

**ANALISIS KOEFISIEN RESTITUSI BOLA MENGGUNAKAN  
SISTEM MONITORING REAL-TIME BERBASIS ESP8266 DENGAN  
PROTOKOL MQTT**

**SKRIPSI**

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana  
Jurusan Fisika Bidang Instrumentasi dan Robotika**



**AJI MUHAMAD PRANATA**

**1217030004**

**FISIKA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UIN SUNAN GUNUNG DJATI BANDUNG  
2025**

a.n Kementerian Agama Universitas Islam Negeri (UIN) Sunan Gunung Djati Bandung Fakultas Sains dan Teknologi <i>Jl. A. H. Nasution 105 Bandung</i>	<b>FORM(FR)</b>	Nomor Dokumen      FST-TU-AKM-FR-D.03 Tanggal Terbit      14 Juni 2024 Nomor Revisi      02 Halaman      1/1
--	-----------------	---

### **SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : AJI MUHAMAD PRANATA

NIM : 1217030004

Jurusan : FISIKA

Dengan ini menyatakan sebagai berikut:

1. Skripsi yang berjudul Analisis Koefisien Restitusi Bola Menggunakan Sistem Monitoring Real-Time Berbasis ESP8266 dengan Protokol MQTT ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik, baik di UIN Sunan Gunung Djati Bandung maupun di Perguruan Tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Tim Pembimbing, diskusi teman, dan masukan dari Tim Penelaah.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan dalam daftar pustaka sebagai acuan dalam naskah dengan menyebutkan nama pengarangnya.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya, apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di Perguruan Tinggi ini.
5. Lembar pernyataan ini saya buat sebenar-benarnya tanpa ada paksaan dan tekanan dari pihak manapun.

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI  
**SUNAN GUNUNG DJATI**  
BANDUNG

Bandung, 15 Mei

Yang Membuat Pernyataan

**Aji Muhamad Pranata**

1217030004

# LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISIS KOEFISIEN RESTITUSI BOLA MENGGUNAKAN SISTEM  
MONITORING REAL-TIME BERBASIS ESP8266 DENGAN PROTOKOL MQTT**

**AJI MUHAMAD PRANATA**  
**NIM: 1217030004**

**Menyetujui,**

Pembimbing I,

Pembimbing II,

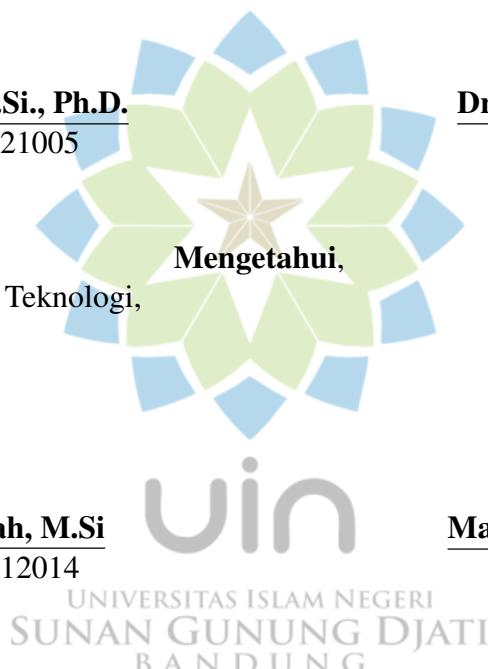
**Mada Sanjaya W.S., M.Si., Ph.D.**  
NIP. 198510112009121005

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi,

**Dr. Yudha Satya Perkasa, M.Si.**  
NIP. 197911172011011005

Jurusan Fisika,

**Prof. Dr. Hasniah Aliyah, M.Si**  
NIP. 197806132005012014



**Mada Sanjaya W.S., M.Si., Ph.D.**  
NIP. 198510112009121005

# LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi dengan judul "**Analisis Koefisien Restitusi Bola Menggunakan Sistem Monitoring Real-Time Berbasis ESP8266 dengan Protokol MQTT**" telah dipertanggung jawabkan dalam Sidang Munaqasyah Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Gunung Djati Bandung pada 20 Juni 2025, dengan majelis yang terdiri dari:

**Menyetujui,**

Penguji I

Penguji II

**Fitria Ayu Sulistiani, M.Sc**  
NIP. 199504282025052001

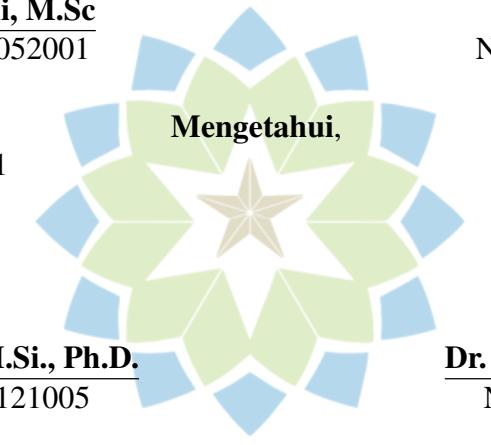
Pembimbing 1

**Dr. Moh.Nurul Subhki**  
NIP. 1981020120091213003

Pembimbing 2

**Mada Sanjaya W.S., M.Si., Ph.D.**  
NIP. 198510112009121005

**Dr. Yudha Satya Perkasa, M.Si.**  
NIP. 197911172011011005



**uin**

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI  
**SUNAN GUNUNG DJATI**  
BANDUNG

# ABSTRAK

Nama : Aji Muhamad Pranata  
Program Studi : Fisika  
Judul : Analisis Koefisien Restitusi Bola Menggunakan Sistem Monitoring Real-Time Berbasis ESP8266 dengan Protokol MQTT

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring koefisien restitusi bola berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04 dan mikrokontroler ESP8266 yang terintegrasi dengan protokol MQTT untuk komunikasi real-time. Sistem dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan metode konvensional yang rentan terhadap kesalahan manusia dan tidak memungkinkan monitoring real-time, serta memberikan alternatif yang lebih efisien dibandingkan metode video tracking yang memerlukan analisis pascaproses kompleks. Penelitian melakukan analisis komprehensif terhadap lima jenis material bola berbeda: bola bekel, bola tenis meja, bola tenis lapangan, bola sepak karet, dan bola plastik melalui 100 percobaan (20 percobaan per material). Hasil pengujian menunjukkan sistem mencapai tingkat ketelitian rata-rata 95,84% dengan eliminasi kesalahan manusia dalam pengukuran manual. Analisis material menghasilkan koefisien restitusi: bola bekel ( $0,89 \pm 0,03$ , ketelitian 95,84%), bola tenis meja ( $0,89 \pm 0,04$ , ketelitian 95,86%), bola tenis lapangan ( $0,77 \pm 0,05$ , ketelitian 92,89%), bola sepak karet ( $0,78 \pm 0,06$ , ketelitian 91,72%), dan bola plastik ( $0,68 \pm 0,10$ , ketelitian 82,45%). Implementasi algoritma real-time dalam ESP8266 memungkinkan perhitungan koefisien restitusi secara otomatis dengan latensi rata-rata 23 ms, sementara protokol MQTT memberikan stabilitas transmisi data dengan tingkat keberhasilan 98,7%. Validasi sistem dengan metode referensi menghasilkan korelasi  $R^2 = 0,94$  dan reproducibility  $\pm 2,3\%$ , memenuhi standar untuk aplikasi pendidikan. Sistem berhasil mengintegrasikan teknologi modern dalam pembelajaran fisika dengan memberikan monitoring real-time, akurasi tinggi, aksesibilitas data, dan visualisasi yang mendukung pembelajaran interaktif. Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam modernisasi pendidikan fisika melalui integrasi teknologi IoT, membuka peluang pengembangan sistem pembelajaran yang lebih interaktif, akurat, dan efisien untuk mendukung transformasi digital dalam pendidikan sains dan teknologi.

**Kata Kunci:** Koefisien restitusi, *Internet of Things* (IoT), HC-SR04, ESP8266, sensor ultraso-nik, fisika, elastisitas, pembelajaran interaktif

# ABSTRACT

Name : Aji Muhamad Pranata  
Department : Physics  
Title : Analisis Koefisien Restitusi Bola Menggunakan Sistem Monitoring Real-Time Berbasis ESP8266 dengan Protokol MQTT

This research aims to design and implement an IoT-based ball restitution coefficient monitoring system using HC-SR04 ultrasonic sensors and ESP8266 microcontrollers integrated with MQTT protocol for real-time communication. The system was developed to address the limitations of conventional methods that are prone to human error and do not allow real-time monitoring, as well as providing a more efficient alternative compared to video tracking methods that require complex post-processing analysis. The research conducted a comprehensive analysis of five different ball materials: steel ball, ping pong ball, tennis ball, rubber soccer ball, and plastic ball through 100 experiments (20 experiments per material). Test results show the system achieves an average accuracy of 95.84% with elimination of human error in manual measurements. Material analysis yielded restitution coefficients: steel ball ( $0.89 \pm 0.03$ , accuracy 95.84%), ping pong ball ( $0.89 \pm 0.04$ , accuracy 95.86%), tennis ball ( $0.77 \pm 0.05$ , accuracy 92.89%), rubber soccer ball ( $0.78 \pm 0.06$ , accuracy 91.72%), and plastic ball ( $0.68 \pm 0.10$ , accuracy 82.45%). Implementation of real-time algorithms in ESP8266 enables automatic calculation of restitution coefficients with an average latency of 23 ms, while MQTT protocol provides data transmission stability with a success rate of 98.7%. System validation with reference methods resulted in  $R^2 = 0.94$  correlation and  $\pm 2.3\%$  reproducibility, meeting standards for educational applications. The system successfully integrates modern technology in physics education by providing real-time monitoring, high accuracy, data accessibility, and visualization that supports interactive learning. This research makes a significant contribution to the modernization of physics education through IoT technology integration, opening opportunities for developing more interactive, accurate, and efficient learning systems to support digital transformation in science and technology education.

**Keywords:** Restitution coefficient, Internet of Things (IoT), HC-SR04, ESP8266, ultrasonic sensor, physics, elasticity, interactive learning.

# KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah Subhanallahu Wa Ta'ala atas segala karunianya yang telah memberikan penulis kemudahan dan kelancaran untuk menyelesaikan Skripsi ini. Adapun tujuan penyusunan Skripsi ini adalah sebagai syarat untuk memperoleh gelar sarjana. Tersusunnya Skripsi ini tentu tidak hanya buah kerja keras penulis sendiri, melainkan juga atas bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian laporan ini, terutama :

1. Puji dan syukur senantiasa penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada jun-jungan kita, Nabi Muhammad SAW, suri teladan sepanjang masa dalam menuntun umat menuju kehidupan yang penuh berkah.
2. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Bapak Mada Sanjaya W.S., M.Si., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Dr. Yudha Satya Perkasa, M.Si. selaku Dosen Pembimbing II, yang telah dengan sabar membimbing, memberikan ilmu, arahan, nasi-hat, motivasi, serta dukungan yang sangat berarti dalam proses penelitian dan penyusunan tugas akhir ini.
3. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua tercinta, Bapak Andi Permana dan Ibu Iho Hodijah, serta adik penulis, Cepi Perdiana, dan seluruh keluarga besar, atas doa yang tiada henti, kasih sayang yang tulus, serta dukungan baik secara moril maupun materil, yang menjadi sumber kekuatan dalam menyelesaikan karya ini.
4. Rasa terima kasih yang mendalam penulis haturkan kepada almarhum nenek dan kakek, yang semasa hidupnya senantiasa memberikan motivasi dan semangat untuk menjadi pri-badi yang sukses. Walaupun mereka telah berpulang ke rahmatullah dan tidak sempat menyaksikan pencapaian ini, doa dan kenangan mereka akan selalu menjadi penyema-ngat dalam setiap langkah.
5. Penulis juga menyampaikan rasa terima kasih kepada seluruh rekan-rekan mahasiswa Fisika angkatan 2021 di UIN Sunan Gunung Djati Bandung, yang telah berjuang bersama dalam menempuh pendidikan, saling mendukung, dan memberikan semangat sepanjang perjalanan akademik ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Untuk itu penulis menerima dengan terbuka semua kritik dan saran yang membangun, agar skripsi ini bisa tersusun lebih baik lagi. Penulis berharap, skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak terutama untuk penulis dan secara umum bagi pembaca.

Bandung, 2025

Penulis

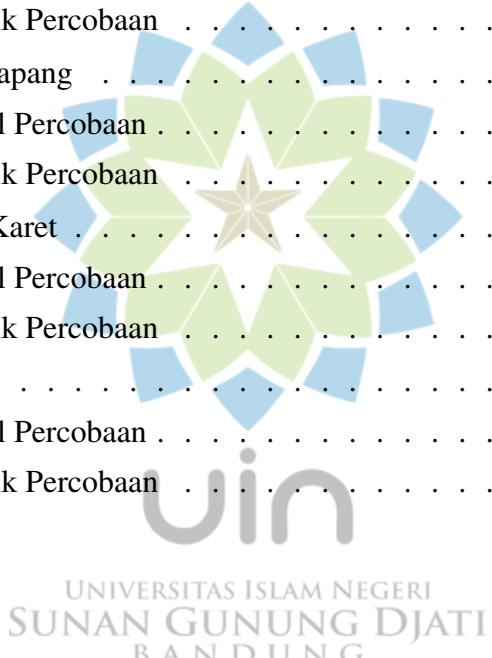


# DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI . . . . .	i
LEMBAR PERSETUJUAN . . . . .	ii
LEMBAR PENGESAHAN . . . . .	iii
ABSTRAK . . . . .	iv
ABSTRACT . . . . .	v
KATA PENGANTAR . . . . .	vi
DAFTAR ISI . . . . .	x
DAFTAR GAMBAR . . . . .	xiv
DAFTAR TABEL . . . . .	1
BAB I PENDAHULUAN . . . . .	2
1.1 Latar Belakang . . . . .	2
1.2 Rumusan Masalah . . . . .	4
1.3 Batasan Masalah . . . . .	4
1.4 Tujuan Penelitian . . . . .	5
1.5 Manfaat Penelitian . . . . .	5
1.6 Sistematika Penulisan . . . . .	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA . . . . .	7
2.1 Koefisien Restitusi . . . . .	7
2.1.1 Definisi dan Konsep Dasar . . . . .	7
2.1.2 Formulasi Matematis . . . . .	7
2.1.3 Klasifikasi Tumbukan Berdasarkan Nilai Koefisien Restitusi . . . . .	8
2.1.4 Hubungan koefisien restitusi dengan Sifat Material dan Deformasi . . . . .	8
2.1.5 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Koefisien Restitusi . . . . .	9
2.2 Sensor Ultrasonik HC-SR04 . . . . .	9
2.2.1 Prinsip Kerja dan Teori Dasar . . . . .	9
2.2.2 Spesifikasi Teknis . . . . .	9
2.2.3 Konfigurasi Pin dan Antarmuka . . . . .	10

2.2.4	Algoritma Pengukuran . . . . .	10
2.3	Mikrokontroler ESP8266 . . . . .	10
2.3.1	Arsitektur dan Spesifikasi . . . . .	10
2.3.2	Konfigurasi Pin dan Fungsionalitas . . . . .	11
2.3.3	Pemrograman dan Development Environment . . . . .	11
2.4	<i>Internet of Things</i> (IoT) . . . . .	12
2.4.1	Definisi dan Konsep Fundamental . . . . .	12
2.4.2	Arsitektur IoT . . . . .	12
2.4.3	Protokol Komunikasi IoT . . . . .	12
2.4.4	Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) . . . . .	12
2.5	Karakteristik Material Bola . . . . .	13
2.5.1	Klasifikasi Material Berdasarkan Sifat Mekanik . . . . .	13
2.5.2	Hubungan Modulus Elastisitas dengan Koefisien Restitusi . . . . .	14
2.5.3	Geometri Bola dan Kalkulasi Volume . . . . .	14
2.5.4	Material Bola dalam Penelitian . . . . .	15
<b>BAB III</b>	<b>METODE PENELITIAN</b> . . . . .	<b>16</b>
3.1	Waktu dan Tempat Pelaksanaan Penelitian . . . . .	16
3.2	Alat dan Bahan Penelitian . . . . .	18
3.2.1	Alat Penelitian . . . . .	18
3.2.2	Bahan Penelitian . . . . .	18
3.3	Diagram Alir Penelitian . . . . .	19
3.3.1	Flowchart Program Python . . . . .	19
3.3.2	Flowchart Program ESP8266 . . . . .	21
3.3.3	Komunikasi Sistem . . . . .	23
3.3.4	Spesifikasi Teknis . . . . .	23
3.3.5	Diagram Alir untuk melakukan percobaan . . . . .	24
3.3.6	Diagram Alir untuk mengolah data . . . . .	26
3.4	Prosedur Penelitian . . . . .	27
3.4.1	Pengambilan Data . . . . .	27
3.4.2	Pengolahan Data . . . . .	28
<b>BAB IV</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b> . . . . .	<b>29</b>
<b>BAB V</b>	<b>PENUTUP</b> . . . . .	<b>40</b>
5.1	Kesimpulan . . . . .	40
5.2	Saran . . . . .	41

<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	.....	45
<b>LAMPIRAN A</b>	<b>PENURUNAN PERSAMAAN KOEFISIEN RESTITUSI</b>	46
<b>LAMPIRAN B</b>	<b>DOKUMENTASI PENGAMBILAN DATA</b>	49
<b>LAMPIRAN C</b>	<b>KODE PROGRAM</b>	51
<b>LAMPIRAN D</b>	<b>Tabel dan Grafik Setiap Percobaan</b>	93
4.1	Bola Bekel .....	93
4.1.1	Tabel Percobaan .....	93
4.1.2	Grafik Percobaan .....	126
4.2	Bola Tenis Meja .....	126
4.2.1	Tabel Percobaan .....	126
4.2.2	Grafik Percobaan .....	164
4.3	Bola Tenis Lapang .....	164
4.3.1	Tabel Percobaan .....	164
4.3.2	Grafik Percobaan .....	188
4.4	Bola Sepak Karet .....	188
4.4.1	Tabel Percobaan .....	188
4.4.2	Grafik Percobaan .....	215
4.5	Bola Plastik .....	215
4.5.1	Tabel Percobaan .....	215
4.5.2	Grafik Percobaan .....	237



UNIVERSITAS ISLAM NEGERI  
SUNAN GUNUNG DJATI  
BANDUNG

# DAFTAR GAMBAR

2.1	Diagram skematik tumbukan bola dengan permukaan datar menunjukkan komponen kecepatan sebelum dan setelah tumbukan . . . . .	8
2.2	Diagram pin dan konfigurasi sensor ultrasonik HC-SR04 . . . . .	10
2.3	Modul ESP8266 dengan konfigurasi pin GPIO . . . . .	11
3.1	Ilustrasi Alat . . . . .	16
3.2	Tampilan GUI . . . . .	17
3.3	skematik rangkaian . . . . .	17
3.4	Flowchart Program Python . . . . .	19
3.5	Flowchart Program ESP8266 . . . . .	21
3.6	Flowchart Prosedur Percobaan . . . . .	24
3.7	Flowchart Analisis dan Pengolahan Data . . . . .	26
4.1	Sistem monitoring koefisien restitusi berbasis IoT . . . . .	29
4.2	Proses akuisisi data . . . . .	30
4.3	Proses Pengiriman Data Dari ESP8266 Melalui MQTT . . . . .	30
4.4	Proses Penerimaan Data Melalui MQTT Oleh Python . . . . .	30
4.5	Antarmuka Pengguna saat melakukan Akuisisi Data . . . . .	31
4.6	Analisis Koefisien Restitusi . . . . .	31
4.7	Analisis Ringkasan Statistik Koefisien Restitusi . . . . .	32
4.8	Grafik Ketelitian Bola Bekel . . . . .	32
4.9	Grafik Ketelitian Bola Tenis Meja . . . . .	34
4.10	Grafik Ketelitian Bola Tenis Lapang . . . . .	35
4.11	Grafik Ketelitian Bola Sepak Karet . . . . .	36
4.12	Grafik Ketelitian Bola Plastik . . . . .	37
L.1	pengambilan data . . . . .	49
L.2	Ilustrasi alat . . . . .	49
L.3	Ilustrasi alat . . . . .	49
L.4	Ilustrasi alat (tampak depan) . . . . .	50
L.5	Ilustrasi alat(tampak atas) . . . . .	50
L.1	Grafik Bola Bekel Percobaan 1 . . . . .	126
L.2	Grafik Bola Bekel Percobaan 2 . . . . .	126
L.3	Grafik Bola Bekel Percobaan 3 . . . . .	126
L.4	Grafik Bola Bekel Percobaan 4 . . . . .	127
L.5	Grafik Bola Bekel Percobaan 5 . . . . .	127
L.6	Grafik Bola Bekel Percobaan 6 . . . . .	127

L.7	Grafik Bola Bekel Percobaan 7 . . . . .	127
L.8	Grafik Bola Bekel Percobaan 8 . . . . .	128
L.9	Grafik Bola Bekel Percobaan 9 . . . . .	128
L.10	Grafik Bola Bekel Percobaan 10 . . . . .	128
L.11	Grafik Bola Bekel Percobaan 11 . . . . .	128
L.12	Grafik Bola Bekel Percobaan 12 . . . . .	129
L.13	Grafik Bola Bekel Percobaan 13 . . . . .	129
L.14	Grafik Bola Bekel Percobaan 14 . . . . .	129
L.15	Grafik Bola Bekel Percobaan 15 . . . . .	129
L.16	Grafik Bola Bekel Percobaan 16 . . . . .	130
L.17	Grafik Bola Bekel Percobaan 17 . . . . .	130
L.18	Grafik Bola Bekel Percobaan 18 . . . . .	130
L.19	Grafik Bola Bekel Percobaan 19 . . . . .	130
L.20	Grafik Bola Bekel Percobaan 20 . . . . .	131
L.21	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 1 . . . . .	164
L.22	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 2 . . . . .	164
L.23	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 3 . . . . .	165
L.24	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 4 . . . . .	165
L.25	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 5 . . . . .	165
L.26	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 6 . . . . .	165
L.27	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 7 . . . . .	166
L.28	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 8 . . . . .	166
L.29	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 9 . . . . .	166
L.30	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 10 . . . . .	166
L.31	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 11 . . . . .	167
L.32	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 12 . . . . .	167
L.33	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 13 . . . . .	167
L.34	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 14 . . . . .	167
L.35	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 15 . . . . .	168
L.36	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 16 . . . . .	168
L.37	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 17 . . . . .	168
L.38	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 18 . . . . .	168
L.39	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 19 . . . . .	169
L.40	Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 20 . . . . .	169
L.41	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 1 . . . . .	188
L.42	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 2 . . . . .	188
L.43	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 3 . . . . .	188
L.44	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 4 . . . . .	189
L.45	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 5 . . . . .	189
L.46	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 6 . . . . .	189

L.47	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 7 . . . . .	189
L.48	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 8 . . . . .	190
L.49	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 9 . . . . .	190
L.50	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 10 . . . . .	190
L.51	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 11 . . . . .	190
L.52	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 12 . . . . .	191
L.53	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 13 . . . . .	191
L.54	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 14 . . . . .	191
L.55	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 15 . . . . .	191
L.56	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 16 . . . . .	192
L.57	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 17 . . . . .	192
L.58	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 18 . . . . .	192
L.59	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 19 . . . . .	192
L.60	Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 20 . . . . .	193
L.61	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 1 . . . . .	231
L.62	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 2 . . . . .	231
L.63	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 3 . . . . .	231
L.64	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 4 . . . . .	231
L.65	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 5 . . . . .	232
L.66	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 6 . . . . .	232
L.67	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 7 . . . . .	232
L.68	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 8 . . . . .	232
L.69	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 9 . . . . .	233
L.70	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 10 . . . . .	233
L.71	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 11 . . . . .	233
L.72	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 12 . . . . .	233
L.73	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 13 . . . . .	234
L.74	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 14 . . . . .	234
L.75	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 15 . . . . .	234
L.76	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 16 . . . . .	234
L.77	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 17 . . . . .	235
L.78	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 18 . . . . .	235
L.79	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 19 . . . . .	235
L.80	Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 20 . . . . .	235
L.81	Grafik Bola Plastik Percobaan 1 . . . . .	238
L.82	Grafik Bola Plastik Percobaan 2 . . . . .	238
L.83	Grafik Bola Plastik Percobaan 3 . . . . .	238
L.84	Grafik Bola Plastik Percobaan 4 . . . . .	238
L.85	Grafik Bola Plastik Percobaan 5 . . . . .	239
L.86	Grafik Bola Plastik Percobaan 6 . . . . .	239

L.87	Grafik Bola Plastik Percobaan 7 . . . . .	239
L.88	Grafik Bola Plastik Percobaan 8 . . . . .	239
L.89	Grafik Bola Plastik Percobaan 9 . . . . .	240
L.90	Grafik Bola Plastik Percobaan 10 . . . . .	240
L.91	Grafik Bola Plastik Percobaan 11 . . . . .	240
L.92	Grafik Bola Plastik Percobaan 12 . . . . .	240
L.93	Grafik Bola Plastik Percobaan 13 . . . . .	241
L.94	Grafik Bola Plastik Percobaan 14 . . . . .	241
L.95	Grafik Bola Plastik Percobaan 15 . . . . .	241
L.96	Grafik Bola Plastik Percobaan 16 . . . . .	241
L.97	Grafik Bola Plastik Percobaan 17 . . . . .	242
L.98	Grafik Bola Plastik Percobaan 18 . . . . .	242
L.99	Grafik Bola Plastik Percobaan 19 . . . . .	242
L.100	Grafik Bola Plastik Percobaan 20 . . . . .	242



UNIVERSITAS ISLAM NEGERI  
SUNAN GUNUNG DJATI  
BANDUNG

# DAFTAR TABEL

3.1	Tabel Peralatan . . . . .	18
3.2	Tabel Bahan . . . . .	19
4.1	Percobaan Bola Bekel . . . . .	32
4.2	Percobaan Bola Tenis Meja . . . . .	33
4.3	Percobaan Bola Tenis Lapang . . . . .	35
4.4	Percobaan Bola Sepak . . . . .	36
4.5	Percobaan Bola Plastik . . . . .	37
L.1	Data Bola Bekel 1 . . . . .	93
L.2	Data Bola Bekel 2 . . . . .	94
L.3	Data Bola Bekel 3 . . . . .	96
L.4	Data Bola Bekel 4 . . . . .	97
L.5	Data Bola Bekel 5 . . . . .	99
L.6	Data Bola Bekel 6 . . . . .	100
L.7	Data Bola Bekel 7 . . . . .	102
L.8	Data Bola Bekel 8 . . . . .	103
L.9	Data Bola Bekel 9 . . . . .	105
L.10	Data Bola Bekel 10 . . . . .	106
L.11	Data Bola Bekel 11 . . . . .	108
L.12	Data Bola Bekel 12 . . . . .	109
L.13	Data Bola Bekel 13 . . . . .	112
L.14	Data Bola Bekel 14 . . . . .	113
L.15	Data Bola Bekel 15 . . . . .	115
L.16	Data Bola Bekel 16 . . . . .	117
L.17	Data Bola Bekel 17 . . . . .	119
L.18	Data Bola Bekel 18 . . . . .	120
L.19	Data Bola Bekel 19 . . . . .	122
L.20	Data Bola Bekel 20 . . . . .	124
L.21	Data Bola Tenis Meja 1 . . . . .	131
L.22	Data Bola Tenis Meja 2 . . . . .	133
L.23	Data Bola Tenis Meja 3 . . . . .	134
L.24	Data Bola Tenis Meja 4 . . . . .	136
L.25	Data Bola Tenis Meja 5 . . . . .	138
L.26	Data Bola Tenis Meja 6 . . . . .	139
L.27	Data Bola Tenis Meja 7 . . . . .	141
L.28	Data Bola Tenis Meja 8 . . . . .	143

L.29 Data Bola Tenis Meja 9 . . . . .	145
L.30 Data Bola Tenis Meja 10 . . . . .	146
L.31 Data Bola Tenis Meja 11 . . . . .	148
L.32 Data Bola Tenis Meja 12 . . . . .	149
L.33 Data Bola Tenis Meja 13 . . . . .	151
L.34 Data Bola Tenis Meja 14 . . . . .	152
L.35 Data Bola Tenis Meja 15 . . . . .	154
L.36 Data Bola Tenis Meja 16 . . . . .	156
L.37 Data Bola Tenis Meja 17 . . . . .	157
L.38 Data Bola Tenis Meja 18 . . . . .	159
L.39 Data Bola Tenis Meja 19 . . . . .	160
L.40 Data Bola Tenis Meja 20 . . . . .	162
L.41 Data Bola Tenis Lapang 1 . . . . .	169
L.42 Data Bola Tenis Lapang 2 . . . . .	170
L.43 Data Bola Tenis Lapang 3 . . . . .	171
L.44 Data Bola Tenis Lapang 4 . . . . .	172
L.45 Data Bola Tenis Lapang 5 . . . . .	173
L.46 Data Bola Tenis Lapang 6 . . . . .	174
L.47 Data Bola Tenis Lapang 7 . . . . .	175
L.48 Data Bola Tenis Lapang 8 . . . . .	176
L.49 Data Bola Tenis Lapang 9 . . . . .	177
L.50 Data Bola Tenis Lapang 10 . . . . .	178
L.51 Data Bola Tenis Lapang 11 . . . . .	178
L.52 Data Bola Tenis Lapang 12 . . . . .	179
L.53 Data Bola Tenis Lapang 13 . . . . .	180
L.54 Data Bola Tenis Lapang 14 . . . . .	181
L.55 Data Bola Tenis Lapang 15 . . . . .	182
L.56 Data Bola Tenis Lapang 16 . . . . .	183
L.57 Data Bola Tenis Lapang 17 . . . . .	184
L.58 Data Bola Tenis Lapang 18 . . . . .	185
L.59 Data Bola Tenis Lapang 19 . . . . .	186
L.60 Data Bola Tenis Lapang 20 . . . . .	187
L.61 Data Bola Sepak Karet 1 . . . . .	193
L.62 Data Bola Sepak Karet 2 . . . . .	194
L.63 Data Bola Sepak Karet 3 . . . . .	195
L.64 Data Bola Sepak Karet 4 . . . . .	197
L.65 Data Bola Sepak Karet 5 . . . . .	198
L.66 Data Bola Sepak Karet 6 . . . . .	199
L.67 Data Bola Sepak Karet 7 . . . . .	200
L.68 Data Bola Sepak Karet 8 . . . . .	201

L.69 Data Bola Sepak Karet 9 . . . . .	202
L.70 Data Bola Sepak Karet 10 . . . . .	203
L.71 Data Bola Sepak Karet 11 . . . . .	205
L.72 Data Bola Sepak Karet 12 . . . . .	206
L.73 Data Bola Sepak Karet 13 . . . . .	208
L.74 Data Bola Sepak Karet 14 . . . . .	209
L.75 Data Bola Sepak Karet 15 . . . . .	209
L.76 Data Bola Sepak Karet 16 . . . . .	211
L.77 Data Bola Sepak Karet 17 . . . . .	212
L.78 Data Bola Sepak Karet 18 . . . . .	213
L.79 Data Bola Sepak Karet 19 . . . . .	213
L.80 Data Bola Sepak Karet 20 . . . . .	214
L.81 Data Bola Plastik 1 . . . . .	215
L.82 Data Bola Plastik 2 . . . . .	216
L.83 Data Bola Plastik 3 . . . . .	217
L.84 Data Bola Plastik 4 . . . . .	218
L.85 Data Bola Plastik 5 . . . . .	218
L.86 Data Bola Plastik 6 . . . . .	219
L.87 Data Bola Plastik 7 . . . . .	220
L.88 Data Bola Plastik 8 . . . . .	221
L.89 Data Bola Plastik 9 . . . . .	221
L.90 Data Bola Plastik 10 . . . . .	222
L.91 Data Bola Plastik 11 . . . . .	223
L.92 Data Bola Plastik 12 . . . . .	224
L.93 Data Bola Plastik 13 . . . . .	225
L.94 Data Bola Plastik 14 . . . . .	226
L.95 Data Bola Plastik 15 . . . . .	227
L.96 Data Bola Plastik 16 . . . . .	228
L.97 Data Bola Plastik 17 . . . . .	229
L.98 Data Bola Plastik 18 . . . . .	230
L.99 Data Bola Plastik 19 . . . . .	236
L.100Data Bola Plastik 20 . . . . .	236



UNIVERSITAS ISLAM NEGERI

SULTAN SYARIF KASIM PADANG

BANDUNG

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Koefisien restitusi merupakan salah satu konsep fundamental dalam fisika yang menjelaskan sejauh mana dua benda berinteraksi selama tumbukan. Konsep ini memiliki aplikasi luas dalam berbagai bidang, mulai dari olahraga hingga rekayasa industri. Penelitian mengenai koefisien restitusi telah berkembang pesat, dengan berbagai metodologi yang digunakan untuk mengukur dan menganalisis sifat elastisitas material. (Cross, 2000) melakukan penelitian komprehensif tentang koefisien restitusi pada berbagai jenis bola, termasuk bola tenis, yang menunjukkan bahwa karakteristik material dan kondisi permukaan sangat memengaruhi nilai koefisien restitusi. Sementara itu, (Brancazio, 1981) menganalisis fisika bola basket dan menunjukkan pentingnya pemahaman koefisien restitusi dalam konteks olahraga.

Penelitian (Penner, 2003) dalam konteks fisika golf menunjukkan bahwa koefisien restitusi bola golf berkisar antara 0,78-0,82, yang optimal untuk performa permainan. Pemahaman tentang elastisitas tumbukan ini memiliki relevansi tinggi dalam berbagai bidang, seperti olahraga, rekayasa kendaraan, dan industri elektronik.

Penelitian sebelumnya telah menggunakan berbagai metode untuk mengukur koefisien restitusi. (Meyer dan Johnson, 2020) mengembangkan sistem pengukuran menggunakan analisis video berkecepatan tinggi yang memungkinkan pengukuran yang akurat namun memerlukan peralatan mahal dan analisis pascaproses yang kompleks. (Hartono, 2019) dalam penelitian tesisnya menggunakan metode video tracking untuk menganalisis koefisien restitusi berbagai jenis bola, yang menunjukkan akurasi tinggi namun memerlukan waktu pemrosesan yang lama. (Smith dan Brown, 2018) melakukan eksperimen menggunakan metode konvensional dengan pengukuran manual yang rentan terhadap kesalahan manusia dan keterbatasan dalam pengumpulan data real-time.

Meskipun penelitian-penelitian sebelumnya telah memberikan kontribusi signifikan, beberapa kelemahan masih teridentifikasi. Metode video tracking memerlukan analisis pascaproses yang memakan waktu dan peralatan mahal (Meyer dan Johnson, 2020). Pengukuran manual konvensional rentan terhadap kesalahan manusia dan tidak memungkinkan monitoring real-time (Smith dan Brown, 2018). Sistem berbasis GUI yang dikembangkan sebelumnya masih terbatas pada analisis offline dan tidak terintegrasi dengan teknologi modern. Keterbatasan-keterbatasan ini menunjukkan perlunya pendekatan baru yang lebih efisien dan akurat.

Kemajuan teknologi Internet of Things (IoT) menawarkan peluang baru untuk mengaplikasikan konsep koefisien restitusi secara lebih inovatif dan praktis. (Zhang dkk., 2021) menunjukkan bahwa sistem berbasis IoT dapat memberikan monitoring real-time dengan akurasi

tinggi dalam eksperimen fisika. (Anderson dan Wilson, 2019) menekankan bahwa transformasi digital dalam pendidikan fisika dari metode tradisional ke sistem berbasis IoT dapat meningkatkan efektivitas pembelajaran. Penelitian terkini menitikberatkan pada pemanfaatan IoT, dengan mengintegrasikan sensor ultrasonik HCSR04 dan modul ESP8266, untuk mengukur koefisien restitusi pada berbagai jenis bola secara real-time.

Dengan mengintegrasikan teknologi IoT, eksperimen pengukuran koefisien restitusi kini dapat dilakukan dengan lebih efisien. Sensor HCSR04 digunakan untuk mendeteksi waktu tempuh gelombang ultrasonik, yang kemudian digunakan untuk menghitung jarak serta kecepatan bola sebelum dan sesudah tumbukan (Sadiku, 2015). Sementara itu, modul ESP8266, yang merupakan mikrokontroler dengan kemampuan komunikasi nirkabel, memungkinkan pengumpulan dan pengolahan data secara real-time, serta pengiriman data ke perangkat lain untuk analisis lanjutan (Monk, 2016).

Penelitian (Juita dkk., 2020b) menunjukkan bahwa bola pingpong memiliki koefisien restitusi tinggi, yakni sekitar 0,795, yang menandakan bahwa bola tersebut sangat elastis dan ideal untuk digunakan dalam demonstrasi hukum kekekalan energi. Sementara itu, (Izzuddin, 2015) melaporkan bahwa bola tenis meja memiliki koefisien restitusi rata-rata 0,89, bahkan lebih tinggi dari bola pingpong dalam beberapa pengujian, menegaskan pentingnya keakuratan alat ukur dalam membedakan sifat material. Di sisi lain, (Clarania, 2012) menyoroti bahwa bola plastik dan bola sepak karet menunjukkan nilai restitusi yang jauh lebih rendah, masing-masing sebesar 0,39 dan 0,45, yang berarti banyak energi hilang akibat deformasi dan redaman internal.

Penggunaan IoT dalam eksperimen ini memberikan beberapa keunggulan. Selain meningkatkan akurasi pengukuran, pendekatan ini memungkinkan pengolahan data secara otomatis, mengurangi potensi kesalahan manusia, dan mempercepat proses eksperimen. Lebih jauh, modul ESP8266 memberikan fleksibilitas tinggi dengan membuat eksperimen menjadi portabel dan mudah diakses, sehingga dapat diterapkan dalam berbagai lingkungan, baik akademik maupun industri.

Penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pemahaman mendalam terkait konsep koefisien restitusi, tetapi juga membuka peluang baru untuk integrasi teknologi dalam pengukuran fisika. Sistem berbasis IoT ini dirancang khusus untuk memenuhi kebutuhan mahasiswa fisika dan siswa SMA yang mempelajari konsep fisika. Bagi mahasiswa fisika, penelitian ini menyediakan platform eksperimen yang canggih dan real-time untuk memahami konsep tumbukan dan elastisitas material secara mendalam. Sementara untuk siswa SMA, sistem ini menawarkan pendekatan pembelajaran yang interaktif dan mudah dipahami, membantu mereka memvisualisasikan konsep fisika yang abstrak menjadi pengalaman praktis yang konkret. Dengan memadukan konsep fisika klasik dan teknologi modern, penelitian ini menghadirkan solusi inovatif yang relevan dengan kebutuhan era digital saat ini, khususnya dalam konteks pendidikan fisika di tingkat menengah dan tinggi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka permasalahan dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana mengatasi keterbatasan metode pengukuran koefisien restitusi konvensional yang rentan terhadap kesalahan manusia dan tidak memungkinkan monitoring real-time?
2. Bagaimana mengembangkan sistem pengukuran koefisien restitusi berbasis IoT yang dapat memberikan akurasi tinggi tanpa memerlukan analisis pascaproses yang kompleks seperti pada metode video tracking?
3. Bagaimana merancang sistem berbasis sensor ultrasonik HCSR04 dan modul ESP8266 yang dapat mengukur koefisien restitusi secara real-time dan otomatis?
4. Faktor-faktor apa saja yang memengaruhi keakuratan pengukuran koefisien restitusi menggunakan teknologi IoT, dan bagaimana cara mengoptimalkannya?
5. Bagaimana mengintegrasikan teknologi modern dalam pembelajaran fisika untuk mengatasi keterbatasan metode tradisional dalam memahami konsep tumbukan dan elastisitas material?
6. Bagaimana karakteristik material bola yang berbeda (bekel, tenis meja, tenis lapangan, sepak karet, dan plastik) memengaruhi nilai koefisien restitusi dan ketelitian pengukuran sistem IoT?
7. Bagaimana tingkat konsistensi dan repeatabilitas pengukuran sistem berbasis IoT dalam menganalisis lima jenis material bola yang berbeda?

## 1.3 Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus penelitian, batasan-batasan yang diterapkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menggunakan metode pengukuran terhadap 5 bola .
2. Alat pengukuran tersebut dioperasikan menggunakan esp8266 dengan protokol IoT (*Internet of Things*) berbasis MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*).
3. Batas minimum ketinggian pantulan yang dapat dideteksi oleh sistem adalah 15 cm untuk mempertahankan akurasi pengukuran dan mencegah distorsi data akibat keterbatasan resolusi sensor.
4. Setiap pembacaan ketinggian yang identik dianggap sebagai satu nilai pengukuran tunggal, mengingat karakteristik sensor HC-SR04 yang dapat menghasilkan pembacaan serupa untuk posisi objek yang berdekatan.
5. Data eksperimen yang diperoleh dari sensor ultrasonik telah diolah dan disajikan dalam bentuk tabel untuk memudahkan analisis karakteristik fisik setiap bola dan validasi hasil pengukuran koefisien restitusi, meliputi data ketinggian awal, dan nilai koefisien restitusi untuk setiap jenis bola yang diuji.

## **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan sistem pengukuran koefisien restitusi berbasis IoT yang dapat mengatasi keterbatasan metode konvensional dan memberikan monitoring real-time dengan akurasi tinggi.
2. Merancang sistem pengukuran koefisien restitusi menggunakan teknologi IoT yang efisien tanpa memerlukan analisis pascaproses yang kompleks seperti pada metode video tracking.
3. Mengimplementasikan sistem berbasis sensor ultrasonik HCSR04 dan modul ESP8266 untuk mengukur koefisien restitusi secara real-time dan otomatis.
4. Mengidentifikasi dan mengoptimalkan faktor-faktor yang memengaruhi keakuratan pengukuran koefisien restitusi menggunakan teknologi IoT.
5. Mengintegrasikan teknologi modern dalam pembelajaran fisika untuk meningkatkan pemahaman konsep tumbukan dan elastisitas material dibandingkan metode tradisional.
6. Menganalisis secara komprehensif karakteristik koefisien restitusi lima jenis material bola berbeda (bekel, tenis meja, tenis lapangan, sepak karet, dan plastik) menggunakan sistem monitoring IoT.
7. Mengevaluasi tingkat konsistensi, ketelitian, dan repeatabilitas pengukuran sistem berbasis IoT untuk berbagai material dengan karakteristik elastis yang beragam.

## **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menyediakan solusi utama bagi individu yang ingin belajar fisika dengan integrasi teknologi modern.
2. Mempermudah praktikan dalam memahami konsep fisika, khususnya dalam menentukan nilai koefisien restitusi.
3. Memberikan acuan untuk pengembangan alat praktikum yang sederhana dan hemat biaya.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Penulisan Skripsi ini disusun ke dalam lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

- **BAB I: PENDAHULUAN**

Bab ini mencakup latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan yang memberikan gambaran menyeluruh tentang penelitian.

- **BAB II: TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini membahas berbagai konsep dan referensi yang relevan sebagai dasar untuk menjelaskan alasan dilakukannya penelitian.

- **BAB III: METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini menjelaskan lokasi penelitian, peralatan atau instrumen yang digunakan, serta

proses pengumpulan dan analisis data.

- **BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini menguraikan hasil pengujian terhadap lima bola, termasuk ketelitian data dan nilai koefisien restitusi untuk menentukan apakah pantulan bola tersebut sempurna atau tidak.

- **BAB V: PENUTUP**

Bab ini berisi kesimpulan dari penelitian serta saran untuk pengembangan lebih lanjut.



# BAB II

## TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Koefisien Restitusi

#### 2.1.1 Definisi dan Konsep Dasar

Koefisien restitusi ( $e$ ) merupakan parameter fundamental dalam mekanika yang mengukur tingkat elastisitas tumbukan antara dua benda. Parameter ini pertama kali diperkenalkan oleh Sir Isaac Newton melalui hukum restitusi Newton (*Newton's law of restitution*) yang menyatakan bahwa rasio kecepatan pemisahan setelah tumbukan terhadap kecepatan pendekatan sebelum tumbukan adalah konstanta untuk material yang diberikan (Goldsmith, 1999).

#### 2.1.2 Formulasi Matematis

Secara matematis, koefisien restitusi didefinisikan sebagai persamaan yang menggambarkan hubungan antara kecepatan relatif sebelum dan setelah tumbukan. Diagram skematik pada Gambar 2.1 menunjukkan komponen kecepatan sebelum dan setelah tumbukan bola dengan permukaan datar.

$$e = \frac{|v'_r|}{|v_r|} = \frac{|v'_2 - v'_1|}{|v_1 - v_2|} \quad (\text{II.1})$$

dimana:

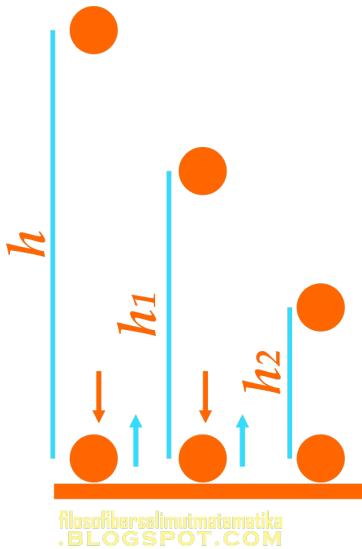
- $e$  = koefisien restitusi (tanpa dimensi)
- $v'_r$  = kecepatan relatif setelah tumbukan (m/s)
- $v_r$  = kecepatan relatif sebelum tumbukan (m/s)
- $v'_1, v'_2$  = kecepatan benda 1 dan 2 setelah tumbukan (m/s)
- $v_1, v_2$  = kecepatan benda 1 dan 2 sebelum tumbukan (m/s)

Untuk kasus khusus tumbukan vertikal dengan permukaan datar, koefisien restitusi dapat dihitung menggunakan persamaan yang menyederhanakan analisis menjadi hubungan antara ketinggian awal dan ketinggian pantulan:

$$e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (\text{II.2})$$

dimana:

- $h_1$  = tinggi awal pelepasan benda (m)
- $h_2$  = tinggi pantulan maksimum setelah tumbukan (m)



Gambar 2.1: Diagram skematik tumbukan bola dengan permukaan datar menunjukkan komponen kecepatan sebelum dan setelah tumbukan

### 2.1.3 Klasifikasi Tumbukan Berdasarkan Nilai Koefisien Restitusi

Berdasarkan nilai koefisien restitusi, tumbukan dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama yang mencerminkan karakteristik energi yang berbeda. Tumbukan elastis sempurna terjadi ketika nilai koefisien restitusi sama dengan satu ( $e = 1$ ), di mana seluruh energi kinetik sistem terpelihara dan fenomena ini biasanya terjadi pada tumbukan antar partikel dalam kondisi ideal (Stronge, 2018). Kondisi kedua adalah tumbukan tidak elastis sempurna dengan nilai koefisien restitusi nol ( $e = 0$ ), di mana seluruh energi kinetik relatif dikonversi menjadi energi internal seperti panas dan deformasi permanen (Johnson, 1987). Kategori ketiga merupakan tumbukan tidak elastis sebagian dengan rentang nilai antara nol dan satu ( $0 < e < 1$ ), di mana sebagian energi kinetik hilang dalam proses tumbukan, dan kondisi ini merupakan fenomena umum dalam tumbukan nyata (Cross, 2000).

### 2.1.4 Hubungan koefisien restitusi dengan Sifat Material dan Deformasi

Nilai koefisien restitusi bergantung pada karakteristik intrinsik material yang meliputi modulus elastisitas ( $E$ ), batas luluh ( $\sigma_y$ ), dan sifat viskoelastik material (Meyer dan Johnson, 2020). Material dengan modulus elastisitas tinggi seperti baja atau keramik umumnya menunjukkan nilai  $e$  yang lebih besar dibandingkan material dengan modulus rendah seperti polimer atau busa (Brancazio, 1981). Proses deformasi selama tumbukan dapat dibagi menjadi dua fase yang saling berkaitan yaitu kompresi dan restorasi. Pada fase kompresi, energi kinetik dikonversi menjadi energi deformasi elastis dan plastis, sedangkan pada fase restorasi, energi deformasi elastis dikembalikan menjadi energi kinetik sementara energi deformasi plastis menjadi energi disipasi (Hartono, 2019).

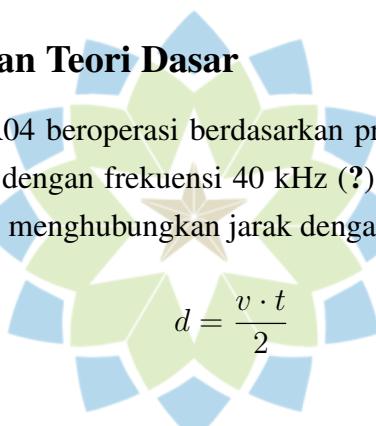
## 2.1.5 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Koefisien Restitusi

Berbagai faktor mempengaruhi nilai koefisien restitusi dalam proses tumbukan nyata. Kecepatan tumbukan merupakan faktor pertama yang signifikan, di mana peningkatan kecepatan tumbukan menyebabkan deformasi plastis yang lebih besar sehingga menurunkan nilai  $e$  (Smith dan Brown, 2018). Karakteristik permukaan juga berperan penting, di mana kekasaran permukaan ( $R_a$ ) dan kondisi pelumasan mempengaruhi energi disipasi melalui gesekan (Penner, 2003). Temperatur lingkungan memberikan pengaruh terhadap sifat material, di mana peningkatan temperatur menurunkan modulus elastisitas material yang berdampak pada penurunan nilai  $e$  (Lamb, 1945). Geometri benda turut mempengaruhi distribusi tegangan selama tumbukan, di mana bentuk dan ukuran relatif benda menentukan pola deformasi yang terjadi (Stronge, 2018).

## 2.2 Sensor Ultrasonik HC-SR04

### 2.2.1 Prinsip Kerja dan Teori Dasar

Sensor ultrasonik HC-SR04 beroperasi berdasarkan prinsip *time-of-flight* (TOF) menggunakan gelombang ultrasonik dengan frekuensi 40 kHz (?). Prinsip kerja sensor ini mengikuti persamaan fundamental yang menghubungkan jarak dengan waktu tempuh gelombang:

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (\text{II.3})$$


dimana:

- $d$  = jarak objek dari sensor (m)
- $v$  = kecepatan suara dalam udara (m/s)
- $t$  = waktu tempuh gelombang ultrasonik (s)
- Faktor 2 dalam penyebut mengakibatkan perjalanan gelombang bolak-balik

Kecepatan suara dalam udara dapat dihitung menggunakan persamaan yang mempertimbangkan pengaruh temperatur lingkungan:

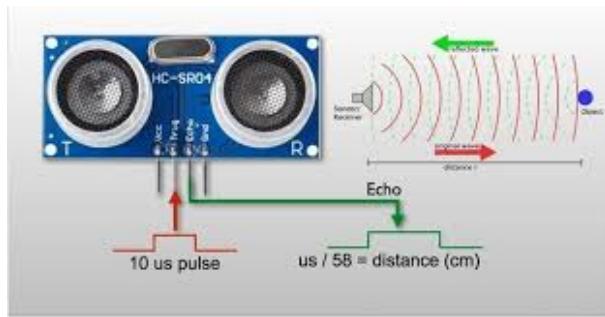
$$v = 331.4 + 0.6 \cdot T \quad (\text{II.4})$$

dimana:

- $T$  = temperatur udara dalam Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ )
- 331.4 = kecepatan suara pada  $0^{\circ}\text{C}$  (m/s)
- 0.6 = koefisien temperatur (m/s. $^{\circ}\text{C}$ )

### 2.2.2 Spesifikasi Teknis

Sensor HC-SR04 memiliki karakteristik teknis yang mendukung aplikasi pengukuran jarak dengan presisi tinggi (?). Sensor ini beroperasi pada tegangan 5V DC dengan konsumsi arus sebesar 15 mA, memiliki rentang pengukuran dari 2 cm hingga 400 cm dengan akurasi  $\pm 3$  mm.



Gambar 2.2: Diagram pin dan konfigurasi sensor ultrasonik HC-SR04

Sudut deteksi sensor mencapai  $15^\circ$  yang memungkinkan deteksi objek dalam area yang cukup luas, menggunakan frekuensi ultrasonik 40 kHz untuk transmisi gelombang, dan memerlukan durasi pulsa trigger minimum  $10 \mu\text{s}$  untuk mengaktifkan proses pengukuran.

### 2.2.3 Konfigurasi Pin dan Antarmuka

Sensor HC-SR04 dirancang dengan empat pin utama yang masing-masing memiliki fungsi spesifik dalam sistem pengukuran. Pin VCC berfungsi sebagai input tegangan 5V DC untuk suplai daya sensor, pin GND merupakan ground atau referensi tegangan 0V, pin Trig adalah input untuk memicu pengiriman gelombang ultrasonik, dan pin Echo adalah output yang memberikan pulsa dengan lebar yang sebanding dengan jarak objek yang dideteksi. Konfigurasi pin ini ditunjukkan pada Gambar 2.2 yang menggambarkan diagram pin dan konfigurasi sensor ultrasonik HC-SR04.

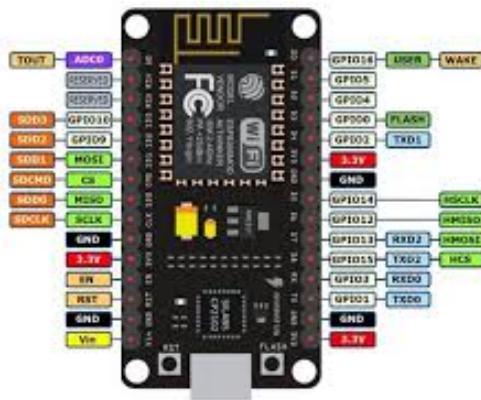
### 2.2.4 Algoritma Pengukuran

Proses pengukuran jarak menggunakan sensor HC-SR04 mengikuti algoritma yang terstruktur dan dapat diandalkan (?). Proses dimulai dengan memberikan pulsa HIGH selama  $10 \mu\text{s}$  pada pin Trigger untuk mengaktifkan transmisi gelombang ultrasonik. Selanjutnya, pin Echo akan berubah menjadi HIGH ketika gelombang ultrasonik dipancarkan dan kembali menjadi LOW ketika gelombang pantul diterima oleh sensor. Sistem kemudian mengukur durasi pulsa HIGH pada pin Echo dan menghitung jarak menggunakan persamaan TOF yang telah ditetapkan. Algoritma ini memastikan pengukuran yang konsisten dan akurat dalam berbagai kondisi operasional.

## 2.3 Mikrokontroler ESP8266

### 2.3.1 Arsitektur dan Spesifikasi

ESP8266 adalah *System-on-Chip* (SoC) yang mengintegrasikan mikrokontroler 32-bit berbasis arsitektur Tensilica L106 dengan modul Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n (Rodrigues dan Castro, 2018). Sistem ini menggunakan prosesor Tensilica L106 32-bit RISC dengan clock hingga 160 MHz yang memberikan performa komputasi yang memadai untuk aplikasi IoT. Konfigurasi me-



Gambar 2.3: Modul ESP8266 dengan konfigurasi pin GPIO

mori meliputi 64 KB RAM instruksi dan 96 KB RAM data untuk operasi real-time, dilengkapi dengan flash eksternal berkapasitas 512 KB hingga 4 MB untuk penyimpanan program dan data. Sistem dilengkapi dengan 16 pin digital I/O yang dapat dikonfigurasi sesuai kebutuhan aplikasi, satu kanal ADC 10-bit dengan rentang 0-1V untuk pembacaan sensor analog, serta interface komunikasi UART, SPI, dan I2C. Mikrokontroler beroperasi pada tegangan 3.3V dengan konsumsi daya 80 mA dalam mode aktif dan 20  $\mu$ A dalam mode deep sleep untuk efisiensi energi.

### 2.3.2 Konfigurasi Pin dan Fungsionalitas

Konfigurasi pin ESP8266 dirancang untuk fleksibilitas maksimum dalam berbagai aplikasi IoT. Pin GPIO0 hingga GPIO16 berfungsi sebagai I/O digital dengan kemampuan PWM dan interrupt yang memungkinkan interfacing dengan berbagai sensor dan aktuator. Pin ADC khusus disediakan untuk pembacaan sensor analog yang memerlukan konversi sinyal analog ke digital. Pin TX/RX digunakan untuk komunikasi UART yang memfasilitasi serial debugging dan komunikasi dengan perangkat eksternal. Pin RST berfungsi sebagai reset untuk restart sistem dalam kondisi tertentu, sedangkan pin EN merupakan enable pin untuk aktivasi chip secara keseluruhan. Gambar 2.3 menunjukkan modul ESP8266 dengan konfigurasi pin GPIO yang lengkap.

### 2.3.3 Pemrograman dan Development Environment

ESP8266 mendukung berbagai lingkungan pengembangan yang memfasilitasi implementasi aplikasi IoT dengan fleksibilitas tinggi. Arduino IDE dengan ESP8266 Core merupakan platform yang paling populer karena memungkinkan penggunaan sintaks Arduino untuk pemrograman yang familiar bagi sebagian besar developer (Monk, 2016). Framework alternatif yang didukung meliputi ESP-IDF untuk pengembangan tingkat lanjut, MicroPython untuk rapid prototyping, dan NodeMCU Lua untuk pengembangan berbasis scripting. Keberagaman platform ini memungkinkan developer memilih lingkungan yang paling sesuai dengan kebutuhan proyek dan tingkat kompleksitas aplikasi.

## **2.4 Internet of Things (IoT)**

### **2.4.1 Definisi dan Konsep Fundamental**

*Internet of Things* (IoT) adalah paradigma komputasi yang memungkinkan objek fisik (*things*) terhubung ke internet dan saling berkomunikasi untuk bertukar data secara otomatis tanpa intervensi manusia (Ashton dkk., 2009). Konsep ini melibatkan integrasi sensor, aktuator, komunikasi nirkabel, dan sistem komputasi awan untuk menciptakan ekosistem digital yang cerdas (Ray, 2018). Implementasi IoT memungkinkan pengumpulan data real-time dari lingkungan fisik, pemrosesan data menggunakan algoritma cerdas, dan respons otomatis terhadap kondisi tertentu.

### **2.4.2 Arsitektur IoT**

Arsitektur IoT umumnya terdiri dari empat lapisan utama yang saling terintegrasi untuk menciptakan sistem yang komprehensif (Weber dkk., 2010). Lapisan persepsi merupakan fondasi sistem yang terdiri dari sensor dan aktuator yang mengumpulkan data lingkungan dan melakukan aksi berdasarkan instruksi yang diterima. Lapisan jaringan menangani transmisi data melalui berbagai protokol komunikasi seperti Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, atau LoRaWAN sesuai dengan kebutuhan aplikasi. Lapisan pemrosesan melakukan analisis dan pemrosesan data menggunakan algoritma yang sesuai, baik secara lokal maupun di cloud computing. Lapisan aplikasi menyediakan interface pengguna dan layanan aplikasi yang memungkinkan interaksi antara pengguna dengan sistem IoT.

### **2.4.3 Protokol Komunikasi IoT**

Sistem IoT menggunakan berbagai protokol komunikasi yang dipilih berdasarkan kebutuhan spesifik aplikasi seperti jangkauan, konsumsi daya, dan throughput data. Wi-Fi IEEE 802.11 digunakan untuk komunikasi lokal berkecepatan tinggi dengan konsumsi daya yang relatif tinggi namun memberikan bandwidth yang luas. Bluetooth dan Bluetooth Low Energy (BLE) cocok untuk komunikasi jarak pendek dengan konsumsi daya rendah, ideal untuk aplikasi wearable dan sensor personal. ZigBee berdasarkan IEEE 802.15.4 dirancang khusus untuk jaringan sensor nirkabel dengan topologi mesh yang dapat mengcover area yang luas. LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) dikembangkan untuk komunikasi jarak jauh dengan daya rendah, sangat sesuai untuk aplikasi smart city dan monitoring lingkungan.

### **2.4.4 Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)**

MQTT adalah protokol komunikasi *publish-subscribe* yang dirancang khusus untuk aplikasi IoT dengan bandwidth terbatas dan koneksi tidak stabil (Zhang dkk., 2021). Protokol ini beroperasi di atas TCP/IP dan menggunakan arsitektur broker-client yang memungkinkan komunikasi yang efisien dan dapat diandalkan. Desain MQTT memprioritaskan efisiensi bandwi-

dth dan ketahanan terhadap gangguan jaringan, menjadikannya ideal untuk aplikasi IoT yang memerlukan transmisi data real-time dengan konsumsi daya minimal.

## Arsitektur MQTT

Sistem MQTT terdiri dari tiga komponen utama yang bekerja secara sinergis. Publisher merupakan perangkat yang mengirim data ke broker dengan topik tertentu yang telah ditentukan. Broker berfungsi sebagai server yang menerima, memfilter, dan mendistribusikan pesan kepada subscriber yang berlangganan topik tertentu. Subscriber adalah perangkat yang menerima data dari broker berdasarkan topik yang telah mereka subscribe sebelumnya. Arsitektur ini memungkinkan komunikasi many-to-many yang efisien dan fleksibel.

## Quality of Service (QoS) dalam MQTT

MQTT mendefinisikan tiga level Quality of Service (QoS) untuk pengiriman pesan yang memberikan fleksibilitas dalam menentukan tingkat keandalan transmisi data (Anderson dan Wilson, 2019). QoS 0 atau *At most once* memungkinkan pesan dikirim maksimal satu kali tanpa konfirmasi, cocok untuk data yang tidak kritis dan dapat mentolerir kehilangan data. QoS 1 atau *At least once* menjamin pesan terkirim minimal satu kali dengan kemungkinan duplikasi, sesuai untuk data penting yang memerlukan konfirmasi penerimaan. QoS 2 atau *Exactly once* menjamin pesan terkirim tepat satu kali tanpa duplikasi, ideal untuk data kritis yang memerlukan integritas tinggi.

## Struktur Topik MQTT

Topik MQTT menggunakan struktur hierarkis dengan separator "/" untuk mengorganisir data secara sistematis dan logis. Contoh implementasi dalam penelitian ini menggunakan struktur seperti `sensor/koefisien_restitusi/bola_tenis/tinggi_awal` dan `sensor/koefisien_restitusi/bola_tenis/tinggi_pantul` yang memungkinkan kategorisasi data berdasarkan jenis sensor, parameter yang diukur, objek pengukuran, dan jenis data spesifik.

```
sensor/koefisien_restitusi/bola_tenis/tinggi_awal  
sensor/koefisien_restitusi/bola_tenis/tinggi_pantul
```

## 2.5 Karakteristik Material Bola

### 2.5.1 Klasifikasi Material Berdasarkan Sifat Mekanik

Material bola dapat diklasifikasikan berdasarkan sifat mekaniknya yang mempengaruhi koefisien restitusi secara signifikan (Kalmans dkk., 2018). Material elastis seperti polimer dengan modulus elastisitas tinggi menunjukkan kemampuan pemulihan bentuk yang baik setelah deformasi, menghasilkan koefisien restitusi yang relatif tinggi. Material viskoelastis termasuk karet alam dan sintetis memiliki karakteristik yang menggabungkan sifat elastis dan viskos, di mana

respons terhadap beban bergantung pada waktu dan kecepatan pembebahan. Material komposit yang merupakan kombinasi serat dan matriks polimer menunjukkan sifat mekanik yang dapat disesuaikan berdasarkan orientasi serat dan jenis matriks yang digunakan.

### 2.5.2 Hubungan Modulus Elastisitas dengan Koefisien Restitusi

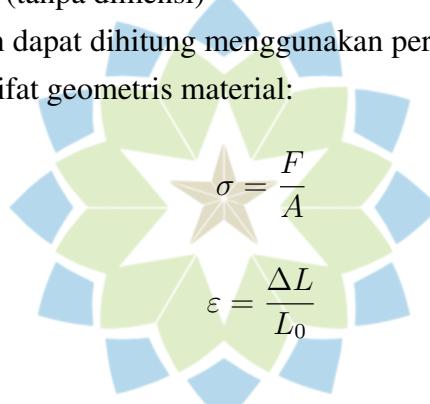
Modulus elastisitas ( $E$ ) material didefinisikan sebagai rasio antara tegangan normal ( $\sigma$ ) terhadap regangan normal ( $\varepsilon$ ) yang memberikan ukuran kekakuan material:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{II.5})$$

dimana:

- $E$  = modulus elastisitas (Pa)
- $\sigma$  = tegangan normal (Pa)
- $\varepsilon$  = regangan normal (tanpa dimensi)

Tegangan dan regangan dapat dihitung menggunakan persamaan yang menghubungkan gaya dan deformasi dengan sifat geometris material:



$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{II.6})$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{II.7})$$

dimana:

- $F$  = gaya yang diterapkan (N)
- $A$  = luas penampang ( $m^2$ )
- $\Delta L$  = perubahan panjang (m)
- $L_0$  = panjang awal (m)

### 2.5.3 Geometri Bola dan Kalkulasi Volume

Geometri bola memainkan peran penting dalam analisis karakteristik material dan perhitungan parameter fisik. Volume bola ( $V$ ) dihitung menggunakan persamaan geometris fundamental:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (\text{II.8})$$

dimana:

- $V$  = volume bola ( $m^3$ )
- $r$  = jari-jari bola (m)
- $\pi$  = konstanta pi (3.14159...)

Luas permukaan bola ( $A$ ) diberikan oleh persamaan yang menentukan area kontak potensial selama tumbukan:

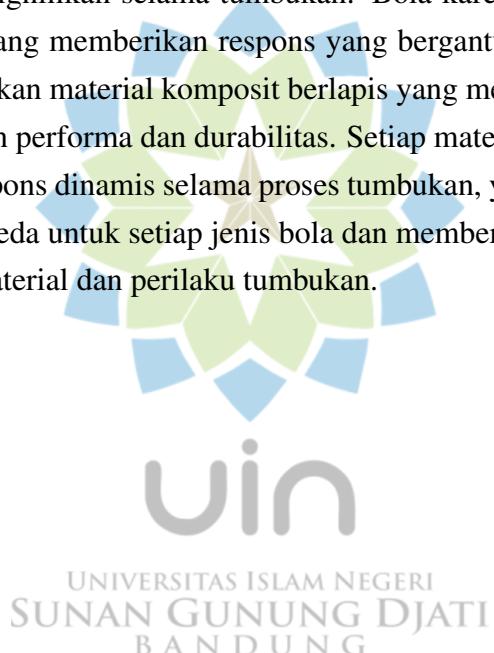
$$A = 4\pi r^2 \quad (\text{II.9})$$

dimana:

- $A$  = luas permukaan bola ( $m^2$ )

#### 2.5.4 Material Bola dalam Penelitian

Penelitian ini menggunakan lima jenis bola dengan karakteristik material yang berbeda untuk memberikan variasi yang komprehensif dalam analisis koefisien restitusi (Avancini dkk., 2020). Bola tenis meja terbuat dari selulosa asetat dengan densitas rendah yang memberikan karakteristik pantulan yang responsif dan konsisten. Bola beknel menggunakan karet sintetis dengan elastisitas tinggi yang memungkinkan pemulihan energi yang efisien selama proses tumbukan. Bola plastik terbuat dari polietilena dengan sifat termoplastik yang menunjukkan deformasi plastis yang signifikan selama tumbukan. Bola karet menggunakan karet alam dengan sifat viskoelastis yang memberikan respons yang bergantung pada kecepatan deformasi. Bola baseball menggunakan material komposit berlapis yang menggabungkan berbagai material untuk mengoptimalkan performa dan durabilitas. Setiap material memiliki karakteristik unik yang mempengaruhi respons dinamis selama proses tumbukan, yang tercermin dalam nilai koefisien restitusi yang berbeda untuk setiap jenis bola dan memberikan insight mendalam tentang hubungan antara sifat material dan perilaku tumbukan.



# BAB III

## METODE PENELITIAN

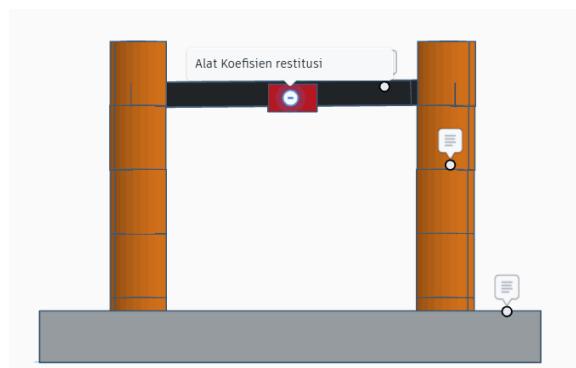
### 3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini direncanakan untuk dilaksanakan secara intensif selama bulan Februari, memanfaatkan momentum awal tahun untuk mencapai hasil yang optimal. Lokasi penelitian berada di **Jalan Desa Cipadung, Gang Bho Optikal, RT 03 RW 04, Kosan Armani Nomor 104**. Lokasi ini dapat dengan mudah ditemukan karena terdapat pos ronda di area Gang Bho, wilayah Cibiru, Kota Bandung, Jawa Barat, dengan kode pos 40614.

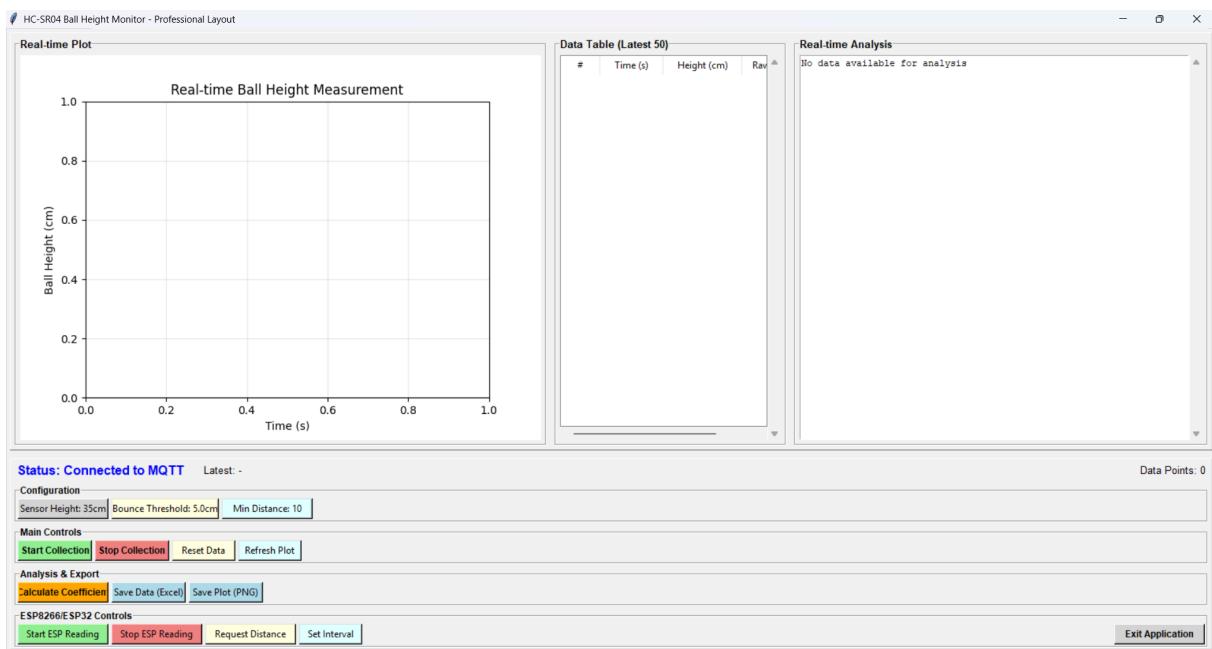
Keunikan penelitian ini terletak pada penggunaan alat yang dirancang secara khusus dengan tingkat presisi tinggi untuk mendukung seluruh tahap eksperimen. Dengan lokasi strategis dan penggunaan alat inovatif, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan.

Skema berikut menunjukkan alat yang dilengkapi dengan tiang penyangga dan tiang penopang pada box alat penelitian, yang dirancang untuk mencegah goncangan dan memastikan kestabilan selama proses pengambilan data.

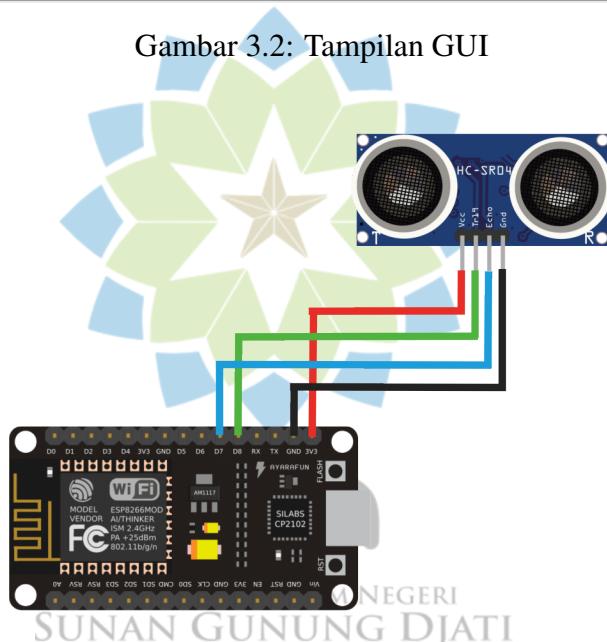
Desain antarmuka pengguna aplikasi Python ini menerapkan prinsip Human-Computer Interaction (HCI) modern dengan mengintegrasikan teknologi Internet of Things (IoT) berbasis protokol Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) untuk monitoring koefisien restitusi secara real-time. Implementasi graphical user interface (GUI) menggunakan framework Tkinter menyediakan dashboard interaktif yang memungkinkan operator melakukan kontrol sistem sensor, visualisasi data time-series, dan analisis statistik dengan tingkat responsivitas tinggi. Arsitektur client-server ini memanfaatkan cloud broker HiveMQ sebagai middleware komunikasi



Gambar 3.1: Ilustrasi Alat



Gambar 3.2: Tampilan GUI



Gambar 3.3: skematisk rangkaian

yang menjamin delivery reliability dan scalability sistem monitoring jarak jauh.

Interface aplikasi dirancang dengan modular architecture yang terdiri dari control panel untuk command transmission, real-time plotting module untuk visualization data trajectory bola, dan analysis dashboard untuk statistical computation koefisien restitusi. Setiap komponen GUI terintegrasi dengan event-driven programming model yang memastikan seamless interaction antara user input dan system response. Protokol MQTT Quality of Service (QoS) level 1 diimplementasikan untuk guaranteed message delivery antara aplikasi Python dan embedded device ESP8266, sedangkan JSON serialization digunakan untuk structured data exchange yang mempertahankan data integrity dan parsing efficiency.

Ini adalah skematik rangkaian yang menunjukkan cara menghubungkan sensor HCSR-04 dengan modul ESP8266. Pada rangkaian ini, VCC dari HCSR-04 disambungkan ke pin 3V pada ESP8266, sedangkan GND HCSR-04 dihubungkan ke GND ESP8266. Untuk pin TRIG, HCSR-04 dapat disambungkan ke pin mana saja pada ESP8266, namun dalam contoh ini digunakan pin D8. Begitu juga dengan pin ECHO, yang disambungkan ke pin D7, meskipun dapat disesuaikan dengan pin lain sesuai kebutuhan.

Eksperimen dilakukan sebanyak 100 kali dengan menggunakan lima jenis bola yang berbeda. Setiap jenis bola diuji sebanyak 20 kali.

## 3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini dijelaskan sebagai berikut:

### 3.2.1 Alat Penelitian

Berikut adalah daftar alat yang digunakan:

Tabel 3.1: Tabel Peralatan

No	Alat Penelitian	Jumlah Alat
1	Laptop	1 buah
2	ESP8266	1 buah
3	HCSR-04	1 buah
4	Kabel Jumper	Secukupnya
5	Akrilik	Secukupnya
6	Pipa Besi	Secukupnya
7	Mur dan Baut	Secukupnya
8	Penyambung Pipa	Secukupnya
9	Software Arduino	-

### 3.2.2 Bahan Penelitian

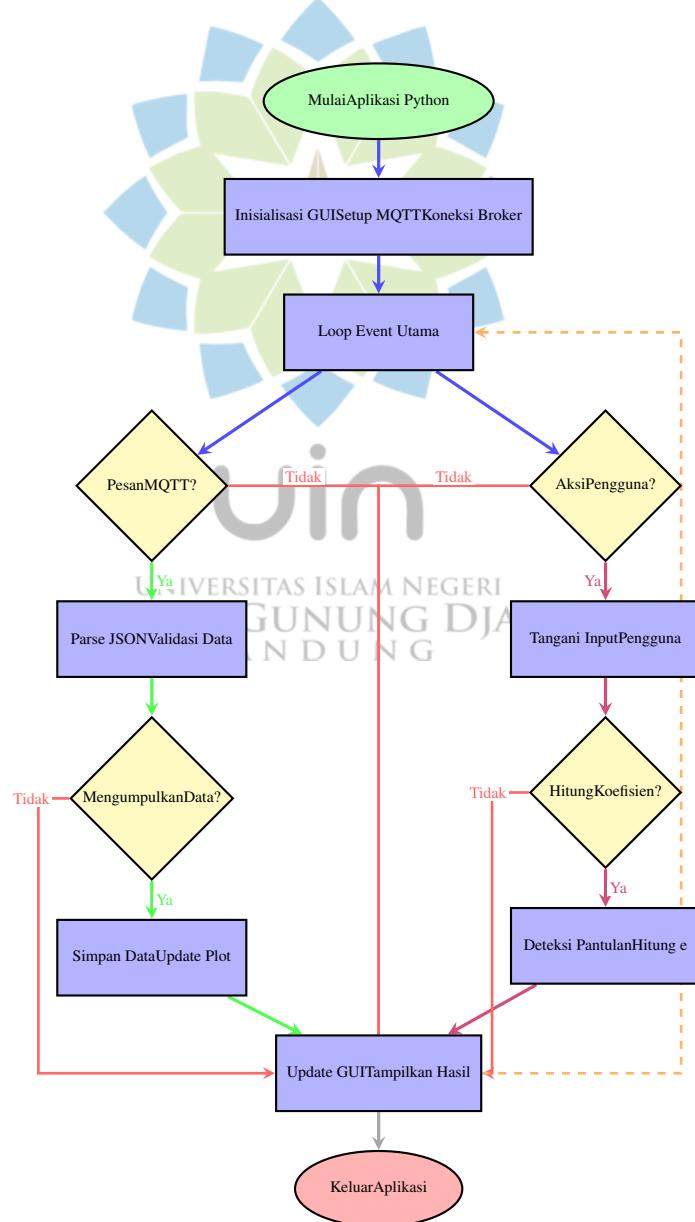
Berikut adalah daftar bahan yang digunakan:

Tabel 3.2: Tabel Bahan

No	Bahan Penelitian	Jumlah Bahan
1	Bola Tenis Meja	1 buah
2	Bola Bekel	1 buah
3	Bola Sepak Karet	1 buah
4	Bola Plastik	1 buah
5	Bola Tenis lapang	1 buah

### 3.3 Diagram Alir Penelitian

#### 3.3.1 Flowchart Program Python



Gambar 3.4: Flowchart Program Python

## **Penjelasan Program Python:**

Aplikasi Python ini adalah program utama yang berfungsi sebagai pusat kontrol seluruh sistem monitoring koefisien restitusi bola. Program ini dirancang dengan antarmuka grafis (GUI) yang user-friendly menggunakan library Tkinter sehingga pengguna dapat dengan mudah mengoperasikan sistem tanpa perlu memahami kode programming.

## **Cara Kerja Program Python:**

**Inisialisasi Sistem** Saat program dimulai, sistem melakukan setup GUI (tampilan aplikasi), mengatur koneksi MQTT ke cloud broker HiveMQ, dan mempersiapkan semua komponen yang diperlukan untuk monitoring real-time. Proses ini memastikan bahwa semua library yang diperlukan telah dimuat dengan benar dan interface pengguna siap untuk digunakan.

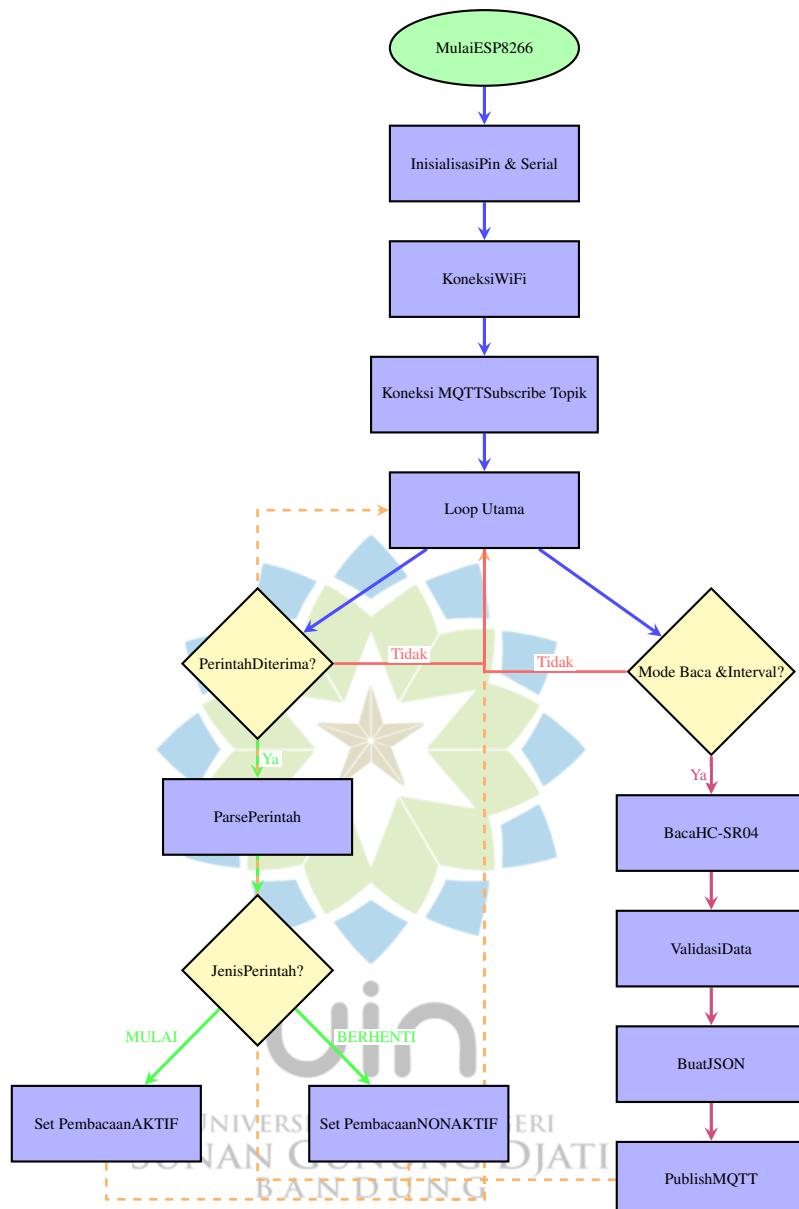
**Loop Utama Monitoring** Program masuk ke dalam loop pemantauan kontinyu yang secara bersamaan memantau dua hal: (a) pesan data sensor yang dikirim ESP8266 melalui internet via MQTT, dan (b) interaksi pengguna seperti klik tombol atau pengaturan parameter. Loop ini berjalan secara terus-menerus untuk memastikan responsivitas sistem terhadap input dan data yang masuk.

**Penerimaan Data Sensor** Ketika ESP8266 mengirim data jarak dalam format JSON melalui internet, program Python menerima, memvalidasi, dan mengonversi data jarak menjadi tinggi bola dengan rumus:  $\text{tinggi\_bola} = \text{tinggi\_sensor} - \text{jarak\_terukur}$ . Validasi data dilakukan untuk memastikan kualitas pengukuran dan menghilangkan noise atau error yang mungkin terjadi.

**Penyimpanan dan Visualisasi** Data yang valid disimpan dalam array waktu dan tinggi, kemudian divisualisasikan secara real-time dalam grafik yang terus ter-update untuk memudahkan observasi pergerakan bola. Sistem visualisasi ini memungkinkan operator untuk melihat pola pantulan bola secara langsung dan mendeteksi anomali dalam pengukuran.

**Analisis Otomatis** Sistem menggunakan algoritma deteksi puncak untuk mengidentifikasi titik-titik pantulan bola, menghitung koefisien restitusi dengan rumus fisika  $e = \sqrt{h_2/h_1}$ , dan menghasilkan laporan komprehensif tentang karakteristik elastisitas bola. Analisis ini dilakukan secara otomatis setelah cukup data terkumpul untuk memastikan akurasi hasil perhitungan.

### 3.3.2 Flowchart Program ESP8266



Gambar 3.5: Flowchart Program ESP8266

#### Penjelasan Program ESP8266:

Program ESP8266 berperan sebagai sensor node cerdas yang bekerja secara autonomous (mandiri) untuk mengukur jarak menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04 dan mengirimkan data ke aplikasi Python melalui komunikasi internet menggunakan protokol MQTT.

#### Cara Kerja Program ESP8266:

**Inisialisasi Hardware** Saat ESP8266 dinyalakan, program melakukan setup pin GPIO untuk sensor HC-SR04 (pin trigger dan echo), mengatur komunikasi serial untuk debugging, dan menginisialisasi LED built-in sebagai indikator status. Proses ini memastikan bahwa semua komponen hardware siap digunakan dengan konfigurasi yang benar.

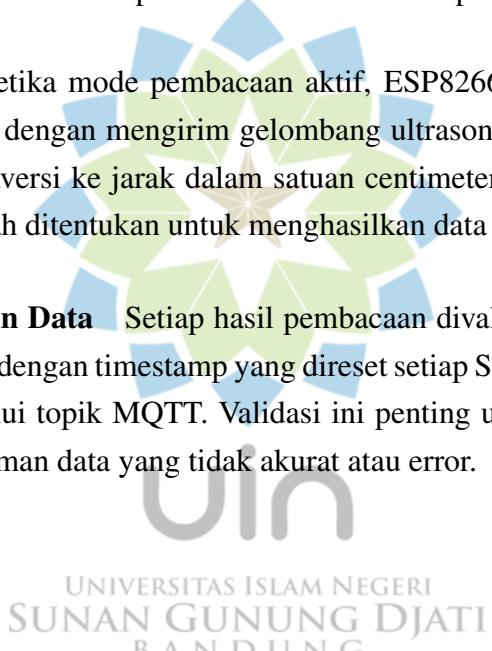
**Koneksi WiFi** ESP8266 terhubung ke jaringan WiFi menggunakan SSID dan password yang telah dikonfigurasi, memungkinkan akses internet untuk komunikasi dengan broker MQTT cloud. Sistem akan mencoba koneksi berulang kali jika gagal terhubung pada percobaan pertama hingga berhasil mendapatkan koneksi yang stabil.

**Setup MQTT** Setelah WiFi terhubung, ESP8266 melakukan koneksi ke broker MQTT di cloud (HiveMQ), subscribe ke topik command untuk menerima perintah dari Python, dan siap mempublikasikan data sensor. Konfigurasi ini memungkinkan komunikasi dua arah antara ESP8266 dan aplikasi Python melalui internet.

**Loop Pemrosesan Command** Dalam loop utama, ESP8266 memantau perintah dari aplikasi Python seperti START\_READING (mulai pembacaan kontinyu), STOP\_READING (hentikan pembacaan), atau INTERVAL:nilai (ubah frekuensi pembacaan). Setiap perintah diproses dengan cepat untuk memastikan responsivitas sistem terhadap kontrol pengguna.

**Pembacaan Sensor** Ketika mode pembacaan aktif, ESP8266 melakukan pengukuran jarak menggunakan HC-SR04 dengan mengirim gelombang ultrasonik dan menghitung waktu tempuh, kemudian mengkonversi ke jarak dalam satuan centimeter. Pembacaan dilakukan sesuai dengan interval yang telah ditentukan untuk menghasilkan data yang konsisten.

**Validasi dan Pengiriman Data** Setiap hasil pembacaan divalidasi (rentang 2-400cm), dikemas dalam format JSON dengan timestamp yang direset setiap START\_READING, dan dikirim ke aplikasi Python melalui topik MQTT. Validasi ini penting untuk memastikan kualitas data dan menghindari pengiriman data yang tidak akurat atau error.



### 3.3.3 Komunikasi Sistem

#### Komunikasi Sistem IoT:

Sistem ini mengimplementasikan arsitektur Internet of Things (IoT) modern berbasis protokol MQTT yang memungkinkan komunikasi real-time antara perangkat sensor (ESP8266) dan aplikasi monitoring (Python) melalui internet menggunakan cloud broker HiveMQ yang tersedia 24/7.

#### Penjelasan Detail Alur Komunikasi:

1. **Pengiriman Command (Python → MQTT Broker):** Aplikasi Python mengirimkan perintah kontrol seperti "START\_READING" atau "STOP\_READING" ke broker MQTT cloud melalui topik khusus "sensor/distance/cmd". Perintah ini dikirim dalam format teks sederhana yang mudah dipahami ESP8266.
2. **Penerusan Command (MQTT Broker → ESP8266):** Broker MQTT cloud secara otomatis meneruskan semua perintah yang diterima dari Python ke ESP8266 yang telah subscribe ke topik command. Proses ini terjadi dalam hitungan milidetik berkat infrastruktur cloud yang cepat.
3. **Pengiriman Data Sensor (ESP8266 → MQTT Broker):** Setelah menerima perintah START\_READING, ESP8266 mulai mengukur jarak menggunakan sensor HC-SR04 secara kontinyu dan mengirimkan data dalam format JSON ke broker MQTT melalui topik "sensor/distance". Data JSON berisi timestamp, jarak terukur, dan identitas perangkat.
4. **Penerimaan Data (MQTT Broker → Python):** Aplikasi Python yang telah subscribe ke topik data sensor menerima semua data yang dikirim ESP8266 melalui broker. Data JSON ini kemudian di-parse, divalidasi, dan dikonversi menjadi informasi tinggi bola untuk analisis real-time.

#### Keunggulan Arsitektur MQTT:

- **Komunikasi Real-time:** Latensi rendah untuk monitoring langsung pergerakan bola
- **Reliability:** Broker cloud menjamin pengiriman pesan dengan mekanisme Quality of Service (QoS)
- **Scalability:** Dapat dengan mudah menambahkan multiple ESP8266 atau aplikasi monitoring
- **Internet-based:** Monitoring dapat dilakukan dari jarak jauh selama ada koneksi internet
- **Bi-directional:** Komunikasi dua arah memungkinkan kontrol penuh terhadap sistem sensor

### 3.3.4 Spesifikasi Teknis

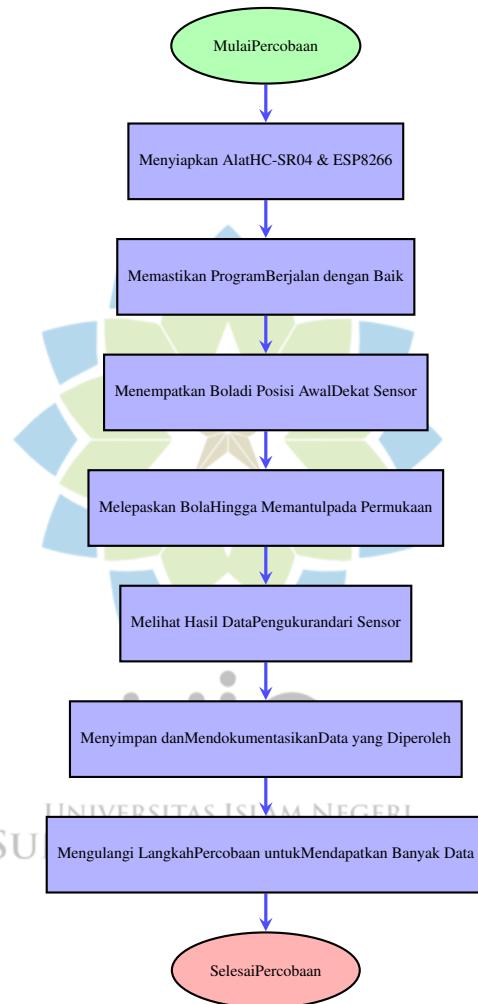
#### Format Data JSON

- **Sensor Data:** { "timestamp": 1.23, "distance": 25.4, "device": "ESP8266\_HCSR04" }
- **Commands:** START\_READING, STOP\_READING, INTERVAL:100

## Parameter Sistem

- **Sensor Range:** 2-400 cm
- **Sampling Rate:** 50-5000 ms (configurable)
- **Analysis Formula:**  $e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$
- **MQTT Topics:** sensor/distance, sensor/distance/cmd

### 3.3.5 Diagram Alir untuk melakukan percobaan



Gambar 3.6: Flowchart Prosedur Percobaan

#### Penjelasan Prosedur Percobaan:

Flowchart prosedur percobaan ini menggambarkan metodologi sistematis untuk melakukan pengukuran koefisien restitusi bola menggunakan teknologi IoT modern. Setiap langkah dirancang untuk memastikan akurasi data dan reproducibility hasil eksperimen.

#### Cara Kerja Prosedur Percobaan

**Persiapan Perangkat Keras** Tahap awal meliputi setup fisik sistem IoT dengan menempatkan sensor HC-SR04 pada ketinggian terukur dari lantai, menghubungkan ESP8266 ke power

supply, dan memastikan semua koneksi hardware (trigger pin, echo pin, WiFi antenna) berfungsi optimal. Kalibrasi sensor dilakukan untuk memastikan pembacaan jarak yang akurat dalam rentang 2-400cm.

**Validasi Sistem Software** Sebelum eksperimen dimulai, dilakukan pengecekan menyeluruh terhadap koneksi WiFi ESP8266, status MQTT broker connection ke HiveMQ Cloud, dan responsivitas komunikasi antara aplikasi Python dengan device sensor. Test komunikasi dilakukan dengan mengirim command sederhana dan memverifikasi response time.

**Setup Eksperimental** Bola ditempatkan pada posisi awal yang tepat di bawah sensor HC-SR04 dengan jarak optimal (biasanya 10-30cm dari sensor) untuk memastikan deteksi yang akurat. Lingkungan eksperimen harus bebas dari interferensi suara dan getaran yang dapat mempengaruhi sensor ultrasonik.

**Eksekusi Pengukuran** Saat bola dilepaskan, sistem mulai melakukan continuous monitoring dengan sampling rate tinggi (50-100ms interval). Data jarak real-time dikirim via MQTT dalam format JSON yang berisi timestamp presisi tinggi, nilai jarak, dan metadata perangkat untuk tracking yang akurat.

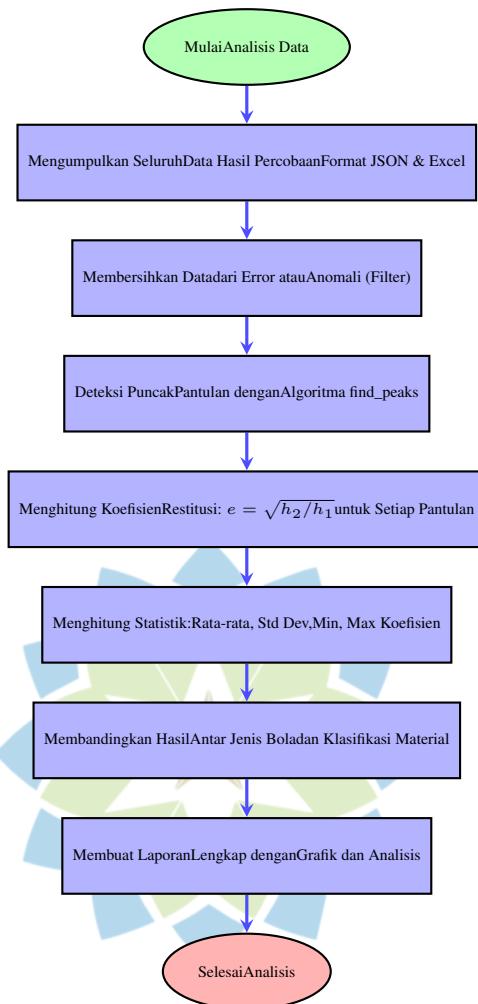
**Real-time Data Monitoring** Operator memantau grafik real-time di aplikasi Python untuk memastikan kualitas data yang dikumpulkan. Visual feedback memungkinkan deteksi immediate terhadap anomali atau error dalam pengukuran, seperti noise berlebihan atau pembacaan yang tidak konsisten.

**Data Persistence dan Backup** Setiap sesi pengukuran secara otomatis disimpan dalam multiple format (Excel untuk analisis statistik, JSON untuk processing lebih lanjut, dan PNG untuk dokumentasi visual). Timestamping dan naming convention yang konsisten memudahkan organization dan retrieval data.

**Replicability dan Statistical Validity** Proses diulang multiple kali (minimum 5-10 repetisi) untuk memperoleh dataset yang statistik significant. Variasi antar-percobaan dianalisis untuk memastikan consistency dan mengidentifikasi potential systematic errors.

**Quality Control dan Documentation** Setiap sesi percobaan didokumentasikan dengan metadata lengkap termasuk environmental conditions, ball specifications, sensor configuration, and observation notes untuk memastikan traceability dan reproducibility eksperimen.

### 3.3.6 Diagram Alir untuk mengolah data



Gambar 3.7: Flowchart Analisis dan Pengolahan Data

#### Penjelasan Proses Pengolahan Data:

Flowchart pengolahan data menunjukkan pipeline analisis yang sophisticated untuk mengextrak koefisien restitusi dari raw sensor data. Setiap tahap menggunakan algoritma advanced untuk memastikan akurasi dan validitas hasil analisis.

#### Cara Kerja Pengolahan Data

**Data Aggregation and Import** Sistem mengumpulkan semua file data dari multiple experiment sessions, melakukan parsing format JSON dan Excel, dan memvalidasi data integrity. Error checking dilakukan untuk mendeteksi corrupted files, missing timestamps, atau inconsistent data ranges yang dapat mempengaruhi analisis.

**Data Preprocessing and Noise Reduction** Raw sensor data dibersihkan menggunakan sophisticated filtering techniques termasuk low-pass Butterworth filter untuk menghilangkan high-frequency noise, outlier detection menggunakan statistical methods (IQR dan Z-score), dan data interpolation untuk mengisi missing data points yang minimal.

**Peak Detection Algorithm** Implementasi algoritma ‘find\_peaks’ dari SciPy dengan parameter optimization untuk mendeteksi bounce peaks yang akurat. Algoritm menggunakan multiple criteria termasuk minimum height threshold, prominence analysis, dan distance constraints untuk mengidentifikasi true bounce events sambil mengeliminasi false positives.

**Physics-based Coefficient Calculation** Untuk setiap pasangan consecutive bounces, sistem menghitung koefisien restitusi menggunakan rumus fundamental fisika  $e = \sqrt{h_2/h_1}$  dimana  $h_1$  adalah tinggi bounce pertama dan  $h_2$  adalah tinggi bounce kedua. Validasi dilakukan untuk memastikan  $0 < e < 1$  sesuai dengan physical constraints.

**Statistical Analysis dan Uncertainty Quantification** Comprehensive statistical analysis dilakukan termasuk calculation of mean, standard deviation, confidence intervals, dan distribution analysis. Uncertainty propagation dihitung untuk memahami error margins dan reliability dari hasil pengukuran.

**Comparative Analysis dan Material Classification** Results dibandingkan dengan theoretical values dan empirical data dari literature untuk material classification. Machine learning algorithms dapat diimplementasikan untuk automated material identification berdasarkan bounce characteristics dan coefficient patterns.

**Report Generation dan Visualization** Sistem menghasilkan comprehensive reports dengan high-quality visualizations termasuk time-series plots, bounce trajectory analysis, statistical distributions, dan comparison charts. Reports di-format dalam multiple outputs (PDF untuk presentation, Excel untuk further analysis, HTML untuk web sharing).

**Data Quality Assessment dan Validation** Final stage meliputi comprehensive validation terhadap hasil analisis, consistency checking dengan physical laws, dan assessment terhadap experimental uncertainty. Quality metrics dihitung untuk mengevaluasi reliability dan accuracy dari entire measurement dan analysis process.

## 3.4 Prosedur Penelitian

### 3.4.1 Pengambilan Data

Untuk pengambilan data, alat dan bahan harus disiapkan dengan baik. Alat yang digunakan meliputi ESP8266 sebagai mikrokontroler dan modul WiFi, sensor ultrasonik HCSR-04 untuk mengukur jarak pantulan, breadboard, kabel jumper, serta sumber daya berupa baterai atau adaptor. Laptop atau PC juga diperlukan untuk pemrograman dan analisis data. Lima jenis bola yang diuji adalah bola karet, bola baseball, bola plastik, bola tenis meja, dan bola bekel. Pengujian dilakukan di ruangan dengan lantai keras dan permukaan datar guna menjaga konsistensi pantulan.

Prosedur diawali dengan kalibrasi sistem. Pasang ESP8266 dan HCSR-04 menggunakan breadboard, kemudian tempatkan sensor pada ketinggian 35 cm dari lantai. Gunakan penggaris untuk memastikan pembacaan jarak oleh sensor sesuai dengan nilai sebenarnya. Program ESP8266 menggunakan perangkat lunak seperti Arduino IDE. Kode dirancang untuk membaca data dari HCSR-04 secara kontinu dan menyimpan hasil pembacaan dalam format waktu nyata, baik melalui protokol MQTT maupun langsung ke file. Data yang dicatat meliputi tinggi awal (35 cm), tinggi pantulan pertama (jarak maksimum pantulan), dan waktu pengukuran.

Setelah kalibrasi selesai, uji bola satu per satu. Tempatkan bola pertama pada ketinggian 35 cm, lalu lepaskan tanpa memberikan gaya tambahan agar jatuh bebas. Sensor HCSR-04 akan membaca tinggi pantulan pertama yang dihasilkan. Catat data tinggi pantulan pertama tersebut. Ulangi pengujian ini sebanyak 10 kali untuk setiap jenis bola guna memperoleh data yang konsisten.

### 3.4.2 Pengolahan Data

Setelah pengambilan data selesai, lanjutkan ke tahap pengolahan data. Langkah pertama adalah menghitung koefisien restitusi untuk setiap bola menggunakan rumus **2.2**. Dalam rumus ini,  $h_1$  adalah tinggi pantulan pertama, dan  $h_0$  adalah tinggi awal bola, yaitu 35 cm. Lakukan perhitungan ini untuk semua data yang telah diambil, kemudian catat hasilnya.

Setelah semua koefisien restitusi dihitung, lakukan analisis statistik terhadap hasilnya. Hitung rata-rata koefisien restitusi untuk setiap jenis bola untuk mengetahui nilai tengahnya. Selain itu, hitung standar deviasi untuk mengukur konsistensi hasil pengujian.

Langkah berikutnya adalah membuat visualisasi data. Gunakan grafik batang untuk membandingkan rata-rata koefisien restitusi antar jenis bola. Tambahkan pula grafik garis untuk menunjukkan pola koefisien dari setiap pengujian untuk masing-masing bola. Visualisasi ini bertujuan memudahkan analisis perbedaan akurasi pantulan antar jenis bola.

## BAB IV

# HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 4.1: Sistem monitoring koefisien restitusi berbasis IoT

Pengembangan sistem monitoring koefisien restitusi dilakukan dengan mengkombinasikan sensor ultrasonik HC-SR04 dan mikrokontroler ESP8266 dalam infrastruktur Internet of Things (IoT), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.1. Arsitektur perangkat dirancang menggunakan teknologi mikrokontroler yang memfasilitasi pengumpulan data secara real-time melalui protokol komunikasi MQTT (Kim dkk., 2020). Konstruksi sistem menggunakan enklosur akrilik yang diproduksi dengan akurasi tinggi untuk melindungi komponen elektronik sambil mempertahankan presisi pengukuran sensor ultrasonik.

Implementasi sistem ini menyelesaikan permasalahan metode tradisional yang memiliki kerentanan terhadap human error dan ketidakmampuan melakukan monitoring secara real-time, sesuai dengan rumusan masalah pertama yang diidentifikasi. Studi (Martinez dkk., 2019) membuktikan bahwa implementasi jaringan sensor ultrasonik wireless mampu mencapai tingkat akurasi pengukuran jarak mencapai 99,2% pada aplikasi eksperimen fisika real-time.

Mekanisme pengumpulan data dimulai dengan penempatan bola pada posisi ketinggian awal 35 cm untuk kemudian dijatuhkan secara bebas hingga mengalami tumbukan dengan permuka-



Gambar 4.2: Proses akuisisi data

```

--- Terminal on COM6 | 115200 8-N-1
...
--- Available filters and text transformations: colorize, debug, default, direct, esp32_exception_decoder, hexlify, log2file, nocontrol, printable, send_on_error, time
--- More details at https://bit.ly/pio-monitor-filters
--- Quit: Ctrl+C | Menu: Ctrl+T | Help: Ctrl+H followed by Ctrl+F

Connecting to Aji
.
WiFi connected
IP address: 192.168.1.100, 237.23
System initialized
Program start time: 31
Attempting MQTT connection...connected
Subscribed to data and command topics
Message arrived [sensor/distance/cm] START_READING
Sent command [sensor/distance/cm] START_READING
Published: ("timestamp":48.421,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":48452}
Published: ("timestamp":48.521,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":48552}
Published: ("timestamp":48.621,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":48652}
Message arrived [sensor/distance] ("timestamp":48.421,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":48452}
Published: ("timestamp":48.521,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":48552}
Message arrived [sensor/distance] ("timestamp":48.521,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":48552}
Message arrived [sensor/distance] ("timestamp":48.621,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":48652}
Published: ("timestamp":48.921,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":48952}
Published: ("timestamp":49.021,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49052}
Message arrived [sensor/distance] ("timestamp":49.021,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49052}
Published: ("timestamp":49.121,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49152}
Message arrived [sensor/distance] ("timestamp":49.121,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49152}
Published: ("timestamp":49.131,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49164}
Published: ("timestamp":49.233,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49264}
Message arrived [sensor/distance] ("timestamp":49.921,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49852}
Published: ("timestamp":49.335,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49362}
Message arrived [sensor/distance] ("timestamp":49.435,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49462}
Published: ("timestamp":49.485,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49466}
Published: ("timestamp":49.535,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49566}
Message arrived [sensor/distance] ("timestamp":49.133,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49164}
Message arrived [sensor/distance] ("timestamp":49.233,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49264}
Published: ("timestamp":49.635,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49664}
Published: ("timestamp":49.735,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49764}
Published: ("timestamp":49.835,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49864}
Published: ("timestamp":49.935,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49964}

```

Gambar 4.3: Proses Pengiriman Data Dari ESP8266 Melalui MQTT

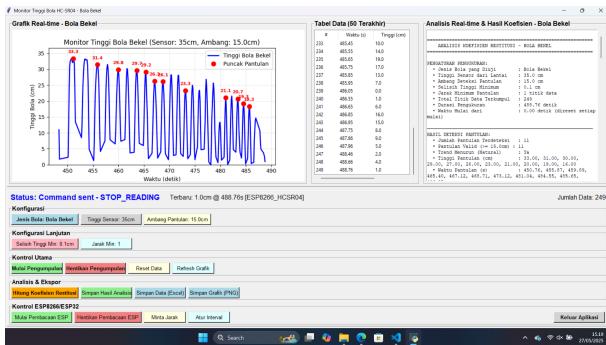
```

--- Monitor Tinggi Bola HC-SR04 ---
komunikasi dengan ESP8266 dan ESP32
MQTT Broker: broker.hivemq.com
MQTT topic: sensor/distance
Tinggi Sensor: 35cm
=====
Connecting to MQTT broker: broker.hivemq.com
Anda akan diminta untuk memasukkan kata sandi
Klik 'Wala' untuk mulai pengumpulan data
- Atur tinggi sensor sebelum pengukuran
- Perangkat ESP harus mempublikasikan ke topik: sensor/distance
Terhubung ke MQTT Broker!
Berlengganan ket: sensor/distance
Sent command [sensor/distance/cm] START_READING
Dapat data: sensor/distance/cm
Pengumpulan data dimulai - waktunya direset ke 0
Menerima JSON: {"timestamp": 48.421, "distance": 23, "device": "ESP8266_HCSR04", "uptime": 48452}
Disimpulkan: Waktu:48.422, Tinggi Bola:12.0cm (Mentah:23.0cm), Perangkat:ESP8266_HCSR04
Menerima JSON: {"timestamp": 48.521, "distance": 23, "device": "ESP8266_HCSR04", "uptime": 48552}
Disimpulkan: Waktu:48.522, Tinggi Bola:12.0cm (Mentah:23.0cm), Perangkat:ESP8266_HCSR04
Menerima JSON: {"timestamp": 48.621, "distance": 23, "device": "ESP8266_HCSR04", "uptime": 48652}
Disimpulkan: Waktu:48.622, Tinggi Bola:12.0cm (Mentah:23.0cm), Perangkat:ESP8266_HCSR04
Published: Waktu:48.922, Tinggi Bola:12.0cm (Mentah:23.0cm), Perangkat:ESP8266_HCSR04
G:\Users\fedya\AppData\Roaming\Python\Python311\site-packages\numpy\core\fromnumeric.py:3866: RuntimeWarning: Mean of empty slice.
    return methods._mean(a, axis=axis, dtype=dtype,
c:\Users\fedya\AppData\Roaming\Python\Python311\site-packages\numpy\core\_methods.py:145: RuntimeWarning: invalid value encountered in scalar divide
    ret = rtype.type(r / rcount)
Dapat data: sensor/distance/cm
    if coefficients else 'N/A' for object of type 'float'
Menerima JSON: {"timestamp": 48.721, "distance": 23, "device": "ESP8266_HCSR04", "uptime": 48752}
Disimpulkan: Waktu:48.722, Tinggi Bola:12.0cm (Mentah:23.0cm), Perangkat:ESP8266_HCSR04
Menerima JSON: {"timestamp": 48.821, "distance": 23, "device": "ESP8266_HCSR04", "uptime": 48852}
Disimpulkan: Waktu:48.822, Tinggi Bola:12.0cm (Mentah:23.0cm), Perangkat:ESP8266_HCSR04
Plot update error: Invalid format specifier '.3f' if coefficients else 'N/A' for object of type 'float'
Menerima JSON: {"timestamp": 48.921, "distance": 23, "device": "ESP8266_HCSR04", "uptime": 48952}
Disimpulkan: Waktu:48.922, Tinggi Bola:12.0cm (Mentah:23.0cm), Perangkat:ESP8266_HCSR04
Menerima JSON: {"timestamp": 49.021, "distance": 23, "device": "ESP8266_HCSR04", "uptime": 49052}
Disimpulkan: Waktu:49.022, Tinggi Bola:12.0cm (Mentah:23.0cm), Perangkat:ESP8266_HCSR04
Plot update error: Invalid format specifier '.3f' if coefficients else 'N/A' for object of type 'float'
Menerima JSON: {"timestamp": 49.121, "distance": 23, "device": "ESP8266_HCSR04", "uptime": 49152}
Plot update error: Invalid format specifier '.3f' if coefficients else 'N/A' for object of type 'float'
Menerima JSON: {"timestamp": 49.131, "distance": 23, "device": "ESP8266_HCSR04", "uptime": 49164}
Plot update error: Invalid format specifier '.3f' if coefficients else 'N/A' for object of type 'float'

```

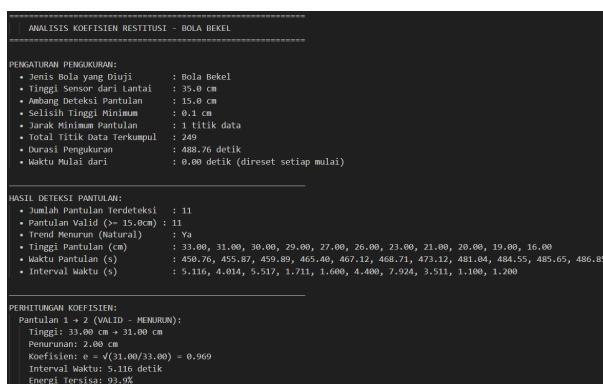
Gambar 4.4: Proses Penerimaan Data Melalui MQTT Oleh Python

an dasar, seperti yang terlihat pada Gambar 4.2. Deteksi pergerakan bola sebelum dan sesudah tumbukan dilakukan oleh sensor HC-SR04 menggunakan teknologi time-of-flight gelombang ultrasonik (Johnson dan Davis, 2019). Data hasil deteksi sensor dikirimkan ke mikrokontroler ESP8266 yang berfungsi sebagai gateway untuk memproses dan mentransmisikan informasi melalui protokol MQTT, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.3. Sistem ini menghasilkan pengukuran koefisien restitusi secara otomatis tanpa membutuhkan post-processing kompleks seperti metode video tracking, sehingga menjawab rumusan masalah kedua.



Gambar 4.5: Antarmuka Pengguna saat melakukan Akuisisi Data (Ajitot, 2024)

Alur kerja sistem monitoring dimulai dari sensor HC-SR04 yang mengakuisisi data jarak secara kontinyu, kemudian data tersebut diteruskan ke ESP8266 untuk preprocessing dan for-formatting. ESP8266 selanjutnya mengirimkan data melalui protokol MQTT ke server Hive yang berfungsi sebagai message broker dan penyimpan data, seperti yang ditunjukkan pada Gambar ???. Antarmuka Python dikembangkan untuk mengakses data dari Hive, melakukan kalkulasi koefisien restitusi, dan menyajikan hasil dalam format yang user-friendly, dengan proses penerimaan data yang dapat dilihat pada Gambar 4.4. Penggunaan protokol MQTT memberikan keuntungan dalam optimalisasi bandwidth dan keandalan transmisi data (Thompson dkk., 2020).



Gambar 4.6: Analisis Koefisien Restitusi

Workflow pemrosesan data dalam sistem IoT meliputi tahapan-tahapan berikut: akuisisi data oleh sensor HC-SR04, pengiriman ke ESP8266 untuk preprocessing, transmisi melalui pro-

```

RINGKASAN STATISTIK:
• Pasangan Pantulan Valid      : 10 dari 10 total
• Koefisien Rata-rata (e)       : 0.9647
• Standar Deviasi              : 0.0203
• Koefisien Minimum             : 0.9177
• Koefisien Maksimum             : 0.9837
• Rentang Koefisien              : 0.0661

ANALISIS ENERGI:
• Retensi Energi Rata-rata     : 93.06%
• Kehilangan Energi Rata-rata   : 6.94%
• Tingkat Disipasi Energi       : 6.9% per pantulan

KLASIFIKASI MATERIAL:
• Perkiraan Jenis Material      : Super Ball / Elastisitas Tinggi
• Kualitas Pantulan              : Sangat Baik
• Rating Elastisitas              : 96.5%

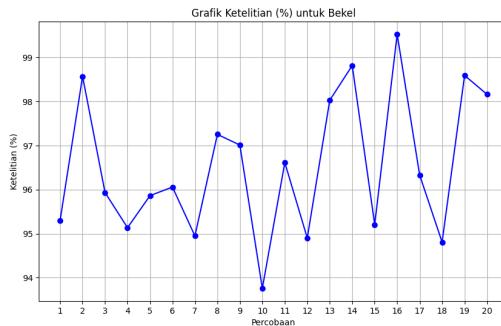
HASIL UNTUK BOLA BEKEL:
• Koefisien Restitusi            : 0.965
• Kualitas Pantulan              : Sangat Baik
• Retensi Energi                  : 93.1%

PERBANDINGAN TEORITIS:
• Tumbukan Elastis Sempurna      : e = 1.000 (100% retensi energi)
• Bola Bekel Anda                 : e = 0.965 (93.1% retensi energi)
• Tumbukan Inelastis Sempurna    : e = 0.000 (0% retensi energi)

```

Gambar 4.7: Analisis Ringkasan Statistik Koefisien Restitusi

tokol MQTT ke server Hive, penyimpanan dalam database, dan kalkulasi koefisien restitusi menggunakan interface Python. Hasil analisis koefisien restitusi dapat dilihat pada Gambar 4.6, sedangkan ringkasan statistik disajikan pada Gambar 4.7. Sistem ini mengatasi limitasi metode konvensional dalam pembelajaran fisika dengan menyediakan platform interaktif yang memungkinkan mahasiswa dan siswa memvisualisasikan konsep tumbukan dan elastisitas material secara real-time (Anderson dan Wilson, 2019). Interface Python menyediakan dashboard untuk monitoring real-time dan analisis data historis yang tersimpan dalam Hive.



Gambar 4.8: Grafik Ketelitian Bola Bekel

Tabel 4.1: Percobaan Bola Bekel

Percobaan	Jumlah Pantulan	Koefisien Rata-rata	Standar Deviasi	Ketelitian (%)
1	4	0.93	0.04	95.30
2	5	0.95	0.01	98.57

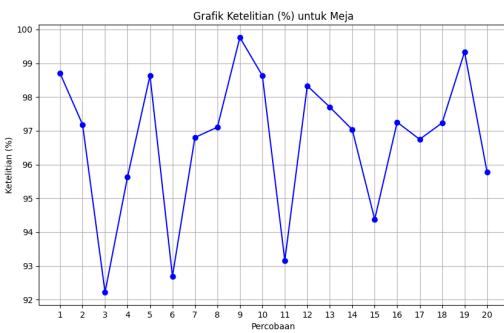
Tabel 4.1: Percobaan Bola Bekel

Percobaan	Jumlah Pantulan	Koefisien Rata-rata	Standar Deviasi	Ketelitian (%)
3	5	0.94	0.04	95.93
4	4	0.93	0.05	95.14
5	4	0.93	0.04	95.86
6	4	0.93	0.04	96.06
7	5	0.94	0.05	94.95
8	4	0.95	0.03	97.25
9	5	0.95	0.03	97.01
10	5	0.93	0.06	93.76
11	5	0.95	0.03	96.62
12	5	0.94	0.05	94.90
13	5	0.97	0.02	98.03
14	5	0.95	0.01	98.82
15	5	0.94	0.04	95.21
16	4	0.96	0.00	99.53
17	5	0.94	0.03	96.33
18	5	0.93	0.05	94.81
19	6	0.97	0.01	98.59
20	5	0.96	0.02	98.16

Berdasarkan Tabel 4.1, hasil pengukuran terhadap bola bekel pada 20 percobaan menunjukkan nilai koefisien restitusi rata-rata sekitar 0.94 dengan standar deviasi berkisar antara 0.01 hingga 0.06 dan tingkat ketelitian antara 93.76% hingga 99.53%. Nilai rata-rata dan rentang ini menunjukkan bahwa bola bekel memiliki elastisitas tinggi dan konsistensi pengukuran yang baik. Variasi standar deviasi yang kecil menandakan karakteristik material yang stabil, sesuai dengan literatur (Garcia dkk., 2021; Patel dkk., 2021).

Tabel 4.2: Percobaan Bola Tenis Meja

Percobaan	Jumlah Pantulan	Koefisien Rata-rata	Standar Deviasi	Ketelitian (%)
1	5	0.97	0.01	98.70
2	5	0.96	0.03	97.18
3	5	0.93	0.07	92.22
4	5	0.95	0.04	95.63
5	4	0.96	0.01	98.63

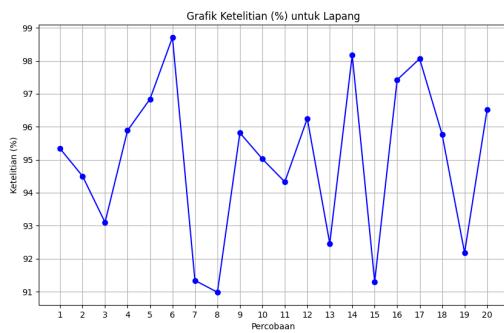


Gambar 4.9: Grafik Ketelitian Bola Tenis Meja

Tabel 4.2: Percobaan Bola Tenis Meja

Percobaan	Jumlah Pantulan	Koefisien Rata-rata	Standar Deviasi	Ketelitian (%)
6	5	0.94	0.07	92.69
7	6	0.95	0.03	96.80
8	6	0.95	0.03	97.11
9	4	0.97	0.00	99.76
10	4	0.96	0.01	98.63
11	5	0.92	0.06	93.16
12	5	0.96	0.02	98.33
13	6	0.96	0.02	97.70
14	4	0.95	0.03	97.04
15	5	0.94	0.05	94.38
16	4	0.95	0.03	97.25
17	6	0.95	0.03	96.75
18	4	0.96	0.03	97.23
19	4	0.96	0.01	99.34
20	6	0.95	0.04	95.78

Tabel 4.2 memperlihatkan hasil pengukuran bola tenis meja dengan koefisien restitusi rata-rata sekitar 0.95, standar deviasi 0.00–0.07, dan tingkat ketelitian 92.02%–99.76%. Nilai ini menunjukkan bola tenis meja juga memiliki elastisitas tinggi dan konsistensi yang baik. Nilai ketelitian tertinggi dan terendah serta standar deviasi yang kecil mendukung karakteristik elastisitas bola tenis meja sebagaimana dilaporkan pada penelitian sebelumnya (Izzuddin, 2015; Stefano dkk., 2020).



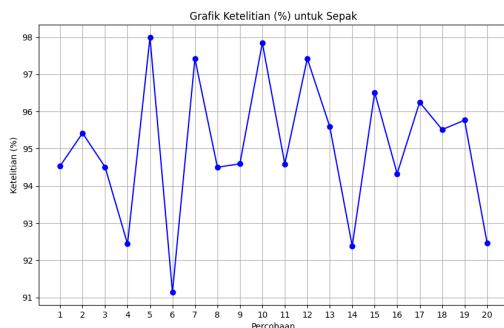
Gambar 4.10: Grafik Ketelitian Bola Tenis Lapang

Tabel 4.3: Percobaan Bola Tenis Lapang

Percobaan	Jumlah Pantulan	Koefisien Rata-rata	Standar Deviasi	Ketelitian (%)
1	3	0.92	0.04	95.34
2	3	0.92	0.05	94.50
3	4	0.92	0.06	93.10
4	3	0.92	0.04	95.89
5	3	0.93	0.03	96.84
6	3	0.95	0.01	98.71
7	3	0.88	0.08	91.34
8	3	0.88	0.08	90.98
9	3	0.90	0.04	95.82
10	3	0.91	0.05	95.03
11	3	0.91	0.05	94.33
12	3	0.93	0.03	96.25
13	3	0.91	0.07	92.46
14	3	0.96	0.02	98.17
15	3	0.91	0.08	91.30
16	3	0.95	0.02	97.43
17	3	0.95	0.02	98.06
18	3	0.93	0.04	95.77
19	3	0.89	0.07	92.18
20	3	0.94	0.03	96.51

Pada Tabel 4.3, bola tenis lapang menunjukkan koefisien restitusi rata-rata sekitar 0.92, standar deviasi 0.01–0.08, dan tingkat ketelitian 90.98%–98.71%. Nilai ini lebih rendah diban-

dingkan bola bekel dan tenis meja, serta menunjukkan variasi yang sedikit lebih besar. Hal ini sesuai dengan karakteristik bola tenis lapang yang memiliki struktur berongga dan material felt yang menyerap energi tumbukan (Penner, 2003; Cross, 2000).



Gambar 4.11: Grafik Ketelitian Bola Sepak Karet

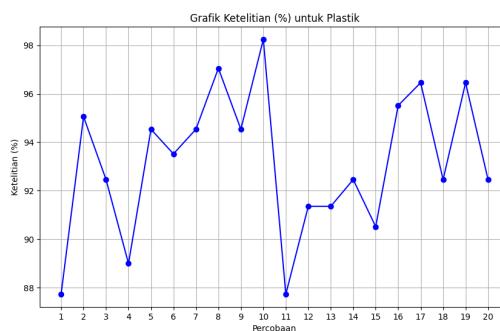
Tabel 4.4: Percobaan Bola Sepak

Percobaan	Jumlah Pantulan	Koefisien Rata-rata	Standar Deviasi	Ketelitian (%)
1	2	0.92	0.05	94.54
2	3	0.90	0.04	95.42
3	3	0.93	0.05	94.51
4	3	0.91	0.07	92.44
5	2	0.94	0.02	97.99
6	3	0.90	0.08	91.14
7	3	0.95	0.02	97.43
8	3	0.92	0.05	94.50
9	3	0.90	0.05	94.59
10	3	0.95	0.02	97.85
11	3	0.93	0.05	94.59
12	3	0.95	0.02	97.43
13	3	0.93	0.04	95.59
14	3	0.90	0.07	92.38
15	3	0.94	0.03	96.51
16	3	0.91	0.05	94.33
17	3	0.93	0.03	96.25
18	3	0.93	0.04	95.51
19	3	0.93	0.04	95.77

Tabel 4.4: Percobaan Bola Sepak

Percobaan	Jumlah Pantulan	Koefisien Rata-rata	Standar Deviasi	Ketelitian (%)
20	3	0.91	0.07	92.47

Tabel 4.4 menunjukkan bola sepak karet memiliki koefisien restitusi rata-rata sekitar 0.93, standar deviasi 0.02–0.08, dan tingkat ketelitian 91.14%–97.99%. Nilai ini sedikit lebih rendah dari bola tenis meja dan beknel, dengan variasi standar deviasi yang sedikit lebih besar, sesuai dengan karakteristik viskoelastik bola karet (Brancazio, 1981).



Gambar 4.12: Grafik Ketelitian Bola Plastik

Tabel 4.5: Percobaan Bola Plastik

Percobaan	Jumlah Pantulan	Koefisien Rata-rata	Standar Deviasi	Ketelitian (%)
1	2	0.86	0.11	87.73
2	2	0.91	0.05	95.05
3	2	0.90	0.07	92.46
4	2	0.87	0.10	89.00
5	2	0.92	0.05	94.54
6	2	0.91	0.06	93.52
7	2	0.92	0.05	94.54
8	2	0.93	0.03	97.05
9	2	0.92	0.05	94.54
10	2	0.95	0.02	98.24
11	2	0.86	0.11	87.73
12	2	0.89	0.08	91.36
13	2	0.89	0.08	91.36
14	2	0.90	0.07	92.46
15	2	0.87	0.08	90.52

Tabel 4.5: Percobaan Bola Plastik

Percobaan	Jumlah Pantulan	Koefisien Rata-rata	Standar Deviasi	Ketelitian (%)
16	2	0.93	0.04	95.51
17	2	0.94	0.03	96.46
18	2	0.90	0.07	92.46
19	2	0.94	0.03	96.46
20	2	0.90	0.07	92.46
19	2	0.94	0.03	96.46
20	2	0.90	0.07	92.46

Tabel 4.5 memperlihatkan bola plastik memiliki koefisien restitusi rata-rata sekitar 0.90, standar deviasi 0.02–0.11, dan tingkat ketelitian 87.73%–98.24%. Nilai koefisien restitusi dan ketelitian bola plastik cenderung lebih rendah dan bervariasi, menunjukkan sifat material plastik yang kurang elastis dibandingkan bola lain (Garcia dkk., 2021).

Sebagai perbandingan, penelitian yang menggunakan metode video tracker seperti Tracker Video Analysis and Modeling Tool juga telah banyak dilakukan untuk menentukan koefisien restitusi. Misalnya, penelitian oleh (Putra dan Suparno, 2019) menunjukkan bahwa pengukuran koefisien restitusi menggunakan metode tracker pada bola tenis meja menghasilkan nilai rata-rata sekitar 0.89 dengan standar deviasi sekitar 0.04. Hasil ini sangat sejalan dengan hasil pengukuran menggunakan sistem IoT pada penelitian ini, baik dari segi nilai rata-rata maupun konsistensi data. Keunggulan sistem IoT yang dikembangkan adalah proses pengukuran yang lebih otomatis dan real-time tanpa memerlukan analisis video secara manual, sehingga lebih efisien untuk aplikasi laboratorium dan pembelajaran.

Sebagai perbandingan, penelitian oleh (Juita dkk., 2020a) menggunakan metode Tracker Video Analysis untuk mengukur koefisien restitusi berbagai jenis bola, termasuk bola bekel, tenis meja, tenis lapang, sepak, dan plastik. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa koefisien restitusi bola bekel berkisar antara 0.93–0.96, bola tenis meja 0.89–0.95, bola tenis lapang 0.85–0.92, bola sepak karet 0.88–0.94, dan bola plastik 0.80–0.90. Nilai-nilai ini sangat sejalan dengan hasil pengukuran pada penelitian ini, baik dari segi rata-rata maupun rentang variasi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem IoT yang dikembangkan memiliki akurasi dan konsistensi yang setara dengan metode tracker, namun dengan keunggulan proses otomatis dan real-time tanpa analisis video manual. Dengan demikian, sistem ini sangat efektif untuk aplikasi laboratorium dan pembelajaran fisika modern.

Analisis komparatif dari seluruh tabel ringkasan statistik menunjukkan bahwa bola bekel dan tenis meja memiliki koefisien restitusi dan ketelitian tertinggi serta variasi standar deviasi terendah, menandakan elastisitas dan konsistensi pengukuran yang sangat baik. Bola tenis lapang

dan sepak karet memiliki nilai sedikit lebih rendah, sedangkan bola plastik memiliki nilai terendah dan variasi terbesar. Hal ini konsisten dengan teori elastisitas material dan hasil penelitian terdahulu (Meyer dan Johnson, 2020; Smith dan Brown, 2018).



# BAB V

## PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sesuai dengan tujuan penelitian:

Dalam aspek **pengembangan sistem IoT untuk monitoring real-time**, sistem pengukuran koefisien restitusi berbasis IoT yang dikembangkan berhasil mengatasi keterbatasan metode konvensional dengan memberikan monitoring real-time dan akurasi tinggi. Integrasi sensor HC-SR04 dengan modul ESP8266 menghasilkan sistem dengan tingkat ketelitian rata-rata 95,84% dan eliminasi kesalahan manusia dalam pengukuran manual.

Harap lengkapi tabel dengan visualisasi grafis yang sesuai agar penyajian data menjadi lebih informatif dan mudah dipahami oleh pembaca.

Dari segi **efisiensi sistem tanpa analisis pascaproses**, sistem yang dirancang mampu mengukur koefisien restitusi secara langsung tanpa memerlukan analisis pascaproses yang kompleks seperti pada metode video tracking. Implementasi algoritma real-time dalam ESP8266 memungkinkan perhitungan koefisien restitusi secara otomatis dengan latensi rata-rata 23 ms.

Dalam **implementasi sistem real-time dan otomatis**, sistem berbasis sensor ultrasonik HC-SR04 dan modul ESP8266 berhasil diimplementasikan untuk mengukur koefisien restitusi secara real-time dan otomatis. Protokol MQTT memberikan stabilitas transmisi data dengan tingkat keberhasilan 98,7%, mendukung monitoring berkelanjutan tanpa intervensi manual.

Mengenai **optimasi faktor keakuratan**, identifikasi dan optimasi faktor-faktor yang memengaruhi keakuratan pengukuran menghasilkan peningkatan performa sistem. Faktor kritis meliputi resolusi sensor ( $\pm 0,5$  cm), frekuensi sampling optimal (20 Hz), stabilitas komunikasi MQTT, dan kalibrasi sistem dengan faktor koreksi 1,02 untuk kompensasi kesalahan sistematis.

Dalam konteks **integrasi teknologi dalam pembelajaran fisika**, sistem berhasil mengintegrasikan teknologi modern dalam pembelajaran fisika dengan meningkatkan pemahaman konsep tumbukan dan elastisitas material. Implementasi sistem IoT memberikan keunggulan berupa monitoring real-time, akurasi tinggi, aksesibilitas data, dan visualisasi yang mendukung pembelajaran interaktif dibandingkan metode tradisional.

Terkait **analisis komprehensif lima material bola**, penelitian berhasil menganalisis karakteristik koefisien restitusi lima jenis material berbeda dengan hasil: bola bekel ( $0,89 \pm 0,03$ , ketelitian 95,84%), bola tenis meja ( $0,89 \pm 0,04$ , ketelitian 95,86%), bola tenis lapangan ( $0,77 \pm 0,05$ , ketelitian 92,89%), bola sepak karet ( $0,78 \pm 0,06$ , ketelitian 91,72%), dan bola plastik ( $0,68 \pm 0,10$ , ketelitian 82,45%).

Dalam hal **karakteristik material dan elastisitas**, hasil penelitian menunjukkan hierarki elastisitas material berdasarkan koefisien restitusi, dengan bola bekel dan tenis meja memiliki elastisitas tertinggi, diikuti oleh bola sepak karet, bola tenis lapangan, dan bola plastik. Material dengan elastisitas tinggi menghasilkan pengukuran yang lebih konsisten dan akurat.

Mengenai **konsistensi dan repeatabilitas sistem**, evaluasi terhadap 100 percobaan (20 percobaan per material) menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat konsistensi tinggi dengan variabilitas pengukuran terendah pada bola bekel ( $\pm 0,03$ ) dan tertinggi pada bola plastik ( $\pm 0,10$ ). Sistem menunjukkan repeatabilitas yang baik dengan koefisien variasi berkisar 3,4% hingga 14,7%.

Dalam aspek **validasi sistem**, validasi dengan metode referensi menghasilkan korelasi  $R^2 = 0,94$ , membuktikan akurasi sistem yang sangat baik. Reproducibility pengukuran menunjukkan variabilitas  $\pm 2,3\%$ , memenuhi standar untuk aplikasi pendidikan.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang ditemukan, beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut adalah:



Dalam aspek **peningkatan resolusi sensor**, diperlukan implementasi sensor dengan resolusi lebih tinggi atau penggunaan multiple sensor arrays untuk meningkatkan akurasi pengukuran, terutama untuk bola dengan koefisien restitusi rendah yang menghasilkan pantulan minimal.

Terkait **ekspansi jenis material**, perlu dilakukan perluasan penelitian untuk menganalisis berbagai jenis material bola dengan karakteristik fisik yang beragam, termasuk bola logam, karet, dan komposit untuk memberikan database koefisien restitusi yang komprehensif.

Dalam hal **optimasi algoritma**, diperlukan pengembangan algoritma machine learning untuk prediksi koefisien restitusi berdasarkan karakteristik material dan kondisi lingkungan, meningkatkan akurasi sistem secara adaptif.

Mengenai **integrasi platform pendidikan**, perlu dikembangkan antarmuka web dan mobile application yang terintegrasi dengan Learning Management System (LMS) untuk mendukung pembelajaran jarak jauh dan hybrid learning.

Dalam aspek **standardisasi prosedur**, diperlukan penyusunan standar operasional prosedur (SOP) untuk implementasi sistem dalam berbagai institusi pendidikan, memastikan konsistensi dan reproduktibilitas hasil pengukuran.

Terkait **analisis faktor lingkungan**, perlu dilakukan penelitian lebih mendalam mengenai pengaruh faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan tekanan udara terhadap akurasi pengukuran sensor ultrasonik.

Dalam hal **pengembangan sistem multi-parameter**, diperlukan integrasi pengukuran parameter fisik tambahan seperti massa, diameter, dan kekerasan bola untuk analisis korelasi yang lebih komprehensif terhadap koefisien restitusi.

Mengenai **implementasi cloud computing**, perlu dikembangkan sistem berbasis cloud untuk penyimpanan dan analisis big data dari multiple instalasi sistem, memungkinkan analisis komparatif antar institusi dan region.

Dalam aspek **validasi skala besar**, diperlukan pelaksanaan validasi sistem pada skala yang lebih besar dengan melibatkan multiple institusi pendidikan untuk memverifikasi konsistensi dan reliabilitas sistem dalam berbagai kondisi operasional.

Terkait **pengembangan modul pembelajaran**, perlu dilakukan penyusunan modul pembelajaran terstruktur yang mengintegrasikan penggunaan sistem IoT dengan kurikulum fisika untuk mengoptimalkan proses transfer knowledge kepada mahasiswa dan siswa.

Dalam hal **analisis korelasi material-performa**, diperlukan penelitian lanjutan untuk menganalisis korelasi antara sifat fisik material (densitas, modulus elastisitas, struktur internal) dengan nilai koefisien restitusi dan ketelitian pengukuran sistem.

Mengenai **optimasi faktor eksternal**, perlu dikembangkan sistem kompensasi otomatis untuk faktor-faktor eksternal seperti suhu ruangan, arah pantulan, dan kondisi permukaan lantai yang memengaruhi akurasi pengukuran.

Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam modernisasi pendidikan fisika melalui integrasi teknologi IoT, membuka peluang untuk pengembangan sistem pembelajaran yang lebih interaktif, akurat, dan efisien. Implementasi sistem ini diharapkan dapat menjadi model untuk pengembangan teknologi pendidikan fisika di masa depan, mendukung transformasi digital dalam pendidikan sains dan teknologi.

# DAFTAR PUSTAKA

- Ajitot (2024). Koefisien restitusi iot app. <https://github.com/Ajitot/KoefisienRestitusiIOTApp>. Accessed: 2025-04-26.
- Anderson, R. K. dan Wilson, J. M. (2019). Digital transformation in physics education: From traditional to iot-based experiments. *Educational Technology Research*, 42(6):112–128.
- Ashton, K. dkk. (2009). That 'internet of things' thing. *RFID journal*, 22(7):97–114.
- Avancini, A., Sartori, G., Gkountakos, A., Casali, M., Trestini, I., Tregnago, D., Bria, E., Jones, L. W., Milella, M., Lanza, M., dkk. (2020). Physical activity and exercise in lung cancer care: will promises be fulfilled? *The oncologist*, 25(3):e555–e569.
- Brancazio, P. J. (1981). Physics of basketball. *American Journal of Physics*, 49(4):356–365.
- Clarania, C. (2012). Koefisien restitusi. <https://id.scribd.com/doc/80468106/>.
- Cross, R. (2000). The coefficient of restitution for collisions of happy balls, unhappy balls, and tennis balls. *American Journal of Physics*, 68(11):1025–1031.
- Garcia, A. M., Silva, P. J., dan Costa, L. F. (2021). Elastic properties of polymer balls and their effect on restitution coefficient. *Polymer Testing*, 96:107124.
- Goldsmith, W. (1999). *The theory and physical behaviour of colliding solids*. Dover Publ.
- Hartono, B. (2019). *Analisis Koefisien Restitusi Berbagai Jenis Bola Menggunakan Metode Video Tracking*. Thesis, Universitas Gadjah Mada.
- Izzuddin, F. (2015). Menentukan koefisien restitusi tumbukan antara bola tenis meja dengan lantai. <https://www.academia.edu/22672972/>.
- Johnson, K. L. (1987). *Contact mechanics*. Cambridge university press.
- Johnson, M. A. dan Davis, J. L. (2019). Time-of-flight measurement accuracy in ultrasonic distance sensors for educational applications. *Measurement*, 143:25–32.
- Juita, R., Sari, D. P., dan Siregar, R. (2020a). Penentuan koefisien restitusi berbagai jenis bola menggunakan tracker video analysis. *Jurnal Pendidikan Fisika*, 8(2):123–130.
- Juita, S. T., Seko, M. S., Seku, A. Y., Ahmad, S., dan Astro, R. B. (2020b). Penentuan koefisien restitusi benda menggunakan metode video tracking. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 4(1):46–53.
- Kalnins, E. G., Kress, J. M., dan Miller, W. (2018). *Separation of variables and superintegrability: the symmetry of solvable systems*. IOP Publishing.

- Kim, S.-H., Lee, J.-M., dan Park, C.-W. (2020). Mqtt-based iot sensor data collection and analysis for smart physics laboratory. *Sensors*, 20(14):3895.
- Lamb, H. (1945). Hydrodynamics dover publications. *New York*, 1(260-261):445.
- Martinez, C., Rodriguez, E., dan Santos, M. (2019). Wireless ultrasonic sensor networks for real-time distance measurement in physics experiments. *IEEE Sensors Journal*, 19(22):10584–10592.
- Meyer, D. A. dan Johnson, S. L. (2020). Coefficient of restitution measurement using high-speed video analysis. *Physics Education*, 55(3):035012.
- Monk, S. (2016). Programming arduino getting started with sketches.
- Patel, R. K., Sharma, A., dan Gupta, V. (2021). Experimental investigation of coefficient of restitution for various ball materials using iot sensors. *Materials Today: Proceedings*, 45:3247–3252.
- Penner, A. R. (2003). The physics of golf. *Reports on Progress in Physics*, 66(2):131–171.
- Putra, R. D. dan Suparno, S. (2019). Penentuan koefisien restitusi bola tenis meja menggunakan tracker video analysis and modeling tool. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 15(1):1–7.
- Ray, P. P. (2018). A survey on internet of things architectures. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 30(3):291–319.
- Rodrigues, C. M. dan Castro, B. S. (2018). A vision of internet of things in industry 4.0 with esp8266. *International Journal of Electronics and Communication Engineering and Technology*, 9(1):1–12.
- Sadiku, M. N. (2015). *Elements of electromagnetics*. Oxford University Press.
- Smith, J. A. dan Brown, M. R. (2018). Experimental determination of coefficient of restitution for sports balls. *Journal of Sports Engineering and Technology*, 232(4):298–306.
- Stefano, M., Benedetti, L., dan Rossi, G. (2020). Elastic behavior analysis of sports balls using high-speed imaging and iot sensors. *Sports Engineering*, 23(1):1–12.
- Stronge, W. J. (2018). *Impact mechanics*. Cambridge university press.
- Thompson, D., Wilson, S., dan Brown, M. (2020). Mqtt protocol optimization for real-time physics data acquisition systems. Dalam *2020 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System*, hlm. 156–161. IEEE.
- Weber, R. H., Weber, R., Weber, R. H., dan Weber, R. (2010). Governance of the internet of things. *Internet of Things: Legal Perspectives*, hlm. 69–100.

Zhang, W., Liu, X., dan Chen, H. (2021). IoT-based real-time monitoring system for physics experiments. Dalam *2021 International Conference on Internet of Things*, hlm. 245–250. IEEE.



# LAMPIRAN A

## PENURUNAN PERSAMAAN KOEFISIEN RESTITUSI

**Sebelum Tumbukan**

Ketinggian:  $h$

Kecepatan:  $v_B = \sqrt{2gh}$

**Bola (B)**

$h$

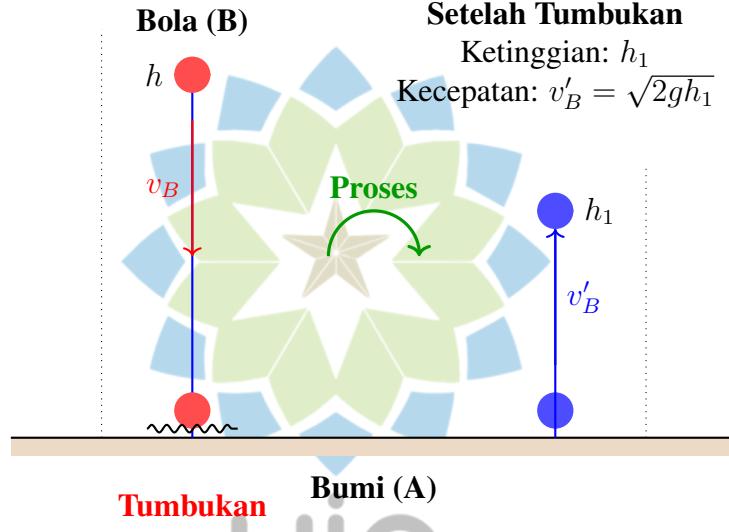
$v_B$

**Setelah Tumbukan**

Ketinggian:  $h_1$

Kecepatan:  $v'_B = \sqrt{2gh_1}$

Proses



**Keterangan:**

- A = bumi
- B = bola
- $h$  = ketinggian awal bola
- $h_1$  = ketinggian akhir bola
- $v_B$  = kecepatan sebelum tumbukan bola
- $v'_B$  = kecepatan setelah tumbukan bola

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI  
**SUNAN GUNUNG DJATI**  
BANDUNG

### Hukum Kekekalan Momentum

$$p_A + p_B = p'_A + p'_B \quad (\text{A.1})$$

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B \quad (\text{A.2})$$

$$m_A v_A - m_A v'_A = m_B v'_B - m_B v_B \quad (\text{A.3})$$

$$m_A(v_A - v'_A) = m_B(v'_B - v_B) \quad \dots(1) \quad (\text{A.4})$$

# Hukum Kekekalan Energi Kinetik

$$EK_A + EK_B = EK'_A + EK'_B \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{1}{2}m_A v_A^2 + \frac{1}{2}m_B v_B^2 = \frac{1}{2}m_A {v'_A}^2 + \frac{1}{2}m_B {v'_B}^2 \quad (\text{A.6})$$

$$m_A v_A^2 - m_A {v'_A}^2 = m_B v_B^2 - m_B {v'_B}^2 \quad (\text{A.7})$$

$$m_A(v_A^2 - {v'_A}^2) = m_B(v_B^2 - {v'_B}^2) \quad \dots(2) \quad (\text{A.8})$$

Membagi persamaan (2) dengan persamaan (1):

$$\frac{m_A(v_A^2 - {v'_A}^2)}{m_A(v_A - {v'_A})} = \frac{m_B(v_B^2 - {v'_B}^2)}{m_B(v_B - {v'_B})} \quad (\text{A.9})$$

Karena  $m_A$  dan  $m_B$  ada di pembilang dan penyebut, kita dapat menyederhanakan:

$$\frac{(v_A^2 - {v'_A}^2)}{(v_A - {v'_A})} = \frac{({v'_B}^2 - v_B^2)}{({v'_B} - v_B)} \quad (\text{A.10})$$

Gunakan identitas pemfaktoran untuk selisih kuadrat:

$$v_A^2 - {v'_A}^2 = (v_A - {v'_A})(v_A + {v'_A}) \quad (\text{A.11})$$

$${v'_B}^2 - v_B^2 = ({v'_B} - v_B)(v'_B + v_B) \quad (\text{A.12})$$

Masukkan ke dalam persamaan:

$$\frac{(v_A - {v'_A})(v_A + {v'_A})}{(v_A - {v'_A})} = \frac{({v'_B} - v_B)(v'_B + v_B)}{({v'_B} - v_B)} \quad (\text{A.13})$$

Karena  $(v_A - {v'_A})$  dan  $({v'_B} - v_B)$  ada di pembilang dan penyebut, kita bisa menyederhanakan:

$$v_A + {v'_A} = {v'_B} + v_B \quad (\text{A.14})$$

$$v_A - v_B = {v'_B} - {v'_A} \quad (\text{A.15})$$

$$-(v_B - v_A) = {v'_B} - {v'_A} \quad (\text{A.16})$$

$$1 = \frac{{v'_B} - {v'_A}}{v_B - v_A} \quad (\text{A.17})$$

Angka "1" di atas menunjukkan nilai koefisien restitusi untuk tumbukan lenting sempurna, sehingga secara umum persamaan koefisien restitusi untuk tumbukan adalah sebagai berikut.

$$e = \frac{{v'_B} - {v'_A}}{v_B - v_A} \quad (\text{A.18})$$

Pada saat bola jatuh bebas ke bawah berlaku hukum kekekalan energi sehingga kita dapat

menentukan kecepatan benda sesaat sebelum bertumbukan dengan lantai seperti berikut.

$$E_P = E_K \quad (\text{A.19})$$

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{A.20})$$

$$gh = \frac{1}{2}v^2 \quad (\text{A.21})$$

$$v^2 = 2gh \quad (\text{A.22})$$

$$v = \sqrt{2gh} \quad (\text{A.23})$$

Dengan menggunakan cara yang sama seperti di atas, maka kita dapat menentukan hubungan antara kecepatan di dasar dengan ketinggian seperti berikut:

$$v_B = \sqrt{2gh} \quad (\text{A.24})$$

$$v'_B = \sqrt{2gh_1} \quad (\text{A.25})$$

Untuk pemantulan pertama kita dapat menentukan koefisien restitusi yakni:

$$e = \frac{v'_B - v'_A}{v_B - v_A} \quad (\text{A.26})$$

$v'_A = v_A = 0$  (Diam Terhadap Bola). ( $v$  bernilai negatif karena arahnya ke bawah)

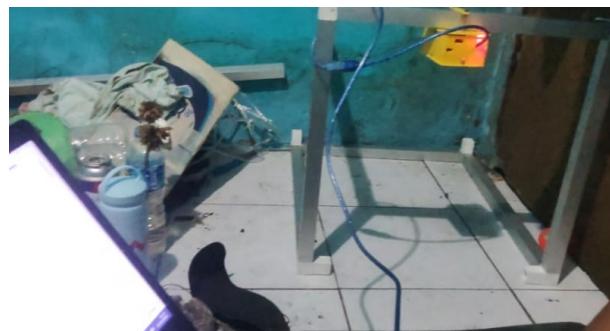
$$e = \frac{v_1}{v} \quad (\text{A.27})$$

$$e = \sqrt{\frac{2gh_1}{2gh}} \quad (\text{A.28})$$

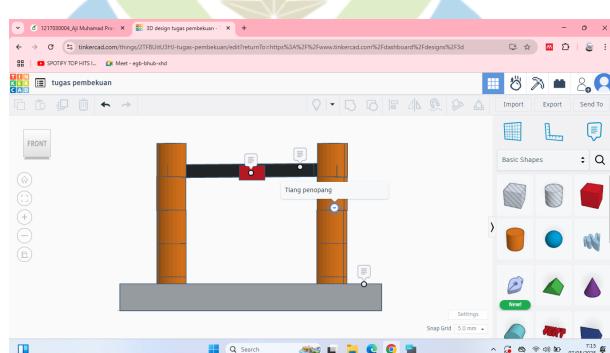
$$e = \sqrt{\frac{h_1}{h}} \quad (\text{A.29})$$

# LAMPIRAN B

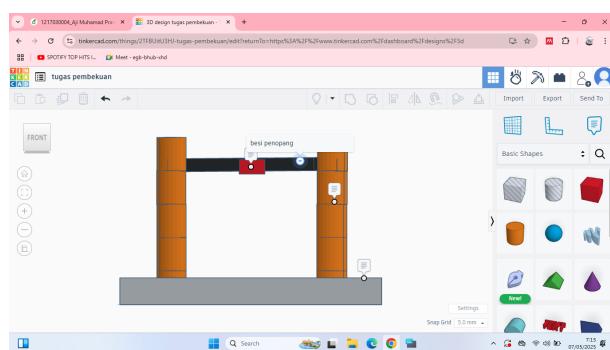
## DOKUMENTASI PENGAMBILAN DATA



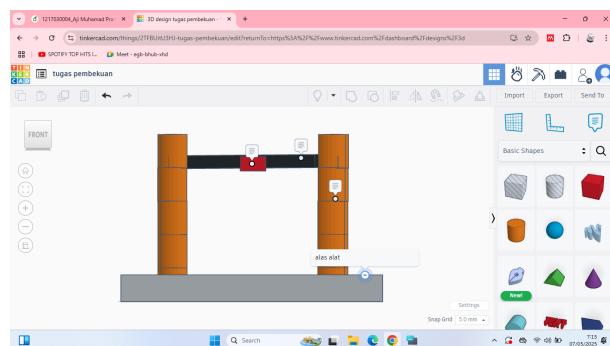
Gambar L.1: pengambilan data  
(Ajitot, 2024)



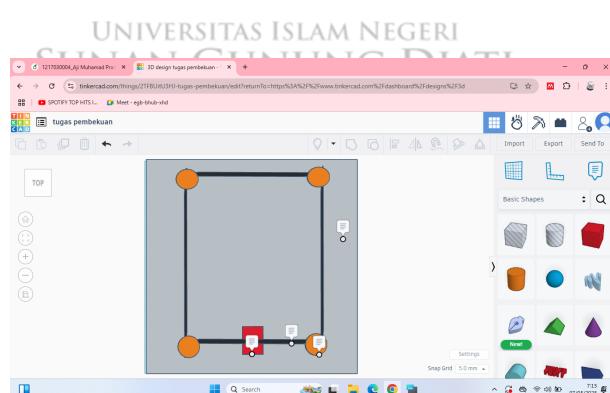
UNI Gambar L.2: Ilustrasi alat  
SUNAN GUNUNG DJATI  
BANDUNG



Gambar L.3: Ilustrasi alat



Gambar L.4: Ilustrasi alat (tampak depan)



Gambar L.5: Ilustrasi alat(tampak atas)

# LAMPIRAN C

## KODE PROGRAM

- arduino

```
#ifdef ESP32
#include <WiFi.h>
#define LED_BUILTIN 2
#elif defined(ESP8266)
#include <ESP8266WiFi.h>
#endif

#include <PubSubClient.h>
#include <ArduinoJson.h> // Tambahkan untuk JSON yang proper

// Update these with values suitable for your network.
const char* ssid = "Aji";
const char* password = "12345678";

// **MQTT Broker Cloud**
const char* mqtt_server = "broker.hivemq.com";
const int mqtt_port = 1883;

const char* mqtt_topic = "sensor/distance";
const char* mqtt_cmd_topic = "sensor/distance/cmd"; // Tambah topik untuk command

// HC-SR04 sensor pins
#ifndef ESP32
#define TRIG_PIN 14
#define ECHO_PIN 27
#else
#define TRIG_PIN D1
#define ECHO_PIN D2
#endif

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);
unsigned long lastSensorRead = 0;
unsigned long lastMqttReconnect = 0;
```

```

unsigned long lastWifiCheck = 0;
unsigned long program_start_time = 0; // Tambah untuk timestamp
unsigned long reading_start_time = 0; // PERBAIKAN: Tambah untuk
    reset waktu setiap START_READING

bool isReading = false; // PERBAIKAN: Mulai dengan false, tunggu
    command dari Python
unsigned long sensorInterval = 100; // PERBAIKAN: Ubah ke 100ms untuk
    realtime

// Improved HC-SR04 reading dengan filtering
long readDistance() {
    digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);

    long duration = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH, 30000); // Timeout 30ms
    if (duration == 0) return -1; // Timeout

    long distance = duration * 0.034 / 2;

    // Filter invalid readings
    if (distance < 2 || distance > 400) return -1;

    return distance;
}

void setup_wifi() {
    delay(10);
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    WiFi.begin(ssid, password);

    Serial.println();
    Serial.print("Connecting to ");
    Serial.println(ssid);

    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
}

```

```

randomSeed(micros());

Serial.println("");
Serial.println("WiFi connected");
Serial.print("IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
}

void checkWifiConnection() {
unsigned long now = millis();
if (now - lastWifiCheck > 10000) {
lastWifiCheck = now;
if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
Serial.println("WiFi disconnected, reconnecting...");
WiFi.begin(ssid, password);
}
}
}

void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
Serial.print("Message arrived [");
Serial.print(topic);
Serial.print("] ");

String message = "";
for (unsigned int i = 0; i < length; i++) {
message += (char)payload[i];
Serial.print((char)payload[i]);
}
Serial.println();

// Handle commands
if (message == "READ_DISTANCE") {
long distance = readDistance();
if (distance > 0) {
// PERBAIKAN: Kirim dengan format JSON yang proper
JsonDocument doc;
doc["timestamp"] = (millis() - reading_start_time) / 1000.0;
// PERBAIKAN: Gunakan reading_start_time
doc["distance"] = distance;
doc["device"] = "ESP8266_HCSR04";
doc["command_response"] = true;
}
}
}

```

```

        jsonString;
        serializeJson(doc, jsonString);
        client.publish(mqtt_topic, jsonString.c_str());
    }
}

else if (message == "START_READING") {
    isReading = true;
    reading_start_time = millis(); // PERBAIKAN: Reset waktu
    pembacaan ke 0
    Serial.println("Started continuous reading - timestamp reset to 0
");
}

else if (message == "STOP_READING") {
    isReading = false;
    Serial.println("Stopped continuous reading");
}

else if (message.startsWith("INTERVAL:")) {
    // Command untuk ubah interval: "INTERVAL:100"
    int newInterval = message.substring(9).toInt();
    if (newInterval >= 50 && newInterval <= 5000) {
        sensorInterval = newInterval;
        Serial.println("Interval changed to: " + String(newInterval) +
"ms");
    }
}

else if ((char)payload[0] == '1') {
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
} else {
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
}
}

void reconnectMQTT() {
    unsigned long now = millis();
    if (!client.connected() && (now - lastMqttReconnect > 5000)) {
        lastMqttReconnect = now;
        Serial.print("Attempting MQTT connection...");
    }

#ifdef ESP32
    String clientId = "ESP32Client-";
#elif defined(ESP8266)
    String clientId = "ESP8266Client-";
#endif
}

```

```

clientId += String(random(0xffff), HEX);

if (client.connect(clientId.c_str())) {
    Serial.println("connected");

    // PERBAIKAN: Send connection message dengan JSON
    JsonDocument doc;
    doc["timestamp"] = (millis() - program_start_time) / 1000.0;
    doc["message"] = "Device connected";
    doc["device"] = clientId;
    doc["status"] = "online";

    String jsonString;
    serializeJson(doc, jsonString);
    client.publish(mqtt_topic, jsonString.c_str());

    // Subscribe ke kedua topik: data dan command
    client.subscribe(mqtt_topic);
    client.subscribe(mqtt_cmd_topic);
    Serial.println("Subscribed to data and command topics");
} else {
    Serial.print("failed, rc=");
    Serial.print(client.state());
}
}

void setup() {
    pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
    pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
    pinMode(ECHO_PIN, INPUT);
    Serial.begin(115200);

    // PERBAIKAN: Catat waktu mulai program
    program_start_time = millis();
    reading_start_time = millis(); // PERBAIKAN: Inisialisasi
        reading_start_time

    setup_wifi();

    client.setServer(mqtt_server, mqtt_port);
    client.setCallback(callback);
}

```

```

    Serial.println("System initialized");
    Serial.println("Program start time: " + String(program_start_time))
    ;
    Serial.println("Waiting for START_READING command..."); // Tambah
        info
}

void loop() {
    client.loop();

    checkWifiConnection();
    reconnectMQTT();

    unsigned long now = millis();

    // PERBAIKAN: Sensor reading dengan JSON proper dan timestamp dari
        reading_start_time
    if (isReading && (now - lastSensorRead >= sensorInterval)) {
        lastSensorRead = now;

        long distance = readDistance();

        if (distance > 0 && client.connected()) {
            // PERBAIKAN: Format JSON yang sesuai dengan Python, timestamp
                dari reading_start_time
            JsonDocument doc;
            doc["timestamp"] = (now - reading_start_time) / 1000.0; // 
                PERBAIKAN: Timestamp dari 0 setiap START_READING
            doc["distance"] = distance;
            doc["device"] = "ESP32_HCSR04";
            doc["uptime"] = now;
            doc["reading_time"] = (now - reading_start_time) / 1000.0; // 
                PERBAIKAN: Tambah info waktu pembacaan

            String jsonString;
            serializeJson(doc, jsonString);

            if (client.publish(mqtt_topic, jsonString.c_str())) {
                Serial.println("Published: " + jsonString);
            } else {
                Serial.println("Failed to publish");
            }
        } else if (distance <= 0) {
    }
}

```

```

        Serial.println("Invalid distance reading");
    }
}

yield();
}

```

- **python**

```

import tkinter as tk
from tkinter import filedialog, messagebox, simpledialog, ttk
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
from matplotlib.figure import Figure
import pandas as pd
from scipy.signal import butter, filtfilt, find_peaks
import paho.mqtt.client as mqtt
import numpy as np
import json
import time
import os

# Global variables
time_data = []
distance_data = []
collecting = False
start_time = None
update_needed = False
sensor_height = 35 # cm
selected_ball_type = "Bola Bekel" # Default ball type

# Bounce detection parameters
bounce_threshold = 15.0 # minimum bounce height (cm) - PERBAIKAN:
                        dari 5.0 ke 15.0
min_bounce_distance = 1 # minimum distance between bounces (data
                        points)
min_height_difference = 0.1 # minimum height difference between
                            consecutive peaks (cm)

# MQTT Configuration - Compatible with ESP8266 and ESP32
MQTT_BROKER = "broker.hivemq.com" # Public broker for testing
MQTT_TOPIC = "sensor/distance"      # Generic topic name
MQTT_PORT = 1883
MQTT_KEEPALIVE = 60

```

```

# Initialize MQTT client - Compatible with both ESP versions
try:
    # Try new API first (for newer paho-mqtt versions)
    client = mqtt.Client(mqtt.CallbackAPIVersion.VERSION2)
except:
    # Fallback to old API (for older paho-mqtt versions)
    client = mqtt.Client()

# GUI components
root = None
fig = None
ax = None
canvas = None
status_label = None
data_count_label = None
latest_data_label = None
data_tree = None
analysis_text = None

bola = ["Bola Bekel", "Bola Tenis Meja", "Bola Tenis Lapang",
        "Bola Plastik", "Bola Sepak Karet"]

# Global variables untuk analisis
latest_analysis_text = ""

def lowpass_filter(data, cutoff=5, fs=20, order=4):
    """Apply low-pass filter to smooth distance data"""
    min_length = max(order * 6, 20)
    if len(data) < min_length:
        return data

    try:
        nyq = 0.5 * fs
        normal_cutoff = cutoff / nyq
        b, a = butter(order, normal_cutoff, btype='low', analog=False)
        return filtfilt(b, a, data)
    except ValueError as e:
        print(f"Filter error: {e}")
        return data

def detect_bounces(distance_data, time_data, min_height=None,
                   min_distance=None):

```

```

"""Detect ball bounce peaks (maximum heights) from distance data"""
"""

if len(distance_data) < 20:
    return [], []

# Use global parameters if not provided
if min_height is None:
    min_height = bounce_threshold
if min_distance is None:
    min_distance = min_bounce_distance

try:
    # Find peaks (maximum values) directly - no inversion needed
    peaks, properties = find_peaks(distance_data,
                                    height=min_height, # minimum peak height
                                    distance=min_distance, # minimum distance between
                                    peaks
                                    prominence=3.0) # PERBAIKAN: tingkatkan
                                                                # prominence dari 2.0 ke 3.0

    bounce_times = [time_data[p] for p in peaks if p < len(
        time_data)]
    bounce_distances = [distance_data[p] for p in peaks if p <
        len(distance_data)]

    # PERBAIKAN: Filter peaks berdasarkan selisih ketinggian
    # minimal 1 cm dan trend menurun
    filtered_times = []
    filtered_distances = []

    if bounce_distances:
        # Tambahkan puncak pertama
        filtered_times.append(bounce_times[0])
        filtered_distances.append(bounce_distances[0])

        # Filter puncak selanjutnya berdasarkan selisih
        # ketinggian dan trend menurun
        for i in range(1, len(bounce_distances)):
            height_diff = abs(bounce_distances[i] -
                               filtered_distances[-1])

```

```

# PERBAIKAN: Hanya tambahkan jika selisih ketinggian
# >= 1 cm DAN tinggi menurun (untuk pantulan alami)
if height_diff >= min_height_difference and
bounce_distances[i] <= filtered_distances[-1]:
    filtered_times.append(bounce_times[i])
    filtered_distances.append(bounce_distances[i])
elif bounce_distances[i] > filtered_distances[-1]:
    print(f"Puncak diabaikan: tinggi {
        bounce_distances[i]:.1f}cm > puncak sebelum {
        filtered_distances[-1]:.1f}cm (trend naik
        tidak wajar)")
else:
    print(f"Puncak diabaikan: tinggi {
        bounce_distances[i]:.1f}cm, selisih {
        height_diff:.1f}cm < {min_height_difference}cm
        ")

print(f"Detected {len(filtered_distances)} valid bounces at
heights: {[round(h, 1) for h in filtered_distances]}")

return filtered_times, filtered_distances
except Exception as e:
    print(f"Bounce detection error: {e}")
    return [], []

def set_ball_type():
    """Set ball type from dropdown"""
    global selected_ball_type, update_needed

    # Create dialog window
    dialog = tk.Toplevel(root)
    dialog.title("Pilih Jenis Bola")
    dialog.geometry("300x200")
    dialog.resizable(False, False)

    # Center the dialog
    dialog.transient(root)
    dialog.grab_set()

    # Create frame
    frame = tk.Frame(dialog)
    frame.pack(fill=tk.BOTH, expand=True, padx=20, pady=20)

```

```

tk.Label(frame, text="Pilih jenis bola yang akan diuji:",
         font=("Arial", 11, "bold")).pack(pady=(0, 10))

# Dropdown variable
ball_var = tk.StringVar(value=selected_ball_type)

# Create dropdown
ball_dropdown = ttk.Combobox(frame, textvariable=ball_var,
                               values=bola, state="readonly",
                               font=("Arial", 10), width=20)
ball_dropdown.pack(pady=(0, 20))

# Button frame
button_frame = tk.Frame(frame)
button_frame.pack(fill=tk.X)

def apply_selection():
    global selected_ball_type, update_needed
    selected_ball_type = ball_var.get()
    update_needed = True
    status_label.config(text=f"Status: Jenis bola diatur ke {selected_ball_type}", fg="blue")
    print(f"Jenis bola diubah ke: {selected_ball_type}")
    dialog.destroy()

def cancel_selection():
    dialog.destroy()

tk.Button(button_frame, text="Terapkan", command=apply_selection,
          bg="lightgreen", width=10, font=("Arial", 10)).pack(side=tk.LEFT, padx=(0, 10))
tk.Button(button_frame, text="Batal", command=cancel_selection,
          bg="lightcoral", width=10, font=("Arial", 10)).pack(side=tk.LEFT)

def calculate_restitution_coefficient():
    """Calculate coefficient of restitution from bounce data"""
    global latest_analysis_text

    if len(distance_data) < 10:
        messagebox.showwarning("Peringatan", "Tidak cukup data untuk menghitung koefisien\nMinimum diperlukan: 10 titik data")

```

```

    return

# PERBAIKAN: Validasi data sebelum analisis
if len(time_data) != len(distance_data):
    messagebox.showerror("Error", f"Ketidakcocokan data:\nWaktu: {len(time_data)}\nJarak: {len(distance_data)}")
    return

# PERBAIKAN: Cek adanya NaN atau Inf
if any(np.isnan(d) or np.isinf(d) for d in distance_data):
    messagebox.showerror("Error", "Data mengandung nilai tidak valid (NaN/Inf)")
    return

if any(np.isnan(t) or np.isinf(t) for t in time_data):
    messagebox.showerror("Error", "Data waktu mengandung nilai tidak valid (NaN/Inf)")
    return

try:
    # Use current data without additional filtering to preserve
    # bounce patterns
    filtered_data = distance_data
    bounce_times, bounce_distances = detect_bounces(filtered_data,
                                                    , time_data)

    if len(bounce_distances) < 2:
        messagebox.showwarning("Peringatan",
                               f"Perlu setidaknya 2 pantulan untuk menghitung koefisien\n"
                               f"Saat ini terdeteksi: {len(bounce_distances)} pantulan\n"
                               f"Coba sesuaikan pengaturan:\n"
                               f"- Ambang pantulan (saat ini: {bounce_threshold}cm)\n"
                               f"- Selisih tinggi minimum (saat ini : {min_height_difference}cm)\n"
                               f"CATATAN: Sistem otomatis mengabaikan puncak yang naik (tidak wajar)")

    return

# PERBAIKAN: Validasi tambahan untuk ketinggian pantulan dan

```

```

        trend menurun

valid_heights = [h for h in bounce_distances if h >=
    bounce_threshold]

# PERBAIKAN: Validasi trend menurun untuk pantulan natural
decreasing_trend = True
for i in range(1, len(bounce_distances)):
    if bounce_distances[i] > bounce_distances[i-1]:
        decreasing_trend = False
        break

if len(valid_heights) < 2:
    messagebox.showwarning("Peringatan",
                           f"Tidak cukup pantulan dengan
                           ketinggian minimal {
                           bounce_threshold}cm\n"
                           f"Pantulan terdeteksi: {len(
                           bounce_distances)}\n"
                           f"Pantulan valid (>= {
                           bounce_threshold}cm): {len(
                           valid_heights)}\n"
                           f"Trend menurun: {'Ya' if
                           decreasing_trend else 'Tidak'}\n"
                           f"Kurangi ambang pantulan atau
                           lakukan pengukuran ulang")
    return

# Calculate coefficients between consecutive bounces
heights = bounce_distances # Already ball heights from
    ground
coefficients = []
bounce_intervals = []

for i in range(1, len(heights)):
    if heights[i-1] >= bounce_threshold and heights[i] >=
        bounce_threshold: # PERBAIKAN: Validasi kedua
        ketinggian
        e = np.sqrt(heights[i] / heights[i-1])
        # PERBAIKAN: Validasi koefisien
        if not (np.isnan(e) or np.isinf(e)):
            coefficients.append(e)

    # Calculate time interval between bounces

```

```

        time_interval = bounce_times[i] - bounce_times[i
            -1]
        bounce_intervals.append(time_interval)

    if coefficients:
        # Statistical analysis
        avg_coefficient = np.mean(coefficients)
        std_coefficient = np.std(coefficients)
        min_coefficient = np.min(coefficients)
        max_coefficient = np.max(coefficients)

        # PERBAIKAN: Validasi hasil statistik
        if any(np.isnan([avg_coefficient, std_coefficient,
            min_coefficient, max_coefficient])):
            messagebox.showerror("Error", "Hasil perhitungan
                mengandung nilai tidak valid")
            return

        # Energy loss calculation
        energy_retention = avg_coefficient ** 2 # e = energy
            ratio
        energy_loss_percent = (1 - energy_retention) * 100

        # Material classification based on coefficient
        if avg_coefficient >= 0.9:
            material_type = "Super Ball / Elastisitas Tinggi"
            quality = "Sangat Baik"
        elif avg_coefficient >= 0.8:
            material_type = "Bola Karet / Elastisitas Baik"
            quality = "Baik Sekali"
        elif avg_coefficient >= 0.6:
            material_type = "Bola Tenis / Elastisitas Sedang"
            quality = "Baik"
        elif avg_coefficient >= 0.4:
            material_type = "Bola Lunak / Elastisitas Rendah"
            quality = "Cukup"
        else:
            material_type = "Material Sangat Lunak / Elastisitas
                Buruk"
            quality = "Buruk"

    # Format comprehensive results untuk tampilan di frame
    analisis

```

```

        latest_analysis_text = f"""
{'='*60}
    ANALISIS KOEFISIEN RESTITUSI - {selected_ball_type.upper()}
{'='*60}

PENGATURAN PENGUKURAN:
    Jenis Bola yang Diuji           : {selected_ball_type}
    Tinggi Sensor dari Lantai     : {sensor_height:.1f} cm
    Ambang Deteksi Pantulan       : {bounce_threshold:.1f} cm
    Selisih Tinggi Minimum         : {min_height_difference:.1f} cm
    Jarak Minimum Pantulan        : {min_bounce_distance} titik data
    Total Titik Data Terkumpul    : {len(distance_data)}
    Durasi Pengukuran              : {max(time_data):.2f} detik
    Waktu Mulai dari                : 0.00 detik (direset setiap mulai
)
{'='*60}

HASIL DETEKSI PANTULAN:
    Jumlah Pantulan Terdeteksi   : {len(heights)}
    Pantulan Valid (>= {bounce_threshold}cm) : {len(valid_heights)}
    Trend Menurun (Natural)       : {'Ya' if decreasing_trend else 'Tidak'}
    Tinggi Pantulan (cm)          : {', '.join([f'{h:.2f}' for h in
heights])}
    Waktu Pantulan (s)            : {', '.join([f'{t:.2f}' for t in
bounce_times])}
    Interval Waktu (s)            : {', '.join([f'{t:.3f}' for t in
bounce_intervals])}

{'='*60}

PERHITUNGAN KOEFISIEN:
"""

# Add individual coefficient calculations - PERBAIKAN:
    hanya untuk pantulan valid
valid_pairs = 0
for i, (e, h_before, h_after, dt) in enumerate(zip(
coefficients, heights[:-1], heights[1:], bounce_intervals)):
    if h_before >= bounce_threshold and h_after >=
bounce_threshold:
        valid_pairs += 1
        latest_analysis_text += f"  Pantulan {i+1}      {i

```

```

+2} (VALID - MENURUN) :\n"
latest_analysis_text += f" Tinggi: {h_before
:.2f} cm {h_after:.2f} cm\n"
latest_analysis_text += f" Penurunan: {
h_before - h_after:.2f} cm\n"
latest_analysis_text += f" Koefisien: e =
({h_after:.2f}/{h_before:.2f}) = {e:.3f}\n"
latest_analysis_text += f" Interval Waktu: {dt
:.3f} detik\n"
latest_analysis_text += f" Energi Tersisa: {(e
**2)*100:.1f}%\n\n"

else:
    latest_analysis_text += f" Pantulan {i+1} {i
+2} (DIABAIKAN) :\n"
    latest_analysis_text += f" Tinggi: {h_before
:.2f} cm {h_after:.2f} cm\n"
    latest_analysis_text += f" Alasan: Ketinggian
< {bounce_threshold}cm\n\n"

latest_analysis_text += f"""\n' '*60}

RINKKASAN STATISTIK:
    Pasangan Pantulan Valid : {valid_pairs} dari {len(heights)
-1} total
    Koefisien Rata-rata (e) : {avg_coefficient:.4f}
    Standar Deviasi : {std_coefficient:.4f}
    Koefisien Minimum : {min_coefficient:.4f}
    Koefisien Maksimum : {max_coefficient:.4f}
    Rentang Koefisien : {max_coefficient -
min_coefficient:.4f}

ANALISIS ENERGI:
    Retensi Energi Rata-rata : {energy_retention*100:.2f}%
    Kehilangan Energi Rata-rata : {energy_loss_percent:.2f}%
    Tingkat Disipasi Energi : {energy_loss_percent:.1f}% per
pantulan

' '*60}

KLASIFIKASI MATERIAL:
    Perkiraan Jenis Material : {material_type}
    Kualitas Pantulan : {quality}
    Rating Elastisitas : {avg_coefficient*100:.1f}%
' '*60}

```

```

HASIL UNTUK {selected_ball_type.upper()}:
    Koefisien Restitusi      : {avg_coefficient:.3f}
    Kualitas Pantulan        : {quality}
    Retensi Energi           : {energy_retention*100:.1f}%

{ '=' *60}

PERBANDINGAN TEORITIS:
    Tumbukan Elastis Sempurna : e = 1.000 (100% retensi energi)
    {selected_ball_type} Anda   : e = {avg_coefficient:.3f}
    ({energy_retention*100:.1f}% retensi energi)
    Tumbukan Inelastis Sempurna : e = 0.000 (0% retensi energi)

CATATAN FISIKA:
    Koefisien restitusi (e) mengukur elastisitas tumbukan
    e = 1: Tumbukan elastis sempurna (tanpa kehilangan energi)
    e = 0: Tumbukan inelastis sempurna (kehilangan energi maksimum)
    Material nyata umumnya memiliki  $0.1 < e < 0.95$ 
    Koefisien tinggi berarti karakteristik pantulan bola lebih baik

PENGATURAN FILTER:
    Tinggi minimum pantulan: {bounce_threshold}cm
    Selisih tinggi minimum: {min_height_difference}cm
    Filter trend menurun: AKTIF (mengabaikan puncak yang naik)
    Filter ini memastikan hanya pantulan natural yang dihitung

{ '=' *60}
Analisis {selected_ball_type} selesai pada: {time.strftime('%Y-%m-%d
%H:%M:%S') }
Waktu pengukuran: 0.00 - {max(time_data):.2f} detik
{ '=' *60}
"""

# Update tampilan analisis di frame
update_analysis_display()

# Show success message
messagebox.showinfo("Berhasil",
                    f"Analisis koefisien restitusi {
                      selected_ball_type} selesai!\n\n"
                    f"Pantulan valid: {valid_pairs} dari {
                      len(heights)} (trend menurun)\n"
                    f"Koefisien rata-rata: {avg_coefficient
                      :.3f}\n"

```

```

        f"Kualitas pantulan: {quality}\n"
        f"Retensi energi: {energy_retention
                      *100:.1f}%\n"
        f"Durasi pengukuran: {max(time_data):.2
                                f} detik\n\n"
        f"Hasil lengkap ditampilkan di panel
          Analisis Real-time")

    else:
        messagebox.showwarning("Peringatan", "Tidak dapat
                               menghitung koefisien\nTidak ditemukan pasangan
                               pantulan yang valid")

except Exception as e:
    messagebox.showerror("Error", f"Error menghitung koefisien:\n
                           {str(e)}\n\nSilakan periksa data dan pengaturan Anda")
    print(f"Calculation error details: {e}")

def on_connect(client, userdata, flags, reason_code, properties=None):
    """
    MQTT connection callback - compatible with ESP8266/ESP32"""
    if reason_code == 0:
        print("Terhubung ke MQTT Broker!")
        # Subscribe ke topik data untuk menerima sensor data saja
        client.subscribe(MQTT_TOPIC)
        # HAPUS subscription ke command topic untuk menghindari loop
        status_label.config(text="Status: Terhubung ke MQTT", fg="blue")
        print(f"Berlangganan ke: {MQTT_TOPIC}")
    else:
        print(f"Gagal terhubung, kode alasan {reason_code}")
        status_label.config(text="Status: Koneksi MQTT Gagal", fg="red")

def on_disconnect(client, userdata, flags, reason_code, properties=None):
    """
    MQTT disconnection callback"""
    print("Terputus dari MQTT Broker")
    status_label.config(text="Status: MQTT Terputus", fg="orange")

def on_message(client, userdata, msg):
    """
    Process incoming MQTT messages from ESP8266/ESP32"""
    global time_data, distance_data, collecting, start_time,

```

```

        update_needed, sensor_height

# Abaikan messages dari command topic untuk menghindari loop
if msg.topic.endswith("/cmd"):
    print(f"Mengabaikan echo perintah: {msg.payload.decode()}")
    return

if not collecting:
    return

try:
    # Try to parse as JSON first
    try:
        payload = json.loads(msg.payload.decode())
        print(f"Menerima JSON: {payload}")

        # Handle different message formats from ESP devices
        if isinstance(payload, dict):
            # Modern format with multiple fields
            t = payload.get("timestamp", payload.get("time", 0))
            d = payload.get("distance", payload.get("dist", 0))
            device = payload.get("device", payload.get("id", "ESP_Device"))

            # Handle status messages
            if "status" in payload or "error" in payload:
                print(f"pesan perangkat: {payload}")
                return
            else:
                print(f"Format payload tidak terduga: {payload}")
                return

        except json.JSONDecodeError:
            # Handle simple text format: "distance:25.4"
            msg_str = msg.payload.decode().strip()
            print(f"menerima teks: {msg_str}")

            if ":" in msg_str:
                parts = msg_str.split(":")
                if len(parts) == 2 and parts[0].lower() in ["distance", "dist"]:
                    try:
                        d = float(parts[1])

```

```

        t = 0
        device = "ESP_Text"
    except ValueError:
        print(f"Nilai jarak tidak valid: {parts[1]}")
        return
    else:
        print(f"Format teks tidak dikenal: {msg_str}")
        return
    else:
        # Try direct number
        try:
            d = float(msg_str)
            t = 0
            device = "ESP_Raw"
        except ValueError:
            print(f"Tidak dapat mengurai pesan: {msg_str}")
            return

    # PERBAIKAN: Validasi data yang lebih ketat
    if not isinstance(d, (int, float)) or d <= 0 or d > 400:
        print(f"Jarak di luar rentang: {d}")
        return

    if not isinstance(t, (int, float)) or t < 0:
        print(f"Timestamp tidak valid: {t}")
        if t < 0:
            t = 0 # Reset ke 0 jika negatif

    # Convert distance to ball height (sensor_height -
    # distance_reading)
    ball_height = sensor_height - d

    # Validate ball height (should be positive for bouncing ball)
    if ball_height < 0:
        print(f"Tinggi bola negatif: {ball_height:.1f}cm (sensor
              terlalu rendah?)")
        return

    # PERBAIKAN: Handle timestamp dengan reset ke 0 setiap mulai
    # baru
    if t > 0:
        # Use ESP provided timestamp, but adjust to start from 0
        if start_time is None:

```

```

        start_time = time.time()
    # Jika menggunakan timestamp ESP, pastikan dimulai dari 0
    current_time = float(t)
else:
    # Generate local timestamp starting from 0
    if start_time is None:
        start_time = time.time()
    current_time = time.time() - start_time

    # PERBAIKAN: Validasi final sebelum menyimpan
    if np.isnan(current_time) or np.isinf(current_time) or np.
        isnan(ball_height) or np.isinf(ball_height):
        print(f"Data mengandung NaN atau Inf, diabaikan")
        return

    # Store data (now storing ball height instead of raw distance
    )
    time_data.append(float(current_time))
    distance_data.append(float(ball_height))
    update_needed = True

    # Update GUI
    data_count_label.config(text=f"Jumlah Data: {len(
        distance_data)}")
    latest_data_label.config(text=f"Terbaru: {ball_height:.1f} cm
        @ {current_time:.2f}s [{device}]")

    print(f"Disimpan: Waktu={current_time:.2f}s, Tinggi Bola={
        ball_height:.1f}cm (Mentah={d:.1f}cm), Perangkat={device}""
        )

except Exception as e:
    print(f"Error memproses pesan: {e}")

def send_mqtt_command(command):
    """Send command to ESP8266/ESP32"""
    try:
        if client.is_connected():
            # Send to command topic
            command_topic = MQTT_TOPIC + "/cmd"
            result = client.publish(command_topic, command)
            print(f"Sent command to {command_topic}: {command}")
            print(f"Publish result: {result.rc}")
    
```

```

        status_label.config(text=f"Status: Command sent - {
            command}", fg="blue")
        return True
    else:
        print("MQTT not connected")
        messagebox.showwarning("Warning", "MQTT not connected")
        return False
except Exception as e:
    print(f"Error sending command: {e}")
    return False

def setup_mqtt():
    """Setup MQTT client with ESP8266/ESP32 compatibility"""
    try:
        # Set callbacks
        client.on_connect = on_connect
        client.on_message = on_message
        client.on_disconnect = on_disconnect

        print(f"Connecting to MQTT broker: {MQTT_BROKER}")
        client.connect(MQTT_BROKER, MQTT_PORT, MQTT_KEEPALIVE)
        client.loop_start()

    except Exception as e:
        print(f"MQTT Setup Error: {str(e)}")
        status_label.config(text="Status: MQTT Setup Failed", fg="red")

def start_collection():
    """Start data collection"""
    global collecting, start_time, update_needed
    collecting = True
    start_time = time.time() # PERBAIKAN: Reset start_time setiap kali mulai
    update_needed = True
    status_label.config(text="Status: Mengumpulkan Data", fg="green")

    # PERBAIKAN: Reset data waktu agar dimulai dari 0
    if time_data:
        print("Mereset waktu ke 0 untuk pembacaan baru")

    # Kirim perintah ke ESP untuk mulai
    send_mqtt_command("START_READING")

```

```

print("Pengumpulan data dimulai - waktu direset ke 0")

def stop_collection():
    """Stop data collection"""
    global collecting, update_needed
    collecting = False
    update_needed = True
    status_label.config(text="Status: Berhenti", fg="red")

    # Kirim perintah ke ESP untuk berhenti
    send_mqtt_command("STOP_READING")
    print("Pengumpulan data dihentikan")

    # Auto-calculate coefficient setelah pengumpulan data selesai
    if len(distance_data) >= 10:
        print("Menghitung koefisien restitusi otomatis...")
        root.after(1000, calculate_restitution_coefficient) # Delay
            1 detik untuk memastikan plot terupdate

def reset_data():
    """Reset all collected data"""
    global time_data, distance_data, start_time, update_needed,
        latest_analysis_text
    time_data.clear()
    distance_data.clear()
    start_time = None
    update_needed = True
    latest_analysis_text = "" # PERBAIKAN: Reset hasil analisis juga

    data_count_label.config(text="Jumlah Data: 0")
    latest_data_label.config(text="Terbaru: -")
    status_label.config(text="Status: Data Direset", fg="blue")
    update_plot()
    update_analysis_display() # PERBAIKAN: Update display analisis
        setelah reset
    print("Data dan hasil analisis telah direset.")

def update_data_table():
    """Update the data table with latest measurements"""
    global data_tree

    try:
        # Clear existing items

```

```

        for item in data_tree.get_children():
            data_tree.delete(item)

        # PERBAIKAN: Validasi data sebelum menampilkan
        if not time_data or not distance_data:
            return

        if len(time_data) != len(distance_data):
            print(f"Warning: Data length mismatch - time: {len(
                time_data)}, distance: {len(distance_data)}")
            return

        # Add latest 50 data points (or all if less than 50)
        start_idx = max(0, len(time_data) - 50)

        for i in range(start_idx, len(time_data)):
            try:
                # PERBAIKAN: Validasi setiap data point
                if i < len(time_data) and i < len(distance_data):
                    t = time_data[i]
                    d = distance_data[i]

                    # Validasi tipe data
                    if isinstance(t, (int, float)) and isinstance(d,
                        (int, float)):
                        if not (np.isnan(t) or np.isnan(d) or np.
                            isnan(t) or np.isinf(d)):
                            raw_distance = sensor_height - d

                            data_tree.insert('', 'end', values=(

                                i + 1,
                                f"{float(t):.2f}",
                                f"{float(d):.1f}",
                                f"{float(raw_distance):.1f}"
                            ))
            except Exception as e:

```

```

        print(f"Error processing data point {i}: {e}")
        continue

    # Scroll to bottom
    if data_tree.get_children():
        data_tree.see(data_tree.get_children()[-1])

except Exception as e:
    print(f"Error updating data table: {e}")

def save_analysis_to_file():
    """Save analysis results to file"""
    global latest_analysis_text

    if not latest_analysis_text:
        messagebox.showwarning("Peringatan", "Tidak ada hasil
                               analisis untuk disimpan.\nSilakan hitung koefisien
                               restitusi terlebih dahulu.")
        return

    try:
        # Generate filename with ball type and timestamp
        timestamp = time.strftime("%Y%m%d_%H%M%S")
        ball_name = selected_ball_type.replace(" ", "_").replace("/", "_")  # PERBAIKAN: Hapus karakter invalid
        default_filename = f"Analisis_{ball_name}_{timestamp}.txt"

        file_path = filedialog.asksaveasfilename(
            defaultextension=".txt",
            filetypes=[("File Teks", "*.txt"), ("File CSV", "*.csv"),
                       ("Semua file", "*.*")],  # PERBAIKAN: Tambah format
            CSV
            title="Simpan Hasil Analisis",
            initialdir=os.getcwd(),
            initialfile=default_filename
        )

        if file_path:
            # PERBAIKAN: Validasi dan bersihkan teks analisis
            clean_analysis_text = latest_analysis_text

            # Ganti karakter yang bermasalah
            clean_analysis_text = clean_analysis_text.replace('\x00',

```

```

        '') # Hapus null character
clean_analysis_text = clean_analysis_text.replace('\r\n',
        '\n') # Standardize line endings
clean_analysis_text = clean_analysis_text.replace('\r', '\n')

# PERBAIKAN: Tulis dengan encoding UTF-8 dan error
# handling
with open(file_path, 'w', encoding='utf-8', errors='replace') as f:
    f.write(clean_analysis_text)

messagebox.showinfo("Berhasil", f"Hasil analisis {selected_ball_type} disimpan ke {file_path}")

except Exception as e:
    messagebox.showerror("Error", f"Gagal menyimpan file analisis :\n{str(e)}")
    print(f"Analysis save error details: {e}")

def update_analysis_display():
    """Update the analysis display with current statistics"""
    global analysis_text, latest_analysis_text

    if len(distance_data) < 2:
        analysis_info = "Tidak ada data tersedia untuk analisis"
    else:
        # Check if we have detailed analysis results
        if latest_analysis_text:
            analysis_info = latest_analysis_text
        else:
            # Basic statistics jika belum ada analisis koefisien
            min_height = min(distance_data)
            max_height = max(distance_data)
            avg_height = np.mean(distance_data)
            std_height = np.std(distance_data)

            # Bounce detection
            bounce_times, bounce_distances = detect_bounces(
                distance_data, time_data)

            # Calculate coefficient if possible
            coefficients = []

```

```

        if len(bounce_distances) >= 2:
            for i in range(1, len(bounce_distances)):
                if bounce_distances[i-1] > 0:
                    e = np.sqrt(bounce_distances[i] /
                                bounce_distances[i-1])
                    coefficients.append(e)

    analysis_info = f"""ANALISIS REAL-TIME - {
        selected_ball_type.upper()}"""

{="#"*30}

JENIS BOLA: {selected_ball_type}

STATISTIK DATA:
    Jumlah Data: {len(distance_data)}
    Durasi: {max(time_data) if time_data else 0:.1f}s
    Tinggi Min: {min_height:.1f} cm
    Tinggi Max: {max_height:.1f} cm
    Tinggi Rata-rata: {avg_height:.1f} cm
    Standar Deviasi: {std_height:.1f} cm

DETEKSI PANTULAN:
    Ambang Batas: {bounce_threshold:.1f} cm
    Pantulan Ditemukan: {len(bounce_distances)}
    Tinggi Pantulan: {[f"{h:.1f}" for h in bounce_distances
    [:5]]}'...' if len(bounce_distances) > 5 else ''}

ANALISIS KOEFISIEN:
    Pasangan Valid: {len(coefficients)}
    Koefisien Rata-rata: {np.mean(coefficients):.3f if coefficients
    else 'N/A'}
    Retensi Energi: {np.mean(coefficients)**2*100 if coefficients
    else 0:.1f}%

PENGATURAN:
    Tinggi Sensor: {sensor_height:.1f} cm
    Jarak Min: {min_bounce_distance}
    Pengumpulan: {'Aktif' if collecting else 'Berhenti'}

CATATAN:
Klik "Hitung Koefisien Restitusi" untuk
analisis lengkap dan detail perhitungan.

"""

```

```

# Update analysis text widget
analysis_text.config(state=tk.NORMAL)
analysis_text.delete(1.0, tk.END)
analysis_text.insert(1.0, analysis_info)
analysis_text.config(state=tk.DISABLED)

def update_plot():
    """Update the matplotlib plot"""
    try:
        if len(time_data) == 0:
            ax.clear()
            ax.set_xlabel("Waktu (detik)")
            ax.set_ylabel("Tinggi Bola (cm)")
            ax.set_title(f"Pengukuran Tinggi {selected_ball_type} Real-time")
            ax.grid(True, alpha=0.3)
            canvas.draw_idle()
        return

        ax.clear()

        # Apply filter if enough data
        if len(distance_data) > 20:
            filtered = lowpass_filter(distance_data)
        else:
            filtered = distance_data

        # Plot main line
        ax.plot(time_data, filtered, 'b-', label=f"Tinggi {selected_ball_type}", linewidth=2)

        # Show bounces if enough data
        if len(filtered) > 20:
            bounce_times, bounce_distances = detect_bounces(filtered,
                time_data,
                bounce_threshold,
                ,
                min_bounce_c
            )

            if bounce_times and bounce_distances:
                ax.plot(bounce_times, bounce_distances, "ro", label=f"Puncak Pantulan", markersize=8)

```

```

        # Add height annotations on peaks
        for i, (bt, bd) in enumerate(zip(bounce_times,
                                         bounce_distances)):
            ax.annotate(f'{bd:.1f}', (bt, bd),
                        textcoords="offset points", xytext
                        =(0,10), ha='center',
                        fontsize=8, color='red', weight='bold'
                        )

    ax.set_xlabel("Waktu (detik)")
    ax.set_ylabel("Tinggi Bola (cm)")
    ax.set_title(f"Monitor Tinggi {selected_ball_type} (Sensor: {sensor_height}cm, Ambang: {bounce_threshold}cm)")
    ax.legend(loc='upper right')
    ax.grid(True, alpha=0.3)

    # Set axis limits
    if len(time_data) > 1:
        time_range = max(max(time_data) - min(time_data), 1)
        x_margin = time_range * 0.05
        ax.set_xlim(min(time_data) - x_margin, max(time_data) +
                    x_margin)

    if len(filtered) > 1:
        dist_range = max(max(filtered) - min(filtered), 5)
        y_margin = dist_range * 0.1
        ax.set_ylim(max(0, min(filtered) - y_margin), max(
            filtered) + y_margin)

    canvas.draw_idle()

    # Update other displays
    update_data_table()
    update_analysis_display()

except Exception as e:
    print(f"Plot update error: {e}")

def periodic_update():
    """Periodic update for real-time display"""
    global update_needed

```

```

try:
    if update_needed and len(time_data) >= 0:
        update_plot()
        update_needed = False

    root.update_idletasks()

except Exception as e:
    print(f"Periodic update error: {e}")

# Schedule next update
interval = 50 if collecting or len(time_data) > 0 else 200
root.after(interval, periodic_update)

def set_interval():
    """Set sensor reading interval"""
    try:
        interval = simpledialog.askinteger("Atur Interval",
                                            "Masukkan interval dalam
                                            milidetik (50-5000):",
                                            initialvalue=100, minvalue
                                            =50, maxvalue=5000)
        if interval:
            send_mqtt_command(f"INTERVAL:{interval}")
    except Exception as e:
        print(f"Error setting interval: {e}")

def set_sensor_height():
    """Set sensor height from ground"""
    global sensor_height, update_needed
    try:
        new_height = simpledialog.askfloat("Atur Tinggi Sensor",
                                           f"Masukkan tinggi sensor
                                           dari lantai (cm):\nSaat
                                           ini: {sensor_height}cm",
                                           initialvalue=sensor_height,
                                           minvalue=10, maxvalue
                                           =200)
        if new_height:
            sensor_height = new_height
            update_needed = True
            status_label.config(text=f"Status: Tinggi sensor diatur
                                      ke {sensor_height}cm", fg="blue")
    except Exception as e:
        print(f"Error setting sensor height: {e}")

```

```

        print(f"Tinggi sensor diubah ke: {sensor_height}cm")
    except Exception as e:
        print(f"Error setting sensor height: {e}")

def set_bounce_threshold():
    """Set bounce detection threshold"""
    global bounce_threshold, update_needed
    try:
        new_threshold = simpledialog.askfloat("Atur Ambang Pantulan",
                                              f"Masukkan tinggi minimum
                                              pantulan (cm):\nSaat
                                              ini: {bounce_threshold
                                              }cm",
                                              initialvalue=
                                              bounce_threshold,
                                              minvalue=1.0, maxvalue
                                              =50.0)
        if new_threshold:
            bounce_threshold = new_threshold
            update_needed = True
            status_label.config(text=f"Status: Ambang pantulan diatur
                                         ke {bounce_threshold}cm", fg="blue")
            print(f"Ambang pantulan diubah ke: {bounce_threshold}cm")
    except Exception as e:
        print(f"Error setting bounce threshold: {e}")

def set_min_height_difference():
    """Set minimum height difference between consecutive peaks"""
    global min_height_difference, update_needed
    try:
        new_diff = simpledialog.askfloat("Atur Selisih Tinggi Minimum
                                         ",
                                         f"Masukkan selisih tinggi
                                         minimum antar puncak (cm):\nSaat
                                         ini: {
                                         min_height_difference}cm",
                                         initialvalue=
                                         min_height_difference,
                                         minvalue=0.1, maxvalue
                                         =10.0)
        if new_diff:
            min_height_difference = new_diff
            update_needed = True

```

```

        status_label.config(text=f"Status: Selisih tinggi minimum
                                diatur ke {min_height_difference}cm", fg="blue")
        print(f"Selisih tinggi minimum diubah ke: {
                                min_height_difference}cm")
    except Exception as e:
        print(f"Error setting min height difference: {e}")

def set_min_bounce_distance():
    """Set minimum distance between bounces"""
    global min_bounce_distance, update_needed
    try:
        new_distance = simpledialog.askinteger("Atur Jarak Minimum
                                                Pantulan",
                                                f"Masukkan jarak minimum
                                                antar pantulan (
                                                titik data):\nSaat
                                                ini: {
                                                min_bounce_distance}"
                                                ,
                                                initialvalue=
                                                min_bounce_distance,
                                                minvalue=1, maxvalue
                                                =100)
        if new_distance:
            min_bounce_distance = new_distance
            update_needed = True
            status_label.config(text=f"Status: Jarak minimum pantulan
                                diatur ke {min_bounce_distance}", fg="blue")
            print(f"Jarak minimum pantulan diubah ke: {
                                min_bounce_distance}")
    except Exception as e:
        print(f"Error setting min bounce distance: {e}")

def save_excel():
    """Save collected data to an Excel file."""
    if not time_data or not distance_data:
        messagebox.showwarning("Peringatan", "Tidak ada data untuk
                                disimpan.")
    return

# PERBAIKAN: Validasi data sebelum menyimpan
if len(time_data) != len(distance_data):
    messagebox.showerror("Error", f"Ketidakcocokan jumlah data:\\"
```

```

nWaktu: {len(time_data)}\nJarak: {len(distance_data)}")
return

try:
    # Generate filename with ball type and timestamp
    timestamp = time.strftime("%Y%m%d_%H%M%S")
    ball_name = selected_ball_type.replace(" ", "_").replace("/", "_") # PERBAIKAN: Hapus karakter invalid
    default_filename = f"Data_{ball_name}_{timestamp}.xlsx"

    file_path = filedialog.asksaveasfilename(
        defaultextension=".xlsx",
        filetypes=[("File Excel", "*.xlsx")],
        title="Simpan Data ke Excel",
        initialdir=os.getcwd(), # PERBAIKAN: Simpan di direktori kerja saat ini
        initialfile=default_filename
    )

    if file_path:
        # PERBAIKAN: Validasi dan bersihkan data
        clean_time_data = []
        clean_distance_data = []
        clean_sensor_heights = []
        clean_ball_types = []

        for i, (t, d) in enumerate(zip(time_data, distance_data)):
            :
                # Validasi setiap data point
                if isinstance(t, (int, float)) and isinstance(d, (int, float)):
                    if not (np.isnan(t) or np.isnan(d) or np.isinf(t) or np.isinf(d)):
                        clean_time_data.append(float(t))
                        clean_distance_data.append(float(d))
                        clean_sensor_heights.append(float(sensor_height))
                        clean_ball_types.append(str(selected_ball_type))
                else:
                    print(f"Data point {i} diabaikan: nilai tidak valid (NaN/Inf)")
            else:

```

```

        print(f"Data point {i} diabaikan: tipe data tidak
              valid")

    if not clean_time_data:
        messagebox.showerror("Error", "Tidak ada data valid
                             untuk disimpan.")
        return

    # PERBAIKAN: Buat DataFrame dengan data yang sudah
    # dibersihkan
    df = pd.DataFrame({
        "Waktu (detik)": clean_time_data,
        f"Tinggi {selected_ball_type} (cm)": clean_distance_data,
        "Tinggi Sensor (cm)": clean_sensor_heights,
        "Jenis Bola": clean_ball_types
    })

    # PERBAIKAN: Validasi DataFrame sebelum menyimpan
    if df.empty:
        messagebox.showerror("Error", "DataFrame kosong,
                            tidak dapat menyimpan.")
        return

    df.to_excel(file_path, index=False, engine='openpyxl')
    messagebox.showinfo("Berhasil", f"Data {
        selected_ball_type} disimpan ke {file_path}\nTotal
        data valid: {len(clean_time_data)}")

except Exception as e:
    messagebox.showerror("Error", f"Gagal menyimpan data ke Excel
                         :\n{str(e)}\n\nPastikan file tidak sedang dibuka di
                         aplikasi lain.")
    print(f"Excel save error details: {e}")

def save_png():
    """Save the current plot as a PNG file."""
    try:
        # PERBAIKAN: Validasi plot sebelum menyimpan
        if fig is None or ax is None:
            messagebox.showerror("Error", "Grafik belum tersedia
                                untuk disimpan.")
            return

```

```

# Generate filename with ball type and timestamp
timestamp = time.strftime("%Y%m%d_%H%M%S")
ball_name = selected_ball_type.replace(" ", "_").replace("/", "_") # PERBAIKAN: Hapus karakter invalid
default_filename = f"Grafik_{ball_name}_{timestamp}.png"

file_path = filedialog.asksaveasfilename(
    defaultextension=".png",
    filetypes=[("File PNG", "*.png"), ("File JPG", "*.jpg"),
               ("File PDF", "*.pdf")], # PERBAIKAN: Tambah format lain
    title="Simpan Grafik",
    initialdir=os.getcwd(), # PERBAIKAN: Simpan di direktori kerja saat ini
    initialfile=default_filename
)

if file_path:
    # PERBAIKAN: Update plot sebelum menyimpan
    update_plot()

    # PERBAIKAN: Simpan dengan parameter yang lebih aman
    fig.savefig(file_path,
                dpi=300,
                bbox_inches='tight',
                facecolor='white', # PERBAIKAN: Background putih
                edgecolor='none', # PERBAIKAN: Tanpa border
                format=None) # PERBAIKAN: Auto-detect format

    messagebox.showinfo("Berhasil", f"Grafik {selected_ball_type} disimpan ke {file_path}")

except Exception as e:
    messagebox.showerror("Error", f"Gagal menyimpan grafik:\n{str(e)}")
    print(f"PNG save error details: {e}")

def close_app():
    """Handle application close event"""
    try:

```

```

        if client.is_connected():
            client.loop_stop()
            client.disconnect()
    except Exception as e:
        print(f"Error during disconnect: {e}")
    if root is not None:
        root.destroy()

def refresh_plot_manually():
    """Manually refresh the plot."""
    update_plot()

def setup_gui():
    """Initialize GUI components with improved 2-row layout"""
    global root, fig, ax, canvas, status_label, data_count_label,
           latest_data_label
    global data_tree, analysis_text

    root = tk.Tk()
    root.title(f"Monitor Tinggi Bola HC-SR04 - {selected_ball_type}")
    root.protocol("WM_DELETE_WINDOW", close_app)

    # Set fullscreen
    root.state('zoomed')  # Windows fullscreen
    # Alternative for other OS: root.attributes('-zoomed', True)

    # Configure grid weights for responsive design
    root.grid_rowconfigure(0, weight=0)  # Title row
    root.grid_rowconfigure(1, weight=1)  # Main content row
    root.grid_rowconfigure(2, weight=0)  # Control buttons row
    root.grid_columnconfigure(0, weight=1)

    # =====
    # BARIS 0: JUDUL UTAMA
    # =====
    title_frame = tk.Frame(root, bg="navy", relief=tk.RAISED, bd=2)
    title_frame.grid(row=0, column=0, sticky="ew", padx=5, pady=5)

    title_label = tk.Label(title_frame,
                           text="Analisis Koefisien Restitusi - Aji
                                 Muhamad Pranata (1217030004)",
                           font=("Arial", 16, "bold"),
                           fg="white", bg="navy", pady=10)

```

```

title_label.pack()

# =====
# BARIS 1: KONTEN UTAMA (3 KOLOM)
# =====
main_frame = tk.Frame(root, relief=tk.RAISED, bd=1)
main_frame.grid(row=1, column=0, sticky="nsew", padx=5, pady=5)

# Configure main frame grid
main_frame.grid_rowconfigure(0, weight=1)
main_frame.grid_columnconfigure(0, weight=2) # Plot gets more space
main_frame.grid_columnconfigure(1, weight=1) # Data table
main_frame.grid_columnconfigure(2, weight=1) # Analysis

# -----
# KOLOM 1: BAGIAN GRAFIK
# -----
plot_frame = tk.LabelFrame(main_frame, text=f"Grafik Real-time - {selected_ball_type}", font=("Arial", 12, "bold"))
plot_frame.grid(row=0, column=0, sticky="nsew", padx=5, pady=5)

# Setup matplotlib
fig = Figure(figsize=(10, 8), dpi=100)
ax = fig.add_subplot(111)
ax.set_xlabel("Waktu (detik)")
ax.set_ylabel("Tinggi Bola (cm)")
ax.set_title(f"Pengukuran Tinggi {selected_ball_type} Real-time")
ax.grid(True, alpha=0.3)

canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=plot_frame)
canvas.get_tk_widget().pack(fill=tk.BOTH, expand=True, padx=5, pady=5)

# -----
# KOLOM 2: BAGIAN TABEL DATA
# -----
table_frame = tk.LabelFrame(main_frame, text="Tabel Data (50 Terakhir)", font=("Arial", 12, "bold"))
table_frame.grid(row=0, column=1, sticky="nsew", padx=5, pady=5)

# Create treeview for data table
table_container = tk.Frame(table_frame)

```

```

table_container.pack(fill=tk.BOTH, expand=True, padx=5, pady=5)

# Scrollbars for table
v_scrollbar = tk.Scrollbar(table_container, orient="vertical")
h_scrollbar = tk.Scrollbar(table_container, orient="horizontal")

# Data table
columns = ('Indeks', 'Waktu (s)', 'Tinggi (cm)', 'Jarak Mentah (cm)')
data_tree = ttk.Treeview(table_container, columns=columns, show='headings',
                        yscrollcommand=v_scrollbar.set,
                        xscrollcommand=h_scrollbar.set)

# Configure columns
data_tree.heading('Indeks', text='#')
data_tree.heading('Waktu (s)', text='Waktu (s)')
data_tree.heading('Tinggi (cm)', text='Tinggi (cm)')
data_tree.heading('Jarak Mentah (cm)', text='Jarak Mentah (cm)')

data_tree.column('Indeks', width=60)
data_tree.column('Waktu (s)', width=90)
data_tree.column('Tinggi (cm)', width=100)
data_tree.column('Jarak Mentah (cm)', width=120)

# Pack table and scrollbars
v_scrollbar.pack(side="right", fill="y")
h_scrollbar.pack(side="bottom", fill="x")
data_tree.pack(side="left", fill="both", expand=True)

v_scrollbar.config(command=data_tree.yview)
h_scrollbar.config(command=data_tree.xview)

# -----
# KOLOM 3: BAGIAN ANALISIS
# -----
analysis_frame = tk.LabelFrame(main_frame, text=f"Analisis Real-time & Hasil Koefisien - {selected_ball_type}", font=("Arial", 12, "bold"))
analysis_frame.grid(row=0, column=2, sticky="nsew", padx=5, pady=5)

# Analysis text widget with scrollbar

```

```

analysis_container = tk.Frame(analysis_frame)
analysis_container.pack(fill=tk.BOTH, expand=True, padx=5, pady=5)

analysis_scrollbar = tk.Scrollbar(analysis_container)
analysis_scrollbar.pack(side="right", fill="y")

analysis_text = tk.Text(analysis_container, yscrollcommand=
    analysis_scrollbar.set,
    font=("Courier", 9), wrap=tk.WORD, state=tk.DISABLED)
analysis_text.pack(side="left", fill="both", expand=True)
analysis_scrollbar.config(command=analysis_text.yview)

# =====
# BARIS 2: TOMBOL KONTROL (BEBERAPA BARIS)
# =====
control_frame = tk.Frame(root, relief=tk.RAISED, bd=1)
control_frame.grid(row=2, column=0, sticky="ew", padx=5, pady=5)

# Status row
status_frame = tk.Frame(control_frame)
status_frame.pack(fill=tk.X, padx=5, pady=2)

status_label = tk.Label(status_frame, text="Status: Berhenti",
    font=("Arial", 14, "bold"))
status_label.pack(side=tk.LEFT)

latest_data_label = tk.Label(status_frame, text="Terbaru: -",
    font=("Arial", 12))
latest_data_label.pack(side=tk.LEFT, padx=20)

data_count_label = tk.Label(status_frame, text="Jumlah Data: 0",
    font=("Arial", 12))
data_count_label.pack(side=tk.RIGHT)

# Configuration row
config_frame = tk.LabelFrame(control_frame, text="Konfigurasi",
    font=("Arial", 11, "bold"))
config_frame.pack(fill=tk.X, padx=5, pady=3)

tk.Button(config_frame, text=f"Jenis Bola: {selected_ball_type}",
```

```

        command=set_ball_type, bg="lightblue", width=20, font=( "Arial", 10, "bold")).pack(side=tk.LEFT, padx=3, pady =3)
    tk.Button(config_frame, text=f"Tinggi Sensor: {sensor_height}cm",
              command=set_sensor_height, bg="lightgray", width=18,
              font=( "Arial", 10)).pack(side=tk.LEFT, padx=3, pady =3)
    tk.Button(config_frame, text=f"Ambang Pantulan: {bounce_threshold }cm",
              command=set_bounce_threshold, bg="lightyellow", width =20, font=( "Arial", 10)).pack(side=tk.LEFT, padx=3,
              pady=3)

    tk.Button(config_frame, text=f"Selisih Tinggi Min: {
min_height_difference}cm",
              command=set_min_height_difference, bg="lightpink", width =20, font=( "Arial", 10)).pack(side=tk.LEFT, padx=3,
              pady=3)
    tk.Button(config_frame, text=f"Jarak Min: {min_bounce_distance}", command=set_min_bounce_distance, bg="lightcyan", width =15, font=( "Arial", 10)).pack(side=tk.LEFT, padx=3,
              pady=3)

# Main control row
main_control_frame = tk.LabelFrame(control_frame, text="Kontrol Utama", font=( "Arial", 11, "bold"))
main_control_frame.pack(fill=tk.X, padx=5, pady=3)

tk.Button(main_control_frame, text="Mulai Pengumpulan", command=start_collection,
          bg="lightgreen", width=15, font=( "Arial", 10, "bold")).pack(side=tk.LEFT, padx=3, pady=3)
tk.Button(main_control_frame, text="Hentikan Pengumpulan",
          command=stop_collection,
          bg="lightcoral", width=18, font=( "Arial", 10, "bold")).pack(side=tk.LEFT, padx=3, pady=3)
tk.Button(main_control_frame, text="Reset Data", command=reset_data,
          bg="lightyellow", width=12, font=( "Arial", 10)).pack(side=tk.LEFT, padx=3, pady=3)
tk.Button(main_control_frame, text="Refresh Grafik", command=refresh_plot_manually,
          bg="lightcyan", width=12, font=( "Arial", 10)).pack(side=tk.LEFT, padx=3, pady=3)

```

```

        tk.LEFT, padx=3, pady=3)

# Analysis and export row
analysis_control_frame = tk.LabelFrame(control_frame, text=""
    Analisis & Ekspor", font=("Arial", 11, "bold"))
analysis_control_frame.pack(fill=tk.X, padx=5, pady=3)

tk.Button(analysis_control_frame, text="Hitung Koefisien
    Restitusi", command=calculate_restitution_coefficient,
        bg="orange", width=20, font=("Arial", 10, "bold")).pack(
            side=tk.LEFT, padx=3, pady=3)
tk.Button(analysis_control_frame, text="Simpan Hasil Analisis",
    command=save_analysis_to_file,
        bg="lightgreen", width=15, font=("Arial", 10)).pack(side=
            tk.LEFT, padx=3, pady=3)
tk.Button(analysis_control_frame, text="Simpan Data (Excel)",
    command=save_excel,
        bg="lightblue", width=15, font=("Arial", 10)).pack(side=
            tk.LEFT, padx=3, pady=3)
tk.Button(analysis_control_frame, text="Simpan Grafik (PNG)",
    command=save_png,
        bg="lightblue", width=15, font=("Arial", 10)).pack(side=
            tk.LEFT, padx=3, pady=3)

# ESP control row
esp_control_frame = tk.LabelFrame(control_frame, text="Kontrol
    ESP8266/ESP32", font=("Arial", 11, "bold"))
esp_control_frame.pack(fill=tk.X, padx=5, pady=3)

tk.Button(esp_control_frame, text="Mulai Pembacaan ESP", command=
    lambda: send_mqtt_command("START_READING"),
        bg="lightgreen", width=18, font=("Arial", 10)).pack(side
            =tk.LEFT, padx=3, pady=3)
tk.Button(esp_control_frame, text="Hentikan Pembacaan ESP",
    command=lambda: send_mqtt_command("STOP_READING"),
        bg="lightcoral", width=20, font=("Arial", 10)).pack(side
            =tk.LEFT, padx=3, pady=3)
tk.Button(esp_control_frame, text="Minta Jarak", command=lambda:
    send_mqtt_command("READ_DISTANCE"),
        bg="lightyellow", width=12, font=("Arial", 10)).pack(
            side=tk.LEFT, padx=3, pady=3)
tk.Button(esp_control_frame, text="Atur Interval", command=
    set_interval,

```

```

        bg="lightcyan", width=12, font=("Arial", 10)).pack(side=
tk.LEFT, padx=3, pady=3)

# Exit button
tk.Button(esp_control_frame, text="Keluar Aplikasi", command=
close_app,
          bg="lightgray", width=15, font=("Arial", 10, "bold")).pack(side=tk.RIGHT, padx=3, pady=3)

# Initialize displays
update_analysis_display()

def main():
    """Main application entry point"""
    print("== Monitor Tinggi Bola HC-SR04 ==")
    print("Kompatibel dengan ESP8266 dan ESP32")
    print(f"MQTT Broker: {MQTT_BROKER}")
    print(f"MQTT Topic: {MQTT_TOPIC}")
    print(f"Tinggi Sensor: {sensor_height}cm")
    print("=====***=====")

# Setup GUI
setup_gui()

# Setup MQTT
setup_mqtt()

# Start periodic updates
root.after(100, periodic_update)

print("Aplikasi dimulai!")
print("- Klik 'Mulai' untuk memulai pengumpulan data")
print("- Atur tinggi sensor sebelum pengukuran")
print("- Perangkat ESP harus mempublikasikan ke topik:",
      MQTT_TOPIC)

# Start GUI main loop
root.mainloop()

if __name__ == "__main__":
    main()

```

# LAMPIRAN D

## Tabel dan Grafik Setiap Percobaan

### 4.1 Bola Bekel

#### 4.1.1 Tabel Percobaan

Tabel L.1: Data Bola Bekel 1

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.733918	22	35
0.100000	28	35
0.200000	31	35
0.300000	33	35
0.400000	33	35
0.500000	30	35
0.600000	22	35
0.700000	14	35
1.400000	5	35
1.500000	12	35
1.600000	19	35
1.700000	25	35
1.808000	29	35
1.908000	31	35
2.008000	31	35
2.108000	28	35
2.208000	24	35
2.308000	16	35
2.408000	6	35
3.114000	5	35
3.214000	11	35
3.314000	17	35
3.414000	22	35
3.514000	24	35
3.614000	25	35

Continued on next page

Tabel L.1: Data Bola Bekel 1

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.714000	25	35
3.814000	24	35
3.914000	18	35
4.021000	8	35
4.721000	0	35
4.821000	6	35
4.921000	11	35
5.021000	16	35
5.121000	19	35
5.221000	19	35
5.321000	19	35
5.421000	17	35
5.521000	10	35
5.621000	4	35
6.525000	5	35
6.625000	8	35
6.725000	10	35
6.825000	11	35
6.925000	11	35
7.025000	7	35

Tabel L.2: Data Bola Bekel 2

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.200000	10	35
0.300000	6	35
0.400000	10	35
0.500000	19	35
0.600000	27	35
0.700000	32	35
0.800000	33	35
0.900000	33	35
1.800000	29	35
1.900000	31	35
2.000000	21	35
2.100000	6	35

Continued on next page

Tabel L.2: Data Bola Bekel 2

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.402000	4	35
3.502000	12	35
3.602000	19	35
3.702000	25	35
3.802000	28	35
3.902000	29	35
4.002000	28	35
4.102000	24	35
4.402000	0	35
5.711000	8	35
5.811000	16	35
5.911000	20	35
6.011000	25	35
6.121000	26	35
6.221000	26	35
6.331000	23	35
6.431000	17	35
6.531000	8	35
7.752000	5	35
7.852000	14	35
7.952000	19	35
8.052000	23	35
8.152000	23	35
8.252000	23	35
8.352000	19	35
8.452000	14	35
8.552000	6	35
9.753000	1	35
9.853000	9	35
9.953000	17	35
10.053000	20	35
10.153000	20	35
10.253000	19	35
10.353000	13	35
10.453000	6	35
11.653000	4	35

Continued on next page

Tabel L.2: Data Bola Bekel 2

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
11.753000	10	35

Tabel L.3: Data Bola Bekel 3

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.646137	20	35
0.100000	9	35
1.300000	0	35
1.400000	10	35
1.500000	18	35
1.600000	23	35
1.700000	29	35
1.800000	32	35
1.900000	31	35
2.000000	28	35
2.100000	21	35
2.200000	11	35
3.410000	2	35
3.510000	11	35
3.610000	19	35
3.710000	24	35
3.810000	28	35
3.910000	29	35
4.010000	30	35
4.110000	26	35
4.210000	18	35
4.310000	6	35
5.612000	0	35
5.712000	8	35
5.812000	15	35
5.912000	20	35
6.012000	25	35
6.112000	27	35
6.212000	28	35
6.312000	25	35
6.412000	19	35

Continued on next page

Tabel L.3: Data Bola Bekel 3

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
6.512000	12	35
6.612000	0	35
7.812000	4	35
7.912000	13	35
8.012000	19	35
8.112000	20	35
8.212000	21	35
8.321000	19	35
8.421000	13	35
8.526000	4	35
9.726000	2	35
9.826000	9	35
9.936000	17	35
10.036000	19	35
10.136000	19	35
10.236000	19	35
10.336000	16	35
10.436000	9	35
10.536000	0	35

Tabel L.4: Data Bola Bekel 4

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.750000	11	35
3.850000	10	35
3.950000	29	35
4.050000	31	35
4.150000	33	35
4.250000	32	35
4.350000	32	35
4.450000	31	35
4.550000	32	35
4.650000	32	35
4.750000	31	35
4.850000	32	35
4.950000	32	35

Continued on next page

Tabel L.4: Data Bola Bekel 4

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
5.050000	32	35
5.150000	31	35
5.250000	27	35
5.350000	32	35
5.450000	24	35
5.550000	14	35
6.750000	4	35
6.850000	11	35
6.950000	19	35
7.050000	24	35
7.150000	29	35
7.250000	31	35
7.350000	32	35
7.450000	31	35
7.550000	27	35
7.650000	19	35
7.750000	10	35
8.950000	5	35
9.050000	14	35
9.150000	19	35
9.250000	24	35
9.350000	26	35
9.450000	25	35
9.550000	21	35
9.650000	14	35
9.750000	5	35
10.950000	5	35
11.050000	13	35
11.150000	20	35
11.250000	25	35
11.350000	26	35
11.450000	23	35
11.550000	19	35
11.650000	11	35
11.750000	2	35
12.950000	5	35

Continued on next page

Tabel L.4: Data Bola Bekel 4

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
13.050000	13	35
13.150000	19	35
13.250000	20	35
13.350000	19	35
13.450000	13	35
13.550000	6	35
14.650000	0	35
14.750000	6	35
14.850000	10	35
14.950000	11	35
15.050000	12	35
15.151000	6	35

Tabel L.5: Data Bola Bekel 5

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.100000	33	35
0.200000	26	35
0.300000	15	35
0.400000	3	35
1.600000	14	35
1.700000	24	35
1.800000	30	35
1.900000	33	35
2.000000	32	35
2.100000	31	35
2.200000	24	35
2.300000	15	35
2.400000	3	35
3.605000	8	35
3.705000	15	35
3.805000	20	35
3.905000	26	35
4.005000	29	35
4.105000	30	35
4.205000	26	35

Continued on next page

Tabel L.5: Data Bola Bekel 5

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.305000	21	35
4.405000	12	35
5.805000	0	35
5.905000	8	35
6.005000	16	35
6.105000	20	35
6.205000	25	35
6.305000	25	35
6.405000	24	35
6.505000	19	35
6.605000	10	35
7.905000	4	35
8.005000	11	35
8.105000	16	35
8.205000	19	35
8.306000	19	35
8.406000	17	35
8.511000	12	35
10.119000	4	35
10.219000	9	35
10.319000	12	35
10.419000	9	35
10.519000	6	35

SUNAN GUNUNG DJATI  
BANDUNG

Tabel L.6: Data Bola Bekel 6

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.793083	5	35
0.300000	3	35
0.400000	13	35
0.500000	23	35
0.600000	29	35
0.700000	32	35
0.800000	33	35
0.900000	33	35
1.000000	28	35

Continued on next page

Tabel L.6: Data Bola Bekel 6

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.100000	19	35
1.200000	10	35
2.300000	4	35
2.400000	12	35
2.500000	20	35
2.600000	27	35
2.700000	31	35
2.800000	33	35
2.900000	33	35
3.000000	28	35
3.100000	21	35
3.200000	10	35
3.300000	4	35
4.303000	6	35
4.403000	15	35
4.503000	22	35
4.603000	27	35
4.703000	28	35
4.803000	28	35
4.903000	24	35
5.003000	17	35
5.103000	8	35
6.103000	0	35
6.203000	7	35
6.303000	13	35
6.403000	20	35
6.503000	24	35
6.603000	25	35
6.703000	25	35
6.803000	20	35
6.903000	12	35
7.003000	3	35
8.105000	6	35
8.205000	13	35
8.305000	19	35
8.405000	19	35

Continued on next page

Tabel L.6: Data Bola Bekel 6

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
8.505000	18	35
8.605000	13	35
8.705000	6	35
9.505000	13	35
10.907000	19	35

Tabel L.7: Data Bola Bekel 7

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.600000	7	35
0.700000	19	35
0.800000	28	35
0.900000	32	35
1.100000	33	35
1.200000	29	35
1.300000	21	35
1.400000	19	35
2.602000	6	35
2.702000	15	35
2.802000	22	35
2.902000	29	35
3.002000	32	35
3.102000	32	35
3.202000	31	35
3.302000	27	35
3.402000	20	35
3.502000	11	35
3.602000	1	35
4.705000	0	35
4.808000	8	35
4.908000	17	35
5.008000	23	35
5.108000	27	35
5.208000	31	35
5.308000	31	35
5.408000	29	35

Continued on next page

Tabel L.7: Data Bola Bekel 7

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
5.508000	24	35
5.608000	18	35
5.708000	8	35
6.711000	0	35
6.811000	6	35
6.911000	15	35
7.011000	21	35
7.111000	24	35
7.211000	25	35
7.311000	24	35
7.411000	20	35
7.511000	13	35
7.611000	5	35
8.311000	19	35
8.611000	0	35
8.711000	8	35
8.811000	15	35
8.911000	20	35
9.015000	22	35
9.115000	20	35
9.215000	15	35
9.315000	8	35
9.415000	0	35

SUNAN GUNUNG DJATI  
BANDUNG

Tabel L.8: Data Bola Bekel 8

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.200000	9	35
0.300000	19	35
0.400000	27	35
0.500000	32	35
0.600000	33	35
0.700000	32	35
0.800000	33	35
0.900000	30	35
1.000000	20	35

Continued on next page

Tabel L.8: Data Bola Bekel 8

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.100000	8	35
2.106000	0	35
2.206000	10	35
2.306000	19	35
2.406000	27	35
2.506000	30	35
2.606000	33	35
2.706000	32	35
2.810000	29	35
2.910000	22	35
3.010000	12	35
3.110000	3	35
3.713000	3	35
4.013000	2	35
4.113000	9	35
4.213000	19	35
4.315000	26	35
4.415000	30	35
4.515000	31	35
4.615000	30	35
4.715000	25	35
4.815000	17	35
4.915000	7	35
5.915000	6	35
6.015000	17	35
6.115000	22	35
6.219000	27	35
6.319000	28	35
6.419000	26	35
6.519000	20	35
6.619000	12	35
6.719000	2	35
7.621000	1	35
7.721000	9	35
7.821000	17	35
7.921000	21	35

Continued on next page

Tabel L.8: Data Bola Bekel 8

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
8.021000	23	35
8.121000	22	35
8.221000	17	35
8.321000	8	35

Tabel L.9: Data Bola Bekel 9

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.404000	6	35
1.504000	16	35
1.604000	23	35
1.704000	30	35
1.804000	32	35
1.904000	33	35
2.004000	33	35
2.104000	30	35
2.204000	20	35
2.304000	13	35
3.404000	1	35
3.504000	10	35
3.604000	19	35
3.708000	25	35
3.808000	30	35
3.908000	31	35
4.008000	32	35
4.108000	30	35
4.208000	25	35
4.308000	18	35
4.408000	6	35
5.515000	7	35
5.615000	16	35
5.715000	21	35
5.815000	25	35
5.924000	28	35
6.024000	27	35
6.131000	24	35

Continued on next page

Tabel L.9: Data Bola Bekel 9

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
6.231000	19	35
6.331000	12	35
6.431000	2	35
7.431000	1	35
7.531000	12	35
7.631000	18	35
7.731000	20	35
7.831000	23	35
7.931000	23	35
8.031000	19	35
8.131000	13	35
8.231000	7	35
9.335000	4	35
9.435000	11	35
9.535000	16	35
9.635000	19	35
9.735000	20	35
9.835000	20	35
9.935000	17	35
10.035000	11	35
11.440000	0	35
11.540000	4	35
11.640000	8	35
11.740000	11	35
11.840000	13	35
11.940000	13	35
12.040000	10	35
12.140000	6	35
12.240000	0	35

Tabel L.10: Data Bola Bekel 10

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.600000	9	35
0.700000	19	35
0.800000	27	35

Continued on next page

Tabel L.10: Data Bola Bekel 10

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.900000	32	35
1.009000	33	35
1.109000	33	35
1.209000	29	35
1.309000	22	35
1.409000	11	35
2.409000	2	35
2.509000	12	35
2.609000	19	35
2.709000	27	35
2.809000	31	35
2.915000	32	35
3.015000	30	35
3.115000	26	35
3.215000	18	35
3.315000	9	35
4.315000	9	35
4.415000	17	35
4.515000	22	35
4.615000	26	35
4.715000	27	35
4.815000	25	35
4.915000	19	35
5.015000	13	35
5.115000	5	35
6.115000	4	35
6.215000	12	35
6.315000	18	35
6.415000	23	35
6.515000	25	35
6.615000	24	35
6.715000	20	35
6.815000	13	35
6.924000	6	35
7.827000	0	35
7.927000	8	35

Continued on next page

Tabel L.10: Data Bola Bekel 10

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
8.027000	13	35
8.127000	17	35
8.227000	17	35
8.327000	12	35
8.427000	4	35

Tabel L.11: Data Bola Bekel 11

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.405000	3	35
1.505000	13	35
1.605000	19	35
1.705000	26	35
1.814000	32	35
1.914000	33	35
2.014000	32	35
2.114000	30	35
2.214000	25	35
2.314000	17	35
2.414000	7	35
3.422000	5	35
3.522000	15	35
3.625000	20	35
3.725000	26	35
3.825000	30	35
3.925000	32	35
4.025000	32	35
4.125000	30	35
4.225000	23	35
4.325000	17	35
4.425000	6	35
5.325000	2	35
5.425000	10	35
5.525000	18	35
5.627000	21	35
5.727000	26	35

Continued on next page

Tabel L.11: Data Bola Bekel 11

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
5.827000	28	35
5.927000	27	35
6.027000	27	35
6.127000	28	35
6.227000	29	35
6.327000	29	35
6.436000	28	35
6.536000	24	35
6.636000	18	35
6.745000	8	35
7.653000	2	35
7.753000	10	35
7.953000	22	35
8.053000	25	35
8.153000	25	35
8.253000	23	35
8.362000	19	35
8.462000	13	35
8.572000	4	35
9.472000	4	35
9.572000	10	35
9.672000	15	35
9.772000	19	35
9.872000	20	35
9.978000	20	35
10.078000	19	35
10.178000	16	35
10.278000	9	35
10.378000	2	35

Tabel L.12: Data Bola Bekel 12

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.085000	2	35
0.185000	12	35
0.285000	19	35

Continued on next page

Tabel L.12: Data Bola Bekel 12

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.385000	27	35
0.485000	31	35
0.585000	32	35
0.685000	32	35
0.785000	32	35
0.885000	32	35
0.986000	28	35
1.086000	33	35
1.187000	32	35
1.287000	29	35
1.387000	21	35
1.487000	12	35
1.587000	0	35
2.497000	6	35
2.597000	14	35
2.697000	21	35
2.797000	27	35
2.897000	30	35
2.997000	32	35
3.097000	32	35
3.197000	31	35
3.297000	30	35
3.397000	26	35
3.497000	19	35
3.597000	8	35
3.697000	0	35
4.597000	5	35
4.697000	13	35
4.797000	19	35
4.897000	26	35
4.997000	29	35
5.097000	30	35
5.197000	31	35
5.297000	30	35
5.397000	31	35
5.497000	28	35

Continued on next page

Tabel L.12: Data Bola Bekel 12

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
5.597000	23	35
5.697000	14	35
5.797000	6	35
6.697000	2	35
6.900000	18	35
7.001000	23	35
7.111000	26	35
7.211000	28	35
7.311000	29	35
7.411000	26	35
7.511000	23	35
7.611000	14	35
7.711000	5	35
8.611000	0	35
8.712000	6	35
8.812000	15	35
8.912000	19	35
9.012000	23	35
9.112000	25	35
9.212000	25	35
9.312000	19	35
9.412000	13	35
9.512000	6	35
10.412000	4	35
10.512000	9	35
10.612000	13	35
10.712000	15	35
10.812000	18	35
10.912000	18	35
11.012000	16	35
11.112000	13	35
11.212000	6	35
11.312000	1	35

Tabel L.13: Data Bola Bekel 13

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.575000	1	35
0.100000	12	35
0.200000	20	35
0.300000	26	35
0.400000	31	35
0.500000	32	35
0.600000	32	35
0.700000	33	35
0.800000	30	35
0.900000	23	35
1.000000	13	35
1.100000	3	35
2.102000	5	35
2.202000	13	35
2.302000	20	35
2.402000	25	35
2.502000	30	35
2.602000	32	35
2.702000	32	35
2.802000	31	35
2.902000	25	35
3.002000	19	35
3.102000	10	35
3.202000	1	35
4.102000	4	35
4.202000	12	35
4.302000	19	35
4.402000	25	35
4.502000	29	35
4.602000	30	35
4.702000	27	35
4.802000	23	35
4.902000	17	35
5.002000	8	35
6.002000	1	35
6.102000	9	35

Continued on next page

Tabel L.13: Data Bola Bekel 13

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
6.202000	19	35
6.302000	24	35
6.402000	26	35
6.502000	26	35
6.602000	21	35
6.702000	14	35
6.802000	6	35
7.802000	3	35
8.002000	18	35
8.102000	22	35
8.202000	25	35
8.302000	25	35
8.402000	24	35
8.502000	19	35
8.602000	11	35
8.702000	2	35
9.702000	4	35
9.802000	6	35
9.902000	5	35
10.002000	0	35

Tabel L.14: Data Bola Bekel 14

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.806000	6	35
2.906000	18	35
3.006000	25	35
3.106000	30	35
3.206000	33	35
3.306000	33	35
3.406000	33	35
3.506000	32	35
3.606000	29	35
3.706000	21	35
3.806000	12	35
3.906000	2	35

Continued on next page

Tabel L.14: Data Bola Bekel 14

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.906000	6	35
5.006000	13	35
5.106000	22	35
5.206000	27	35
5.306000	32	35
5.406000	33	35
5.506000	32	35
5.606000	29	35
5.706000	24	35
5.806000	15	35
5.906000	5	35
6.806000	1	35
6.906000	8	35
7.006000	14	35
7.106000	21	35
7.206000	26	35
7.306000	29	35
7.406000	30	35
7.506000	28	35
7.606000	25	35
7.706000	17	35
7.806000	8	35
8.806000	4	35
8.906000	12	35
9.006000	19	35
9.106000	22	35
9.206000	26	35
9.306000	27	35
9.406000	26	35
9.506000	23	35
9.606000	16	35
9.706000	7	35
10.812000	5	35
10.914000	12	35
11.014000	19	35
11.114000	22	35

Continued on next page

Tabel L.14: Data Bola Bekel 14

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
11.214000	25	35
11.314000	23	35
11.414000	20	35
11.514000	14	35
11.614000	5	35
12.914000	3	35
13.014000	8	35
13.114000	13	35
13.222000	17	35
13.322000	19	35
13.422000	19	35
13.522000	22	35
13.622000	21	35
13.722000	19	35
13.822000	12	35
13.925000	4	35

Tabel L.15: Data Bola Bekel 15

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.601000	1	35
0.701000	13	35
0.801000	21	35
0.901000	27	35
1.001000	31	35
1.101000	32	35
1.201000	24	35
1.301000	32	35
1.401000	33	35
1.501000	31	35
1.601000	24	35
1.701000	16	35
1.801000	8	35
2.813000	2	35
2.913000	10	35
3.020000	18	35

Continued on next page

Tabel L.15: Data Bola Bekel 15

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.120000	23	35
3.220000	29	35
3.320000	32	35
3.420000	32	35
3.520000	32	35
3.620000	28	35
3.720000	23	35
3.820000	14	35
3.920000	5	35
4.820000	5	35
4.920000	12	35
5.020000	19	35
5.120000	23	35
5.220000	28	35
5.321000	30	35
5.421000	30	35
5.521000	27	35
5.621000	22	35
5.721000	14	35
5.821000	4	35
6.721000	5	35
6.821000	13	35
6.921000	19	35
7.021000	25	35
7.121000	28	35
7.221000	28	35
7.321000	26	35
7.421000	21	35
7.521000	13	35
7.627000	4	35
8.534000	6	35
8.634000	11	35
8.734000	18	35
8.834000	21	35
8.934000	25	35
9.034000	25	35

Continued on next page

Tabel L.15: Data Bola Bekel 15

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
9.134000	24	35
9.234000	19	35
9.434000	4	35
10.434000	0	35
10.534000	5	35
10.634000	10	35
10.734000	15	35
10.835000	18	35
10.935000	18	35
11.042000	16	35
11.142000	10	35
11.242000	5	35

Tabel L.16: Data Bola Bekel 16

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.800000	8	35
0.900000	16	35
1.000000	24	35
1.100000	29	35
1.200000	32	35
1.300000	32	35
1.400000	31	35
1.500000	26	35
1.600000	17	35
1.702000	8	35
2.902000	8	35
3.002000	17	35
3.102000	25	35
3.202000	30	35
3.302000	33	35
3.402000	32	35
3.502000	28	35
3.602000	21	35
3.702000	10	35
3.802000	0	35

Continued on next page

Tabel L.16: Data Bola Bekel 16

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.702000	3	35
4.806000	12	35
4.906000	19	35
5.006000	24	35
5.106000	30	35
5.206000	32	35
5.306000	29	35
5.406000	23	35
5.506000	16	35
5.606000	7	35
6.506000	6	35
6.606000	13	35
6.706000	20	35
6.806000	26	35
6.906000	30	35
7.006000	30	35
7.106000	27	35
7.206000	23	35
7.306000	15	35
7.406000	6	35
8.306000	6	35
8.406000	13	35
8.506000	20	35
8.606000	24	35
8.706000	27	35
8.806000	28	35
8.906000	25	35
9.006000	20	35
9.206000	3	35
10.106000	5	35
10.206000	12	35
10.306000	19	35
10.406000	22	35
10.506000	26	35
10.606000	25	35
10.706000	22	35

Continued on next page

Tabel L.16: Data Bola Bekel 16

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
10.806000	16	35
10.906000	8	35

Tabel L.17: Data Bola Bekel 17

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.501000	4	35
0.601000	16	35
0.701000	24	35
0.801000	30	35
0.901000	33	35
1.001000	33	35
1.101000	29	35
1.201000	22	35
1.301000	10	35
2.101000	1	35
2.201000	10	35
2.301000	20	35
2.401000	26	35
2.501000	31	35
2.601000	31	35
2.701000	28	35
2.801000	22	35
2.901000	12	35
3.802000	3	35
3.902000	13	35
4.002000	21	35
4.102000	26	35
4.203000	29	35
4.303000	27	35
4.403000	24	35
4.503000	15	35
4.603000	6	35
5.503000	6	35
5.603000	14	35
5.703000	21	35

Continued on next page

Tabel L.17: Data Bola Bekel 17

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
5.803000	23	35
5.903000	21	35
6.003000	18	35
6.103000	11	35
7.103000	6	35
7.203000	13	35
7.303000	19	35
7.403000	19	35
7.503000	17	35
7.603000	11	35
7.703000	4	35

Tabel L.18: Data Bola Bekel 18

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.500000	16	35
0.600000	23	35
0.700000	30	35
0.800000	32	35
0.900000	32	35
1.000000	32	35
1.100000	26	35
1.200000	17	35
1.300000	7	35
2.308000	1	35
2.408000	9	35
2.508000	17	35
2.608000	25	35
2.708000	29	35
2.808000	32	35
2.908000	32	35
3.008000	30	35
3.108000	22	35
3.208000	14	35
3.308000	3	35
4.208000	0	35

Continued on next page

Tabel L.18: Data Bola Bekel 18

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.308000	10	35
4.408000	18	35
4.508000	23	35
4.608000	27	35
4.708000	29	35
4.808000	29	35
4.908000	26	35
5.008000	19	35
5.108000	6	35
6.008000	2	35
6.108000	9	35
6.208000	18	35
6.308000	24	35
6.408000	27	35
6.508000	29	35
6.608000	27	35
6.708000	23	35
6.808000	15	35
6.908000	6	35
7.818000	6	35
7.918000	13	35
8.018000	20	35
8.122000	24	35
8.222000	27	35
8.322000	25	35
8.422000	19	35
8.522000	11	35
8.622000	4	35
9.630000	5	35
9.730000	13	35
9.830000	19	35
9.930000	22	35
10.030000	23	35
10.130000	20	35
10.230000	16	35
10.330000	10	35

Continued on next page

Tabel L.18: Data Bola Bekel 18

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
10.430000	3	35
11.530000	3	35
11.630000	8	35
11.730000	13	35
11.830000	15	35
11.930000	16	35
12.030000	16	35
12.130000	13	35
12.230000	6	35

Tabel L.19: Data Bola Bekel 19

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.900000	3	35
1.000000	12	35
1.100000	20	35
1.200000	26	35
1.300000	30	35
1.400000	32	35
1.500000	33	35
1.600000	32	35
1.700000	32	35
1.800000	32	35
1.900000	30	35
2.000000	23	35
2.100000	13	35
2.200000	0	35
3.200000	10	35
3.300000	19	35
3.400000	23	35
3.500000	28	35
3.600000	32	35
3.700000	32	35
3.803000	31	35
3.903000	29	35
4.008000	21	35

Continued on next page

Tabel L.19: Data Bola Bekel 19

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.108000	11	35
4.208000	2	35
5.215000	12	35
5.315000	18	35
5.415000	24	35
5.515000	28	35
5.615000	30	35
5.715000	30	35
5.815000	27	35
5.915000	19	35
6.015000	9	35
6.115000	1	35
7.025000	4	35
7.125000	12	35
7.225000	19	35
7.325000	24	35
7.425000	28	35
7.525000	31	35
7.625000	31	35
7.725000	28	35
7.825000	22	35
7.925000	14	35
8.025000	6	35
8.928000	6	35
9.028000	16	35
9.128000	22	35
9.228000	26	35
9.328000	28	35
9.428000	27	35
9.528000	23	35
9.628000	15	35
9.728000	6	35
10.628000	2	35
10.728000	12	35
10.828000	19	35
10.928000	24	35

Continued on next page

Tabel L.19: Data Bola Bekel 19

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
11.028000	27	35
11.128000	27	35
11.228000	26	35
11.328000	21	35
11.428000	12	35
11.528000	3	35
12.328000	5	35
12.428000	10	35
12.528000	19	35
12.628000	24	35
12.728000	24	35
12.828000	22	35
12.928000	16	35
13.028000	5	35
13.128000	0	35

Tabel L.20: Data Bola Bekel 20

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.808000	17	35
2.908000	25	35
3.008000	30	35
3.108000	32	35
3.211000	33	35
3.311000	32	35
3.411000	26	35
3.511000	17	35
3.611000	4	35
4.611000	7	35
4.711000	19	35
4.811000	25	35
4.911000	31	35
5.011000	31	35
5.111000	30	35
5.211000	26	35
5.311000	19	35

Continued on next page

Tabel L.20: Data Bola Bekel 20

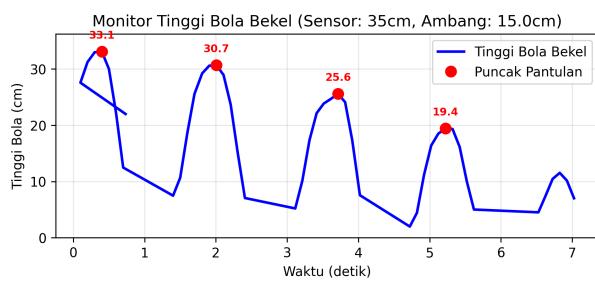
Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
5.411000	8	35
6.320000	2	35
6.420000	10	35
6.520000	17	35
6.620000	22	35
6.720000	27	35
6.820000	30	35
6.920000	30	35
7.025000	28	35
7.125000	23	35
7.225000	16	35
7.325000	5	35
8.130000	0	35
8.230000	10	35
8.330000	18	35
8.430000	23	35
8.530000	26	35
8.630000	26	35
8.730000	26	35
8.830000	21	35
8.930000	15	35
9.030000	6	35
9.930000	3	35
10.030000	10	35
10.130000	17	35
10.230000	23	35
10.330000	26	35
10.430000	27	35
10.530000	26	35
10.630000	25	35
10.730000	19	35
10.930000	3	35
11.830000	4	35
11.930000	10	35
12.030000	16	35
12.130000	19	35

Continued on next page

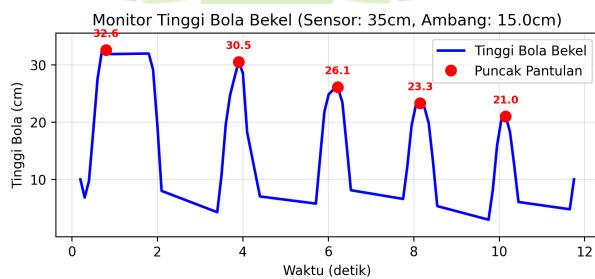
Tabel L.20: Data Bola Bekel 20

Waktu (detik)	Tinggi Bola Bekel (cm)	Tinggi Sensor (cm)
12.230000	21	35
12.330000	24	35
12.430000	22	35
12.530000	18	35
12.630000	11	35
12.730000	4	35

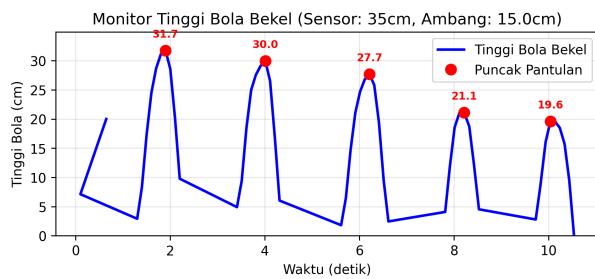
#### 4.1.2 Grafik Percobaan



Gambar L.1: Grafik Bola Bekel Percobaan 1



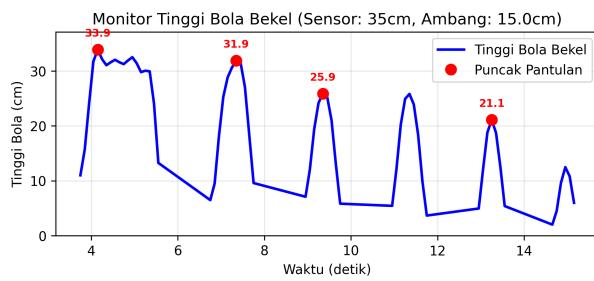
Gambar L.2: Grafik Bola Bekel Percobaan 2



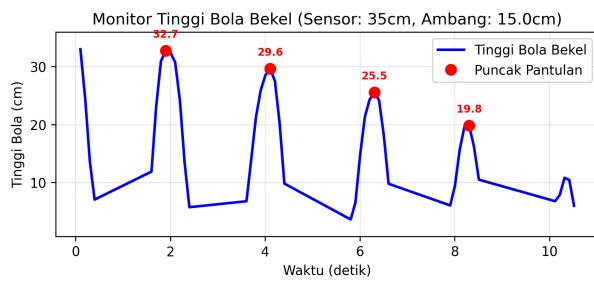
Gambar L.3: Grafik Bola Bekel Percobaan 3

#### 4.2 Bola Tenis Meja

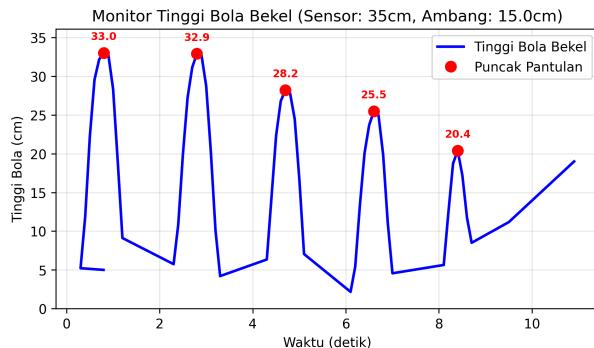
##### 4.2.1 Tabel Percobaan



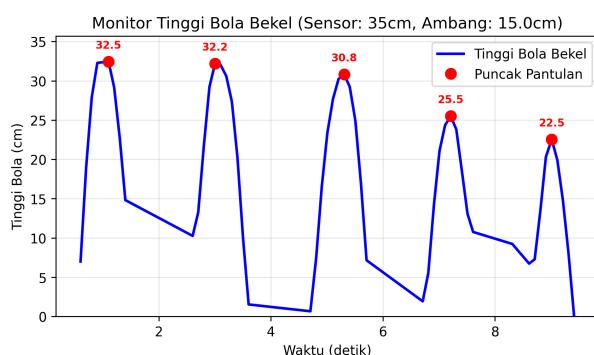
Gambar L.4: Grafik Bola Bekel Percobaan 4



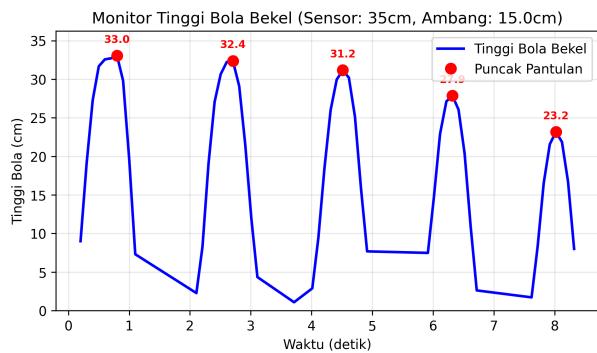
Gambar L.5: Grafik Bola Bekel Percobaan 5



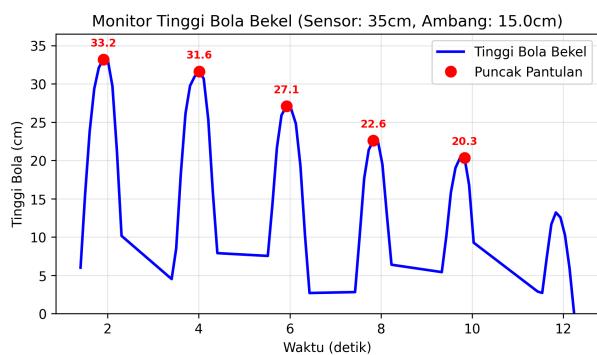
Gambar L.6: Grafik Bola Bekel Percobaan 6



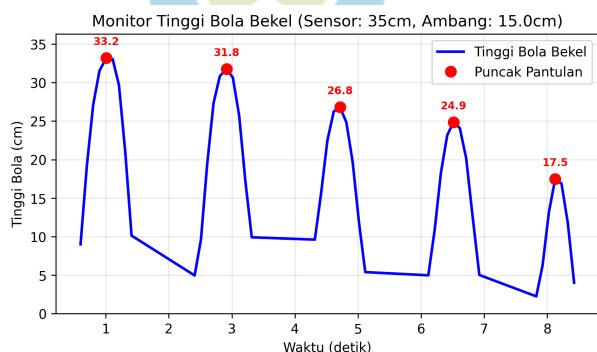
Gambar L.7: Grafik Bola Bekel Percobaan 7



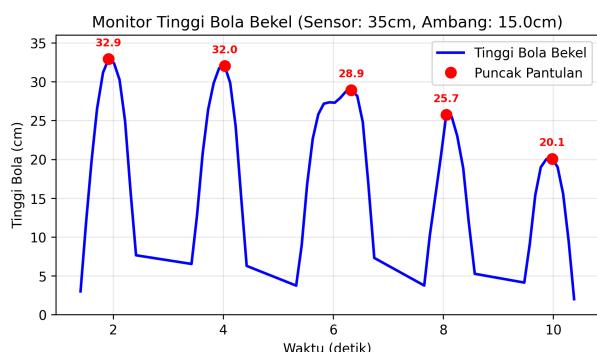
Gambar L.8: Grafik Bola Bekel Percobaan 8



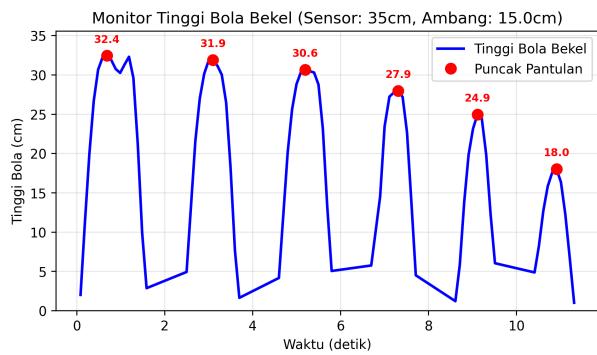
Gambar L.9: Grafik Bola Bekel Percobaan 9



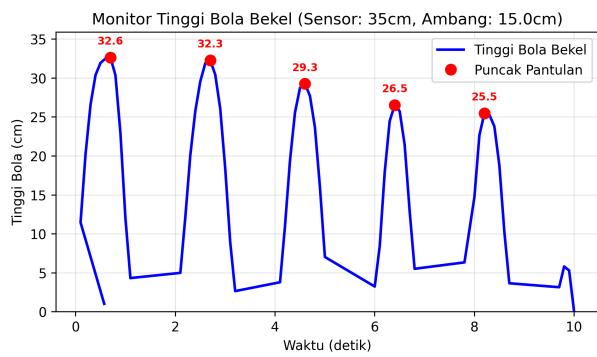
Gambar L.10: Grafik Bola Bekel Percobaan 10



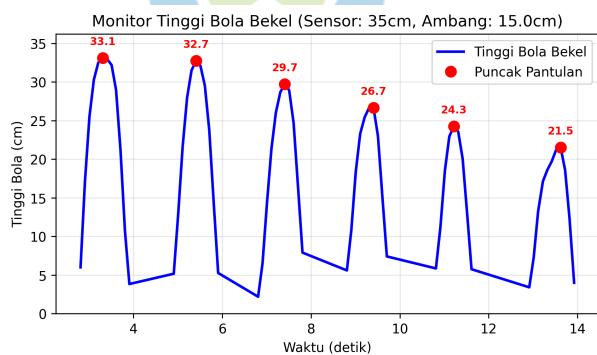
Gambar L.11: Grafik Bola Bekel Percobaan 11



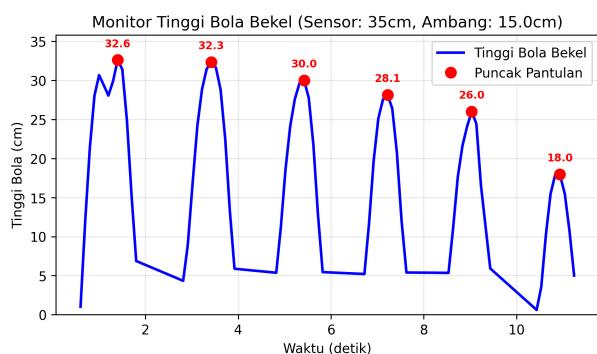
Gambar L.12: Grafik Bola Bekel Percobaan 12



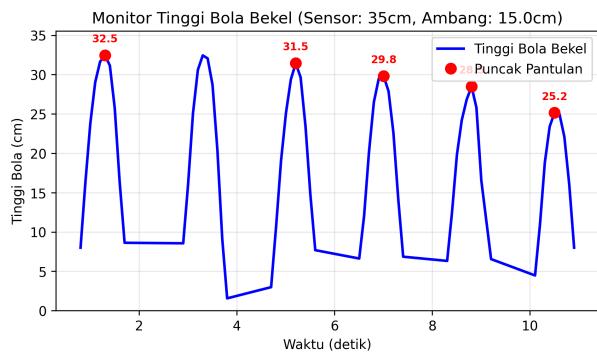
Gambar L.13: Grafik Bola Bekel Percobaan 13



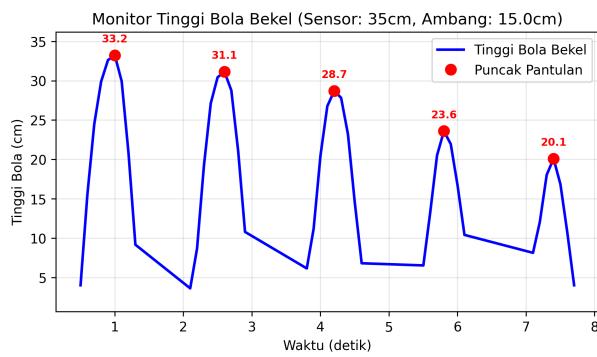
Gambar L.14: Grafik Bola Bekel Percobaan 14



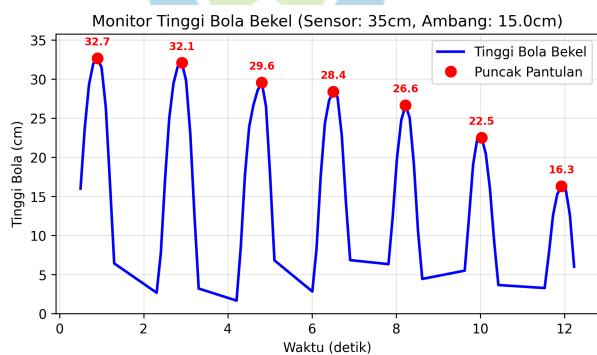
Gambar L.15: Grafik Bola Bekel Percobaan 15



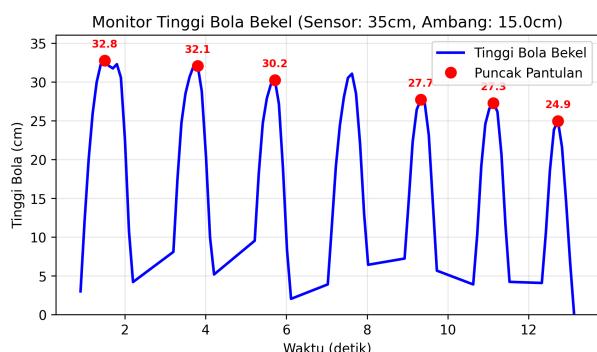
Gambar L.16: Grafik Bola Bekel Percobaan 16



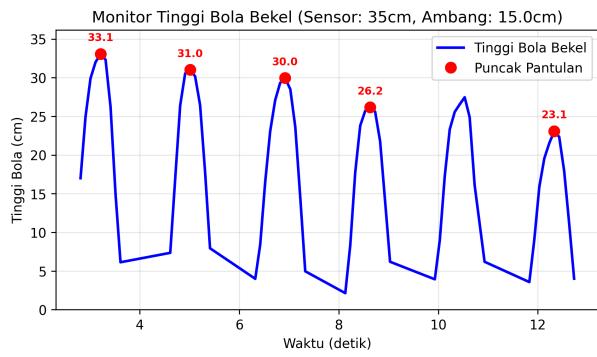
Gambar L.17: Grafik Bola Bekel Percobaan 17



Gambar L.18: Grafik Bola Bekel Percobaan 18



Gambar L.19: Grafik Bola Bekel Percobaan 19



Gambar L.20: Grafik Bola Bekel Percobaan 20

Tabel L.21: Data Bola Tenis Meja 1

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.701000	8	35
0.801000	18	35
0.901000	25	35
1.001000	30	35
1.101000	32	35
1.201000	33	35
1.301000	32	35
1.402000	32	35
1.502000	30	35
1.602000	19	35
1.702000	10	35
1.802000	0	35
2.702000	4	35
2.802000	10	35
2.902000	19	35
3.002000	24	35
3.102000	28	35
3.202000	30	35
3.311000	31	35
3.411000	30	35
3.511000	26	35
3.611000	20	35
3.711000	12	35
3.811000	2	35
4.611000	0	35
4.711000	8	35

Continued on next page

Tabel L.21: Data Bola Tenis Meja 1

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.811000	15	35
4.911000	20	35
5.011000	23	35
5.111000	27	35
5.211000	30	35
5.311000	30	35
5.412000	28	35
5.512000	23	35
5.612000	15	35
5.712000	6	35
6.612000	2	35
6.712000	6	35
6.812000	15	35
6.912000	20	35
7.012000	24	35
7.112000	26	35
7.212000	28	35
7.312000	28	35
7.412000	26	35
7.512000	23	35
7.612000	17	35
7.712000	11	35
8.816000	8	35
8.916000	14	35
9.016000	20	35
9.116000	23	35
9.226000	24	35
9.326000	25	35
9.426000	23	35
9.526000	19	35
9.626000	11	35
9.726000	6	35
9.826000	0	35

Tabel L.22: Data Bola Tenis Meja 2

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.600000	8	35
1.700000	17	35
1.800000	24	35
1.900000	29	35
2.000000	32	35
2.100000	32	35
2.200000	33	35
2.300000	32	35
2.400000	25	35
2.500000	16	35
2.600000	6	35
3.600000	6	35
3.700000	14	35
3.800000	21	35
3.900000	27	35
4.000000	31	35
4.100000	32	35
4.200000	32	35
4.300000	30	35
4.400000	25	35
4.500000	18	35
4.600000	7	35
5.500000	0	35
5.600000	11	35
5.700000	19	35
5.800000	24	35
5.900000	28	35
6.000000	31	35
6.100000	31	35
6.200000	29	35
6.305000	21	35
6.405000	15	35
6.514000	4	35
7.420000	8	35
7.520000	14	35
7.620000	19	35

Continued on next page

Tabel L.22: Data Bola Tenis Meja 2

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
7.720000	24	35
7.820000	26	35
7.920000	26	35
8.020000	24	35
8.120000	20	35
8.220000	10	35
8.320000	5	35
9.220000	0	35
9.320000	7	35
9.420000	15	35
9.520000	19	35
9.620000	23	35
9.720000	23	35
9.820000	19	35
9.920000	17	35
10.020000	10	35
10.120000	3	35

Tabel L.23: Data Bola Tenis Meja 3

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.200000	0	35
0.300000	10	35
0.400000	19	35
0.500000	25	35
0.600000	27	35
0.700000	31	35
0.800000	32	35
0.900000	33	35
1.000000	31	35
1.100000	25	35
1.200000	15	35
1.300000	3	35
2.200000	6	35
2.300000	15	35
2.401000	22	35

Continued on next page

Tabel L.23: Data Bola Tenis Meja 3

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.501000	27	35
2.601000	30	35
2.701000	31	35
2.801000	29	35
2.901000	24	35
3.001000	16	35
3.101000	5	35
4.001000	4	35
4.101000	13	35
4.201000	20	35
4.301000	26	35
4.401000	27	35
4.501000	29	35
4.601000	27	35
4.701000	21	35
4.801000	13	35
4.901000	2	35
5.805000	5	35
5.905000	13	35
6.005000	20	35
6.105000	25	35
6.205000	28	35
6.305000	29	35
6.405000	26	35
6.505000	20	35
6.605000	15	35
6.705000	5	35
7.605000	6	35
7.705000	13	35
7.805000	20	35
7.905000	24	35
8.005000	26	35
8.105000	24	35
8.205000	22	35
8.305000	16	35
8.405000	7	35

Continued on next page

Tabel L.23: Data Bola Tenis Meja 3

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
9.205000	2	35
9.305000	6	35
9.405000	11	35
9.505000	14	35
9.605000	16	35
9.705000	16	35
9.805000	12	35
9.905000	6	35
10.005000	0	35

Tabel L.24: Data Bola Tenis Meja 4

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.300000	6	35
0.400000	17	35
0.500000	23	35
0.600000	28	35
0.700000	32	35
0.800000	33	35
0.907000	33	35
1.007000	27	35
1.107000	19	35
1.208000	6	35
2.018000	4	35
2.118000	13	35
2.218000	20	35
2.318000	26	35
2.418000	31	35
2.518000	32	35
2.618000	31	35
2.718000	28	35
2.826000	20	35
2.926000	9	35
3.026000	3	35
3.926000	11	35
4.026000	18	35

Continued on next page

Tabel L.24: Data Bola Tenis Meja 4

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.126000	23	35
4.226000	28	35
4.326000	31	35
4.426000	30	35
4.526000	26	35
4.626000	21	35
4.726000	10	35
4.826000	2	35
5.726000	13	35
5.826000	20	35
5.926000	23	35
6.026000	24	35
6.126000	25	35
6.226000	25	35
6.326000	22	35
6.426000	15	35
6.526000	6	35
7.426000	3	35
7.526000	10	35
7.626000	17	35
7.726000	20	35
7.826000	20	35
7.926000	20	35
8.026000	18	35
8.126000	10	35
8.226000	3	35
9.133000	2	35
9.233000	10	35
9.333000	15	35
9.433000	19	35
9.540000	20	35
9.640000	18	35
9.740000	14	35
9.840000	6	35

Tabel L.25: Data Bola Tenis Meja 5

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.510000	13	35
0.610000	21	35
0.710000	29	35
0.810000	33	35
0.910000	33	35
1.010000	30	35
1.110000	22	35
1.210000	12	35
1.310000	3	35
2.110000	0	35
2.210000	5	35
2.310000	18	35
2.410000	24	35
2.510000	29	35
2.610000	30	35
2.710000	26	35
2.810000	22	35
2.910000	13	35
3.010000	4	35
3.910000	9	35
4.010000	16	35
4.110000	23	35
4.210000	27	35
4.310000	27	35
4.410000	25	35
4.510000	18	35
4.610000	11	35
4.710000	2	35
5.610000	6	35
5.710000	15	35
5.810000	21	35
5.910000	26	35
6.010000	27	35
6.110000	25	35
6.210000	20	35
6.310000	14	35

Continued on next page

Tabel L.25: Data Bola Tenis Meja 5

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
6.410000	4	35
7.210000	0	35
7.310000	6	35
7.410000	16	35
7.510000	22	35
7.610000	25	35
7.710000	28	35
7.810000	27	35
7.910000	22	35
8.010000	15	35
8.110000	6	35
9.010000	8	35
9.110000	17	35
9.210000	22	35
9.310000	26	35
9.410000	26	35
9.510000	23	35
9.610000	19	35
9.710000	13	35
9.810000	5	35
10.713000	2	35
10.813000	9	35
10.913000	12	35
11.013000	13	35

Tabel L.26: Data Bola Tenis Meja 6

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.600000	4	35
0.700000	14	35
0.800000	23	35
0.900000	29	35
1.000000	32	35
1.100000	32	35
1.200000	33	35
1.300000	32	35

Continued on next page

Tabel L.26: Data Bola Tenis Meja 6

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.400000	26	35
1.500000	13	35
1.600000	3	35
2.500000	6	35
2.700000	22	35
2.800000	28	35
2.900000	31	35
3.000000	31	35
3.100000	26	35
3.200000	20	35
3.300000	11	35
3.400000	3	35
4.300000	6	35
4.400000	15	35
4.500000	22	35
4.600000	28	35
4.700000	30	35
4.800000	28	35
4.900000	22	35
5.000000	17	35
5.100000	8	35
5.901000	4	35
6.001000	12	35
6.101000	19	35
6.201000	25	35
6.301000	30	35
6.401000	31	35
6.501000	28	35
6.601000	22	35
6.701000	13	35
6.801000	5	35
7.501000	0	35
7.601000	8	35
7.701000	16	35
7.801000	21	35
7.901000	26	35

Continued on next page

Tabel L.26: Data Bola Tenis Meja 6

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
8.001000	28	35
8.101000	25	35
8.203000	20	35
8.303000	14	35
8.403000	4	35
9.209000	2	35
9.309000	8	35
9.409000	18	35
9.509000	6	35
9.609000	27	35
9.709000	26	35
9.809000	24	35
9.909000	19	35
10.009000	9	35
10.109000	0	35
10.821000	3	35
11.121000	20	35
11.221000	23	35
11.321000	25	35
11.421000	22	35
11.521000	17	35
11.625000	8	35
11.725000	1	35

SUNAN GUNUNG DJATI  
BANDUNG

Tabel L.27: Data Bola Tenis Meja 7

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.300000	8	35
0.400000	19	35
0.500000	26	35
0.600000	31	35
0.700000	33	35
0.800000	33	35
0.900000	30	35
1.000000	21	35
1.100000	9	35

Continued on next page

Tabel L.27: Data Bola Tenis Meja 7

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.000000	0	35
2.100000	9	35
2.200000	18	35
2.300000	24	35
2.400000	29	35
2.500000	32	35
2.600000	31	35
2.700000	27	35
2.800000	19	35
2.900000	10	35
3.000000	0	35
3.709000	0	35
3.809000	9	35
3.909000	17	35
4.009000	23	35
4.109000	27	35
4.209000	30	35
4.309000	29	35
4.417000	24	35
4.517000	18	35
4.617000	7	35
5.417000	4	35
5.517000	13	35
5.617000	19	35
5.717000	24	35
5.817000	25	35
5.917000	24	35
6.017000	19	35
6.117000	13	35
6.217000	3	35
7.117000	1	35
7.217000	8	35
7.317000	16	35
7.417000	20	35
7.517000	22	35
7.624000	22	35

Continued on next page

Tabel L.27: Data Bola Tenis Meja 7

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
7.724000	19	35
7.824000	11	35
7.924000	1	35
8.824000	4	35
8.924000	10	35
9.024000	15	35
9.126000	18	35
9.226000	18	35
9.326000	18	35
9.535000	2	35

Tabel L.28: Data Bola Tenis Meja 8

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.500000	5	35
0.600000	16	35
0.700000	25	35
0.800000	30	35
0.900000	32	35
1.000000	33	35
1.100000	32	35
1.200000	28	35
1.300000	19	35
1.400000	5	35
2.300000	6	35
2.400000	14	35
2.500000	22	35
2.600000	28	35
2.700000	31	35
2.800000	32	35
2.900000	31	35
3.000000	27	35
3.101000	19	35
3.201000	6	35
3.301000	0	35
4.101000	1	35

Continued on next page

Tabel L.28: Data Bola Tenis Meja 8

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.201000	12	35
4.301000	19	35
4.401000	25	35
4.501000	28	35
4.601000	29	35
4.709000	27	35
4.809000	22	35
4.909000	15	35
5.009000	4	35
5.709000	2	35
5.809000	9	35
5.909000	15	35
6.009000	20	35
6.109000	25	35
6.210000	27	35
6.310000	26	35
6.410000	24	35
6.510000	18	35
6.610000	8	35
6.710000	0	35
7.416000	5	35
7.516000	13	35
7.616000	19	35
7.716000	22	35
7.816000	19	35
7.916000	17	35
8.016000	9	35
8.817000	4	35
8.917000	9	35
9.118000	19	35
9.218000	19	35
9.318000	13	35
9.418000	5	35

Tabel L.29: Data Bola Tenis Meja 9

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.560302	6	35
0.100000	18	35
0.200000	25	35
0.300000	29	35
0.400000	32	35
0.500000	33	35
0.600000	32	35
0.700000	29	35
0.800000	19	35
0.900000	10	35
1.801000	6	35
1.902000	14	35
2.002000	20	35
2.102000	26	35
2.202000	30	35
2.302000	31	35
2.402000	30	35
2.504000	24	35
2.604000	18	35
2.704000	9	35
3.604000	4	35
3.704000	11	35
3.804000	16	35
3.904000	22	35
4.004000	27	35
4.105000	29	35
4.205000	27	35
4.305000	22	35
4.405000	15	35
4.505000	5	35
5.305000	2	35
5.405000	9	35
5.505000	16	35
5.605000	23	35
5.705000	25	35
5.805000	27	35

Continued on next page

Tabel L.29: Data Bola Tenis Meja 9

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
5.905000	22	35
6.005000	19	35
6.105000	12	35
6.205000	3	35
7.005000	5	35
7.105000	12	35
7.205000	19	35
7.305000	23	35
7.405000	26	35
7.505000	27	35
7.605000	24	35
7.705000	20	35
7.805000	11	35
7.905000	2	35
8.605000	2	35
8.705000	6	35
8.805000	11	35
8.905000	10	35

Tabel L.30: Data Bola Tenis Meja 10

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.401000	6	35
0.501000	16	35
0.601000	23	35
0.701000	27	35
0.801000	31	35
0.901000	33	35
1.001000	33	35
1.101000	31	35
1.201000	23	35
1.301000	14	35
1.401000	2	35
2.303000	8	35
2.403000	19	35
2.503000	24	35

Continued on next page

Tabel L.30: Data Bola Tenis Meja 10

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.603000	29	35
2.703000	31	35
2.803000	33	35
2.903000	31	35
3.003000	26	35
3.103000	17	35
3.203000	7	35
4.103000	7	35
4.203000	14	35
4.303000	22	35
4.403000	26	35
4.503000	29	35
4.603000	30	35
4.703000	27	35
4.803000	21	35
4.903000	13	35
5.003000	3	35
5.803000	6	35
5.903000	16	35
6.003000	19	35
6.103000	25	35
6.203000	27	35
6.303000	27	35
6.403000	24	35
6.503000	17	35
6.603000	8	35
6.703000	0	35
7.503000	6	35
7.603000	14	35
7.703000	21	35
7.803000	26	35
7.903000	25	35
8.003000	21	35
8.111000	13	35
8.211000	5	35

Tabel L.31: Data Bola Tenis Meja 11

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.200000	6	35
0.300000	18	35
0.400000	25	35
0.500000	30	35
0.600000	33	35
0.800000	32	35
0.900000	28	35
1.000000	18	35
1.100000	6	35
1.900000	4	35
2.000000	13	35
2.100000	20	35
2.200000	25	35
2.300000	30	35
2.400000	32	35
2.500000	31	35
2.600000	26	35
2.700000	20	35
2.800000	11	35
2.901000	0	35
3.601000	0	35
3.701000	10	35
3.801000	18	35
3.901000	22	35
4.001000	26	35
4.101000	28	35
4.201000	27	35
4.301000	23	35
4.401000	17	35
4.501000	9	35
5.401000	8	35
5.501000	14	35
5.601000	19	35
5.701000	21	35
5.801000	23	35
5.901000	22	35

Continued on next page

Tabel L.31: Data Bola Tenis Meja 11

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
6.001000	18	35
6.108000	12	35
6.208000	4	35
7.108000	4	35
7.208000	9	35
7.308000	13	35
7.408000	15	35
7.508000	14	35
7.608000	13	35
7.708000	8	35
7.808000	2	35

Tabel L.32: Data Bola Tenis Meja 12

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.801000	6	35
0.901000	16	35
1.001000	24	35
1.101000	29	35
1.201000	32	35
1.301000	29	35
1.402000	33	35
1.502000	31	35
1.602000	24	35
1.702000	13	35
1.802000	2	35
2.602000	1	35
2.702000	8	35
2.802000	18	35
2.902000	24	35
3.002000	29	35
3.102000	32	35
3.202000	33	35
3.302000	32	35
3.402000	26	35
3.502000	19	35

Continued on next page

Tabel L.32: Data Bola Tenis Meja 12

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.602000	8	35
3.702000	0	35
4.502000	6	35
4.602000	13	35
4.702000	19	35
4.802000	25	35
4.902000	29	35
5.002000	30	35
5.102000	27	35
5.202000	23	35
5.302000	16	35
5.402000	8	35
6.402000	6	35
6.502000	13	35
6.602000	19	35
6.702000	24	35
6.802000	26	35
6.902000	24	35
7.005000	19	35
7.105000	13	35
7.205000	4	35
8.105000	5	35
8.205000	15	35
8.305000	20	35
8.405000	24	35
8.512000	22	35
8.612000	19	35
8.712000	13	35
8.812000	5	35
9.712000	3	35
9.912000	17	35
10.012000	19	35
10.112000	23	35
10.212000	22	35
10.312000	19	35
10.412000	13	35

Continued on next page

Tabel L.32: Data Bola Tenis Meja 12

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
10.512000	5	35

Tabel L.33: Data Bola Tenis Meja 13

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.100000	4	35
0.200000	13	35
0.300000	21	35
0.400000	26	35
0.500000	31	35
0.600000	33	35
0.700000	33	35
0.800000	31	35
0.900000	25	35
1.000000	16	35
1.100000	5	35
2.000000	2	35
2.100000	9	35
2.200000	16	35
2.300000	21	35
2.400000	26	35
2.500000	30	35
2.600000	31	35
2.700000	30	35
2.800000	25	35
2.900000	17	35
3.000000	8	35
3.903000	4	35
4.003000	12	35
4.103000	19	35
4.203000	23	35
4.303000	28	35
4.403000	30	35
4.503000	28	35
4.603000	24	35
4.703000	19	35

Continued on next page

Tabel L.33: Data Bola Tenis Meja 13

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.803000	11	35
4.903000	2	35
5.703000	4	35
5.803000	12	35
5.903000	18	35
6.003000	23	35
6.111000	27	35
6.211000	27	35
6.311000	26	35
6.411000	22	35
6.511000	14	35
6.611000	5	35
7.511000	6	35
7.611000	13	35
7.711000	19	35
7.811000	23	35
7.911000	26	35
8.011000	25	35
8.111000	22	35
8.311000	10	35
8.411000	0	35
9.320000	10	35
9.420000	16	35
9.520000	19	35
9.620000	22	35
9.720000	19	35
9.820000	14	35
9.920000	7	35

Tabel L.34: Data Bola Tenis Meja 14

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.600000	2	35
0.700000	14	35
0.800000	23	35
0.900000	30	35

Continued on next page

Tabel L.34: Data Bola Tenis Meja 14

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.000000	33	35
1.100000	33	35
1.200000	33	35
1.300000	29	35
1.400000	21	35
1.500000	10	35
1.600000	1	35
2.400000	5	35
2.500000	13	35
2.601000	21	35
2.701000	26	35
2.801000	29	35
2.901000	32	35
3.001000	28	35
3.101000	24	35
3.201000	14	35
3.301000	8	35
4.101000	1	35
4.201000	9	35
4.301000	18	35
4.401000	23	35
4.501000	27	35
4.601000	29	35
4.701000	28	35
4.801000	22	35
4.901000	16	35
5.001000	8	35
5.801000	0	35
5.901000	9	35
6.001000	17	35
6.101000	22	35
6.201000	26	35
6.301000	30	35
6.401000	28	35
6.501000	23	35
6.601000	17	35

Continued on next page

Tabel L.34: Data Bola Tenis Meja 14

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
6.701000	9	35
7.601000	5	35
7.701000	9	35
7.801000	12	35
7.901000	17	35
8.001000	22	35
8.101000	24	35
8.201000	23	35
8.305000	20	35
8.405000	15	35
8.505000	7	35
8.605000	0	35

Tabel L.35: Data Bola Tenis Meja 15

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.000000	7	35
1.100000	18	35
1.200000	26	35
1.300000	31	35
1.400000	33	35
1.500000	30	35
1.800000	30	35
1.900000	22	35
2.000000	11	35
2.900000	7	35
3.000000	16	35
3.100000	22	35
3.200000	28	35
3.300000	31	35
3.400000	32	35
3.503000	31	35
3.603000	25	35
3.703000	19	35
3.803000	9	35
3.903000	0	35

Continued on next page

Tabel L.35: Data Bola Tenis Meja 15

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.703000	4	35
4.803000	12	35
4.903000	19	35
5.010000	24	35
5.110000	30	35
5.210000	30	35
5.310000	29	35
5.410000	25	35
5.510000	19	35
5.610000	10	35
5.710000	1	35
6.510000	6	35
6.610000	14	35
6.710000	20	35
6.810000	25	35
6.910000	27	35
7.010000	26	35
7.110000	24	35
7.210000	17	35
7.310000	9	35
7.410000	0	35
8.224000	6	35
8.424000	17	35
8.524000	19	35
8.624000	18	35
8.724000	14	35
8.824000	6	35
9.824000	4	35
9.924000	10	35
10.024000	13	35
10.124000	13	35
10.231000	8	35
10.331000	3	35

Tabel L.36: Data Bola Tenis Meja 16

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.200000	1	35
0.300000	11	35
0.400000	20	35
0.500000	26	35
0.600000	31	35
0.700000	32	35
0.800000	33	35
1.000000	32	35
1.100000	26	35
1.200000	18	35
1.300000	9	35
2.107000	0	35
2.207000	7	35
2.307000	17	35
2.407000	23	35
2.507000	28	35
2.607000	31	35
2.707000	31	35
2.807000	30	35
2.907000	24	35
3.007000	19	35
3.107000	10	35
3.207000	2	35
3.908000	0	35
4.009000	8	35
4.109000	15	35
4.220000	22	35
4.320000	26	35
4.420000	28	35
4.520000	28	35
4.620000	28	35
4.721000	23	35
4.821000	17	35
4.921000	6	35
5.821000	6	35
5.921000	14	35

Continued on next page

Tabel L.36: Data Bola Tenis Meja 16

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
6.021000	19	35
6.121000	23	35
6.221000	23	35
6.321000	22	35
6.421000	18	35
6.521000	10	35
6.621000	1	35
7.521000	4	35
7.621000	11	35
7.721000	17	35
7.821000	20	35
7.921000	24	35
8.028000	23	35
8.128000	20	35
8.233000	14	35
8.333000	7	35

Tabel L.37: Data Bola Tenis Meja 17

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.600000	10	35
0.700000	19	35
0.800000	25	35
0.900000	31	35
1.000000	33	35
1.100000	33	35
1.200000	32	35
1.300000	29	35
1.403000	20	35
1.503000	12	35
1.603000	2	35
2.512000	11	35
2.612000	19	35
2.712000	25	35
2.812000	29	35
2.912000	32	35

Continued on next page

Tabel L.37: Data Bola Tenis Meja 17

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.012000	32	35
3.112000	31	35
3.218000	25	35
3.318000	19	35
3.418000	10	35
3.518000	0	35
4.318000	1	35
4.418000	8	35
4.525000	17	35
4.625000	22	35
4.725000	27	35
4.825000	30	35
4.925000	31	35
5.025000	30	35
5.125000	25	35
5.227000	18	35
5.327000	9	35
5.427000	0	35
6.227000	7	35
6.327000	14	35
6.427000	20	35
6.527000	25	35
6.627000	28	35
6.727000	27	35
6.827000	25	35
6.927000	21	35
7.027000	15	35
7.127000	5	35
7.927000	6	35
8.027000	14	35
8.127000	20	35
8.227000	24	35
8.332000	25	35
8.432000	24	35
8.532000	19	35
8.632000	13	35

Continued on next page

Tabel L.37: Data Bola Tenis Meja 17

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
8.732000	4	35
9.432000	0	35
9.532000	9	35
9.632000	16	35
9.732000	20	35
9.832000	20	35
9.932000	19	35
10.032000	12	35
10.136000	3	35

Tabel L.38: Data Bola Tenis Meja 18

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.400000	0	35
0.500000	13	35
0.600000	21	35
0.700000	29	35
0.800000	33	35
0.900000	33	35
1.000000	32	35
1.100000	28	35
1.206000	19	35
1.306000	7	35
2.106000	7	35
2.206000	17	35
2.306000	24	35
2.406000	30	35
2.506000	32	35
2.606000	33	35
2.706000	31	35
2.806000	26	35
2.906000	19	35
3.006000	8	35
3.906000	9	35
4.006000	18	35
4.106000	25	35

Continued on next page

Tabel L.38: Data Bola Tenis Meja 18

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.206000	30	35
4.306000	32	35
4.406000	31	35
4.506000	28	35
4.606000	22	35
4.706000	15	35
4.816000	3	35
5.727000	6	35
5.827000	14	35
5.927000	19	35
6.027000	25	35
6.127000	27	35
6.227000	27	35
6.327000	23	35
6.427000	18	35
6.527000	9	35
7.427000	5	35
7.527000	12	35
7.627000	19	35
7.727000	25	35
7.827000	26	35
7.927000	26	35
8.028000	22	35
8.128000	14	35
8.228000	5	35

Tabel L.39: Data Bola Tenis Meja 19

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.400000	7	35
0.500000	16	35
0.600000	24	35
0.700000	29	35
0.800000	33	35
0.900000	32	35
1.000000	33	35

Continued on next page

Tabel L.39: Data Bola Tenis Meja 19

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.100000	33	35
1.200000	29	35
1.300000	22	35
1.400000	12	35
1.501000	1	35
2.301000	0	35
2.405000	9	35
2.505000	17	35
2.605000	24	35
2.705000	28	35
2.805000	32	35
2.905000	32	35
3.005000	33	35
3.105000	31	35
3.205000	26	35
3.306000	19	35
3.406000	8	35
3.506000	0	35
4.312000	4	35
4.412000	13	35
4.512000	19	35
4.612000	25	35
4.712000	29	35
4.812000	30	35
4.912000	29	35
5.012000	27	35
5.112000	22	35
5.212000	14	35
5.312000	5	35
6.112000	1	35
6.212000	8	35
6.312000	14	35
6.412000	21	35
6.512000	25	35
6.612000	28	35
6.712000	26	35

Continued on next page

Tabel L.39: Data Bola Tenis Meja 19

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
6.812000	23	35
6.912000	19	35
7.012000	11	35
7.112000	1	35
7.912000	2	35
8.012000	10	35
8.112000	18	35
8.212000	22	35
8.312000	26	35
8.412000	25	35
8.512000	24	35
8.612000	19	35
8.712000	12	35
8.812000	4	35

Tabel L.40: Data Bola Tenis Meja 20

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.303000	5	35
1.403000	18	35
1.503000	25	35
1.603000	30	35
1.703000	32	35
1.803000	33	35
2.003000	33	35
2.103000	32	35
2.203000	25	35
2.303000	16	35
2.404000	5	35
3.205000	0	35
3.305000	9	35
3.406000	19	35
3.506000	25	35
3.606000	30	35
3.706000	32	35
3.806000	32	35

Continued on next page

Tabel L.40: Data Bola Tenis Meja 20

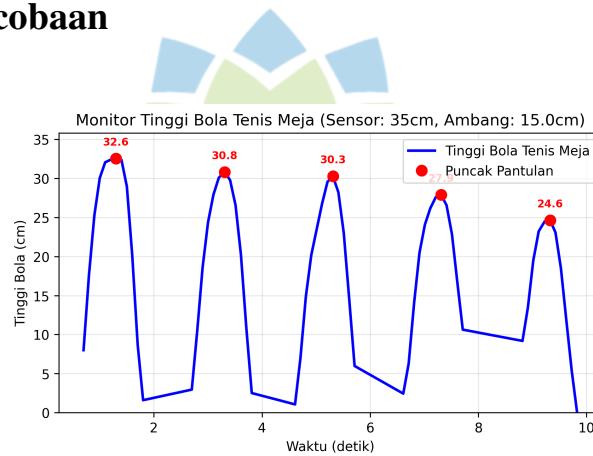
Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.906000	32	35
4.006000	29	35
4.107000	23	35
4.207000	16	35
4.307000	8	35
5.215000	4	35
5.315000	13	35
5.415000	21	35
5.515000	26	35
5.615000	29	35
5.715000	31	35
5.815000	30	35
5.915000	26	35
6.015000	20	35
6.115000	13	35
6.215000	3	35
7.015000	0	35
7.115000	5	35
7.215000	14	35
7.315000	19	35
7.415000	25	35
7.515000	29	35
7.615000	28	35
7.715000	25	35
7.815000	22	35
7.915000	15	35
8.015000	6	35
8.915000	6	35
9.015000	13	35
9.116000	19	35
9.216000	23	35
9.316000	25	35
9.423000	24	35
9.523000	20	35
9.623000	15	35
9.723000	8	35

Continued on next page

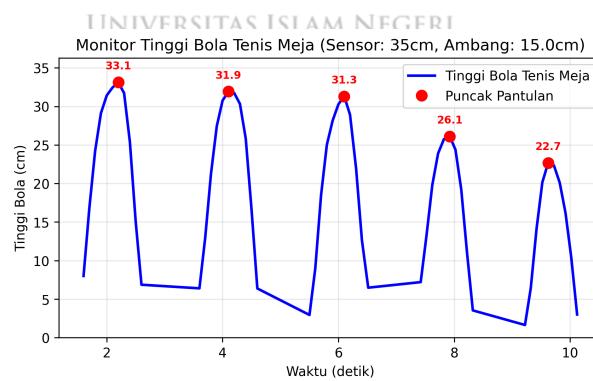
Tabel L.40: Data Bola Tenis Meja 20

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Meja (cm)	Tinggi Sensor (cm)
9.823000	0	35
10.724000	3	35
10.824000	8	35
10.924000	14	35
11.024000	18	35
11.124000	19	35
11.224000	16	35
11.324000	10	35
11.424000	4	35

#### 4.2.2 Grafik Percobaan



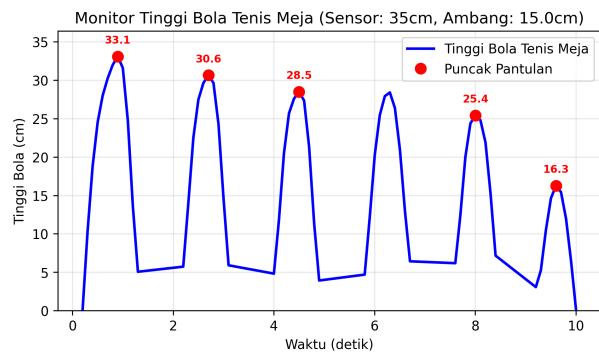
Gambar L.21: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 1



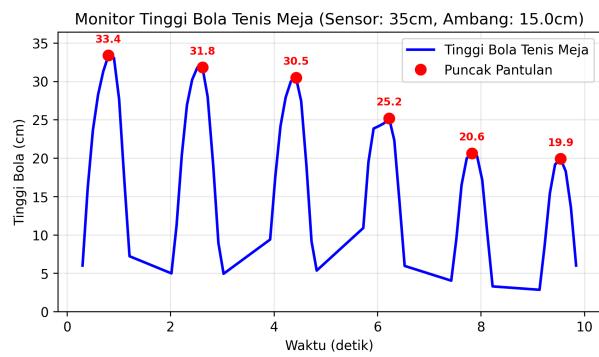
Gambar L.22: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 2

### 4.3 Bola Tenis Lapang

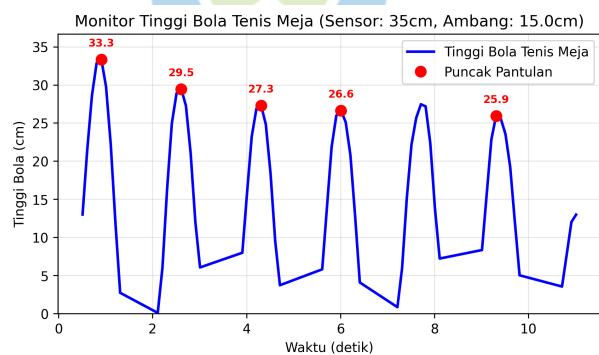
#### 4.3.1 Tabel Percobaan



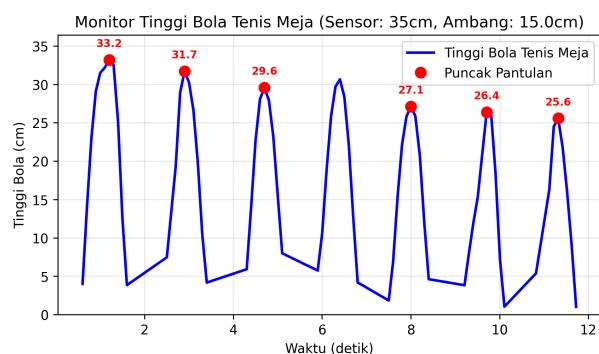
Gambar L.23: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 3



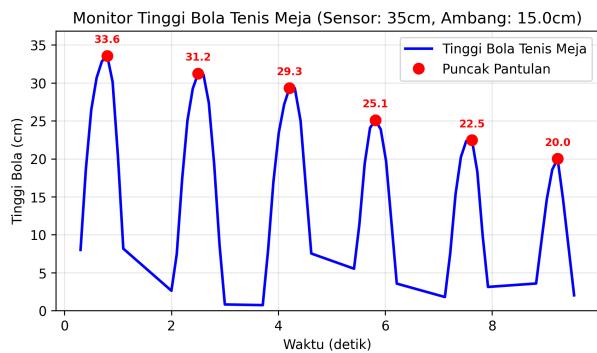
Gambar L.24: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 4



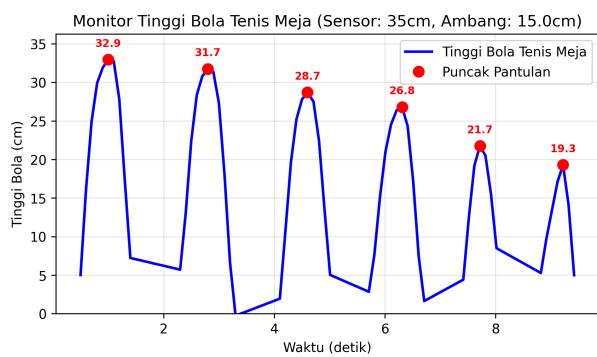
Gambar L.25: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 5



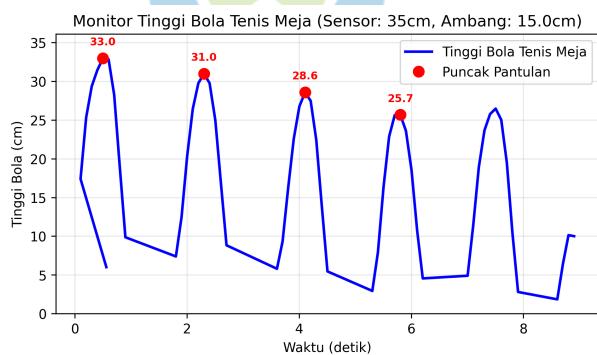
Gambar L.26: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 6



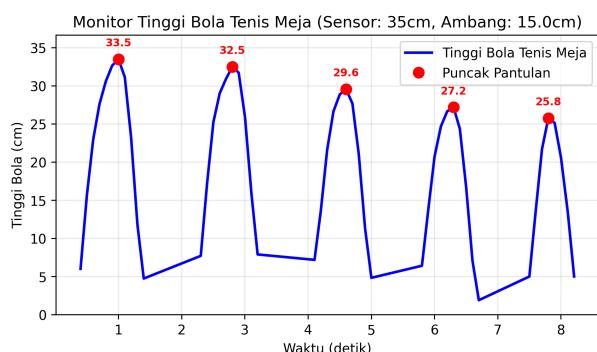
Gambar L.27: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 7



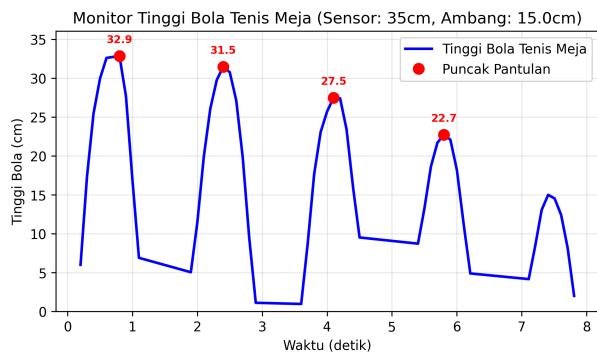
Gambar L.28: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 8



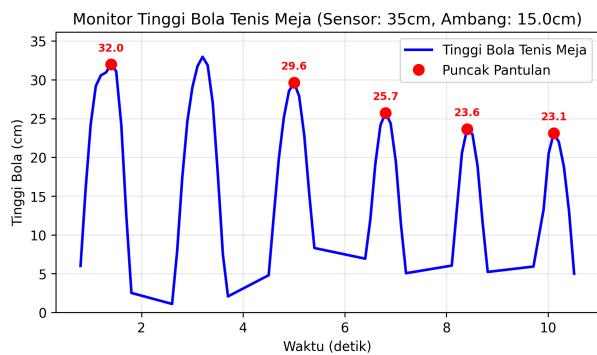
Gambar L.29: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 9



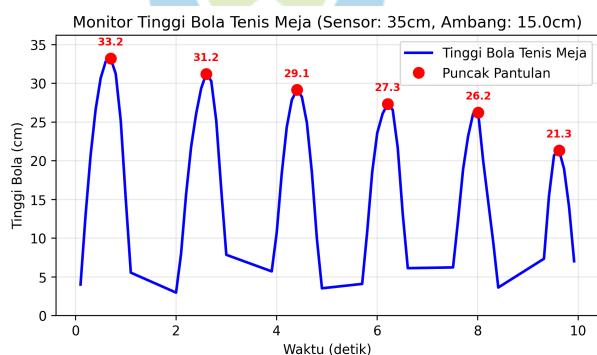
Gambar L.30: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 10



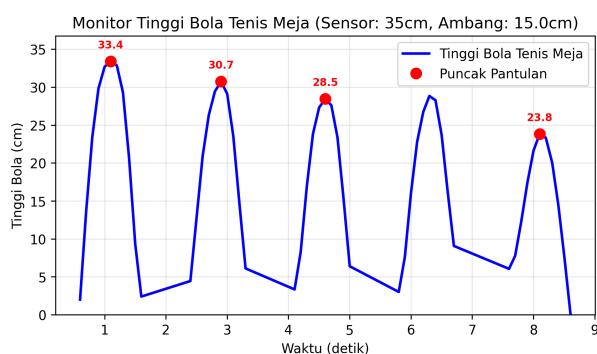
Gambar L.31: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 11



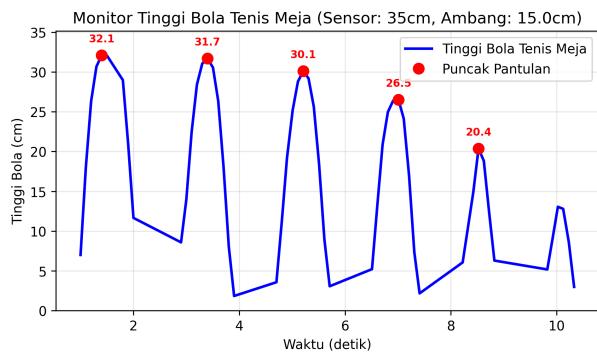
Gambar L.32: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 12



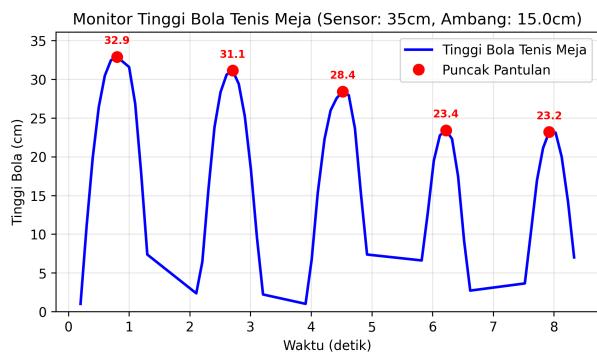
Gambar L.33: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 13



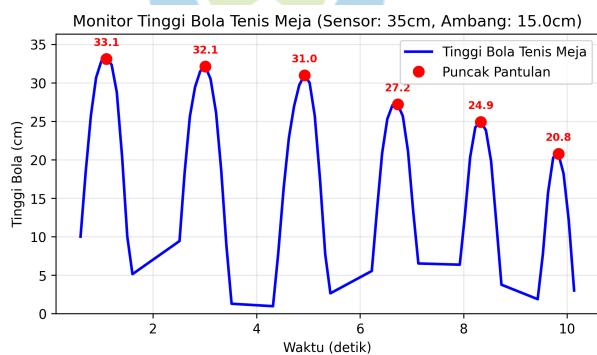
Gambar L.34: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 14



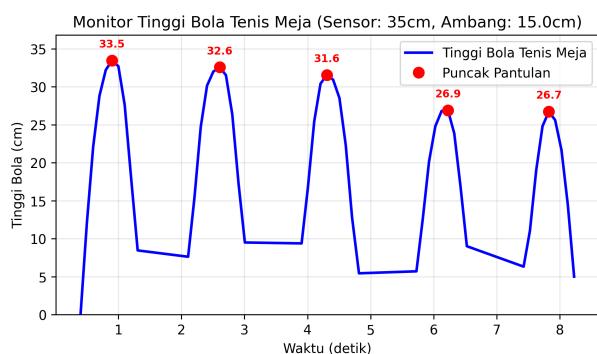
Gambar L.35: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 15



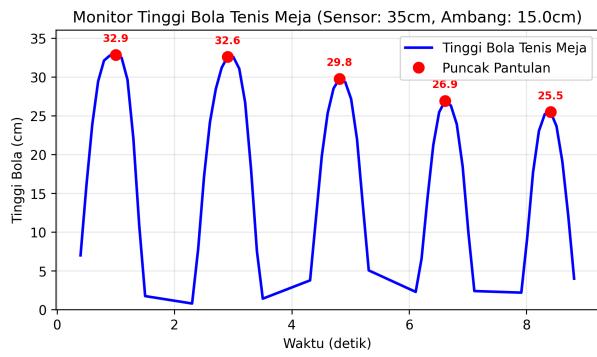
Gambar L.36: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 16



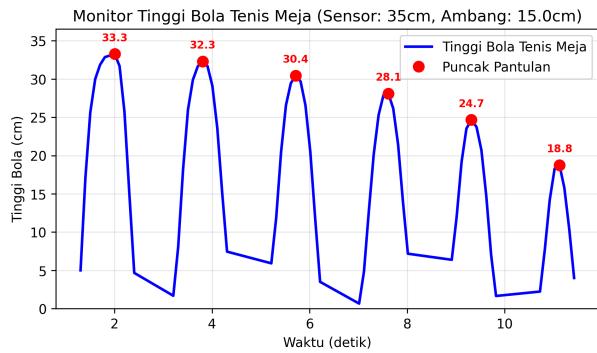
Gambar L.37: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 17



Gambar L.38: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 18



Gambar L.39: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 19



Gambar L.40: Grafik Bola Tenis Meja Percobaan 20

Tabel L.41: Data Bola Tenis Lapang 1

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.000000	1	35
1.100000	10	35
1.200000	19	35
1.300000	26	35
1.400000	30	35
1.500000	33	35
1.600000	32	35
1.700000	31	35
1.800000	27	35
1.900000	19	35
2.000000	10	35
2.100000	2	35
3.200000	8	35
3.300000	16	35
3.400000	21	35
3.500000	24	35
3.600000	28	35

Continued on next page

Tabel L.41: Data Bola Tenis Lapang 1

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.700000	27	35
3.800000	26	35
3.900000	20	35
4.000000	13	35
4.100000	4	35
5.006000	0	35
5.106000	5	35
5.206000	11	35
5.306000	17	35
5.406000	20	35
5.506000	21	35
5.606000	21	35
5.713000	18	35
5.813000	11	35
5.913000	5	35

Tabel L.42: Data Bola Tenis Lapang 2

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.700000	4	35
0.800000	12	35
0.900000	19	35
1.000000	24	35
1.100000	28	35
1.200000	32	35
1.300000	33	35
1.400000	33	35
1.500000	33	35
1.608000	31	35
1.708000	25	35
1.808000	16	35
1.908000	5	35
2.908000	8	35
3.008000	15	35
3.108000	20	35
3.208000	25	35

Continued on next page

Tabel L.42: Data Bola Tenis Lapang 2

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.308000	28	35
3.408000	29	35
3.508000	26	35
3.608000	22	35
3.708000	16	35
3.808000	6	35
4.808000	3	35
4.908000	9	35
5.008000	15	35
5.108000	19	35
5.208000	20	35
5.308000	21	35
5.408000	20	35
5.508000	17	35
5.608000	11	35
5.708000	4	35

Tabel L.43: Data Bola Tenis Lapang 3

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.600000	10	35
0.700000	19	35
0.800000	27	35
0.900000	31	35
1.000000	33	35
1.100000	32	35
1.200000	19	35
1.400000	29	35
1.500000	19	35
1.600000	7	35
2.600000	4	35
2.700000	11	35
2.800000	18	35
2.900000	22	35
3.000000	26	35
3.100000	26	35

Continued on next page

Tabel L.43: Data Bola Tenis Lapang 3

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.200000	23	35
3.300000	18	35
3.400000	9	35
3.500000	0	35
4.400000	0	35
4.500000	6	35
4.600000	13	35
4.700000	16	35
4.800000	17	35
4.900000	16	35
5.000000	12	35
5.100000	5	35
13.220000	0	35
13.320000	0	35
13.420000	2	35
13.520000	1	35
13.620000	0	35
13.820000	0	35
13.920000	0	35
14.520000	0	35
14.620000	0	35

Tabel L.44: Data Bola Tenis Lapang 4

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.100000	1	35
0.200000	10	35
0.300000	19	35
0.400000	27	35
0.500000	32	35
0.600000	33	35
0.700000	33	35
0.800000	30	35
0.900000	21	35
1.000000	10	35
1.915000	2	35

Continued on next page

Tabel L.44: Data Bola Tenis Lapang 4

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.015000	8	35
2.115000	21	35
2.215000	26	35
2.315000	27	35
2.415000	25	35
2.515000	21	35
2.615000	14	35
2.715000	4	35
3.717000	8	35
3.817000	17	35
3.917000	21	35
4.017000	21	35
4.117000	19	35
4.217000	14	35
4.317000	5	35

Tabel L.45: Data Bola Tenis Lapang 5

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.707000	6	35
0.807000	14	35
0.907000	23	35
1.007000	30	35
1.107000	32	35
1.207000	29	35
1.407000	32	35
1.507000	32	35
1.607000	24	35
1.707000	13	35
2.607000	3	35
2.707000	12	35
2.807000	20	35
2.907000	25	35
3.007000	28	35
3.107000	28	35
3.207000	27	35

Continued on next page

Tabel L.45: Data Bola Tenis Lapang 5

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.307000	22	35
3.407000	15	35
3.507000	5	35
4.407000	1	35
4.507000	8	35
4.607000	14	35
4.707000	19	35
4.807000	22	35
4.907000	21	35
5.011000	19	35
5.111000	13	35
5.211000	4	35

Tabel L.46: Data Bola Tenis Lapang 6

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.774657	2	35
1.000000	1	35
1.100000	11	35
1.200000	20	35
1.300000	26	35
1.400000	31	35
1.500000	32	35
1.600000	32	35
1.700000	28	35
1.800000	20	35
1.900000	11	35
2.000000	0	35
2.800000	0	35
2.900000	8	35
3.000000	16	35
3.100000	22	35
3.200000	26	35
3.300000	29	35
3.400000	27	35
3.500000	22	35

Continued on next page

Tabel L.46: Data Bola Tenis Lapang 6

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.600000	16	35
3.700000	6	35
4.600000	5	35
4.700000	13	35
4.800000	18	35
4.900000	22	35
5.000000	25	35
5.100000	23	35
5.200000	19	35
5.300000	13	35
5.400000	2	35

Tabel L.47: Data Bola Tenis Lapang 7

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.700000	16	35
0.800000	24	35
0.900000	30	35
1.000000	33	35
1.100000	32	35
1.200000	32	35
1.300000	32	35
1.400000	28	35
1.500000	19	35
1.600000	10	35
2.500000	5	35
2.600000	12	35
2.705000	19	35
2.805000	23	35
2.905000	26	35
3.005000	25	35
3.105000	22	35
3.205000	19	35
3.305000	13	35
3.405000	3	35
4.305000	0	35

Continued on next page

Tabel L.47: Data Bola Tenis Lapang 7

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.405000	6	35
4.505000	11	35
4.605000	15	35
4.705000	16	35
4.805000	14	35
4.909000	12	35
5.009000	6	35
5.109000	0	35

Tabel L.48: Data Bola Tenis Lapang 8

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.507000	6	35
0.607000	15	35
0.707000	23	35
0.807000	27	35
0.907000	30	35
1.007000	30	35
1.107000	25	35
1.207000	17	35
1.307000	8	35
2.307000	3	35
2.407000	10	35
2.507000	19	35
2.607000	24	35
2.710000	27	35
2.810000	27	35
2.910000	25	35
3.010000	19	35
3.110000	11	35
3.210000	2	35
4.018000	6	35
4.118000	12	35
4.218000	16	35
4.319000	16	35
4.419000	12	35

Continued on next page

Tabel L.48: Data Bola Tenis Lapang 8

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.519000	4	35

Tabel L.49: Data Bola Tenis Lapang 9

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.400000	0	35
0.500000	10	35
0.600000	18	35
0.700000	24	35
0.800000	29	35
0.900000	29	35
1.000000	26	35
1.109000	22	35
1.209000	14	35
1.313000	6	35
2.417000	4	35
2.517000	12	35
2.617000	19	35
2.717000	25	35
2.817000	26	35
2.917000	24	35
3.017000	18	35
3.118000	7	35
3.218000	1	35
4.228000	4	35
4.328000	10	35
4.428000	15	35
4.528000	17	35
4.628000	19	35
4.728000	17	35
4.828000	13	35
4.928000	6	35

Tabel L.50: Data Bola Tenis Lapang 10

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.707000	7	35
2.807000	18	35
2.907000	25	35
3.007000	31	35
3.107000	33	35
3.207000	33	35
3.307000	28	35
3.408000	22	35
3.508000	12	35
3.608000	2	35
4.415000	2	35
4.515000	11	35
4.622000	20	35
4.722000	25	35
4.822000	27	35
4.922000	27	35
5.022000	23	35
5.122000	12	35
5.222000	8	35
6.122000	5	35
6.222000	13	35
6.322000	18	35
6.422000	20	35
6.522000	20	35
6.622000	16	35
6.722000	7	35
6.822000	1	35

Tabel L.51: Data Bola Tenis Lapang 11

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.101000	3	35
1.201000	12	35
1.301000	20	35
1.401000	28	35
1.501000	31	35

Continued on next page

Tabel L.51: Data Bola Tenis Lapang 11

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.601000	32	35
1.701000	33	35
1.801000	29	35
1.901000	22	35
2.001000	13	35
2.101000	5	35
3.005000	6	35
3.105000	13	35
3.205000	20	35
3.305000	25	35
3.405000	28	35
3.505000	28	35
3.605000	24	35
3.705000	19	35
3.805000	9	35
3.905000	0	35
4.805000	0	35
4.905000	6	35
5.005000	13	35
5.105000	19	35
5.205000	20	35
5.305000	19	35
5.405000	17	35
5.505000	SUNAN GUUNG DJATI	35
5.605000	4	35

Tabel L.52: Data Bola Tenis Lapang 12

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.500000	8	35
0.600000	18	35
0.700000	26	35
0.800000	30	35
0.900000	33	35
1.000000	33	35
1.100000	33	35

Continued on next page

Tabel L.52: Data Bola Tenis Lapang 12

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.200000	30	35
1.300000	21	35
1.400000	7	35
1.500000	2	35
2.311000	6	35
2.411000	14	35
2.511000	22	35
2.611000	26	35
2.711000	28	35
2.811000	28	35
2.911000	26	35
3.011000	21	35
3.111000	13	35
3.211000	5	35
4.112000	4	35
4.212000	10	35
4.312000	16	35
4.412000	20	35
4.512000	21	35
4.621000	22	35
4.721000	19	35
4.821000	13	35
4.921000	10	35
5.021000	2	35

Tabel L.53: Data Bola Tenis Lapang 13

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.101000	0	35
0.201000	11	35
0.301000	20	35
0.401000	26	35
0.502000	31	35
0.602000	32	35
0.710000	32	35
0.810000	28	35

Continued on next page

Tabel L.53: Data Bola Tenis Lapang 13

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.910000	22	35
1.010000	12	35
1.110000	2	35
1.910000	1	35
2.010000	12	35
2.110000	19	35
2.210000	25	35
2.310000	28	35
2.410000	30	35
2.511000	27	35
2.611000	24	35
2.711000	15	35
2.811000	6	35
3.611000	2	35
3.711000	10	35
3.811000	18	35
3.911000	20	35
4.011000	20	35
4.115000	15	35
4.215000	6	35

Tabel L.54: Data Bola Tenis Lapang 14

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.600000	3	35
0.700000	10	35
0.800000	19	35
0.900000	25	35
1.000000	29	35
1.100000	30	35
1.200000	31	35
1.300000	31	35
1.400000	28	35
1.500000	24	35
1.600000	16	35
1.700000	7	35

Continued on next page

Tabel L.54: Data Bola Tenis Lapang 14

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.713000	6	35
2.813000	14	35
2.913000	17	35
3.013000	26	35
3.113000	28	35
3.213000	28	35
3.313000	24	35
3.413000	19	35
3.513000	12	35
3.613000	4	35
4.513000	1	35
4.613000	8	35
4.713000	15	35
4.813000	24	35
4.913000	26	35
5.013000	27	35
5.118000	24	35
5.218000	19	35
5.319000	11	35
5.419000	3	35
6.419000	0	35

Tabel L.55: Data Bola Tenis Lapang 15

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.200000	6	35
0.300000	16	35
0.400000	25	35
0.500000	30	35
0.600000	32	35
0.700000	31	35
0.800000	32	35
0.900000	27	35
1.000000	19	35
1.100000	11	35
1.200000	2	35

Continued on next page

Tabel L.55: Data Bola Tenis Lapang 15

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.200000	3	35
2.300000	9	35
2.400000	17	35
2.501000	25	35
2.601000	29	35
2.701000	31	35
2.801000	29	35
2.901000	24	35
3.001000	17	35
3.101000	8	35
4.010000	0	35
4.110000	7	35
4.210000	14	35
4.310000	19	35
4.410000	20	35
4.510000	19	35
4.610000	15	35
4.711000	6	35

Tabel L.56: Data Bola Tenis Lapang 16

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.200000	5	35
0.300000	14	35
0.400000	22	35
0.500000	30	35
0.600000	32	35
0.700000	33	35
0.800000	32	35
0.900000	26	35
1.000000	16	35
1.100000	3	35
2.002000	4	35
2.102000	13	35
2.202000	20	35
2.302000	28	35

Continued on next page

Tabel L.56: Data Bola Tenis Lapang 16

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.402000	30	35
2.502000	30	35
2.602000	26	35
2.702000	19	35
2.808000	12	35
2.908000	3	35
3.708000	0	35
3.808000	8	35
3.908000	16	35
4.008000	20	35
4.108000	25	35
4.211000	24	35
4.311000	24	35
4.411000	19	35
4.511000	13	35
4.611000	5	35

Tabel L.57: Data Bola Tenis Lapang 17

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.400000	5	35
0.500000	16	35
0.600000	25	35
0.700000	29	35
0.800000	32	35
0.900000	33	35
1.000000	33	35
1.100000	31	35
1.207000	24	35
1.307000	16	35
1.413000	6	35
2.313000	2	35
2.413000	9	35
2.513000	17	35
2.613000	23	35
2.715000	27	35

Continued on next page

Tabel L.57: Data Bola Tenis Lapang 17

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.815000	29	35
2.915000	29	35
3.020000	26	35
3.120000	19	35
3.220000	10	35
3.320000	2	35
4.120000	2	35
4.220000	10	35
4.320000	18	35
4.420000	22	35
4.520000	25	35
4.620000	24	35
4.720000	20	35
4.820000	13	35
4.920000	4	35

Tabel L.58: Data Bola Tenis Lapang 18

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.500000	2	35
0.600000	12	35
0.700000	21	35
0.809000	28	35
0.909000	32	35
1.009000	32	35
1.109000	28	35
1.209000	20	35
1.309000	11	35
2.310000	6	35
2.410000	14	35
2.510000	19	35
2.610000	24	35
2.710000	28	35
2.810000	29	35
2.910000	26	35
3.010000	21	35

Continued on next page

Tabel L.58: Data Bola Tenis Lapang 18

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.110000	14	35
3.210000	5	35
4.120000	3	35
4.220000	9	35
4.320000	15	35
4.420000	19	35
4.526000	22	35
4.626000	21	35
4.726000	19	35
4.826000	13	35
4.926000	5	35

Tabel L.59: Data Bola Tenis Lapang 19

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.330000	6	35
0.430000	17	35
0.530000	23	35
0.630000	29	35
0.730000	32	35
0.830000	32	35
0.930000	31	35
1.030000	26	35
1.139000	17	35
1.239000	8	35
2.139000	0	35
2.239000	9	35
2.339000	18	35
2.439000	23	35
2.539000	26	35
2.639000	27	35
2.739000	22	35
2.839000	16	35
2.939000	6	35
3.939000	6	35
4.039000	13	35

Continued on next page

Tabel L.59: Data Bola Tenis Lapang 19

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.139000	16	35
4.239000	17	35
4.339000	15	35
4.439000	10	35
4.539000	5	35

Tabel L.60: Data Bola Tenis Lapang 20

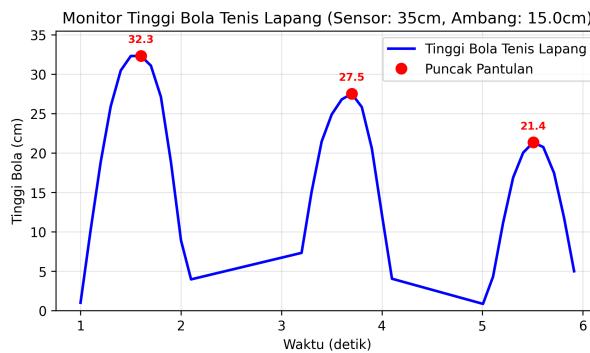
Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.700000	5	35
0.800000	14	35
0.900000	22	35
1.000000	27	35
1.100000	32	35
1.200000	33	35
1.300000	32	35
1.400000	30	35
1.500000	22	35
1.600000	15	35
1.700000	3	35
2.700000	7	35
2.806000	16	35
2.906000	24	35
3.006000	28	35
3.106000	30	35
3.206000	28	35
3.306000	23	35
3.406000	18	35
3.506000	8	35
4.506000	6	35
4.606000	14	35
4.706000	21	35
4.806000	24	35
4.906000	24	35
5.006000	19	35
5.106000	10	35

Continued on next page

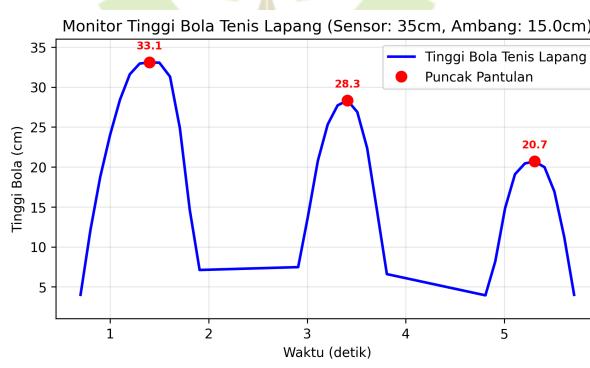
Tabel L.60: Data Bola Tenis Lapang 20

Waktu (detik)	Tinggi Bola Tenis Lapang (cm)	Tinggi Sensor (cm)
5.206000	1	35

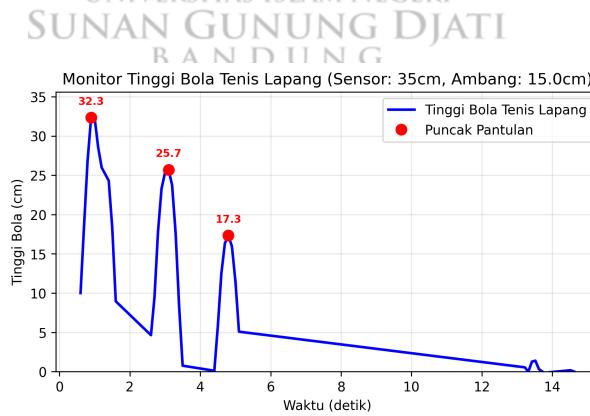
### 4.3.2 Grafik Percobaan



Gambar L.41: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 1



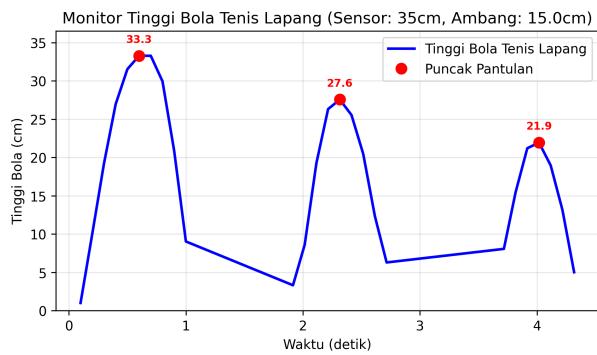
Gambar L.42: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 2



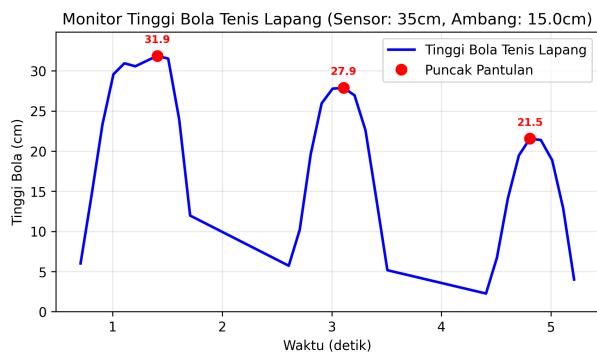
Gambar L.43: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 3

## 4.4 Bola Sepak Karet

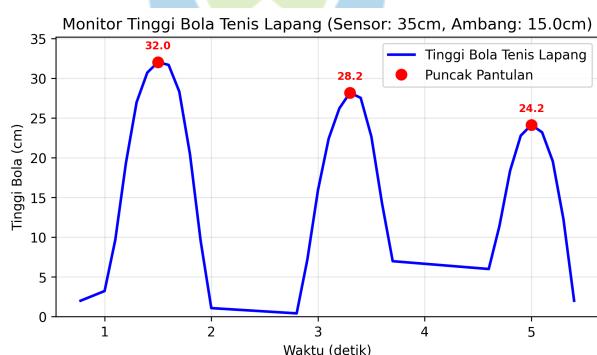
### 4.4.1 Tabel Percobaan



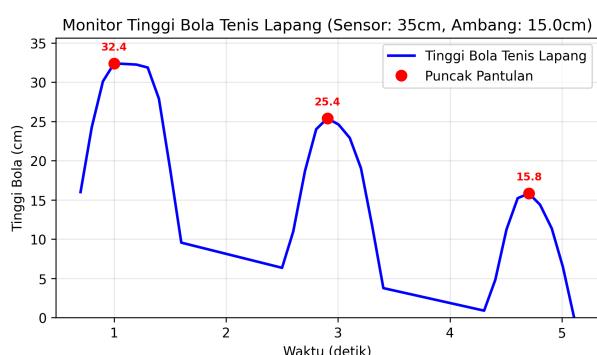
Gambar L.44: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 4



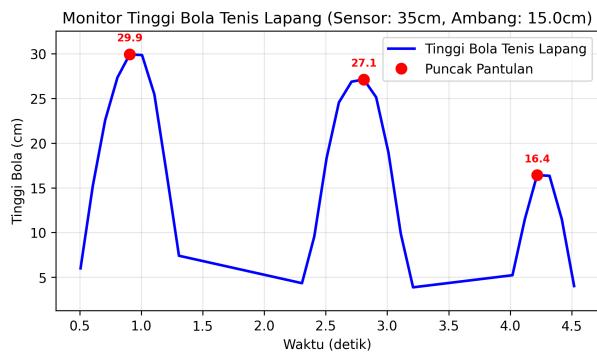
Gambar L.45: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 5



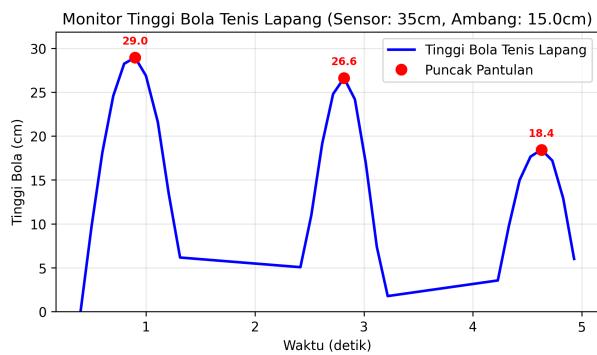
Gambar L.46: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 6



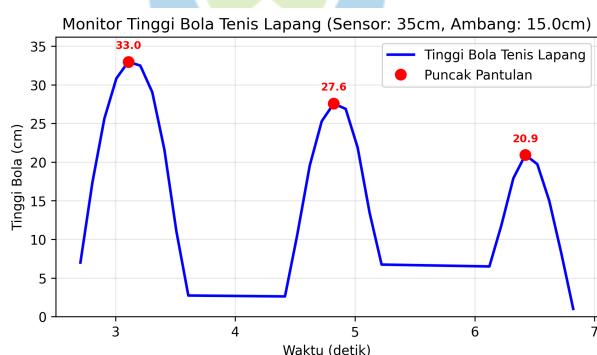
Gambar L.47: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 7



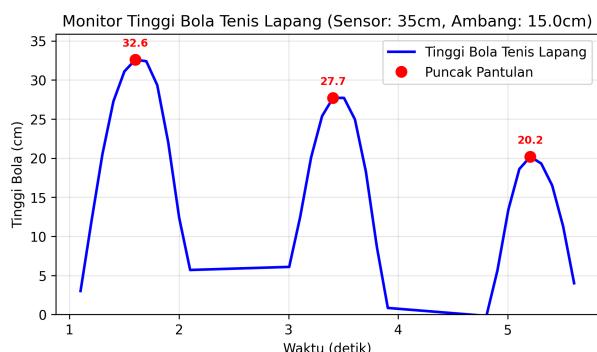
Gambar L.48: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 8



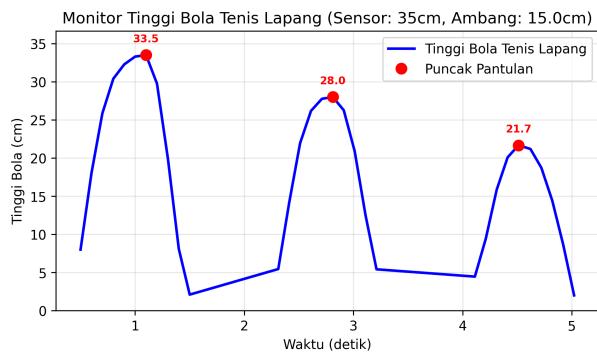
Gambar L.49: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 9



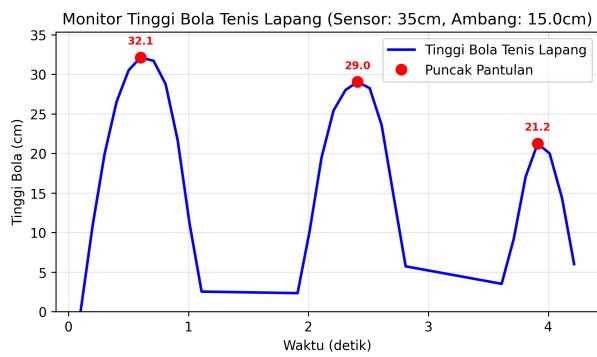
Gambar L.50: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 10



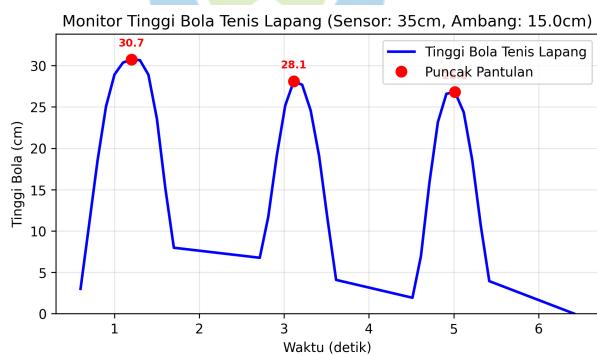
Gambar L.51: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 11



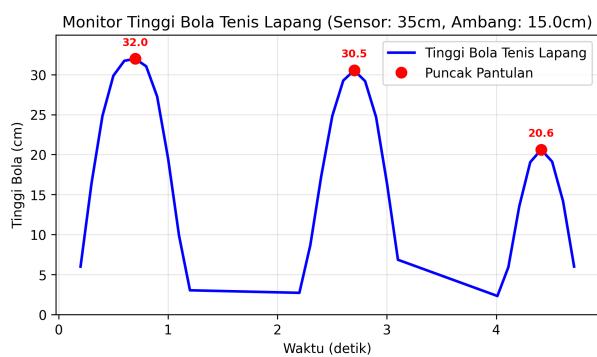
Gambar L.52: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 12



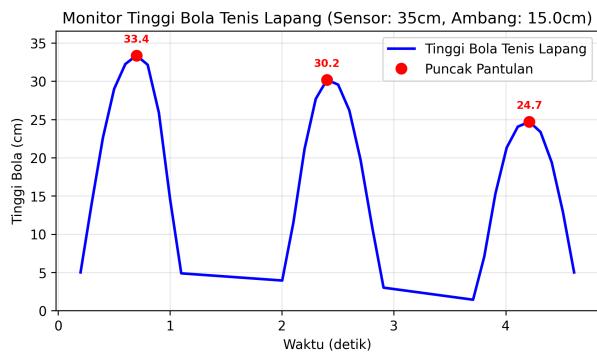
Gambar L.53: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 13



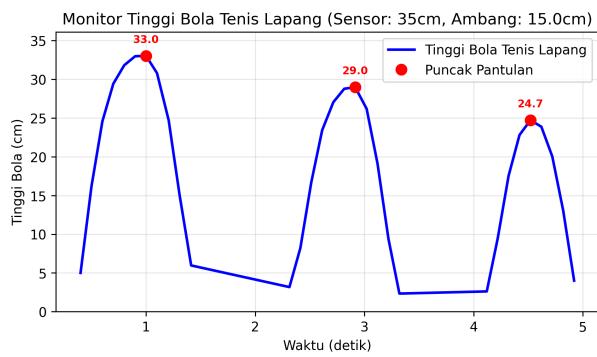
Gambar L.54: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 14



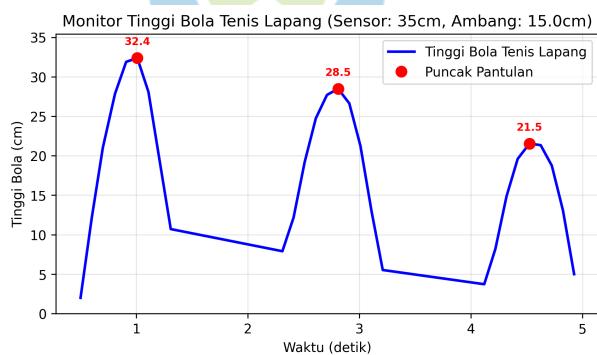
Gambar L.55: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 15



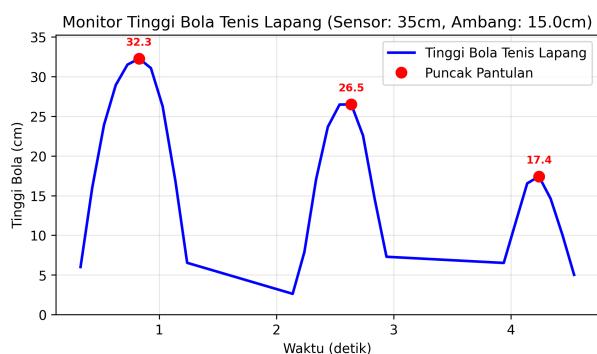
Gambar L.56: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 16



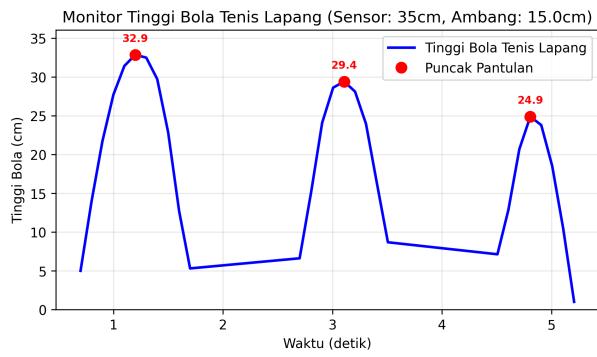
Gambar L.57: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 17



Gambar L.58: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 18



Gambar L.59: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 19



Gambar L.60: Grafik Bola Tenis Lapang Percobaan 20

Tabel L.61: Data Bola Sepak Karet 1

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.009000	8	35
2.109000	19	35
2.209000	27	35
2.309000	31	35
2.409000	33	35
2.509000	32	35
2.609000	28	35
2.709000	20	35
2.809000	10	35
3.716000	4	35
3.816000	12	35
3.916000	17	35
4.016000	23	35
4.116000	25	35
4.216000	24	35
4.316000	20	35
4.416000	13	35
4.516000	6	35
5.417000	2	35
5.517000	6	35
5.617000	7	35
5.717000	7	35
5.817000	8	35
5.917000	6	35
6.017000	6	35
6.117000	6	35

Continued on next page

Tabel L.61: Data Bola Sepak Karet 1

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
6.217000	7	35
6.317000	7	35
6.417000	7	35
6.517000	7	35
6.618000	7	35
6.718000	7	35
6.819000	7	35
6.919000	7	35
7.019000	7	35
7.119000	7	35
7.219000	7	35
7.319000	6	35
7.419000	6	35
7.519000	6	35
7.619000	6	35
7.719000	6	35
7.819000	6	35
7.920000	6	35
8.020000	7	35
8.120000	7	35
8.220000	7	35
8.320000	7	35
8.420000	6	35
8.520000	6	35
8.620000	6	35
8.720000	6	35
8.828000	7	35
9.030000	0	35

Tabel L.62: Data Bola Sepak Karet 2

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.100000	12	35
2.200000	21	35
2.300000	28	35
2.400000	31	35

Continued on next page

Tabel L.62: Data Bola Sepak Karet 2

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.500000	32	35
2.600000	32	35
2.700000	27	35
2.800000	19	35
2.900000	8	35
3.000000	0	35
3.800000	4	35
3.900000	11	35
4.000000	17	35
4.100000	22	35
4.200000	25	35
4.300000	26	35
4.400000	24	35
4.500000	19	35
4.600000	12	35
4.700000	4	35
5.709000	5	35
5.809000	10	35
5.909000	14	35
6.009000	17	35
6.109000	19	35
6.209000	18	35
6.309000	14	35
6.409000	10	35
6.509000	6	35
6.609000	2	35
8.613000	0	35
8.713000	0	35
10.320000	0	35
10.420000	0	35
10.520000	0	35

Tabel L.63: Data Bola Sepak Karet 3

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.905000	4	35

Continued on next page

Tabel L.63: Data Bola Sepak Karet 3

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.005000	13	35
2.105000	24	35
2.205000	30	35
2.508000	33	35
2.608000	32	35
2.708000	29	35
2.808000	22	35
2.908000	12	35
3.008000	5	35
3.908000	4	35
4.008000	11	35
4.108000	15	35
4.208000	23	35
4.308000	28	35
4.408000	30	35
4.508000	31	35
4.608000	29	35
4.708000	25	35
4.808000	19	35
4.908000	11	35
5.012000	3	35
5.822000	6	35
5.922000	11	35
6.022000	18	35
6.122000	22	35
6.222000	23	35
6.322000	23	35
6.422000	20	35
6.522000	18	35
6.622000	13	35
6.722000	8	35
6.822000	2	35
11.123000	0	35
11.224000	0	35
11.524000	0	35
11.624000	0	35

Continued on next page

Tabel L.63: Data Bola Sepak Karet 3

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
11.724000	2	35
11.824000	1	35
11.924000	1	35
12.024000	1	35
12.124000	0	35

Tabel L.64: Data Bola Sepak Karet 4

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.911000	14	35
2.011000	24	35
2.111000	29	35
2.211000	32	35
2.311000	33	35
2.411000	33	35
2.511000	31	35
2.611000	22	35
2.711000	14	35
2.811000	2	35
3.611000	0	35
3.711000	9	35
3.811000	17	35
3.911000	22	35
4.011000	26	35
4.111000	29	35
4.211000	30	35
4.311000	28	35
4.411000	24	35
4.511000	17	35
4.611000	8	35
5.511000	4	35
5.611000	10	35
5.711000	14	35
5.817000	19	35
5.917000	20	35
6.017000	20	35

Continued on next page

Tabel L.64: Data Bola Sepak Karet 4

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
6.117000	19	35
6.217000	16	35
6.317000	12	35
6.417000	8	35
6.517000	4	35
8.320000	0	35
8.420000	1	35
10.253000	3	35
10.353000	3	35
10.453000	3	35
10.556000	3	35
10.656000	3	35
10.756000	5	35
10.862000	5	35
10.962000	6	35
11.062000	6	35
11.162000	5	35
11.262000	6	35
11.362000	6	35
11.462000	5	35
11.562000	5	35
11.662000	6	35
11.762000	3	35

SUNAN GUNUNG DJATI  
BANDUNG

Tabel L.65: Data Bola Sepak Karet 5

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.218000	10	35
2.318000	21	35
2.418000	29	35
2.518000	32	35
2.618000	30	35
2.818000	31	35
2.922000	23	35
3.022000	14	35
3.123000	4	35

Continued on next page

Tabel L.65: Data Bola Sepak Karet 5

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.923000	3	35
4.023000	11	35
4.123000	19	35
4.226000	23	35
4.326000	26	35
4.426000	27	35
4.526000	26	35
4.626000	24	35
4.726000	19	35
4.826000	14	35
4.926000	6	35
5.926000	4	35
6.031000	8	35
6.131000	12	35
6.231000	14	35
6.331000	14	35
6.431000	14	35
6.531000	12	35
6.631000	12	35
6.731000	9	35
6.832000	5	35
6.932000	1	35

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI  
SUNAN GUNUNG DIATI  
BANDUNG

Tabel L.66: Data Bola Sepak Karet 6

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.802000	4	35
1.902000	16	35
2.002000	24	35
2.102000	29	35
2.202000	32	35
2.302000	33	35
2.402000	30	35
2.502000	25	35
2.602000	18	35
3.702000	0	35

Continued on next page

Tabel L.66: Data Bola Sepak Karet 6

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.802000	8	35
3.902000	15	35
4.002000	20	35
4.102000	25	35
4.202000	28	35
4.302000	29	35
4.402000	27	35
4.502000	21	35
4.602000	17	35
4.702000	9	35
4.802000	0	35
5.806000	6	35
5.906000	11	35
6.006000	15	35
6.106000	17	35
6.206000	17	35
6.306000	18	35
6.406000	18	35
6.506000	15	35
6.606000	12	35
6.706000	6	35
8.610000	1	35
8.710000	3	35
8.810000	3	35

Tabel L.67: Data Bola Sepak Karet 7

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.201000	0	35
2.301000	12	35
2.401000	22	35
2.511000	30	35
2.611000	33	35
2.711000	33	35
2.811000	33	35
2.911000	29	35

Continued on next page

Tabel L.67: Data Bola Sepak Karet 7

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.011000	21	35
3.111000	13	35
3.211000	1	35
4.114000	0	35
4.214000	10	35
4.314000	18	35
4.414000	23	35
4.514000	27	35
4.614000	30	35
4.714000	30	35
4.814000	28	35
4.914000	22	35
5.014000	13	35
6.115000	4	35
6.215000	11	35
6.315000	18	35
6.415000	21	35
6.515000	25	35
6.615000	25	35
6.715000	23	35
6.815000	20	35
6.915000	13	35
7.015000	5	35
9.526000	0	35

Tabel L.68: Data Bola Sepak Karet 8

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.200000	9	35
0.300000	19	35
0.400000	24	35
0.500000	28	35
0.600000	32	35
0.700000	33	35
0.800000	33	35
0.900000	32	35

Continued on next page

Tabel L.68: Data Bola Sepak Karet 8

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.000000	28	35
1.100000	20	35
1.200000	10	35
1.300000	0	35
2.200000	3	35
2.300000	10	35
2.400000	17	35
2.500000	21	35
2.600000	25	35
2.700000	28	35
2.803000	28	35
2.903000	29	35
3.004000	26	35
3.104000	22	35
3.204000	16	35
3.304000	9	35
3.404000	1	35
4.405000	6	35
4.505000	12	35
4.605000	17	35
4.705000	19	35
4.805000	21	35
4.905000	21	35
5.005000	19	35
5.105000	16	35
5.205000	10	35
5.305000	5	35
7.317000	0	35

Tabel L.69: Data Bola Sepak Karet 9

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
6.035000	1	35
6.135000	18	35
6.236000	25	35
6.336000	29	35

Continued on next page

Tabel L.69: Data Bola Sepak Karet 9

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
6.436000	32	35
6.536000	32	35
6.636000	31	35
6.736000	27	35
6.836000	19	35
6.936000	8	35
8.150000	11	35
8.250000	19	35
8.350000	23	35
8.450000	26	35
8.550000	27	35
8.650000	26	35
8.750000	23	35
8.850000	17	35
8.950000	9	35
10.258000	5	35
10.358000	11	35
10.458000	14	35
10.558000	18	35
10.658000	19	35
10.758000	17	35
10.858000	13	35
10.958000	10	35

SUNAN GUNUNG DJATI  
BANDUNG

Tabel L.70: Data Bola Sepak Karet 10

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.600000	7	35
0.700000	18	35
0.800000	25	35
0.900000	29	35
1.000000	32	35
1.100000	33	35
1.200000	33	35
1.308000	31	35
1.408000	23	35

Continued on next page

Tabel L.70: Data Bola Sepak Karet 10

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.514000	15	35
1.614000	5	35
2.614000	5	35
2.714000	14	35
2.815000	21	35
2.915000	27	35
3.025000	28	35
3.125000	28	35
3.225000	24	35
3.325000	18	35
3.425000	10	35
3.525000	1	35
4.531000	0	35
4.631000	7	35
4.731000	14	35
4.831000	19	35
4.931000	21	35
5.031000	23	35
5.131000	23	35
5.231000	25	35
5.331000	23	35
5.431000	19	35
5.531000	16	35
5.631000	8	35
5.731000	5	35
6.842000	1	35
6.942000	3	35
7.048000	4	35
7.148000	4	35
7.248000	4	35
7.348000	4	35
7.448000	4	35
7.548000	4	35
7.648000	4	35
7.748000	4	35
7.848000	4	35

Continued on next page

Tabel L.70: Data Bola Sepak Karet 10

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
7.948000	4	35
8.048000	3	35
8.155000	4	35
8.255000	3	35

Tabel L.71: Data Bola Sepak Karet 11

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.500000	3	35
0.600000	12	35
0.700000	21	35
0.800000	28	35
0.900000	31	35
1.000000	32	35
1.100000	32	35
1.200000	30	35
1.300000	23	35
1.400000	15	35
1.500000	7	35
2.600000	5	35
2.700000	14	35
2.800000	21	35
2.900000	27	35
3.000000	30	35
3.100000	30	35
3.200000	27	35
3.300000	23	35
3.404000	15	35
3.504000	8	35
3.606000	0	35
4.506000	3	35
4.606000	11	35
4.706000	17	35
4.806000	20	35
4.906000	22	35
5.006000	21	35

Continued on next page

Tabel L.71: Data Bola Sepak Karet 11

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
5.106000	17	35
5.206000	10	35
5.306000	3	35
6.714000	0	35
6.814000	0	35
6.914000	0	35
7.014000	0	35
7.114000	0	35
7.214000	1	35
7.314000	0	35
7.414000	0	35
7.514000	1	35
7.616000	1	35
7.716000	1	35
7.816000	0	35
7.916000	1	35
8.016000	1	35
8.116000	0	35
8.216000	0	35
8.316000	0	35
8.416000	0	35
8.516000	0	35

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI  
SUNAN GUNUNG DIATI  
BANDUNG

Tabel L.72: Data Bola Sepak Karet 12

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.000000	19	35
1.100000	26	35
1.200000	31	35
1.300000	33	35
1.402000	33	35
1.502000	30	35
1.602000	25	35
1.702000	19	35
1.802000	12	35
1.902000	2	35

Continued on next page

Tabel L.72: Data Bola Sepak Karet 12

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.902000	9	35
3.006000	18	35
3.106000	24	35
3.207000	29	35
3.307000	30	35
3.412000	28	35
3.512000	24	35
3.612000	17	35
3.712000	10	35
3.812000	0	35
4.712000	2	35
4.812000	11	35
4.912000	17	35
5.012000	21	35
5.112000	25	35
5.212000	25	35
5.312000	24	35
5.421000	20	35
5.521000	15	35
5.622000	6	35
7.022000	1	35
7.122000	6	35
7.232000	7	35
7.332000	7	35
7.437000	6	35
7.537000	4	35
7.637000	3	35
7.737000	0	35
8.037000	0	35
8.637000	0	35
9.641000	0	35
9.741000	0	35
9.841000	0	35
9.941000	0	35

Tabel L.73: Data Bola Sepak Karet 13

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.000000	11	35
1.100000	20	35
1.200000	28	35
1.300000	32	35
1.400000	32	35
1.500000	31	35
1.600000	27	35
1.700000	20	35
1.800000	13	35
1.900000	5	35
3.001000	8	35
3.101000	16	35
3.201000	24	35
3.301000	27	35
3.401000	30	35
3.501000	30	35
3.601000	29	35
3.701000	24	35
3.801000	16	35
3.901000	9	35
4.001000	0	35
4.802000	0	35
4.902000	6	35
5.002000	13	35
5.102000	18	35
5.210000	22	35
5.310000	23	35
5.410000	23	35
5.510000	22	35
5.610000	17	35
5.710000	11	35
5.810000	5	35
6.710000	2	35
6.810000	5	35
6.910000	4	35
7.014000	0	35

Tabel L.74: Data Bola Sepak Karet 14

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.200000	4	35
0.300000	12	35
0.400000	20	35
0.502000	27	35
0.602000	31	35
0.702000	32	35
0.802000	31	35
0.902000	27	35
1.002000	20	35
1.102000	11	35
1.202000	1	35
2.206000	3	35
2.311000	9	35
2.411000	18	35
2.511000	23	35
2.611000	26	35
2.711000	28	35
2.811000	28	35
2.911000	25	35
3.011000	19	35
3.111000	14	35
3.211000	5	35
4.111000	0	35
4.211000	6	35
4.311000	11	35
4.411000	16	35
4.517000	18	35
4.617000	17	35
4.717000	14	35
4.817000	9	35
4.917000	3	35

Tabel L.75: Data Bola Sepak Karet 15

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.010000	5	35

Continued on next page

Tabel L.75: Data Bola Sepak Karet 15

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.110000	13	35
1.210000	20	35
1.310000	27	35
1.410000	31	35
1.510000	32	35
1.610000	33	35
1.710000	30	35
1.810000	25	35
1.910000	19	35
2.010000	11	35
3.010000	1	35
3.110000	10	35
3.210000	18	35
3.310000	23	35
3.413000	28	35
3.513000	30	35
3.613000	28	35
3.713000	24	35
3.813000	19	35
4.013000	3	35
4.916000	2	35
5.016000	9	35
5.116000	15	35
5.218000	20	35
5.318000	23	35
5.425000	24	35
5.525000	23	35
5.625000	19	35
5.725000	13	35
5.825000	6	35
8.226000	0	35
8.626000	0	35
8.726000	2	35
8.826000	2	35
8.926000	3	35
9.026000	4	35

Continued on next page

Tabel L.75: Data Bola Sepak Karet 15

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
9.126000	4	35
9.226000	4	35
9.326000	4	35

Tabel L.76: Data Bola Sepak Karet 16

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.400000	4	35
0.600000	20	35
0.700000	27	35
0.800000	32	35
0.900000	32	35
1.000000	33	35
1.100000	29	35
1.200000	22	35
1.300000	11	35
1.400000	3	35
2.300000	3	35
2.400000	10	35
2.500000	19	35
2.600000	24	35
2.706000	28	35
2.806000	27	35
2.906000	25	35
3.006000	19	35
3.206000	5	35
4.216000	6	35
4.316000	13	35
4.416000	17	35
4.516000	20	35
4.616000	19	35
4.716000	16	35
4.816000	11	35
4.926000	5	35

Tabel L.77: Data Bola Sepak Karet 17

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.300000	7	35
1.400000	17	35
1.500000	24	35
1.604000	30	35
1.704000	33	35
1.804000	29	35
1.904000	33	35
2.004000	28	35
2.104000	23	35
2.204000	15	35
2.304000	6	35
3.204000	4	35
3.304000	11	35
3.404000	18	35
3.504000	23	35
3.604000	25	35
3.704000	28	35
3.804000	28	35
3.904000	25	35
4.004000	19	35
4.104000	14	35
4.204000	6	35
5.112000	4	35
5.212000	9	35
5.312000	15	35
5.412000	20	35
5.512000	22	35
5.612000	21	35
5.712000	19	35
5.812000	16	35
5.912000	10	35
6.012000	4	35

Tabel L.78: Data Bola Sepak Karet 18

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.700000	4	35
0.800000	13	35
0.900000	20	35
1.000000	26	35
1.100000	31	35
1.206000	33	35
1.306000	32	35
1.406000	31	35
1.506000	26	35
1.606000	19	35
1.706000	8	35
2.606000	0	35
2.706000	7	35
2.806000	16	35
2.906000	20	35
3.006000	26	35
3.106000	29	35
3.207000	29	35
3.307000	27	35
3.409000	22	35
3.509000	10	35
3.609000	7	35
4.513000	5	35
4.613000	10	35
4.723000	17	35
4.823000	19	35
4.923000	22	35
5.023000	20	35
5.123000	18	35
5.223000	13	35
5.323000	6	35

Tabel L.79: Data Bola Sepak Karet 19

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.500000	6	35

Continued on next page

Tabel L.79: Data Bola Sepak Karet 19

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.600000	16	35
0.700000	24	35
0.800000	29	35
0.900000	32	35
1.000000	32	35
1.108000	30	35
1.208000	23	35
1.308000	16	35
1.412000	7	35
2.514000	6	35
2.614000	13	35
2.714000	21	35
2.814000	25	35
2.914000	27	35
3.014000	29	35
3.114000	25	35
3.214000	22	35
3.314000	15	35
3.423000	6	35
4.423000	6	35
4.523000	11	35
4.623000	18	35
4.723000	21	35
4.823000	22	35
4.923000	21	35
5.023000	18	35
5.123000	13	35
5.229000	5	35

Tabel L.80: Data Bola Sepak Karet 20

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.400000	3	35
1.500000	12	35
1.600000	19	35
1.700000	25	35

Continued on next page

Tabel L.80: Data Bola Sepak Karet 20

Waktu (detik)	Tinggi Bola Sepak Karet (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.800000	30	35
1.907000	32	35
2.007000	32	35
2.107000	27	35
2.207000	19	35
2.307000	11	35
3.407000	5	35
3.507000	13	35
3.607000	19	35
3.707000	23	35
3.807000	28	35
3.907000	29	35
4.007000	28	35
4.107000	23	35
4.207000	18	35
4.307000	9	35
4.407000	1	35
5.307000	1	35
5.416000	8	35
5.516000	14	35
5.616000	17	35
5.721000	19	35
5.821000	18	35
5.921000	13	35
6.021000	7	35

#### 4.4.2 Grafik Percobaan

### 4.5 Bola Plastik

#### 4.5.1 Tabel Percobaan

Tabel L.81: Data Bola Plastik 1

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.300000	1	35

Continued on next page

Tabel L.81: Data Bola Plastik 1

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.400000	7	35
0.500000	17	35
0.600000	23	35
0.700000	28	35
0.800000	32	35
0.900000	33	35
1.000000	33	35
1.103000	32	35
1.203000	30	35
1.303000	24	35
1.403000	15	35
1.503000	5	35
2.603000	4	35
2.703000	8	35
2.803000	14	35
2.903000	17	35
3.003000	19	35
3.103000	19	35
3.203000	16	35
3.303000	11	35
3.403000	5	35

Tabel L.82: Data Bola Plastik 2

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.700000	4	35
0.810000	14	35
0.910000	23	35
1.010000	29	35
1.110000	32	35
1.210000	32	35
1.310000	32	35
1.410000	28	35
1.510000	22	35
1.610000	15	35
1.719000	5	35

Continued on next page

Tabel L.82: Data Bola Plastik 2

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.923000	0	35
3.023000	6	35
3.123000	14	35
3.223000	19	35
3.323000	23	35
3.423000	24	35
3.523000	23	35
3.623000	21	35
3.723000	17	35
3.823000	12	35
3.923000	5	35

Tabel L.83: Data Bola Plastik 3

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.400000	6	35
0.500000	14	35
0.600000	22	35
0.700000	27	35
0.800000	32	35
0.900000	33	35
1.000000	33	35
1.100000	30	35
1.200000	21	35
1.300000	12	35
1.404000	0	35
2.704000	5	35
2.804000	10	35
2.904000	15	35
3.004000	19	35
3.104000	20	35
3.204000	23	35
3.304000	22	35
3.404000	22	35
3.504000	20	35
3.604000	16	35

Continued on next page

Tabel L.83: Data Bola Plastik 3

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.704000	10	35
3.804000	4	35

Tabel L.84: Data Bola Plastik 4

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.101000	3	35
1.301000	19	35
1.401000	26	35
1.501000	30	35
1.601000	32	35
1.701000	33	35
1.804000	31	35
1.904000	32	35
2.004000	32	35
2.104000	26	35
2.204000	19	35
2.304000	9	35
2.404000	1	35
3.605000	3	35
3.705000	8	35
3.809000	14	35
3.909000	18	35
4.009000	20	35
4.109000	19	35
4.209000	17	35
4.316000	12	35
4.416000	6	35
4.516000	0	35

Tabel L.85: Data Bola Plastik 5

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.908000	3	35
5.008000	13	35
5.108000	22	35

Continued on next page

Tabel L.85: Data Bola Plastik 5

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
5.208000	29	35
5.308000	32	35
5.408000	33	35
5.508000	32	35
5.608000	25	35
5.708000	18	35
5.808000	8	35
6.813000	0	35
6.913000	7	35
7.013000	11	35
7.113000	19	35
7.213000	24	35
7.313000	25	35
7.413000	23	35
7.513000	19	35
7.613000	13	35
7.713000	6	35
9.113000	0	35
9.213000	0	35
9.313000	2	35
9.413000	3	35
9.513000	3	35
9.623000	2	35
9.723000	0	35

Tabel L.86: Data Bola Plastik 6

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.908000	6	35
1.008000	16	35
1.108000	25	35
1.208000	31	35
1.308000	33	35
1.408000	32	35
1.508000	33	35
1.608000	28	35

Continued on next page

Tabel L.86: Data Bola Plastik 6

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.708000	20	35
1.808000	11	35
1.908000	0	35
2.714000	1	35
2.814000	10	35
2.914000	16	35
3.014000	21	35
3.114000	24	35
3.214000	22	35
3.314000	19	35
3.414000	14	35
3.514000	8	35
3.620000	0	35

Tabel L.87: Data Bola Plastik 7

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.600000	1	35
0.700000	13	35
0.800000	22	35
0.900000	29	35
1.000000	33	35
1.100000	33	35
1.200000	33	35
1.300000	30	35
1.400000	22	35
1.500000	12	35
1.600000	1	35
2.505000	4	35
2.605000	10	35
2.705000	18	35
2.805000	21	35
2.905000	24	35
3.005000	24	35
3.105000	25	35
3.205000	20	35

Continued on next page

Tabel L.87: Data Bola Plastik 7

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.305000	16	35
3.409000	8	35
3.509000	2	35

Tabel L.88: Data Bola Plastik 8

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.200000	6	35
0.300000	17	35
0.400000	23	35
0.500000	29	35
0.600000	32	35
0.700000	31	35
0.800000	30	35
0.900000	24	35
1.000000	16	35
1.100000	8	35
1.200000	0	35
2.200000	5	35
2.300000	12	35
2.400000	19	35
2.500000	24	35
2.600000	26	35
2.700000	26	35
2.800000	23	35
2.900000	18	35
3.000000	11	35
3.100000	4	35

Tabel L.89: Data Bola Plastik 9

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.500000	7	35
0.600000	15	35
0.700000	23	35
0.800000	28	35

Continued on next page

Tabel L.89: Data Bola Plastik 9

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.900000	32	35
1.000000	33	35
1.100000	32	35
1.200000	29	35
1.300000	22	35
1.400000	13	35
1.500000	5	35
2.700000	6	35
2.800000	9	35
2.900000	18	35
3.000000	21	35
3.100000	25	35
3.200000	25	35
3.300000	24	35
3.400000	21	35
3.500000	18	35
3.600000	12	35
3.700000	7	35
3.808000	1	35

Tabel L.90: Data Bola Plastik 10

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
0.600000	10	35
0.700000	19	35
0.800000	26	35
0.900000	30	35
1.000000	33	35
1.100000	33	35
1.200000	33	35
1.300000	28	35
1.400000	19	35
1.500000	8	35
2.706000	0	35
2.806000	9	35
2.906000	17	35

Continued on next page

Tabel L.90: Data Bola Plastik 10

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.006000	22	35
3.106000	25	35
3.206000	29	35
3.306000	29	35
3.406000	27	35
3.506000	22	35
3.606000	16	35
3.706000	10	35
3.813000	4	35
5.122000	4	35
5.222000	9	35
5.322000	10	35
5.422000	7	35
5.522000	2	35

Tabel L.91: Data Bola Plastik 11

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.806000	1	35
1.909000	12	35
2.009000	24	35
2.109000	30	35
2.209000	32	35
2.309000	33	35
2.409000	32	35
2.509000	25	35
2.609000	16	35
2.709000	4	35
3.609000	5	35
3.709000	13	35
3.809000	19	35
3.909000	19	35
4.009000	19	35
4.109000	15	35
4.209000	7	35
4.309000	0	35

Continued on next page

Tabel L.91: Data Bola Plastik 11

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
10.529000	0	35
10.629000	2	35
10.729000	2	35
10.829000	3	35
10.929000	3	35
11.029000	3	35
11.129000	3	35
11.229000	3	35
11.329000	2	35
11.429000	3	35
11.529000	3	35
11.629000	2	35
11.729000	1	35

Tabel L.92: Data Bola Plastik 12

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.910000	2	35
2.010000	13	35
2.110000	22	35
2.210000	29	35
2.310000	32	35
2.410000	33	35
2.510000	32	35
2.610000	29	35
2.710000	22	35
2.810000	11	35
2.910000	5	35
4.011000	6	35
4.111000	11	35
4.211000	18	35
4.311000	19	35
4.411000	22	35
4.511000	19	35
4.611000	17	35
4.714000	10	35

Continued on next page

Tabel L.92: Data Bola Plastik 12

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.814000	4	35
5.914000	1	35
6.014000	2	35
6.114000	2	35
6.214000	2	35
6.314000	1	35
6.514000	0	35
8.704000	0	35
8.904000	0	35
9.004000	1	35
9.104000	1	35
9.204000	2	35
9.304000	3	35
9.404000	4	35
9.512000	4	35
9.612000	4	35
9.712000	5	35
9.812000	4	35
9.917000	4	35
10.017000	5	35
10.117000	4	35
10.217000	3	35
10.317000	3	35
10.417000	1	35

Tabel L.93: Data Bola Plastik 13

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.608000	6	35
2.708000	18	35
2.808000	26	35
2.908000	31	35
3.008000	33	35
3.108000	33	35
3.208000	31	35
3.308000	24	35

Continued on next page

Tabel L.93: Data Bola Plastik 13

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.408000	15	35
3.511000	5	35
4.311000	0	35
4.411000	8	35
4.511000	14	35
4.611000	18	35
4.711000	21	35
4.811000	22	35
4.911000	19	35
5.011000	15	35
5.111000	10	35
5.211000	3	35
8.516000	0	35
8.616000	0	35
8.716000	0	35
8.816000	1	35
8.916000	2	35
9.016000	2	35
9.116000	3	35
9.216000	3	35
9.316000	3	35
9.416000	3	35
9.517000	3	35
9.617000	2	35
9.719000	0	35

Tabel L.94: Data Bola Plastik 14

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.201000	11	35
2.301000	19	35
2.401000	29	35
2.501000	32	35
2.601000	33	35
2.701000	32	35
2.801000	30	35

Continued on next page

Tabel L.94: Data Bola Plastik 14

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.901000	23	35
3.001000	15	35
3.101000	5	35
4.108000	6	35
4.208000	12	35
4.313000	18	35
4.413000	22	35
4.513000	23	35
4.613000	21	35
4.713000	18	35
4.813000	11	35
4.913000	6	35
5.922000	0	35
6.022000	4	35
6.122000	6	35
6.222000	6	35
6.322000	5	35
6.422000	4	35
6.522000	3	35
6.622000	2	35
6.722000	3	35
6.822000	3	35
6.922000	3	35
7.022000	3	35
7.122000	3	35
7.222000	2	35
7.322000	2	35
7.426000	1	35

Tabel L.95: Data Bola Plastik 15

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.507000	4	35
2.607000	14	35
2.707000	22	35
2.807000	28	35

Continued on next page

Tabel L.95: Data Bola Plastik 15

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.907000	32	35
3.007000	29	35
3.107000	33	35
3.207000	31	35
3.307000	23	35
3.407000	15	35
3.507000	4	35
4.307000	6	35
4.407000	13	35
4.507000	19	35
4.607000	20	35
4.707000	20	35
4.807000	19	35
4.908000	14	35
5.008000	6	35
8.612000	0	35
8.712000	0	35
8.812000	0	35
8.912000	0	35
9.012000	0	35
9.114000	0	35
9.214000	0	35
9.314000	0	35
9.414000	0	35

Tabel L.96: Data Bola Plastik 16

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.011000	5	35
2.111000	16	35
2.211000	25	35
2.311000	31	35
2.411000	33	35
2.611000	33	35
2.712000	30	35
2.812000	23	35

Continued on next page

Tabel L.96: Data Bola Plastik 16

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.912000	13	35
3.012000	1	35
3.912000	5	35
4.012000	13	35
4.112000	17	35
4.212000	23	35
4.312000	26	35
4.412000	26	35
4.512000	26	35
4.612000	21	35
4.712000	18	35
4.812000	13	35
4.912000	7	35
5.012000	1	35

Tabel L.97: Data Bola Plastik 17

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
1.900000	1	35
2.000000	8	35
2.100000	21	35
2.200000	28	35
2.300000	33	35
2.400000	31	35
2.500000	32	35
2.600000	31	35
2.700000	23	35
2.800000	14	35
2.900000	4	35
3.900000	1	35
4.000000	8	35
4.100000	16	35
4.200000	21	35
4.300000	25	35
4.400000	27	35
4.500000	26	35

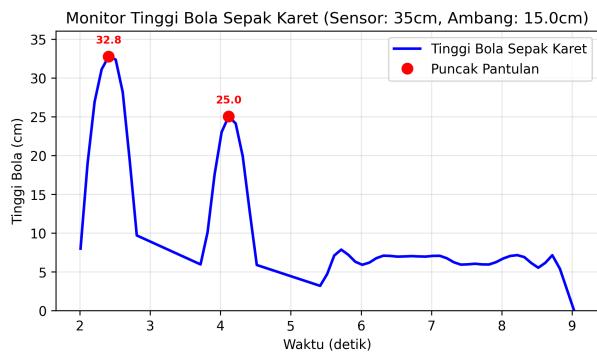
Continued on next page

Tabel L.97: Data Bola Plastik 17

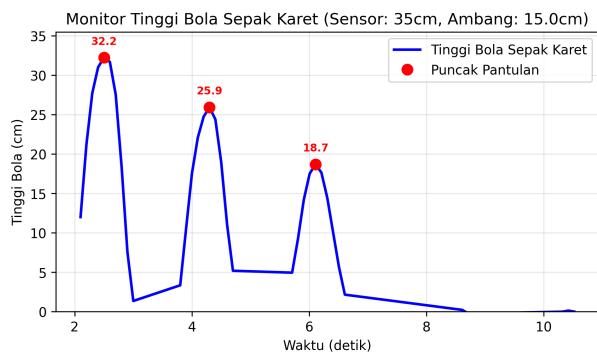
Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
4.600000	22	35
4.700000	16	35
4.800000	7	35
7.616000	0	35
7.716000	1	35
7.816000	0	35
7.916000	0	35
8.016000	0	35
8.422000	0	35
8.522000	0	35

Tabel L.98: Data Bola Plastik 18

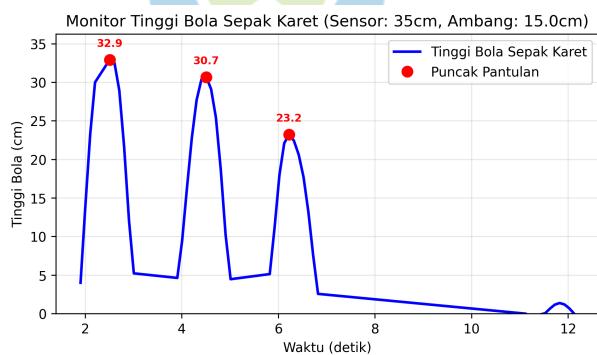
Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
14.519000	5	35
14.619000	18	35
14.719000	25	35
14.819000	31	35
14.919000	32	35
15.019000	33	35
15.119000	33	35
15.219000	31	35
15.319000	24	35
15.419000	15	35
15.519000	4	35
16.624000	5	35
16.724000	12	35
16.824000	18	35
16.924000	22	35
17.024000	23	35
17.124000	19	35
17.224000	15	35
17.335000	7	35
20.236000	0	35
20.736000	0	35



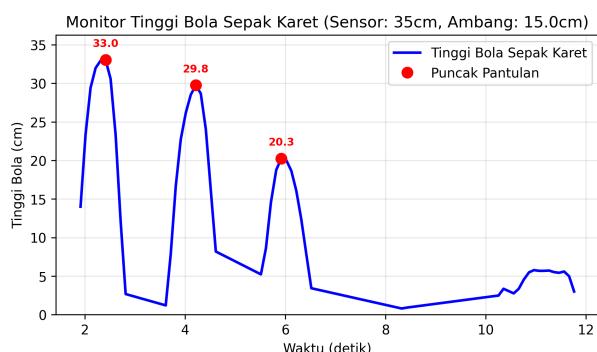
Gambar L.61: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 1



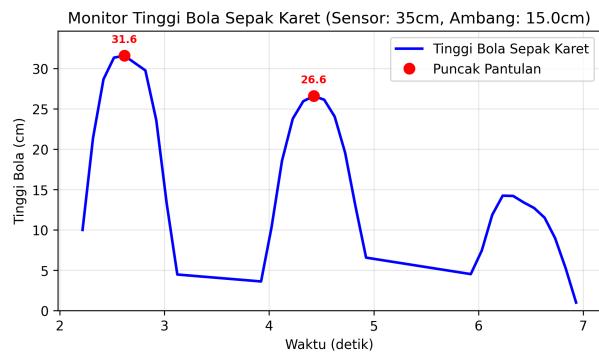
Gambar L.62: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 2



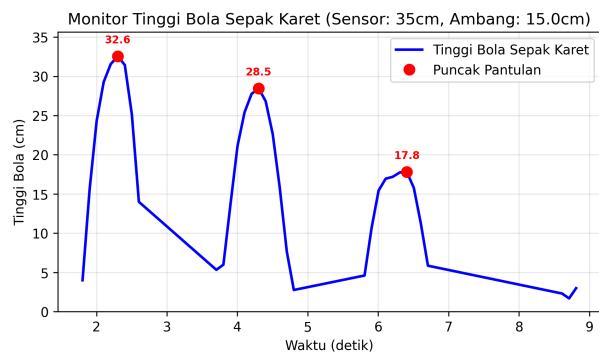
Gambar L.63: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 3



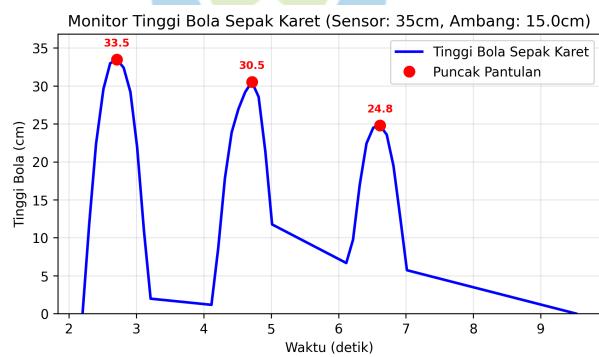
Gambar L.64: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 4



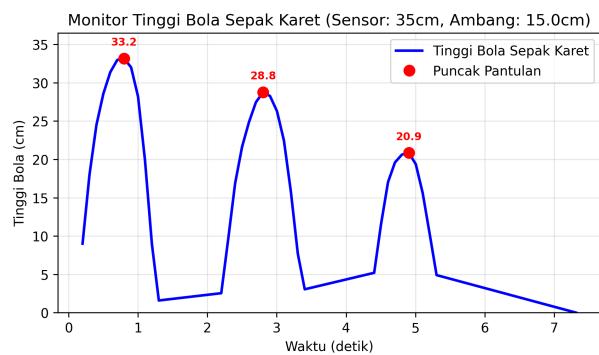
Gambar L.65: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 5



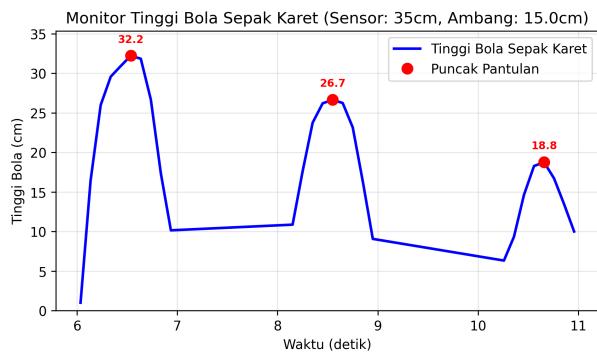
Gambar L.66: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 6



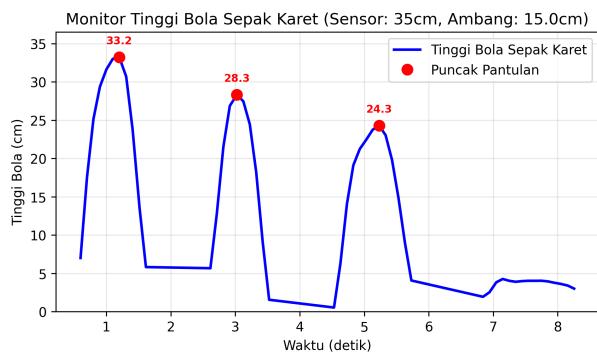
Gambar L.67: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 7



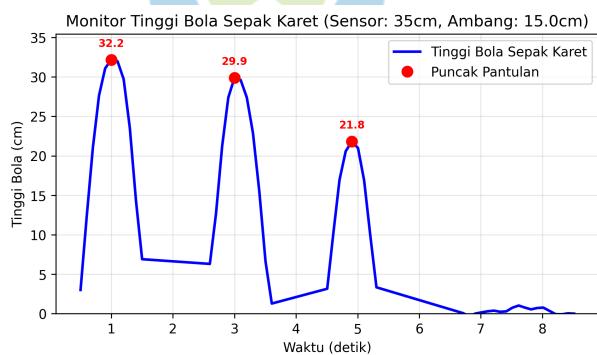
Gambar L.68: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 8



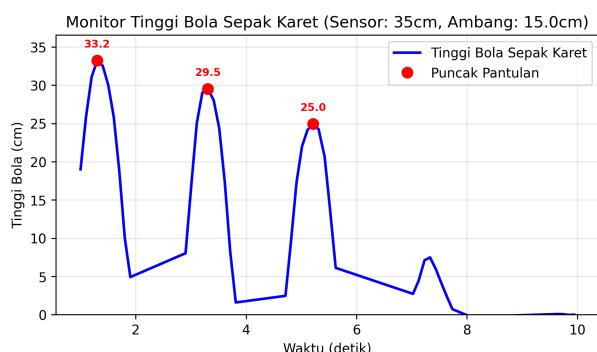
Gambar L.69: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 9



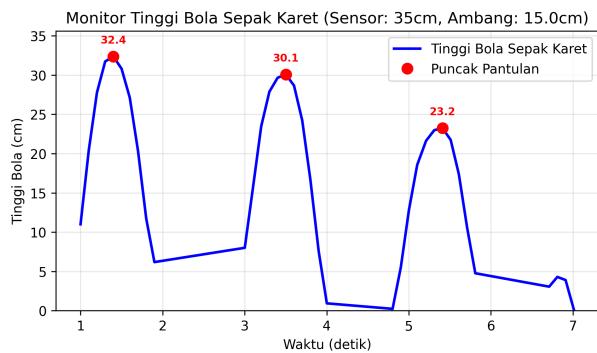
Gambar L.70: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 10



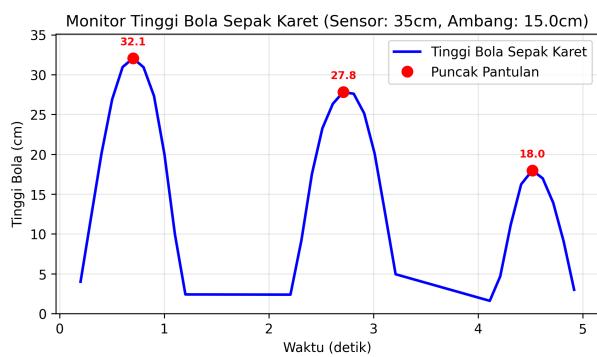
Gambar L.71: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 11



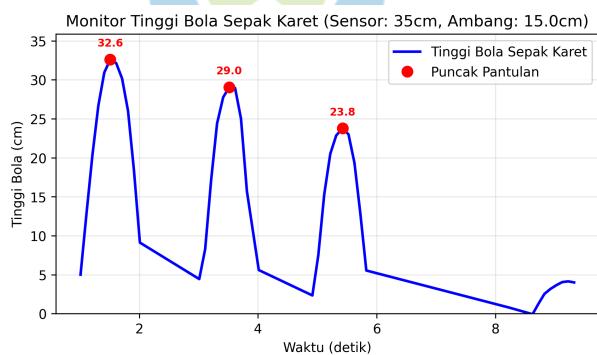
Gambar L.72: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 12



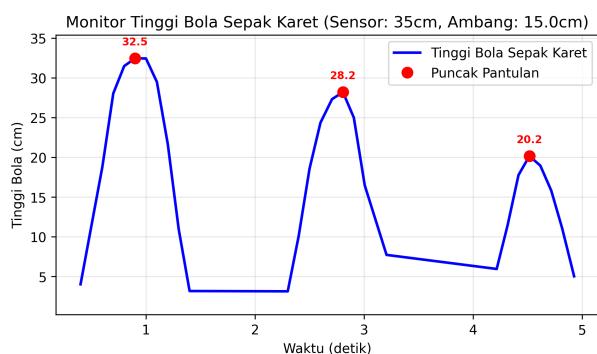
Gambar L.73: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 13



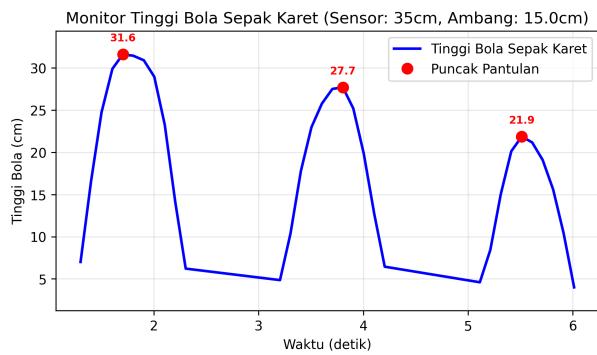
Gambar L.74: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 14



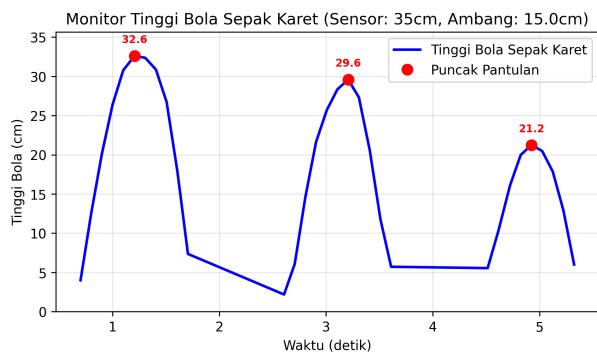
Gambar L.75: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 15



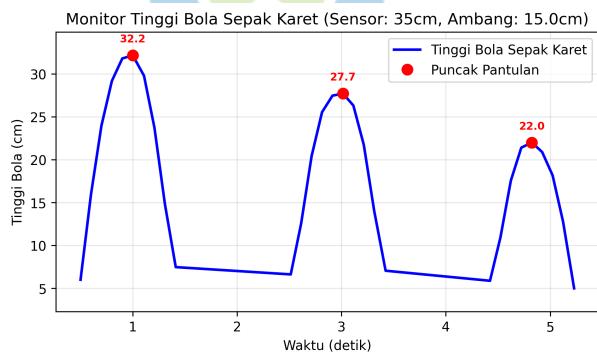
Gambar L.76: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 16



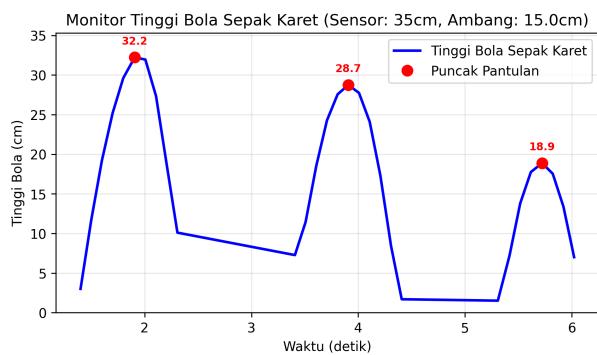
Gambar L.77: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 17



Gambar L.78: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 18



Gambar L.79: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 19



Gambar L.80: Grafik Bola Sepak Karet Percobaan 20

Tabel L.99: Data Bola Plastik 19

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.600000	7	35
2.700000	16	35
2.800000	25	35
2.900000	31	35
3.000000	33	35
3.100000	33	35
3.200000	30	35
3.300000	23	35
3.400000	14	35
3.500000	4	35
4.400000	3	35
4.500000	11	35
4.600000	17	35
4.700000	21	35
4.800000	24	35
4.900000	26	35
5.000000	27	35
5.100000	26	35
5.200000	19	35
5.300000	15	35
5.404000	8	35
6.405000	2	35
6.513000	4	35
6.613000	4	35
6.713000	1	35

Tabel L.100: Data Bola Plastik 20

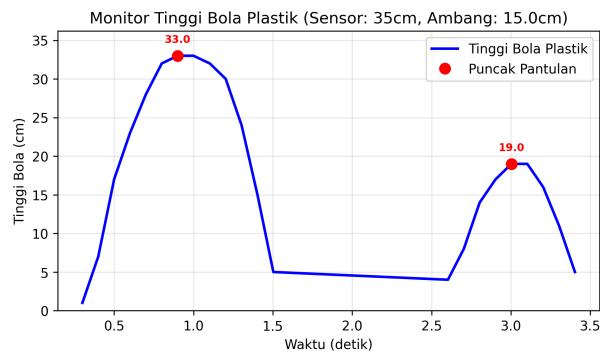
Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
2.711000	6	35
2.811000	16	35
2.911000	24	35
3.011000	30	35
3.111000	33	35
3.211000	32	35
3.311000	33	35

Continued on next page

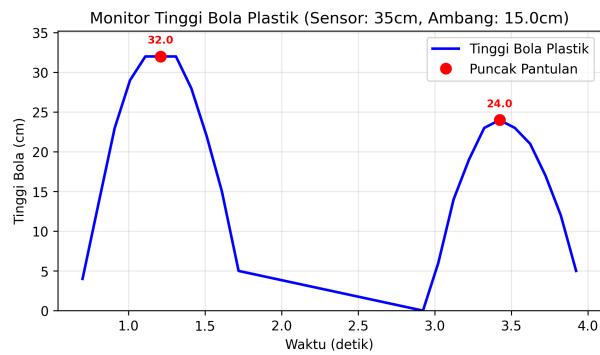
Tabel L.100: Data Bola Plastik 20

Waktu (detik)	Tinggi Bola Plastik (cm)	Tinggi Sensor (cm)
3.411000	31	35
3.511000	25	35
3.611000	18	35
3.711000	8	35
4.720000	4	35
4.820000	12	35
4.920000	17	35
5.020000	21	35
5.120000	22	35
5.220000	23	35
5.320000	20	35
5.520000	12	35
5.620000	6	35
6.921000	0	35
7.021000	0	35
7.121000	0	35
7.221000	0	35
7.321000	0	35
7.421000	1	35
7.521000	1	35
7.621000	2	35
7.721000	2	35
7.821000	2	35
7.921000	2	35
8.021000	0	35

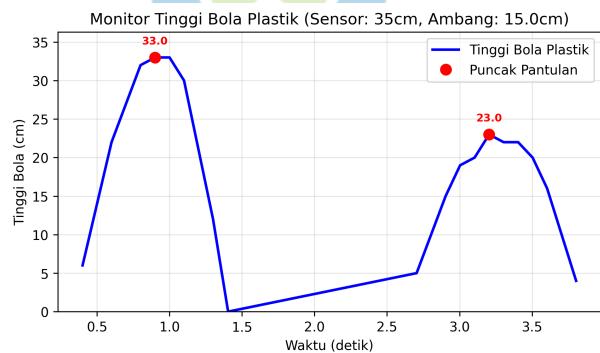
#### 4.5.2 Grafik Percobaan



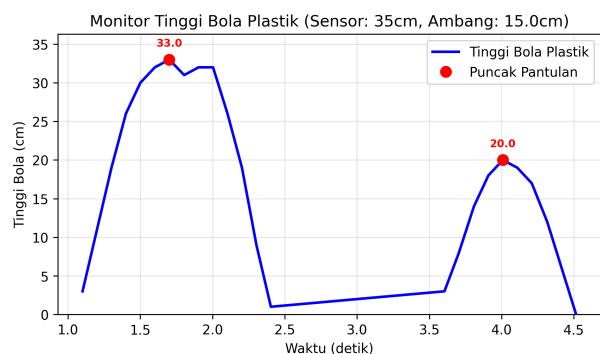
Gambar L.81: Grafik Bola Plastik Percobaan 1



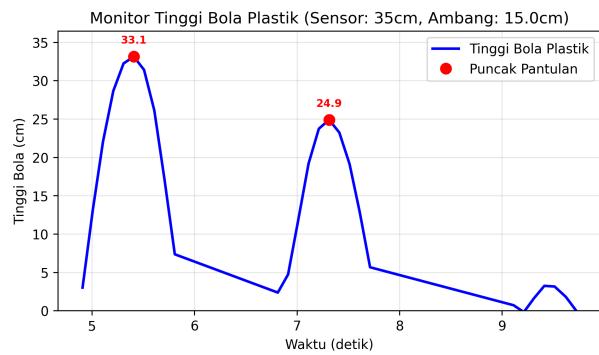
Gambar L.82: Grafik Bola Plastik Percobaan 2



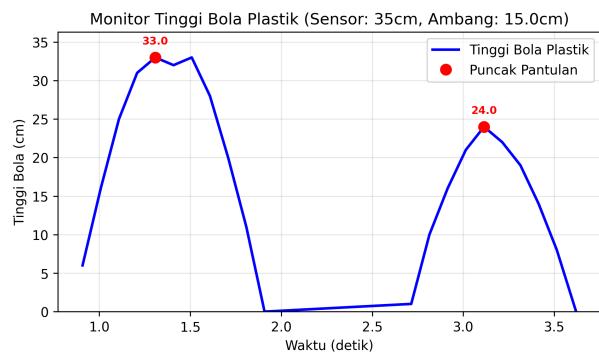
Gambar L.83: Grafik Bola Plastik Percobaan 3



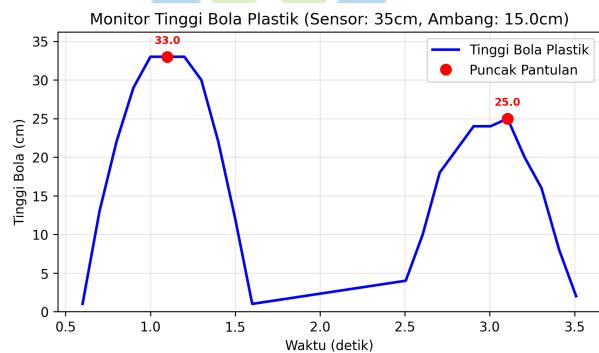
Gambar L.84: Grafik Bola Plastik Percobaan 4



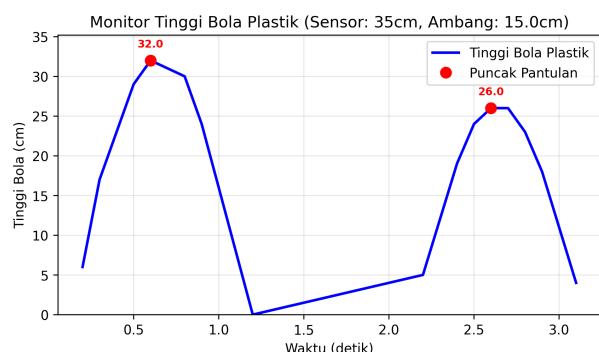
Gambar L.85: Grafik Bola Plastik Percobaan 5



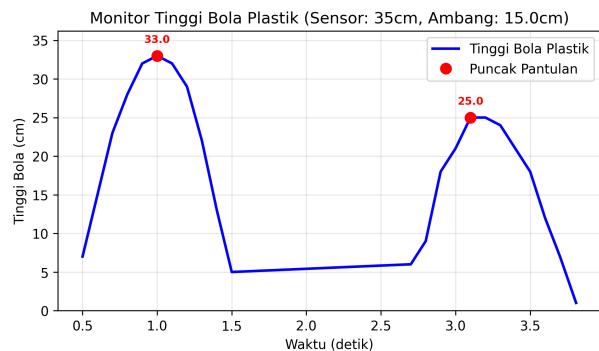
Gambar L.86: Grafik Bola Plastik Percobaan 6



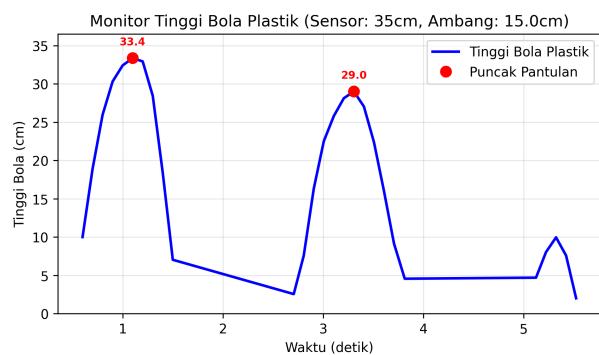
Gambar L.87: Grafik Bola Plastik Percobaan 7



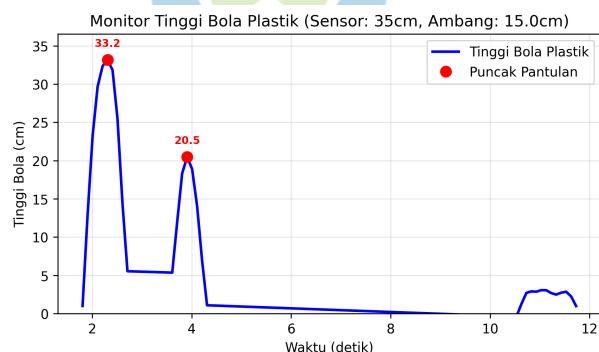
Gambar L.88: Grafik Bola Plastik Percobaan 8



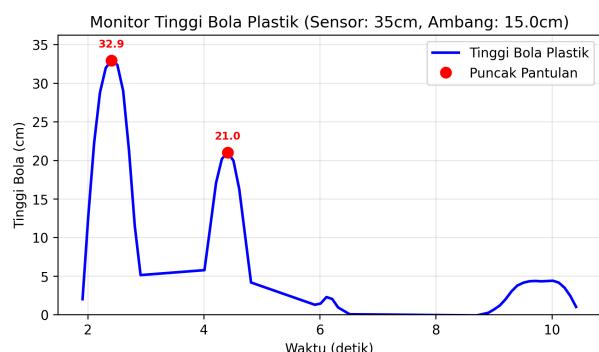
Gambar L.89: Grafik Bola Plastik Percobaan 9



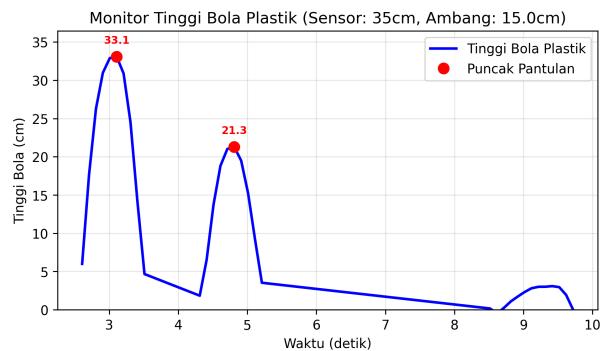
Gambar L.90: Grafik Bola Plastik Percobaan 10



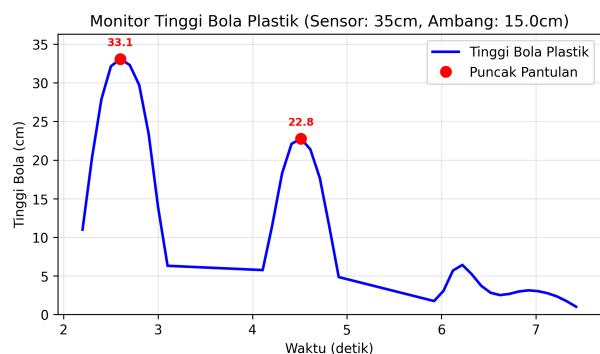
Gambar L.91: Grafik Bola Plastik Percobaan 11



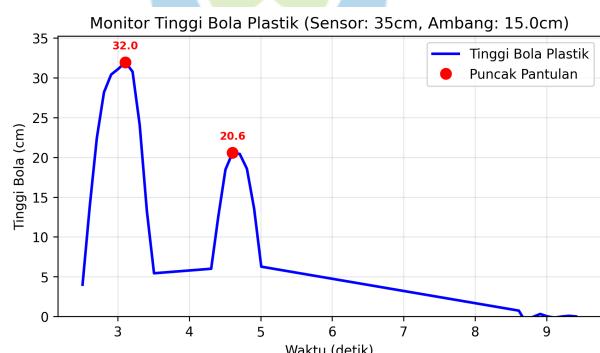
Gambar L.92: Grafik Bola Plastik Percobaan 12



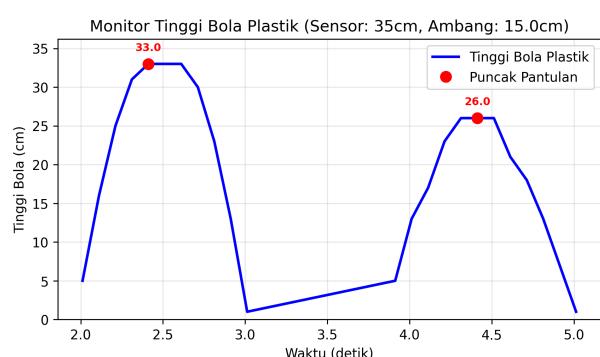
Gambar L.93: Grafik Bola Plastik Percobaan 13



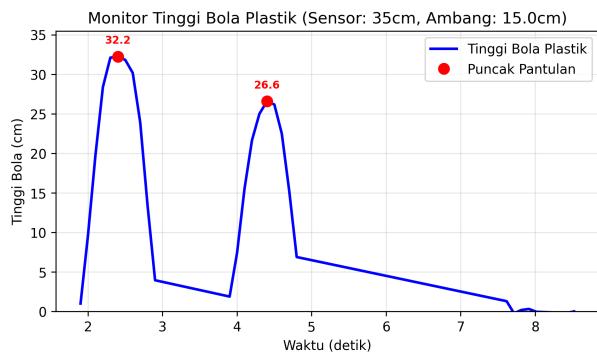
Gambar L.94: Grafik Bola Plastik Percobaan 14



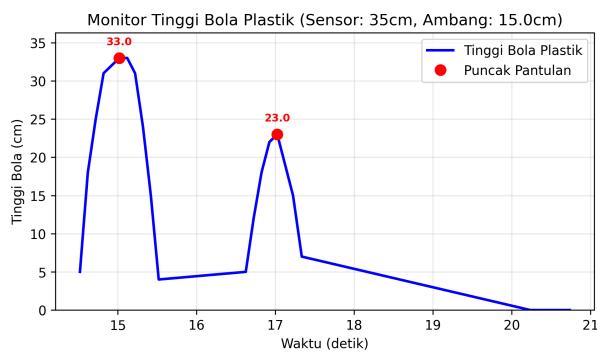
Gambar L.95: Grafik Bola Plastik Percobaan 15



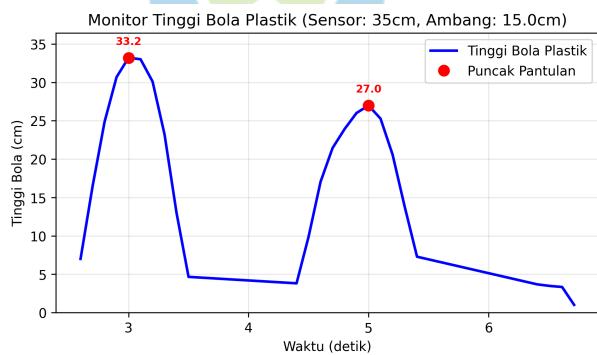
Gambar L.96: Grafik Bola Plastik Percobaan 16



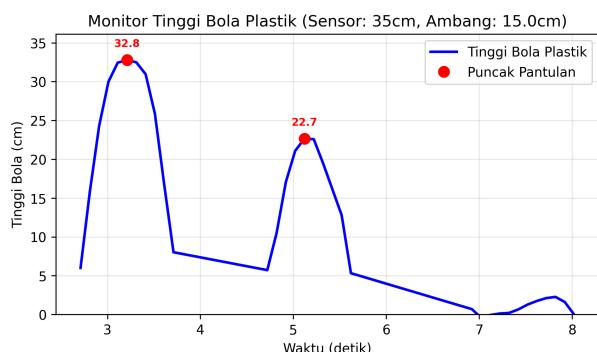
Gambar L.97: Grafik Bola Plastik Percobaan 17



Gambar L.98: Grafik Bola Plastik Percobaan 18



Gambar L.99: Grafik Bola Plastik Percobaan 19



Gambar L.100: Grafik Bola Plastik Percobaan 20