

**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>	<i>FORM(FR)</i>	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.



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

Dr. Yudha Satya Perkasa, M.Si.

NIP. 197911172011011005

Mengetahui,

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi,

Jurusan Fisika,

Prof. Dr. Hasniah Aliah, M.Si

NIP. 197806132005012014

Mada Sanjaya W.S., M.Si., Ph.D.

NIP. 198510112009121005

UIN
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI
SUNAN GUNUNG DJATI
BANDUNG

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

Dr. Moh.Nurul Subhki
NIP. 1981020120091213003

Mengetahui,

Pembimbing 1

Pembimbing 2

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

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



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 ultrasonik, 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 ± 0.03 , accuracy 95.84%), ping pong ball (0.89 ± 0.04 , accuracy 95.86%), tennis ball (0.77 ± 0.05 , accuracy 92.89%), rubber soccer ball (0.78 ± 0.06 , accuracy 91.72%), and plastic ball (0.68 ± 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 kehadiran 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 junjungan 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, nasihat, 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 pribadi yang sukses. Walaupun mereka telah berpulang ke rahmatullah dan tidak sempat menyaksikan pencapaian ini, doa dan kenangan mereka akan selalu menjadi penyemangat 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	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Koefisien Restitusi	6
2.1.1 Definisi dan Konsep Dasar	6
2.1.2 Formulasi Matematis	6
2.1.3 Klasifikasi Tumbukan Berdasarkan Nilai Koefisien Restitusi	7
2.1.4 Hubungan Koefisien Restitusi dengan Sifat Material dan Deformasi	7
2.1.5 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Koefisien Restitusi	8
2.2 Sensor Ultrasonik HC-SR04	8
2.2.1 Prinsip Kerja dan Teori Dasar	8
2.2.2 Spesifikasi Teknis	9
2.2.3 Konfigurasi Pin dan Antarmuka	9

2.2.4	Algoritma Pengukuran	9
2.3	Mikrokontroler ESP8266	10
2.3.1	Arsitektur dan Spesifikasi	10
2.3.2	Konfigurasi Pin dan Fungsionalitas	10
2.3.3	Pemrograman dan Development Environment	11
2.4	<i>Internet of Things</i> (IoT)	11
2.4.1	Definisi dan Konsep Fundamental	11
2.4.2	Arsitektur IoT	11
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	13
2.5.3	Geometri Bola dan Kalkulasi Volume	14
2.5.4	Material Bola dalam Penelitian	14
BAB III	METODE PENELITIAN	16
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	Diagram Alir Program Python	19
3.3.2	Diagram Alir Program ESP8266	21
3.3.3	Komunikasi Sistem	23
3.3.4	Spesifikasi Teknis	23
3.4	Diagram Alir Pelaksanaan Percobaan	24
3.4.1	Diagram Alir Pengolahan Data	26
3.5	Prosedur Penelitian	27
3.5.1	Pengambilan Data	27
3.5.2	Pengolahan Data	27
3.6	Prosedur Penelitian	28
3.6.1	Pengambilan Data	28
3.6.2	Pengolahan Data	29
3.6.3	Pengolahan Data	29
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	30

BAB V PENUTUP	44
5.1 Kesimpulan	44
5.2 Saran	44
DAFTAR PUSTAKA	48
LAMPIRAN	49
L.1 Data, Grafik dan Kode Program Percobaan Alat	49
L.2 Dokumentasi Percobaan	49
L.2.1 Dokumentasi Video	49
L.2.2 Dokumentasi Foto	49
L.3 Penurunan Persamaan Koefisien Restitusi	50



DAFTAR GAMBAR

2.1	Diagram skematik tumbukan <i>bola</i> dengan permukaan datar menunjukkan komponen kecepatan sebelum dan setelah tumbukan	7
2.2	Diagram pin dan konfigurasi sensor ultrasonik HC-SR04	9
2.3	Modul ESP8266 dengan konfigurasi pin GPIO	10
3.1	Ilustrasi Alat	16
3.2	Tampilan GUI	17
3.3	Skematik rangkaian	17
3.4	Diagram Alir Program Python	19
3.5	Diagram Alir Program ESP8266	21
3.6	Diagram Alir Prosedur Percobaan	24
3.7	Diagram Alir Analisis dan Pengolahan Data	26
4.1	Sistem pemantauan koefisien restitusi berbasis <i>IoT</i>	30
4.2	Proses pemerolehan data	31
4.3	Proses pengiriman data dari <i>ESP8266</i> melalui <i>MQTT</i>	31
4.4	Proses penerimaan data melalui <i>MQTT</i> oleh <i>Python</i>	32
4.5	Antarmuka pengguna saat melakukan pemerolehan data	32
4.6	Analisis Koefisien Restitusi	33
4.7	Analisis Ringkasan Statistik Koefisien Restitusi	34
4.8	Grafik Ketelitian Bola Bekel	35
4.9	Grafik Ketelitian Bola Tennis Meja	37
4.10	Grafik Ketelitian Bola Tennis Lapangan	38
4.11	Grafik Ketelitian Bola Sepak Karet	40
4.12	Grafik Ketelitian Bola Plastik	41
L.1	QR Code Repository Github https://github.com/Ajitot/KoefisienRestitusiIOTApp/	49
L.2	Proses pengambilan data	49
L.3	Ilustrasi alat dari berbagai sudut	50

DAFTAR TABEL

3.1	Daftar Peralatan Penelitian	18
3.2	Daftar Bahan Penelitian	18
4.1	Percobaan Bola Bekel	36
4.2	Percobaan Bola Tennis Meja	37
4.3	Percobaan Bola Tennis Lapangan	39
4.4	Percobaan Bola Sepak	40
4.5	Percobaan Bola Plastik	42



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 (?) 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 (beker, *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) adalah parameter dasar dalam mekanika yang digunakan untuk mengukur tingkat keelastisan tumbukan antara dua benda. Konsep ini pertama kali dikemukakan oleh Sir Isaac Newton melalui hukum restitusi Newton (*Newton's law of restitution*). Hukum tersebut menyatakan bahwa perbandingan kecepatan pemisahan sesudah tumbukan dengan kecepatan pendekatan sebelum tumbukan merupakan konstanta untuk material tertentu (Goldsmith, 1999).

Dalam konteks fisika, koefisien restitusi memberikan gambaran mengenai seberapa besar energi kinetik yang dapat dipulihkan setelah terjadinya tumbukan. Nilai ini sangat berguna dalam berbagai aplikasi teknik, mulai dari desain *bola olahraga* hingga analisis *kecelakaan kendaraan*.

2.1.2 Formulasi Matematis

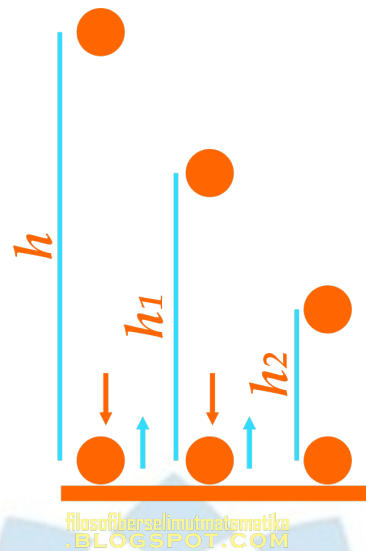
Secara matematis, koefisien restitusi dapat didefinisikan sebagai hubungan antara kecepatan relatif sebelum dan sesudah tumbukan terjadi. Gambar 2.1 memperlihatkan diagram skematik yang menggambarkan komponen kecepatan sebelum dan sesudah tumbukan *bola* dengan permukaan datar.

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

dengan:

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

Untuk kasus khusus tumbukan vertikal dengan permukaan datar, perhitungan koefisien restitusi dapat disederhanakan. Dalam hal ini, analisis menjadi lebih mudah karena dapat menggunakan hubungan antara ketinggian awal dan ketinggian pantulan:



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

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

dengan:

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

2.1.3 Klasifikasi Tumbukan Berdasarkan Nilai Koefisien Restitusi

Berdasarkan nilai koefisien restitusi yang diperoleh, tumbukan dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori utama. Setiap kategori mencerminkan karakteristik energi yang berbeda-beda.

Tumbukan *elastis sempurna* terjadi apabila nilai koefisien restitusi sama dengan satu ($e = 1$). Pada kondisi ini, seluruh energi kinetik sistem tetap terjaga. Fenomena semacam ini biasanya dijumpai pada tumbukan *antarpartikel* dalam kondisi ideal (Stronge, 2018).

Kondisi berikutnya adalah tumbukan *tidak elastis sempurna* yang memiliki nilai koefisien restitusi nol ($e = 0$). Dalam keadaan ini, seluruh energi kinetik relatif berubah menjadi energi internal seperti panas dan deformasi permanen (Johnson, 1987).

Kategori terakhir merupakan tumbukan *tidak elastis sebagian* dengan rentang nilai antara nol dan satu ($0 < e < 1$). Pada kondisi ini, sebagian energi kinetik hilang dalam proses tumbukan. Kondisi seperti ini merupakan fenomena yang umum dijumpai dalam tumbukan nyata (Cross, 2000).

2.1.4 Hubungan Koefisien Restitusi dengan Sifat Material dan Deformasi

Nilai koefisien restitusi sangat bergantung pada karakteristik intrinsik material. Karakteristik tersebut meliputi *modulus elastisitas* (E), *batas luluh* (σ_y), dan sifat *viskoelastik* material (Meyer dan Johnson, 2020).

Material yang memiliki *modulus elastisitas* tinggi seperti baja atau keramik umumnya menunjukkan nilai e yang lebih besar. Hal ini berbeda dengan material yang memiliki *modulus* rendah seperti polimer atau busa (Brancazio, 1981).

Proses deformasi selama tumbukan berlangsung dapat dibagi menjadi dua fase yang saling berkaitan, yaitu *kompresi* dan *restorasi*. Pada fase *kompresi*, energi kinetik diubah menjadi energi deformasi elastis dan plastis. Sementara itu, pada fase *restorasi*, energi deformasi elastis dikembalikan menjadi energi kinetik. Adapun energi deformasi plastis menjadi energi disipasi (Hartono, 2019).

2.1.5 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Koefisien Restitusi

Beberapa faktor memengaruhi nilai koefisien restitusi dalam proses tumbukan nyata. *Kecepatan tumbukan* merupakan faktor pertama yang cukup signifikan. Peningkatan *kecepatan tumbukan* menyebabkan deformasi plastis yang lebih besar sehingga menurunkan nilai e (Smith dan Brown, 2018).

Karakteristik permukaan juga berperan penting dalam menentukan nilai koefisien restitusi. *Kekasaran permukaan* (R_a) dan kondisi pelumasan memengaruhi energi disipasi melalui gesekan (Penner, 2003).

Temperatur lingkungan memberikan pengaruh terhadap sifat material. Peningkatan *temperatur* menurunkan *modulus elastisitas* material yang berdampak pada penurunan nilai e (Lamb, 1945).

Geometri benda turut memengaruhi distribusi tegangan selama tumbukan berlangsung. 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

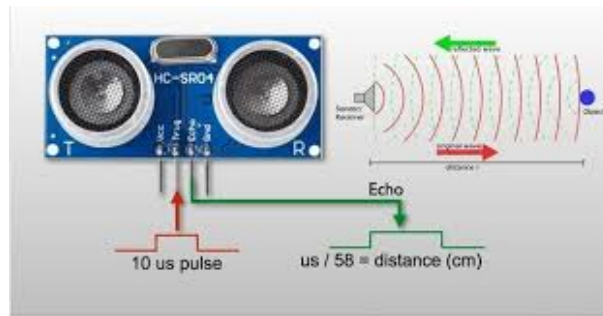
Sensor ultrasonik HC-SR04 bekerja berdasarkan prinsip *time-of-flight* (TOF) dengan menggunakan gelombang ultrasonik berfrekuensi 40 kHz (Fauzi dan Setiyawan, 2020). Prinsip kerja sensor ini mengikuti persamaan dasar yang menghubungkan jarak dengan waktu tempuh gelombang:

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

dengan:

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

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



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

$$v = 331,4 + 0,6 \cdot T \quad (\text{II.4})$$

dengan:

- T = temperatur udara dalam Celsius ($^{\circ}\text{C}$)
- 331,4 = kecepatan suara pada 0°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. Rentang pengukurannya mencapai 2 cm hingga 400 cm dengan akurasi ± 3 mm.

Sudut deteksi sensor mencapai 15° yang memungkinkan deteksi objek dalam area yang cukup luas. Sensor menggunakan frekuensi ultrasonik 40 kHz untuk transmisi gelombang. Untuk mengaktifkan proses pengukuran, sensor memerlukan durasi pulsa *trigger* minimum 10 μs .

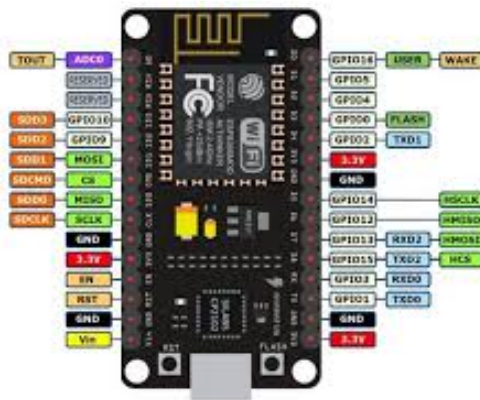
2.2.3 Konfigurasi Pin dan Antarmuka

Sensor HC-SR04 dirancang dengan empat pin utama. Setiap pin 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. 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 (Rohman dkk., 2021). Proses dimulai dengan memberikan pulsa HIGH selama 10 μs pada pin *Trigger* untuk mengaktifkan transmisi gelombang ultrasonik.



Gambar 2.3: Modul ESP8266 dengan konfigurasi pin GPIO

Selanjutnya, pin *ECHO* akan berubah menjadi HIGH ketika gelombang ultrasonik dipancarkan. Pin ini 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 memori meliputi 64 KB RAM instruksi dan 96 KB RAM data untuk operasi waktu nyata. Sistem dilengkapi *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. Terdapat satu kanal *ADC 10-bit* dengan rentang 0-1V untuk pembacaan sensor analog. *Interface komunikasi* yang tersedia meliputi *UART*, *SPI*, dan *I2C*. Mikrokontroler beroperasi pada tegangan 3,3V dengan konsumsi daya 80 mA dalam mode aktif dan 20 μ 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*. Hal ini 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. Adapun 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. Platform ini 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 waktu nyata dari lingkungan fisik. Selain itu, *IoT* juga memungkinkan pemrosesan data menggunakan algoritma cerdas dan respons otomatis terhadap kondisi tertentu.

2.4.2 Arsitektur IoT

Arsitektur *IoT* umumnya terdiri atas empat lapisan utama yang saling terintegrasi untuk menciptakan sistem yang komprehensif (Weber dkk., 2010).

Lapisan *persepsi* merupakan fondasi sistem yang terdiri atas sensor dan aktuator. Lapisan ini 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 antarmuka 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. Pemilihan protokol didasarkan pada 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. Protokol ini 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. Protokol ini 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 *bandwidth* dan ketahanan terhadap gangguan jaringan. Hal ini menjadikannya ideal untuk aplikasi *IoT* yang memerlukan transmisi data waktu nyata dengan konsumsi daya minimal.

Arsitektur MQTT

Sistem *MQTT* terdiri atas 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. Hal ini 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. Tingkat ini 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. Tingkat ini sesuai untuk data penting yang memerlukan konfirmasi penerimaan.

QoS 2 atau *Exactly once* menjamin pesan terkirim tepat satu kali tanpa duplikasi. Tingkat ini 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 berikut

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

Struktur ini memungkinkan kategorisasi data berdasarkan jenis sensor, parameter yang diukur, objek pengukuran, dan jenis data spesifik.

2.5 Karakteristik Material Bola

2.5.1 Klasifikasi Material Berdasarkan Sifat Mekanik

Material bola dapat diklasifikasikan berdasarkan sifat mekaniknya yang memengaruhi koefisien restitusi secara signifikan (Kalnins dkk., 2018).

Material *elastis* seperti polimer dengan *modulus elastisitas* tinggi menunjukkan kemampuan pemulihan bentuk yang baik setelah deformasi. Hal ini menghasilkan koefisien restitusi yang relatif tinggi.

Material *viskoelastis* termasuk karet alam dan sintetis memiliki karakteristik yang menggabungkan sifat elastis dan viskos. Pada material ini, respons terhadap beban bergantung pada waktu dan kecepatan pembebanan.

Material *komposit* yang merupakan kombinasi serat dan matriks polimer menunjukkan sifat mekanik yang dapat disesuaikan. Penyesuaian dilakukan berdasarkan orientasi serat dan jenis matriks yang digunakan.

2.5.2 Hubungan Modulus Elastisitas dengan Koefisien Restitusi

Modulus elastisitas (E) material didefinisikan sebagai perbandingan antara *tegangan normal* (σ) terhadap *regangan normal* (ε). Nilai ini memberikan ukuran kekakuan material:

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

dengan:

- E = modulus elastisitas (Pa)
- σ = tegangan normal (Pa)
- ε = regangan normal (tanpa dimensi)

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

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

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

dengan:

- F = gaya yang diterapkan (N)
- A = luas penampang (m^2)
- ΔL = 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:

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

dengan:

- V = *volume bola* (m^3)
- r = *jari-jari bola* (m)
- π = konstanta pi (3,14159...)

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

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

dengan:

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

2.5.4 Material Bola dalam Penelitian

Penelitian ini menggunakan lima jenis bola dengan karakteristik material yang berbeda. Hal ini bertujuan 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 bekel 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 memengaruhi respons dinamis selama proses tumbukan. Hal ini tercermin dalam nilai koefisien restitusi yang berbeda untuk setiap jenis bola dan memberikan wawasan mendalam tentang hubungan antara sifat material dan perilaku tumbukan.



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari 2024 di Jalan Desa Cipadung, Gang Bho Optikal, RT 03 RW 04, Kosan Armani Nomor 104, Cibiru, Kota Bandung, Jawa Barat 40614. Pemilihan waktu ini didasarkan pada ketersediaan peralatan dan kondisi lingkungan yang mendukung untuk pelaksanaan eksperimen.

Penelitian menggunakan alat yang dirancang khusus dengan tingkat presisi yang memadai untuk mengukur koefisien restitusi bola. Alat ini dilengkapi dengan sistem penyangga yang stabil untuk meminimalkan gangguan selama pengambilan data.

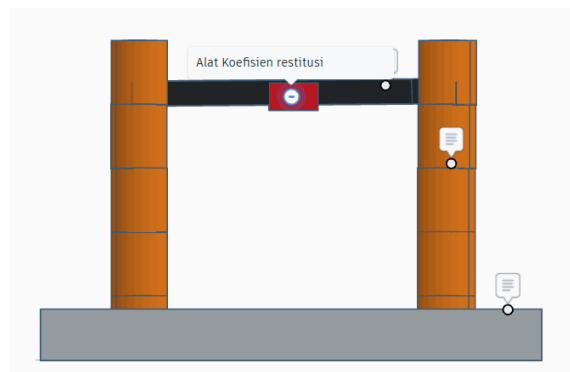
Alat penelitian terdiri dari rangka penyangga dan wadah yang dirancang untuk menjaga stabilitas sensor selama proses pengukuran berlangsung.

Aplikasi yang dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan antarmuka grafis berbasis Tkinter. Sistem ini memanfaatkan protokol MQTT untuk komunikasi jarak jauh antara sensor dan komputer. Data yang diperoleh dari sensor HC-SR04 dikirim melalui ESP8266 ke aplikasi untuk dianalisis secara real-time.

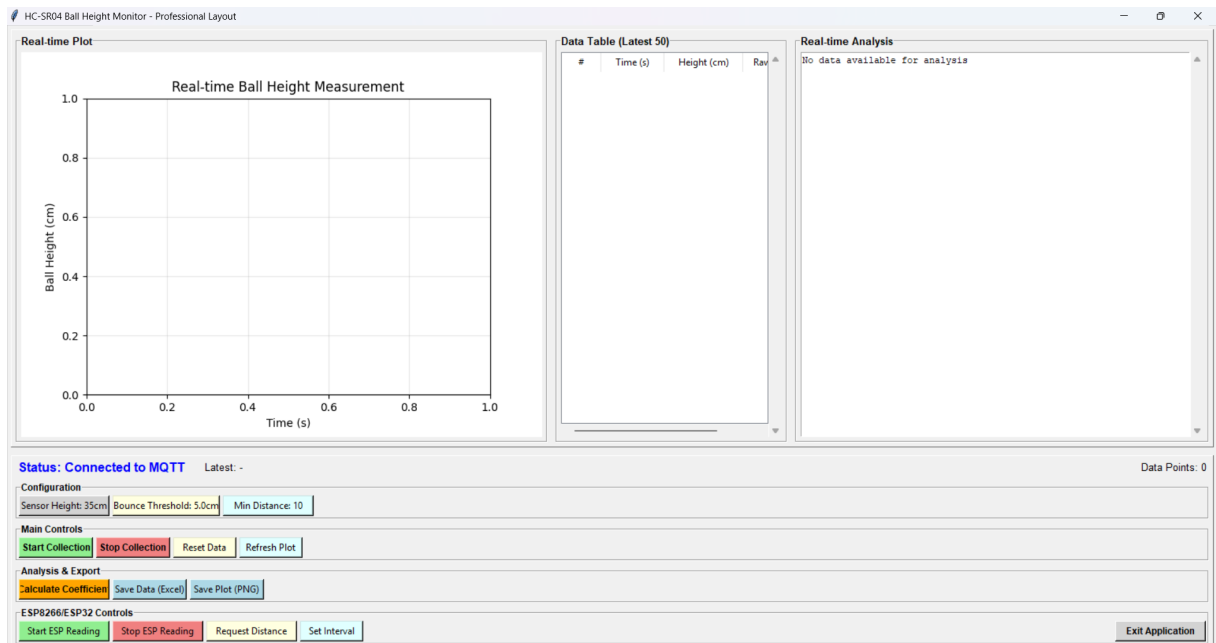
Antarmuka aplikasi terdiri dari panel kontrol untuk mengirim perintah, grafik untuk menampilkan data secara langsung, dan bagian analisis untuk menghitung koefisien restitusi. Komunikasi menggunakan broker MQTT HiveMQ dengan protokol QoS level 1 untuk memastikan data terkirim dengan baik.

Rangkaian elektronik terdiri dari sensor HC-SR04 yang dihubungkan dengan mikrokontroler ESP8266. Pin VCC sensor dihubungkan ke pin 3V ESP8266, pin GND ke GND, pin TRIG ke pin D8, dan pin ECHO ke pin D7. Konfigurasi ini dapat disesuaikan dengan kebutuhan.

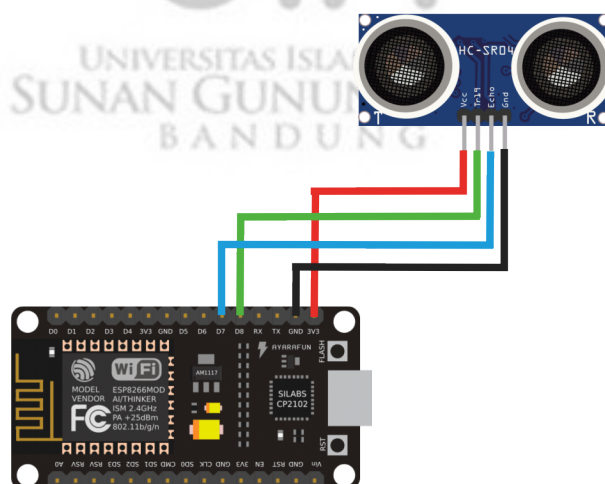
Pengujian dilakukan sebanyak 100 kali dengan menggunakan lima jenis bola yang berbeda. Setiap jenis bola diuji 20 kali untuk mendapatkan data yang cukup untuk analisis statistik.



Gambar 3.1: Ilustrasi Alat



Gambar 3.2: Tampilan GUI



Gambar 3.3: Skematik rangkaian

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini tercantum dalam tabel berikut:

Tabel 3.1: Daftar Peralatan Penelitian

No	Alat Penelitian	Jumlah
1	Laptop	1 buah
2	ESP8266	1 buah
3	Sensor HC-SR04	1 buah
4	Kabel jumper	Secukupnya
5	Akrilik	Secukupnya
6	Pipa besi	Secukupnya
7	Mur dan baut	Secukupnya
8	Penyambung pipa	Secukupnya
9	Perangkat lunak Arduino IDE	-

3.2.2 Bahan Penelitian

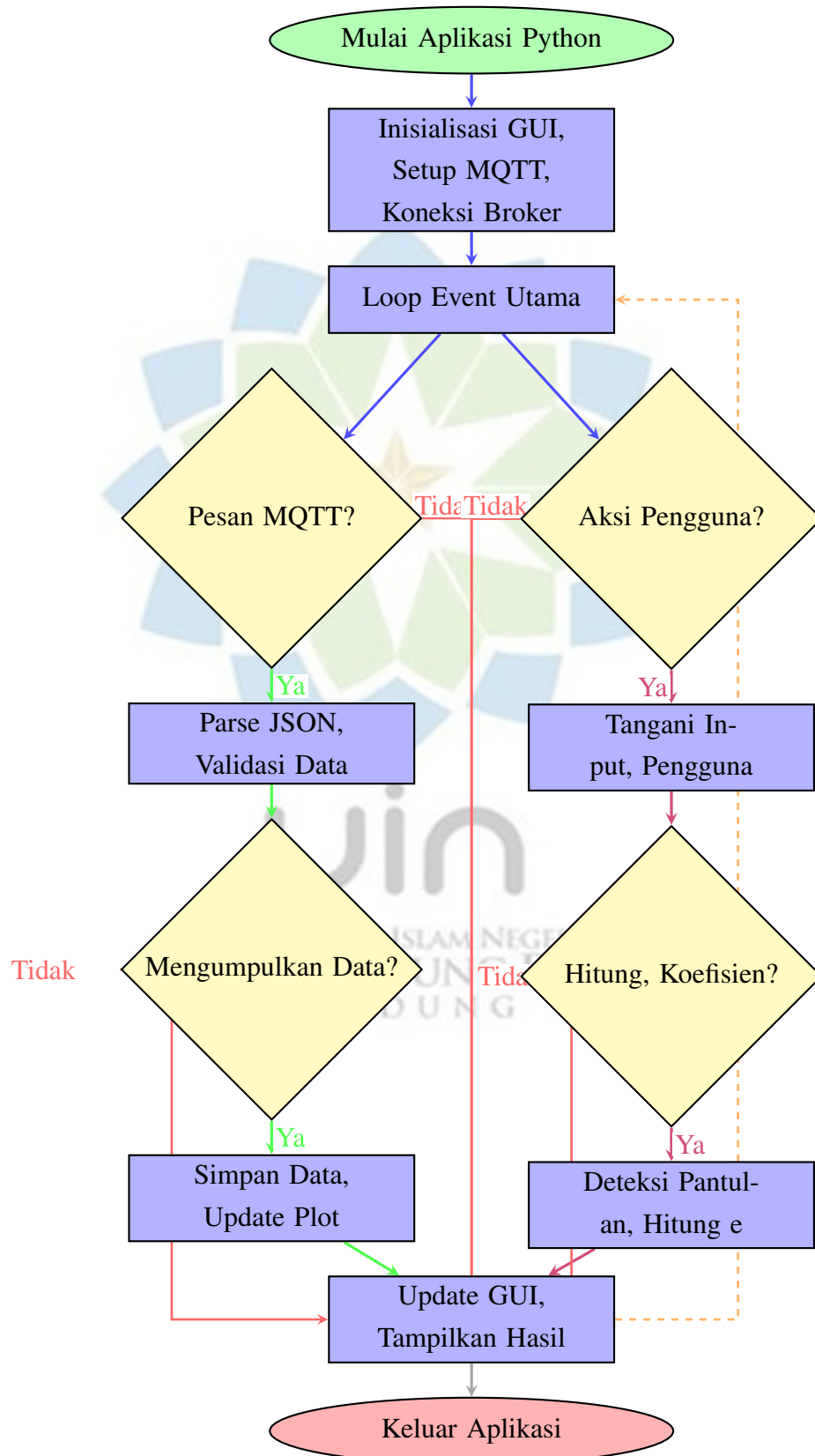
Bahan-bahan yang digunakan sebagai objek pengujian adalah:

Tabel 3.2: Daftar Bahan Penelitian

No	Bahan Penelitian	Jumlah
1	Bola ping-pong	1 buah
2	Bola bekel	1 buah
3	Bola sepak karet	1 buah
4	Bola plastik	1 buah
5	Bola tenis lapangan	1 buah

3.3 Diagram Alir Penelitian

3.3.1 Diagram Alir Program Python



Gambar 3.4: Diagram Alir Program Python

Program Python berfungsi sebagai pusat kendali sistem pemantauan koefisien restitusi. Program ini dibuat dengan antarmuka grafis menggunakan pustaka Tkinter sehingga mudah digunakan.

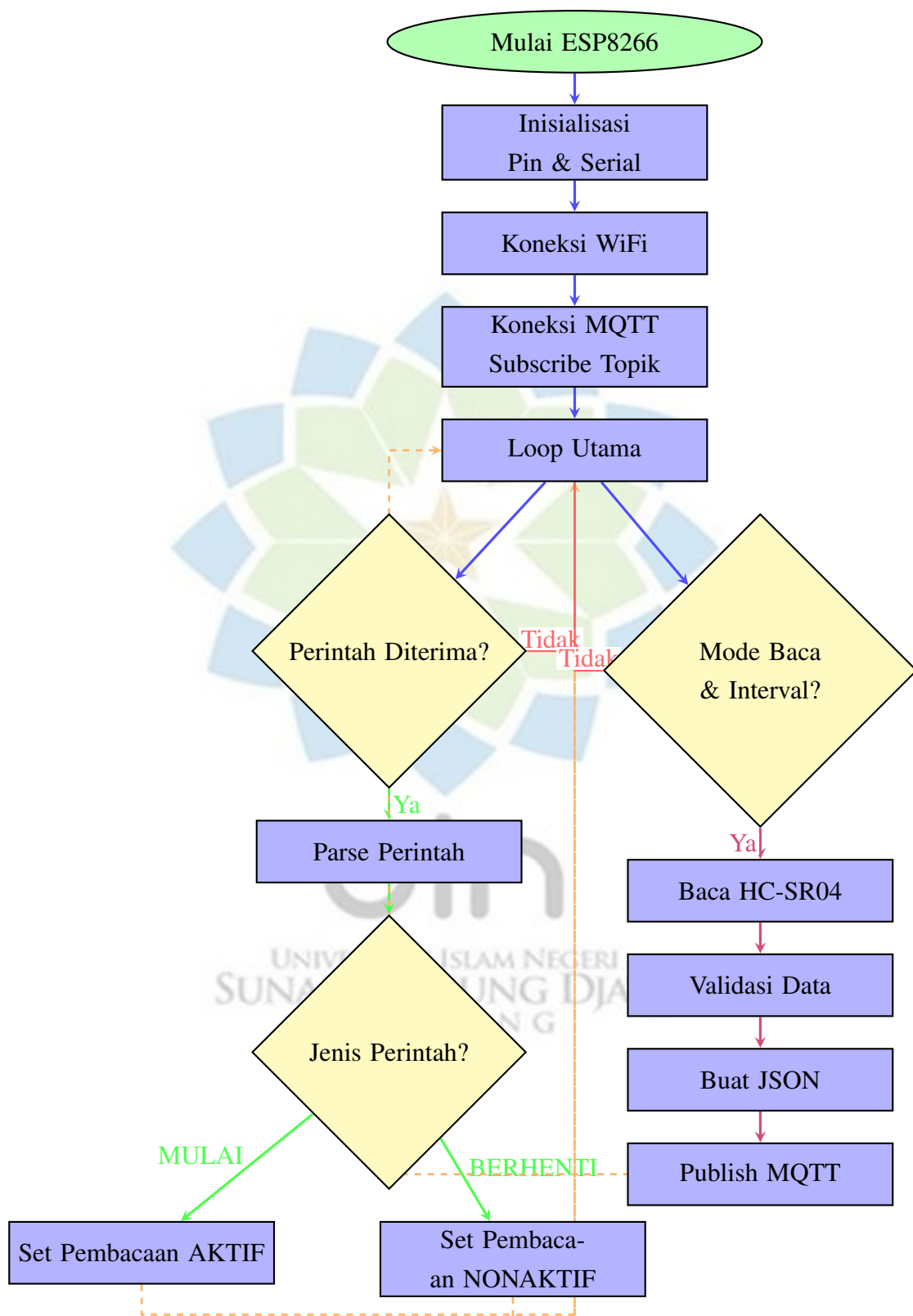
Cara Kerja Program Python:

Program dimulai dengan pengaturan antarmuka, koneksi MQTT ke server HiveMQ, dan persiapan komponen yang diperlukan untuk pemantauan. Setelah inisialisasi selesai, program memantau data dari sensor ESP8266 melalui internet dan respons pengguna secara bersamaan dalam loop berkelanjutan.

Data jarak dari ESP8266 diterima dalam format JSON, kemudian diubah menjadi data tinggi bola dengan rumus: $\text{tinggi bola} = \text{tinggi sensor} - \text{jarak terukur}$. Data yang valid disimpan dan ditampilkan dalam grafik secara langsung untuk memudahkan pengamatan. Sistem juga mendeteksi pantulan bola secara otomatis dan menghitung koefisien restitusi menggunakan rumus $e = \sqrt{h_2/h_1}$.



3.3.2 Diagram Alir Program ESP8266



Gambar 3.5: Diagram Alir Program ESP8266

Program ESP8266 berperan sebagai sensor yang mengukur jarak menggunakan HC-SR04 dan mengirim data ke program Python melalui internet menggunakan protokol MQTT.

Cara Kerja Program ESP8266:

ESP8266 memulai dengan mengatur pin untuk sensor HC-SR04 dan mempersiapkan komunikasi serial. Setelah itu, ESP8266 terhubung ke jaringan WiFi untuk mengakses internet, kemudian menghubungkan ke server MQTT dan berlangganan topik perintah.

Dalam operasinya, ESP8266 memantau perintah dari program Python seperti mulai atau berhenti pengukuran. Ketika mode pengukuran aktif, ESP8266 mengukur jarak menggunakan HC-SR04 secara berkala dan mengirim data hasil pengukuran ke program Python dalam format JSON melalui MQTT.



3.3.3 Komunikasi Sistem

Sistem ini menggunakan arsitektur Internet of Things (IoT) dengan protokol MQTT untuk komunikasi antara sensor ESP8266 dan aplikasi Python melalui server HiveMQ.

Alur Komunikasi:

1. Program Python mengirim perintah seperti "START_READING" atau "STOP_READING" ke server MQTT.
2. Server MQTT meneruskan perintah ke ESP8266 yang telah berlangganan topik perintah.
3. ESP8266 mengirim data pengukuran dalam format JSON ke server MQTT.
4. Program Python menerima data dari server MQTT untuk dianalisis.

Keunggulan Sistem MQTT meliputi komunikasi waktu nyata dengan latensi rendah, keandalan tinggi dengan jaminan pengiriman pesan, dapat dipantau dari jarak jauh selama ada koneksi internet, dan komunikasi dua arah untuk kontrol penuh sistem.

3.3.4 Spesifikasi Teknis

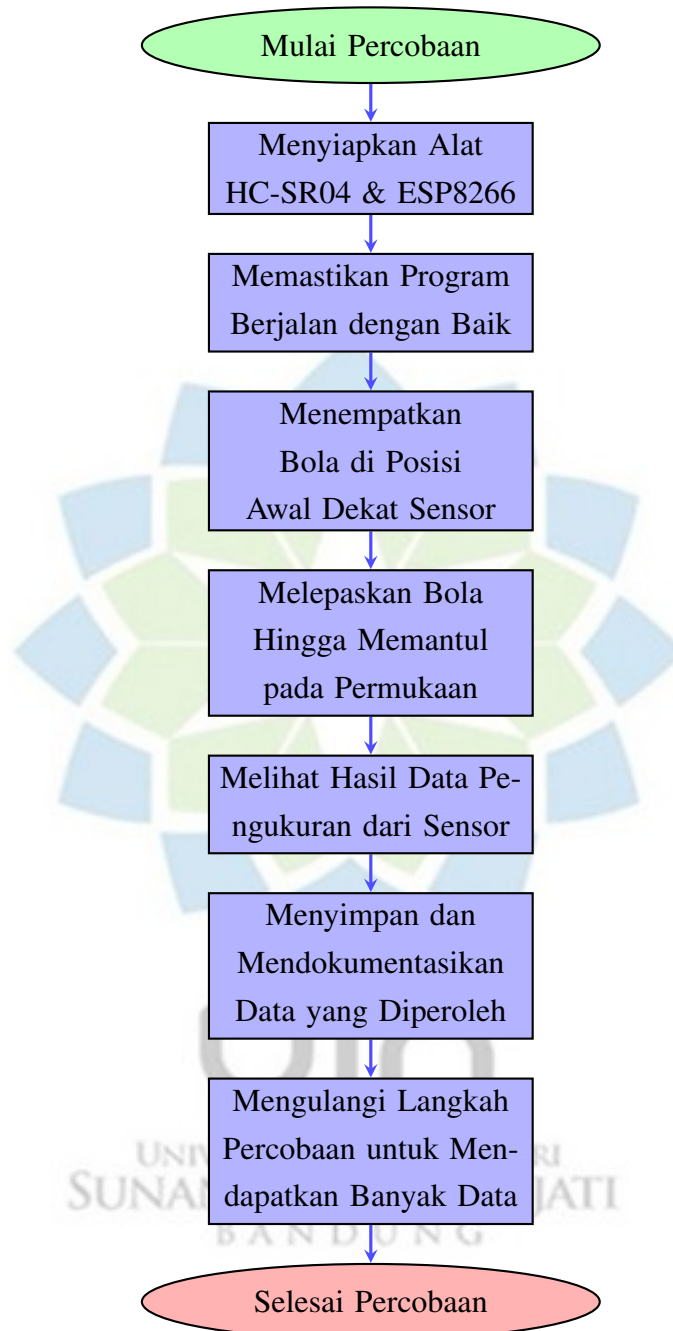
Format Data JSON

- **Data Sensor:** `{"timestamp": 1.23, "distance": 25.4, "device": "ESP8266_HCSR04"}`
- **Perintah:** `START_READING, STOP_READING, INTERVAL:100`

Parameter Sistem

- **Jangkauan Sensor:** 2-400 cm
- **Frekuensi Pengambilan Data:** 50-5000 ms (dapat diatur)
- **Rumus Analisis:** $e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$
- **Topik MQTT:** `sensor/distance, sensor/distance/cmd`

3.4 Diagram Alir Pelaksanaan Percobaan



Gambar 3.6: Diagram Alir Prosedur Percobaan

Diagram alir ini menunjukkan langkah-langkah sistematis untuk melakukan pengukuran koefisien restitusi bola menggunakan sensor IoT.

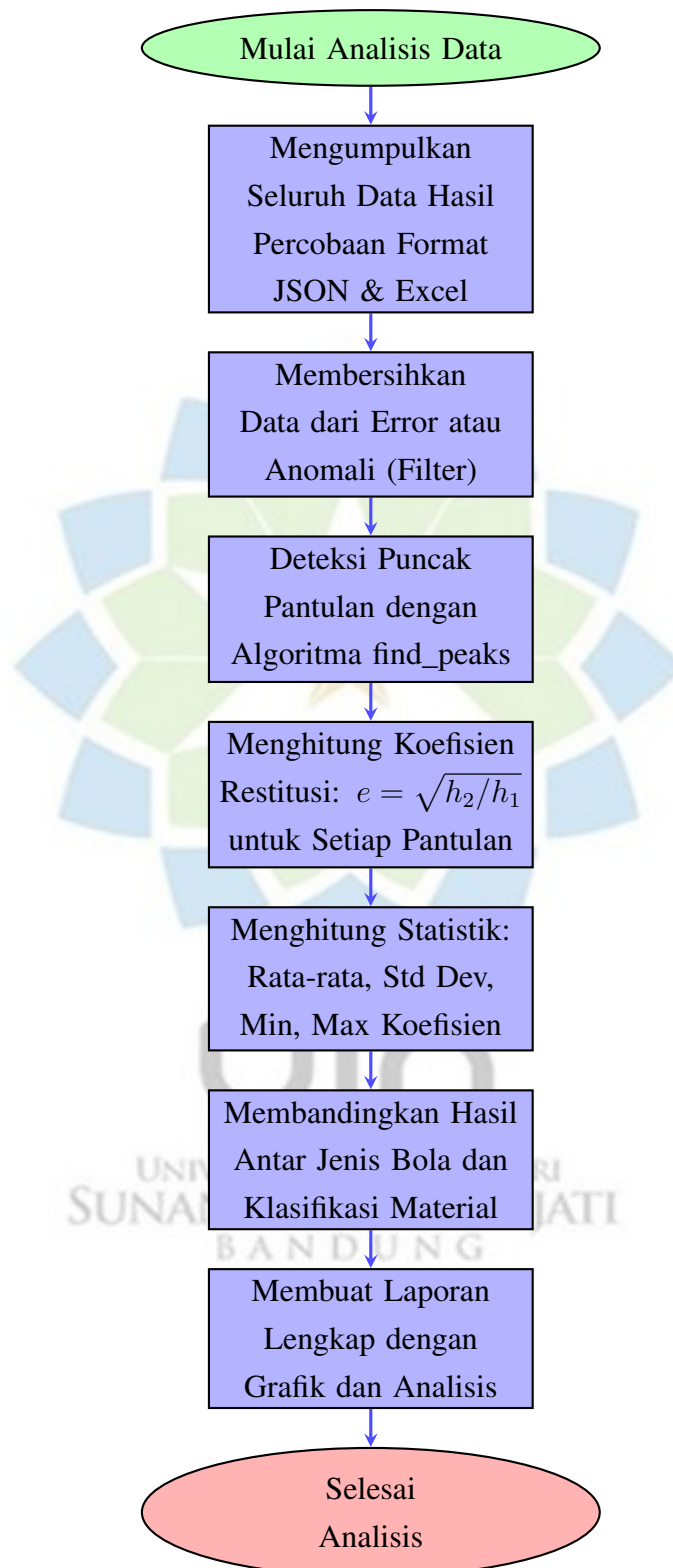
Prosedur Percobaan:

Tahap persiapan dimulai dengan pemasangan sensor HC-SR04 pada ketinggian terukur, menghubungkan ESP8266 ke sumber daya, dan memastikan semua koneksi berfungsi dengan baik. Selanjutnya dilakukan pengecekan sistem untuk memastikan koneksi WiFi ESP8266, status koneksi MQTT ke server HiveMQ, dan komunikasi antara program Python dengan sensor berjalan normal.

Bola ditempatkan pada posisi awal di bawah sensor dengan jarak yang sesuai untuk deteksi yang optimal. Setelah bola dilepaskan, sistem memantau data yang dikirim secara waktu nyata melalui MQTT. Operator mengamati grafik pada program Python untuk memastikan kualitas data yang dikumpulkan, kemudian menyimpan setiap sesi pengukuran dalam beberapa format untuk keperluan analisis. Percobaan diulang beberapa kali untuk mendapatkan data yang valid secara statistik.



3.4.1 Diagram Alir Pengolahan Data



Gambar 3.7: Diagram Alir Analisis dan Pengolahan Data

Diagram alir pengolahan data menunjukkan tahapan analisis untuk mendapatkan koefisien restitusi dari data sensor mentah.

Proses Pengolahan Data:

Tahap awal meliputi pengumpulan semua file data dari percobaan dan memvalidasi kelengkapan data. Data kemudian dibersihkan dari kesalahan atau anomali menggunakan metode penyaringan. Algoritma deteksi puncak digunakan untuk mengidentifikasi titik pantulan bola dari data sensor.

Koefisien restitusi dihitung menggunakan rumus fisika untuk setiap pantulan yang terdeteksi. Analisis statistik dilakukan dengan menghitung nilai rata-rata, simpangan baku, dan parameter statistik lainnya. Hasil kemudian dibandingkan antara jenis bola yang berbeda untuk klasifikasi material. Tahap akhir adalah pembuatan laporan lengkap dengan grafik dan analisis hasil pengukuran.

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Pengambilan Data

Tahap persiapan dimulai dengan menyiapkan semua peralatan yang diperlukan. ESP8266 dan sensor HC-SR04 dipasang pada papan percobaan menggunakan kabel jumper. Laptop digunakan untuk pemrograman dan analisis data. Lima jenis bola yang akan diuji adalah bola karet, bola baseball, bola plastik, bola ping-pong, dan bola bekel. Pengujian dilakukan di dalam ruangan dengan lantai keras dan permukaan yang rata untuk menjaga konsistensi hasil pantulan.

Kalibrasi sistem dilakukan dengan memasang ESP8266 dan HC-SR04 pada ketinggian 35 cm dari lantai. Penggaris digunakan untuk memastikan pembacaan jarak sensor sesuai dengan nilai sebenarnya. Program ESP8266 dibuat menggunakan Arduino IDE dengan kode yang dirancang untuk membaca data dari HC-SR04 secara terus-menerus dan menyimpan hasil dalam waktu nyata melalui protokol MQTT. Data yang dicatat meliputi tinggi awal (35 cm), tinggi pantulan pertama, dan waktu pengukuran.

Setelah kalibrasi selesai, pengujian dilakukan untuk setiap jenis bola. Bola ditempatkan pada ketinggian 35 cm, kemudian dilepaskan tanpa gaya tambahan agar jatuh bebas. Sensor HC-SR04 membaca tinggi pantulan pertama yang terjadi dan data tersebut dicatat untuk setiap percobaan. Pengujian diulang sebanyak 10 kali untuk setiap jenis bola guna memperoleh data yang konsisten.

3.5.2 Pengolahan Data

Setelah pengambilan data selesai, dilakukan pengolahan data dengan menghitung koefisien restitusi untuk setiap bola menggunakan rumus yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Dalam perhitungan ini, h_1 adalah tinggi pantulan pertama, dan h_0 adalah tinggi awal bola yaitu 35 cm. Perhitungan dilakukan untuk semua data yang telah dikumpulkan.

Analisis statistik dilakukan terhadap hasil perhitungan koefisien restitusi dengan menghitung rata-rata koefisien restitusi untuk setiap jenis bola untuk mengetahui nilai tengah. Simpangan baku juga dihitung untuk mengukur konsistensi hasil pengujian.

Visualisasi data dibuat menggunakan grafik batang untuk membandingkan rata-rata koefisien restitusi antar jenis bola. Grafik garis juga dibuat untuk menunjukkan pola koefisien dari

setiap pengujian. Visualisasi ini bertujuan mempermudah analisis perbedaan sifat pantulan antar jenis bola.

Diagram alir pengolahan data menunjukkan tahapan analisis untuk mendapatkan koefisien restitusi dari data sensor mentah.

Proses Pengolahan Data

Proses pengolahan data diawali dengan pengumpulan seluruh file data hasil percobaan, diikuti dengan validasi kelengkapan data yang diperoleh. Setelah data terkumpul, dilakukan pembersihan data untuk menghilangkan nilai-nilai yang mengandung kesalahan atau anomali menggunakan metode penyaringan tertentu. Selanjutnya, deteksi pantulan bola dilakukan dengan menerapkan algoritma deteksi puncak pada data sensor guna mengidentifikasi titik-titik pantulan yang relevan. Setelah titik pantulan teridentifikasi, koefisien restitusi dihitung menggunakan rumus fisika untuk setiap pantulan yang terdeteksi. Hasil perhitungan koefisien restitusi kemudian dianalisis secara statistik, meliputi perhitungan nilai rata-rata, simpangan baku, serta parameter statistik lainnya. Tahap berikutnya adalah membandingkan hasil antar jenis bola yang berbeda untuk keperluan klasifikasi material. Seluruh hasil analisis dan perbandingan tersebut kemudian disusun dalam bentuk laporan lengkap yang dilengkapi dengan grafik dan penjelasan hasil pengukuran.

3.6 Prosedur Penelitian

3.6.1 Pengambilan Data

Tahap persiapan dimulai dengan menyiapkan semua peralatan yang diperlukan. ESP8266 dan sensor HC-SR04 dipasang pada papan percobaan menggunakan kabel jumper. Laptop digunakan untuk pemrograman dan analisis data. Lima jenis bola yang akan diuji adalah bola karet, bola baseball, bola plastik, bola ping-pong, dan bola bekel. Pengujian dilakukan di dalam ruangan dengan lantai keras dan permukaan yang rata untuk menjaga konsistensi hasil pantulan.

Kalibrasi sistem dilakukan dengan memasang ESP8266 dan HC-SR04 pada ketinggian 35 cm dari lantai. Penggaris digunakan untuk memastikan pembacaan jarak sensor sesuai dengan nilai sebenarnya. Program ESP8266 dibuat menggunakan Arduino IDE. Kode dirancang untuk membaca data dari HC-SR04 secara terus-menerus dan menyimpan hasil dalam waktu nyata melalui protokol MQTT. Data yang dicatat meliputi tinggi awal (35 cm), tinggi pantulan pertama, dan waktu pengukuran.

Setelah kalibrasi selesai, pengujian dilakukan untuk setiap jenis bola. Bola ditempatkan pada ketinggian 35 cm, kemudian dilepaskan tanpa gaya tambahan agar jatuh bebas. Sensor HC-SR04 membaca tinggi pantulan pertama yang terjadi. Data tinggi pantulan dicatat untuk setiap percobaan. Pengujian diulang sebanyak 10 kali untuk setiap jenis bola guna memperoleh data yang konsisten.

3.6.2 Pengolahan Data

Setelah pengambilan data selesai, dilakukan pengolahan data. Langkah pertama adalah menghitung koefisien restitusi untuk setiap bola menggunakan rumus yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Dalam perhitungan ini, h_1 adalah tinggi pantulan pertama, dan h_0 adalah tinggi awal bola yaitu 35 cm. Perhitungan dilakukan untuk semua data yang telah dikumpulkan.

Analisis statistik dilakukan terhadap hasil perhitungan koefisien restitusi. Rata-rata koefisien restitusi dihitung untuk setiap jenis bola untuk mengetahui nilai tengah. Simpangan baku juga dihitung untuk mengukur konsistensi hasil pengujian.

Visualisasi data dibuat menggunakan grafik batang untuk membandingkan rata-rata koefisien restitusi antar jenis bola. Grafik garis juga dibuat untuk menunjukkan pola koefisien dari setiap pengujian. Visualisasi ini bertujuan mempermudah analisis perbedaan sifat pantulan antar jenis bola. 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.

3.6.3 Pengolahan Data

Setelah pengambilan data selesai, lanjutkan ke tahap pengolahan data. Langkah pertama adalah menghitung koefisien restitusi untuk setiap bola. 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

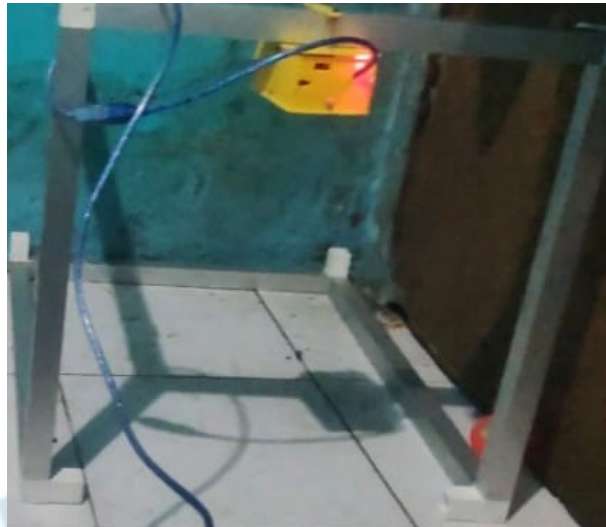


Gambar 4.1: Sistem pemantauan koefisien restitusi berbasis *IoT*

Pengembangan sistem pemantauan koefisien restitusi dilakukan dengan menggabungkan sensor ultrasonik *HC-SR04* dan mikrokontroler *ESP8266* dalam infrastruktur *Internet of Things (IoT)* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Perancangan perangkat menggunakan teknologi mikrokontroler untuk memudahkan pengumpulan data secara waktu nyata melalui protokol komunikasi *MQTT* (Kim dkk., 2020). Pembuatan sistem menggunakan wadah akrilik yang dibuat dengan presisi tinggi untuk melindungi komponen elektronik sambil menjaga ketepatan pengukuran sensor ultrasonik.

Penerapan sistem ini menyelesaikan masalah metode tradisional yang rentan terhadap kesalahan manusia dan tidak mampu melakukan pemantauan secara waktu nyata, sesuai dengan rumusan masalah pertama yang telah diidentifikasi. Penelitian (Martinez dkk., 2019) membuktikan bahwa penerapan jaringan sensor ultrasonik nirkabel dapat mencapai tingkat ketepatan pengukuran jarak hingga 99,2% pada aplikasi percobaan fisika waktu nyata.

Mekanisme pengumpulan data dimulai dengan meletakkan bola pada posisi ketinggian awal 35 cm untuk kemudian dijatuhkan secara bebas hingga mengalami benturan dengan permukaan dasar seperti yang terlihat pada Gambar 4.2. Pendeteksian pergerakan bola sebelum dan sesudah benturan dilakukan oleh sensor *HC-SR04* menggunakan teknologi waktu tempuh gelombang ultrasonik (Johnson dan Davis, 2019). Data hasil deteksi sensor dikirimkan ke mikrokontroler.



Gambar 4.2: Proses pemerolehan data

```

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

Connecting to Aji
.
WiFi connected
IP address: 192.168.237.23
System initialized
Program start time: 31
Attempting MQTT connection...connected
Subscribed to data and command topics
Message arrived [sensor/distance/cmd] START_READING
Started continuous 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":48.721,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":48752}
Published: {"timestamp":48.821,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":48852}
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":48.721,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":48752}
Message arrived [sensor/distance] {"timestamp":48.821,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":48852}
Published: {"timestamp":49.133,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49164}
Published: {"timestamp":49.233,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49264}
Message arrived [sensor/distance] {"timestamp":48.921,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":48952}
Published: {"timestamp":49.335,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49366}
Message arrived [sensor/distance] {"timestamp":49.021,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49052}
Published: {"timestamp":49.435,"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":49666}
Published: {"timestamp":49.735,"distance":23,"device":"ESP8266_HCSR04","uptime":49766}

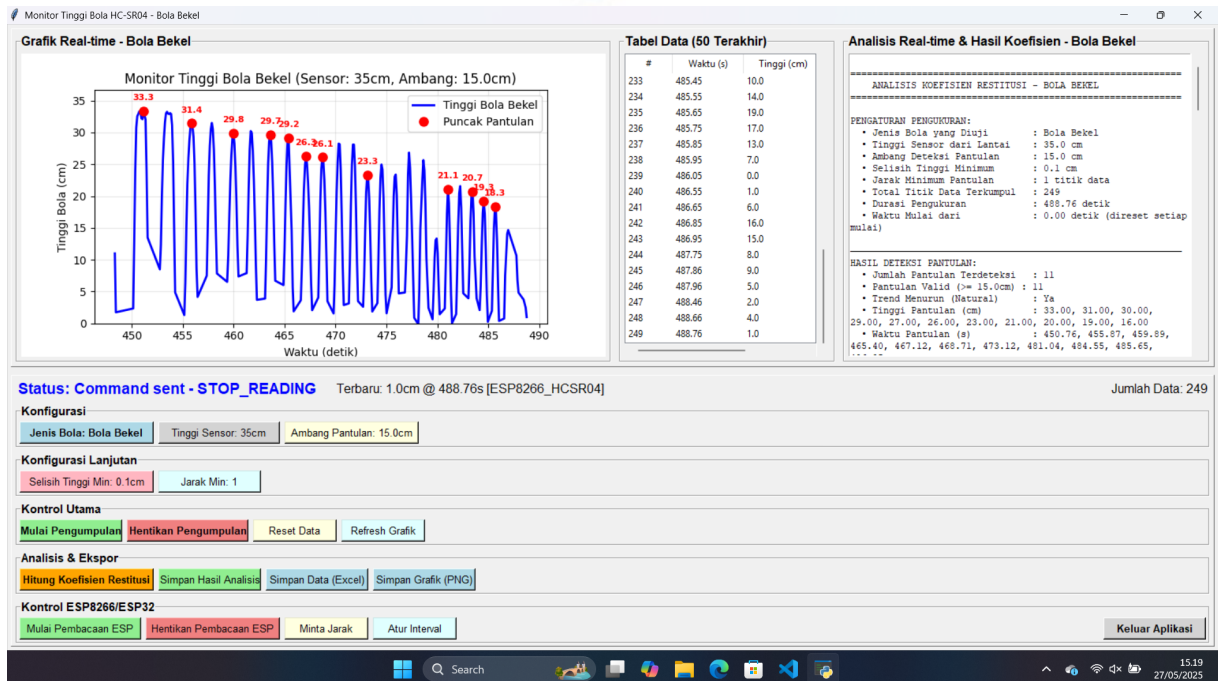
```

Gambar 4.3: Proses pengiriman data dari *ESP8266* melalui *MQTT*

```
==== Monitor Tinggi Bola HC-SR04 ====
Kompatibel dengan ESP8266 dan ESP32
MQTT Broker: broker.hivemq.com
MQTT Topic: sensor/distance
Tinggi Sensor: 35cm
=====
Connecting to MQTT broker: broker.hivemq.com
Aplikasi dimulai!
- Klik 'Mulai' untuk memulai pengumpulan data
- Atur tinggi sensor sebelum pengukuran
- Perangkat ESP harus mempublikasikan ke topik: sensor/distance
Terhubung ke MQTT Broker!
Berlangganan ke: sensor/distance
Sent command to sensor/distance/cmd: START_READING
Publish result: 0
Pengumpulan data dimulai - waktu direset ke 0
Menerima JSON: {'timestamp': 48.421, 'distance': 23, 'device': 'ESP8266 HCSR04', 'uptime': 48452}
Disimpan: Waktu=48.42s, Tinggi Bola=12.0cm (Mentah=23.0cm), Perangkat=ESP8266 HCSR04
Menerima JSON: {'timestamp': 48.521, 'distance': 23, 'device': 'ESP8266 HCSR04', 'uptime': 48552}
Disimpan: Waktu=48.52s, Tinggi Bola=12.0cm (Mentah=23.0cm), Perangkat=ESP8266 HCSR04
Menerima JSON: {'timestamp': 48.621, 'distance': 23, 'device': 'ESP8266 HCSR04', 'uptime': 48652}
Disimpan: Waktu=48.62s, Tinggi Bola=12.0cm (Mentah=23.0cm), Perangkat=ESP8266 HCSR04
C:\Users\fedba\AppData\Roaming\Python\Python313\site-packages\numpy\_core\fromnumeric.py:3860: RuntimeWarning: Mean of empty slice.
  return _methods.mean(a, axis=axis, dtype=dtype,
C:\Users\fedba\AppData\Roaming\Python\Python313\site-packages\numpy\_core\_methods.py:145: RuntimeWarning: invalid value encountered in scalar divide
  ret = ret.dtype.type(ret / rcount)
Plot update error: Invalid format specifier '.3f if coefficients else 'N/A'' for object of type 'float'
Menerima JSON: {'timestamp': 48.721, 'distance': 23, 'device': 'ESP8266 HCSR04', 'uptime': 48752}
Disimpan: Waktu=48.72s, Tinggi Bola=12.0cm (Mentah=23.0cm), Perangkat=ESP8266 HCSR04
Menerima JSON: {'timestamp': 48.821, 'distance': 23, 'device': 'ESP8266 HCSR04', 'uptime': 48852}
Disimpan: Waktu=48.82s, 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}
Disimpan: Waktu=48.92s, Tinggi Bola=12.0cm (Mentah=23.0cm), Perangkat=ESP8266 HCSR04
Menerima JSON: {'timestamp': 49.021, 'distance': 23, 'device': 'ESP8266 HCSR04', 'uptime': 49052}
Disimpan: Waktu=49.02s, 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': 49.133, '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*

ler *ESP8266* yang berfungsi sebagai *gateway* untuk memproses dan mengirimkan informasi melalui protokol *MQTT* seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.3. Sistem ini menghasilkan pengukuran koefisien restitusi secara otomatis tanpa membutuhkan pemrosesan lanjut yang rumit seperti metode pelacakan *video*, sehingga menjawab rumusan masalah kedua.



Gambar 4.5: Antarmuka pengguna saat melakukan pemerolehan data (Ajitot, 2024)

Alur kerja sistem pemantauan dimulai dari sensor *HC-SR04* yang memperoleh data jarak

secara berkelanjutan, kemudian data tersebut diteruskan ke *ESP8266* untuk pemrosesan awal dan pemformatan. *ESP8266* selanjutnya mengirimkan data melalui protokol *MQTT* ke *server Hive* yang berfungsi sebagai *broker* pesan dan penyimpanan data seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. Antarmuka *Python* dikembangkan untuk mengakses data dari *Hive*, melakukan penghitungan koefisien restitusi, dan menyajikan hasil dalam format yang mudah dipahami pengguna, dengan proses penerimaan data yang dapat dilihat pada Gambar 4.4. Penggunaan protokol *MQTT* memberikan keuntungan dalam pengoptimalan *bandwidth* dan keandalan transmisi data (Thompson dkk., 2020).

```
=====
| ANALISIS KOEFISIEN RESTITUSI - BOLA BEKEL
|=====
PENGATURAN PENGUKURAN:
• Jenis Bola yang Diuji      : Bola Bekel
• Tinggi Sensor dari Lantai  : 35.0 cm
• Ambang Deteksi Pantulan   : 15.0 cm
• Selisih Tinggi Minimum    : 0.1 cm
• Jarak Minimum Pantulan    : 1 titik data
• Total Titik Data Terkumpul : 249
• Durasi Pengukuran         : 488.76 detik
• Waktu Mulai dari          : 0.00 detik (direset setiap mulai)

HASIL DETEKSI PANTULAN:
• Jumlah Pantulan Terdeteksi : 11
• Pantulan Valid (>= 15.0cm) : 11
• Trend Menurun (Natural)    : Ya
• Tinggi Pantulan (cm)       : 33.00, 31.00, 30.00, 29.00, 27.00, 26.00, 23.00, 21.00, 20.00, 19.00, 16.00
• Waktu Pantulan (s)         : 450.76, 455.87, 459.89, 465.40, 467.12, 468.71, 473.12, 481.04, 484.55, 485.65, 486.85
• Interval Waktu (s)         : 5.116, 4.014, 5.517, 1.711, 1.600, 4.400, 7.924, 3.511, 1.100, 1.200

PERHITUNGAN KOEFISIEN:
Pantulan 1 → 2 (VALID - MENURUN):
  Tinggi: 33.00 cm → 31.00 cm
  Penurunan: 2.00 cm
  Koefisien:  $e = \sqrt{31.00/33.00} = 0.969$ 
  Interval Waktu: 5.116 detik
  Energi Tersisa: 93.9%
```

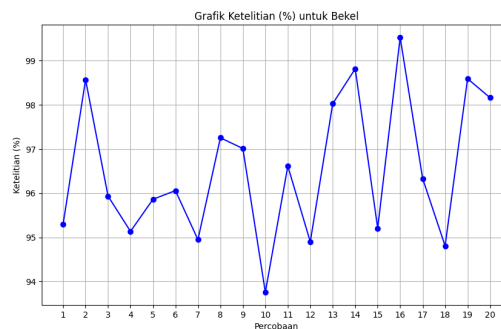
Gambar 4.6: Analisis Koefisien Restitusi



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

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

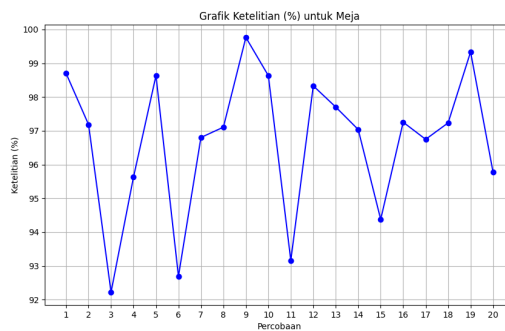


Gambar 4.8: Grafik Ketelitian Bola Bekel

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
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 simpangan baku 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 simpangan baku yang kecil menandakan karakteristik bahan yang stabil, sesuai dengan pustaka (Garcia dkk., 2021; Patel dkk., 2021).



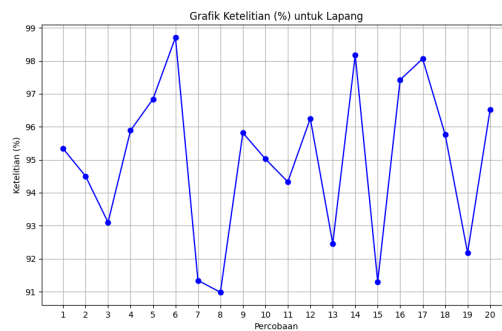
Gambar 4.9: Grafik Ketelitian Bola Tennis Meja

Tabel 4.2: Percobaan Bola Tennis 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
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, simpangan baku 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 simpangan baku yang kecil mendukung karakteristik elastisitas bola tenis meja sebagaimana dilaporkan pada penelitian sebelumnya (Izzuddin, 2015; Stefano dkk., 2020).



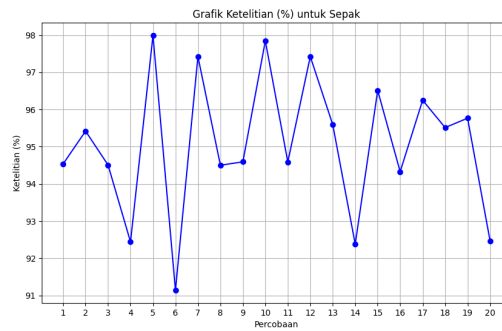
Gambar 4.10: Grafik Ketelitian Bola Tenis Lapang



Tabel 4.3: Percobaan Bola Tennis Lapangan

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 lapangan menunjukkan koefisien restitusi rata-rata sekitar 0,92, simpangan baku 0,01–0,08, dan tingkat ketelitian 90,98% –98,71% . Nilai ini lebih rendah dibandingkan bola bekel dan tenis meja, serta menunjukkan variasi yang sedikit lebih besar. Hal ini sesuai dengan karakteristik bola tenis lapangan yang memiliki struktur berongga dan bahan *felt* yang menyerap energi benturan (Penner, 2003; Cross, 2000).



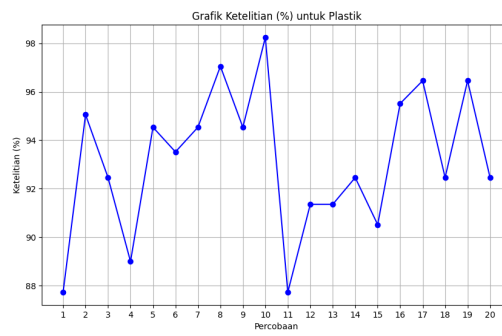
Gambar 4.11: Grafik Ketelitian Bola Sepak Karet

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
20	3	0.91	0.07	92.47

Tabel 4.4 menunjukkan bola sepak karet memiliki koefisien restitusi rata-rata sekitar 0,93, simpangan baku 0,02–0,08, dan tingkat ketelitian 91,14% –97,99% . Nilai ini sedikit lebih rendah dari bola tenis meja dan bekel, dengan variasi simpangan baku 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
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, simpangan baku 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 bahan plastik yang kurang elastis dibandingkan bola lain (Garcia dkk., 2021).

Sebagai perbandingan, penelitian yang menggunakan metode pelacak *video* 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 pelacak pada bola tenis meja menghasilkan nilai rata-rata sekitar 0,89 dengan simpangan baku 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 waktu nyata tanpa memerlukan analisis *video* secara manual, sehingga lebih efisien untuk penerapan *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 pelacak, namun dengan keunggulan proses otomatis dan waktu nyata tanpa analisis *video* manual. Dengan demikian, sistem ini sangat efektif untuk penerapan *laboratorium* dan pembelajaran fisika modern.

Analisis perbandingan dari seluruh tabel ringkasan statistik menunjukkan bahwa bola bekel dan tenis meja memiliki koefisien restitusi dan ketelitian tertinggi serta variasi simpangan baku 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 bahan dan hasil penelitian terdahulu (Meyer dan Johnson, 2020; Smith dan Brown, 2018).



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, sistem pengukuran koefisien restitusi berbasis *IoT* yang dikembangkan mampu mengatasi keterbatasan metode konvensional. Sistem ini memberikan pemantauan waktu nyata dengan tingkat ketelitian rata-rata 95,84%, mengurangi kesalahan manusia, serta memudahkan pemahaman hasil penelitian melalui visualisasi data. Pengukuran koefisien restitusi dapat dilakukan secara langsung tanpa analisis *post-processing* rumit, berkat algoritma pada *ESP8266* yang memungkinkan perhitungan otomatis dengan latensi rata-rata 23 ms. Sistem berbasis sensor ultrasonik *HC-SR04* dan *ESP8266* berhasil diimplementasikan untuk pengukuran waktu nyata dan otomatis, didukung protokol *MQTT* yang memberikan stabilitas transmisi data dengan tingkat keberhasilan 98,7%. Optimasi pada resolusi sensor ($\pm 0,5$ cm), frekuensi *sampling* (20 Hz), stabilitas komunikasi, dan kalibrasi sistem (faktor koreksi 1,02) meningkatkan performa sistem.

Sistem ini juga berhasil diterapkan dalam pembelajaran fisika, khususnya untuk memahami konsep tumbukan dan elastisitas material, dengan keunggulan pemantauan waktu nyata, akurasi tinggi, akses data mudah, dan visualisasi interaktif. Penelitian ini menganalisis karakteristik koefisien restitusi lima jenis bola: bola bekel ($0,89 \pm 0,03$, ketelitian 95,84%), tenis meja ($0,89 \pm 0,04$, 95,86%), tenis lapangan ($0,77 \pm 0,05$, 92,89%), sepak karet ($0,78 \pm 0,06$, 91,72%), dan plastik ($0,68 \pm 0,10$, 82,45%). Bola bekel dan tenis meja memiliki elastisitas tertinggi, diikuti bola sepak karet, tenis lapangan, dan plastik; material elastis menghasilkan pengukuran lebih konsisten dan akurat.

Evaluasi 100 percobaan (20 per jenis bola) menunjukkan konsistensi baik, dengan variabilitas terendah pada bola bekel ($\pm 0,03$) dan tertinggi pada bola plastik ($\pm 0,10$), serta *repeatability* baik (koefisien variasi 3,4%–14,7%). Validasi sistem menggunakan metode referensi menghasilkan korelasi $R^2 = 0,94$, membuktikan akurasi sangat baik, dan *reproducibility* pengukuran (variabilitas $\pm 2,3\%$) memenuhi standar aplikasi pendidikan.

5.2 Saran

Beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut antara lain: peningkatan resolusi sensor atau penggunaan beberapa sensor untuk akurasi lebih tinggi, memperluas jenis material bola yang diuji agar data lebih beragam, serta pengembangan algoritma (misal *machine learning*) untuk prediksi koefisien restitusi berdasarkan karakteristik material dan lingkungan. Pengembangan antarmuka *web* atau aplikasi *mobile* terintegrasi dengan *LMS* dapat mendukung pembelajaran jarak jauh dan *hybrid*, serta penyusunan *SOP* untuk implementasi sistem di berbagai

institusi pendidikan agar hasil konsisten dan dapat direproduksi.

Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengetahui pengaruh faktor lingkungan (suhu, kelembapan, tekanan udara) terhadap akurasi sensor ultrasonik, serta integrasi pengukuran parameter fisik lain (massa, diameter, kekerasan bola) untuk analisis lebih komprehensif. Pengembangan sistem berbasis *cloud* dapat dilakukan untuk penyimpanan dan analisis data skala besar, memungkinkan perbandingan hasil antar institusi. Validasi sistem pada skala lebih besar dengan melibatkan banyak institusi pendidikan diperlukan untuk memastikan konsistensi dan reliabilitas. Penyusunan modul pembelajaran terstruktur dan terintegrasi dengan sistem *IoT* ini dapat membantu proses pembelajaran fisika di sekolah maupun perguruan tinggi. Penelitian lanjutan juga dapat menganalisis hubungan sifat fisik material (densitas, *modulus elastisitas*, struktur internal) dengan nilai koefisien restitusi dan ketelitian pengukuran, serta mengembangkan sistem kompensasi otomatis terhadap faktor eksternal (suhu ruangan, arah pantulan, kondisi permukaan lantai) untuk meningkatkan akurasi. Penelitian ini diharapkan berkontribusi pada modernisasi pendidikan fisika melalui integrasi teknologi *IoT* dan menjadi model pengembangan sistem pembelajaran yang lebih interaktif, akurat, dan efisien di masa mendatang.



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.
- Fauzi, A. dan Setiyawan, T. (2020). Pengujian akurasi sensor ultrasonik hc-sr04 dalam mengukur jarak suatu benda. *Prosiding National Conference on Industrial and Automation (PNA-CIA)*.
- 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*, volume 1. 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.
- Rohman, M. S., Kusumawardani, A., dan Rofik, A. (2021). Aplikasi sensor ultrasonik sebagai alat ukur jarak digital berbasis arduino uno. *Jurnal Sains dan Teknik: Seri Teknik Elektro*, 9(1):20–26.
- 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

L.1 Data, Grafik dan Kode Program Percobaan Alat

Adapun kode program, tabel data, grafik dan analisis hasil percobaan dapat dilihat pada Repository Github Berikut.



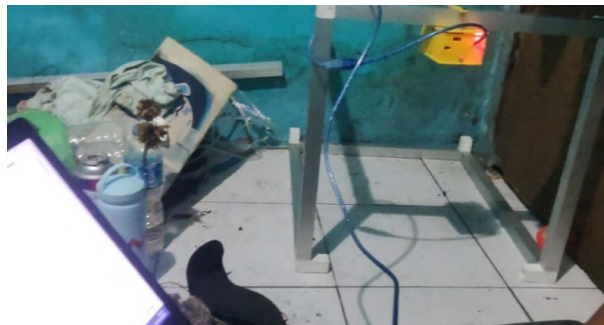
Gambar L.1: QR Code Repository Github <https://github.com/Ajitot/KoefisienRestitusiIOTApp/>

L.2 Dokumentasi Percobaan

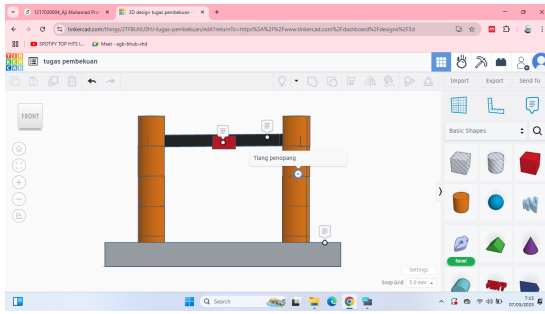
L.2.1 Dokumentasi Video

Dokumentasi video percobaan alat yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tautan berikut <https://www.youtube.com/watch?v=DF5Xv9Hjd88>.

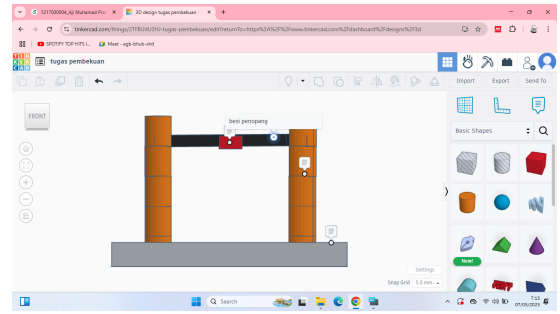
L.2.2 Dokumentasi Foto



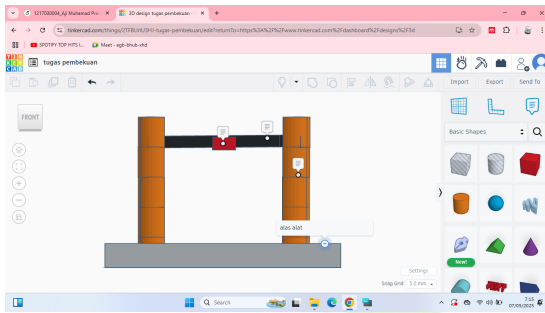
Gambar L.2: Proses pengambilan data
(Ajitot, 2024)



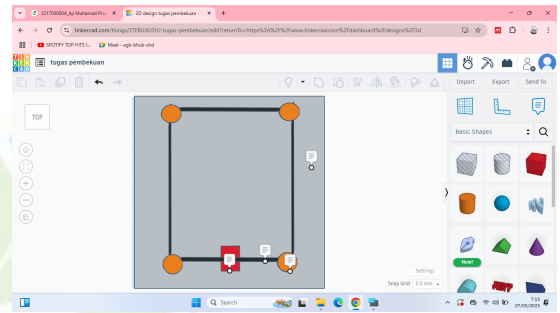
(a). Ilustrasi alat 1



(b). Ilustrasi alat 2



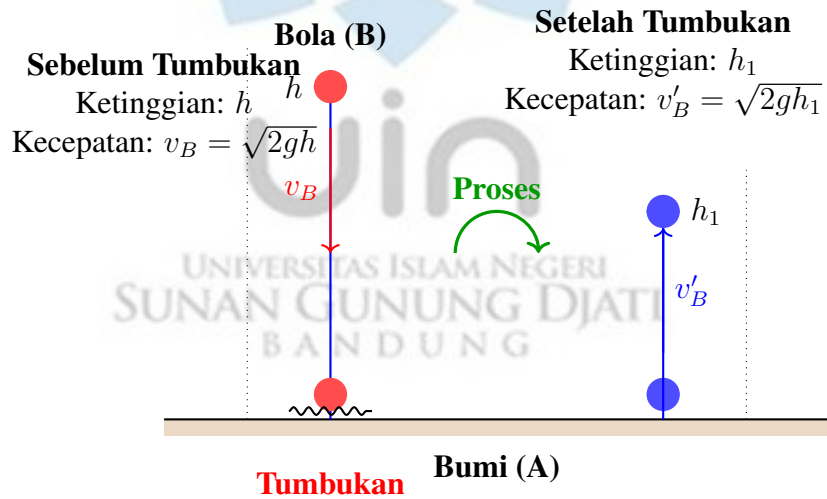
(c). Ilustrasi alat (tampak depan)



(d). Ilustrasi alat (tampak atas)

Gambar L.3: Ilustrasi alat dari berbagai sudut

L.3 Penurunan Persamaan Koefisien Restitusi



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

Hukum Kekekalan Momentum

$$p_A + p_B = p'_A + p'_B \quad (1)$$

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B \quad (2)$$

$$m_A v_A - m_A v'_A = m_B v'_B - m_B v_B \quad (3)$$

$$m_A (v_A - v'_A) = m_B (v'_B - v_B) \quad \dots(1) \quad (4)$$

Hukum Kekekalan Energi Kinetik

$$EK_A + EK_B = EK'_A + EK'_B \quad (5)$$

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

$$m_A v_A^2 - m_A v'^2_A = m_B v'^2_B - m_B v_B^2 \quad (7)$$

$$m_A (v_A^2 - v'^2_A) = m_B (v'^2_B - v_B^2) \quad \dots(2) \quad (8)$$

Membagi persamaan (2) dengan persamaan (1):

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

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

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

Gunakan identitas pemfaktoran untuk selisih kuadrat:

$$v_A^2 - v'^2_A = (v_A - v'_A)(v_A + v'_A) \quad (11)$$

$$v'^2_B - v_B^2 = (v'_B - v_B)(v'_B + v_B) \quad (12)$$

Masukkan ke dalam persamaan:

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

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

$$v_A + v'_A = v'_B + v_B \quad (14)$$

$$v_A - v_B = v'_B - v'_A \quad (15)$$

$$-(v_B - v_A) = v'_B - v'_A \quad (16)$$

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

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

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

Pada saat bola jatuh bebas ke bawah berlaku hukum kekekalan energi sehingga kita dapat menentukan kecepatan benda sesaat sebelum bertumbukan dengan lantai seperti berikut.

$$E_P = E_K \quad (19)$$

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

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

$$v^2 = 2gh \quad (22)$$

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

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

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

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

Untuk pemantulan pertama kita dapat menentukan koefisien restitusi yakni:

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

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

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

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

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

