

# Analisis Koefisien Restitusi pada Bola Berbasis ESP8266 Dengan Protokol MQTT Melalui Antarmuka Grafis Secara Realtime

## 1 Tujuan

1. Mengimplementasikan sistem pengukuran koefisien restitusi berbasis ESP8266 dan sensor ultrasonik HCSR04 dengan protokol MQTT untuk monitoring real-time
2. Menganalisis karakteristik koefisien restitusi dari lima jenis material bola berbeda menggunakan teknologi IoT
3. Mengevaluasi akurasi dan konsistensi pengukuran sistem berbasis IoT dibandingkan dengan metode konvensional

## 2 Dasar Teori

### 2.1 Koefisien Restitusi

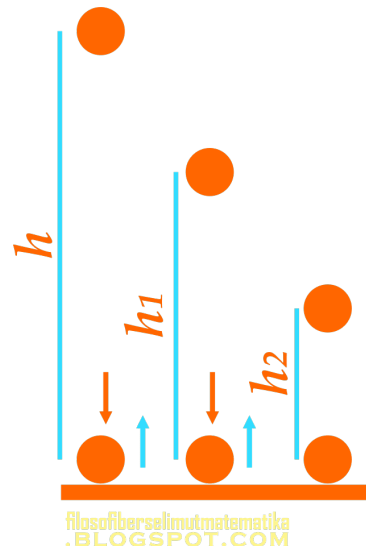


Figure 1: Ilustrasi Gerak Pantulan Bola dengan Koefisien Restitusi

Koefisien restitusi ( $e$ ) merupakan parameter fundamental dalam mekanika yang mengukur tingkat elastisitas tumbukan antara dua benda. Parameter ini didefinisikan sebagai rasio kecepatan pemisahan setelah tumbukan terhadap kecepatan pendekatan sebelum tumbukan. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, ketika sebuah bola dijatuhkan dari

ketinggian  $h_0$  dan memantul mencapai ketinggian  $h_1, h_2$ , nilai koefisien restitusi dapat ditentukan dari rasio tinggi pantulan terhadap tinggi awal.

Secara matematis, koefisien restitusi dinyatakan sebagai:

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

dimana:

1.  $e$  = koefisien restitusi (tanpa satuan)
2.  $v'_r$  = kecepatan relatif setelah tumbukan ( $\text{m s}^{-1}$ )
3.  $v_r$  = kecepatan relatif sebelum tumbukan ( $\text{m s}^{-1}$ )
4.  $v_1, v_2$  = kecepatan benda sebelum tumbukan ( $\text{m s}^{-1}$ )
5.  $v'_1, v'_2$  = kecepatan benda setelah tumbukan ( $\text{m s}^{-1}$ )

Untuk kasus khusus tumbukan vertikal dengan permukaan datar, koefisien restitusi dapat dihitung menggunakan:

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

dimana:

1.  $h_1$  = tinggi awal pelepasan benda (m)
2.  $h_2$  = tinggi pantulan maksimum setelah tumbukan (m)

Berdasarkan nilai koefisien restitusi, tumbukan diklasifikasikan menjadi tiga kategori. Tumbukan elastis sempurna ( $e = 1$ ) terjadi ketika seluruh energi kinetik terpelihara dan benda memantul dengan tinggi yang sama dengan tinggi awal. Tumbukan tidak elastis sempurna ( $e = 0$ ) merupakan kondisi dimana energi kinetik relatif hilang seluruhnya dan benda tidak memantul setelah tumbukan. Sementara itu, tumbukan tidak elastis sebagian ( $0 < e < 1$ ) adalah kondisi yang paling umum terjadi dimana sebagian energi kinetik hilang akibat deformasi dan gesekan internal material.

## 2.2 Elastisitas Bola

Elastisitas bola ditentukan oleh sifat material yang meliputi modulus elastisitas ( $E$ ), batas luluh, dan sifat viskoelastik. Material dengan modulus elastisitas tinggi umumnya menunjukkan nilai koefisien restitusi yang lebih besar. Modulus elastisitas didefinisikan sebagai:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \quad (3)$$

dimana:

1.  $E$  = modulus elastisitas (Pa)
2.  $\sigma$  = tegangan (Pa)
3.  $\varepsilon$  = regangan (tanpa satuan)
4.  $F$  = gaya yang diberikan (N)
5.  $A$  = luas penampang ( $\text{m}^2$ )
6.  $\Delta L$  = perubahan panjang (m)
7.  $L_0$  = panjang awal (m)

Faktor-faktor yang mempengaruhi koefisien restitusi mencakup kecepatan tumbukan, dimana semakin tinggi kecepatan tumbukan maka nilai koefisien restitusi cenderung menurun. Karakteristik permukaan juga berperan penting, permukaan yang kasar akan menyebabkan kehilangan energi yang lebih besar dibandingkan permukaan halus. Temperatur lingkungan mempengaruhi sifat elastisitas material, umumnya material menjadi lebih keras pada temperatur rendah dan lebih lunak pada temperatur tinggi. Geometri benda termasuk bentuk, ukuran, dan distribusi massa juga berpengaruh terhadap karakteristik pantulan.

## 2.3 Sensor HCSR04

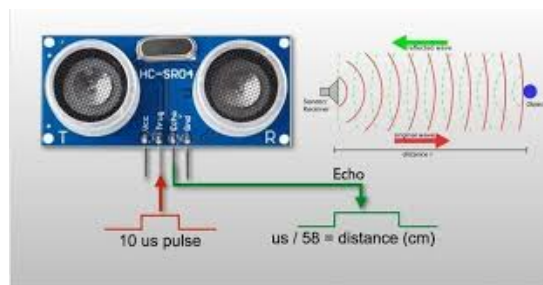


Figure 2: Sensor HC-SR04

Sensor ultrasonik HC-SR04 yang ditunjukkan pada Gambar 2 beroperasi berdasarkan prinsip time-of-flight (TOF) menggunakan gelombang ultrasonik 40 kHz. Sensor ini bekerja dengan memancarkan pulsa ultrasonik melalui transmitter dan menerima pantulan sinyal melalui receiver. Waktu tempuh gelombang dari sensor ke objek dan kembali ke sensor digunakan untuk menghitung jarak objek.

Jarak objek dihitung menggunakan:

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (4)$$

dimana:



## 2.5 Protokol MQTT

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) adalah protokol komunikasi publish-subscribe yang dirancang untuk aplikasi IoT dengan bandwidth terbatas. Protokol ini sangat efisien untuk transmisi data sensor karena menggunakan overhead yang minimal dan mampu beroperasi pada jaringan dengan kualitas yang tidak stabil.

Arsitektur MQTT terdiri dari tiga komponen utama. Publisher berperan sebagai perangkat pengirim data yang akan mengirimkan informasi sensor ke broker. Broker berfungsi sebagai server penerima dan pendistribusi pesan yang mengelola semua komunikasi antar perangkat. Subscriber merupakan perangkat penerima data yang akan mendapatkan informasi sesuai dengan topik yang telah dilanggan.

MQTT mendefinisikan tiga level Quality of Service (QoS) untuk menjamin keandalan transmisi data. QoS 0 (At most once) tidak memberikan konfirmasi pengiriman sehingga pesan bisa hilang namun memiliki overhead terendah. QoS 1 (At least once) memberikan konfirmasi pengiriman untuk menjamin pesan sampai tujuan namun bisa terjadi duplikasi. QoS 2 (Exactly once) menjamin pesan sampai tepat sekali tanpa duplikasi namun memiliki overhead tertinggi.

Struktur topik MQTT menggunakan hierarki dengan separator ”/” untuk organisasi data yang sistematis. Dalam penelitian ini digunakan struktur topik seperti:

```
sensor/koefisien_restitusi/[jenis_bola]/tinggi_awal  
sensor/koefisien_restitusi/[jenis_bola]/tinggi_pantul
```

### 3 Metode Percobaan

Dalam penelitian ini, metode percobaan dirancang untuk mengukur koefisien restitusi berbagai jenis bola menggunakan sistem berbasis ESP8266 dan sensor ultrasonik HCSR04 dengan protokol MQTT untuk monitoring real-time.

#### 3.1 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini mencakup komponen elektronik, struktur mekanik, dan perangkat lunak untuk membangun sistem pengukuran koefisien restitusi yang terintegrasi dengan teknologi IoT. Tabel 1 menunjukkan daftar alat yang diperlukan untuk membangun sistem pengukuran berbasis IoT.

Table 1: Alat yang digunakan

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

Bahan penelitian terdiri dari lima jenis bola dengan karakteristik material yang berbeda untuk menganalisis variasi koefisien restitusi berdasarkan sifat elastisitas material. Tabel 2 menunjukkan spesifikasi bahan yang digunakan sebagai objek uji dalam pengukuran koefisien restitusi.

Table 2: Bahan yang digunakan

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

#### 3.2 Prosedur Percobaan

Prosedur percobaan dilakukan secara sistematis mulai dari persiapan alat, pemasangan struktur fisik, konfigurasi software, kalibrasi sistem, hingga pelaksanaan pengukuran dan

analisis data untuk memastikan akurasi dan konsistensi hasil pengukuran koefisien restitusi.

### 3.2.1 Persiapan Alat

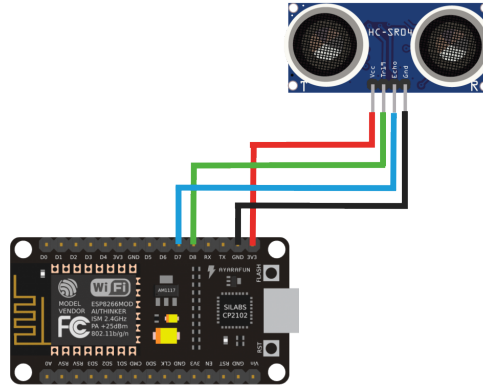
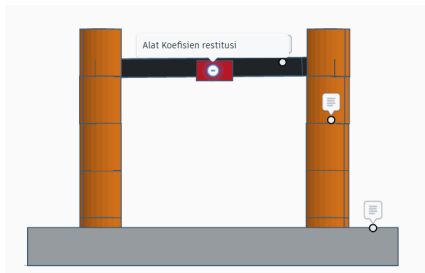


Figure 4: Rangkaian Elektronika ESP8266 dan HC-SR04

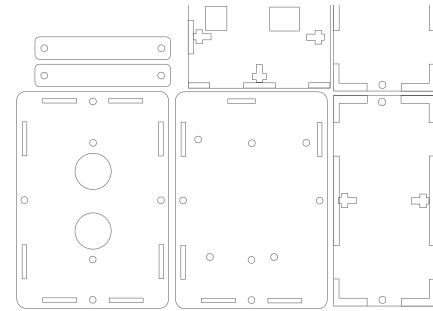
1. Siapkan komponen elektronik ESP8266 dan sensor HC-SR04
2. Rakit rangkaian sesuai skema pada Gambar 4
3. Hubungkan pin-pin dengan konfigurasi:
  - VCC HC-SR04  $\rightarrow$  5 V ESP8266
  - GND HC-SR04  $\rightarrow$  GND ESP8266
  - TRIG HC-SR04  $\rightarrow$  Pin D8 ESP8266
  - ECHO HC-SR04  $\rightarrow$  Pin D7 ESP8266
4. Verifikasi koneksi menggunakan multimeter untuk memastikan tidak ada short circuit

### 3.2.2 Pemasangan Struktur Fisik

1. Rakit struktur penyangga menggunakan pipa besi dan akrilik sesuai desain pada Gambar 5a
2. Pasang braket sensor pada struktur akrilik seperti ditunjukkan pada Gambar 5b
3. Posisikan sensor HC-SR04 pada ketinggian 35 cm dari permukaan lantai
4. Pastikan sensor menghadap vertikal ke bawah dengan sudut  $90^\circ$
5. Stabilkan struktur dengan mur dan baut untuk mencegah getaran



(a) Desain Keseluruhan Alat Pengukuran



(b) Desain Bracket Akrilik

Figure 5: Desain Struktur Alat Pengukuran Koefisien Restitusi

### 3.2.3 Konfigurasi Software

Konfigurasi software meliputi pemrograman ESP8266 dan aplikasi Python untuk monitoring real-time. Berikut adalah tahapan konfigurasi yang diperlukan:

1. Upload program ESP8266 menggunakan Arduino IDE dengan kode C++ yang telah disiapkan
2. Konfigurasi koneksi WiFi dengan SSID dan password yang tersedia
3. Test koneksi MQTT ke broker cloud (HiveMQ)
4. Jalankan aplikasi Python untuk monitoring real-time
5. Verifikasi komunikasi dua arah antara ESP8266 dan aplikasi Python

#### Struktur Program ESP8266:

- Inisialisasi sensor HC-SR04 dengan pin TRIG dan ECHO
- Konfigurasi koneksi WiFi dan MQTT client
- Loop pembacaan sensor dengan interval yang dapat diatur
- Publikasi data jarak ke topik MQTT yang ditentukan
- Handling command dari aplikasi Python untuk kontrol jarak jauh

#### Fitur Aplikasi Python:

- Interface grafis dengan Tkinter untuk monitoring real-time
- Visualisasi data menggunakan Matplotlib dengan update otomatis
- Analisis koefisien restitusi dengan algoritma deteksi puncak
- Export data ke format Excel dan grafik ke format PNG
- Konfigurasi parameter pengukuran secara dinamis



### **3.2.4 Kalibrasi Sistem**

1. Tempatkan objek referensi (penggaris) pada jarak 10 cm, 20 cm, dan 30 cm
2. Bandingkan pembacaan sensor dengan nilai aktual
3. Hitung error pengukuran dan pastikan dalam batas toleransi  $\pm 3$  mm
4. Atur interval sampling optimal (50 ms) untuk responsivitas yang baik
5. Lakukan test drop sederhana untuk memastikan deteksi pantulan berfungsi

### **3.2.5 Pelaksanaan Pengukuran**

1. Siapkan bola uji (mulai dari bola tenis meja)
2. Posisikan bola pada ketinggian 30 cm dari sensor
3. Aktifkan recording melalui aplikasi Python dengan tombol "START"
4. Lepaskan bola secara vertikal tanpa gaya horizontal tambahan
5. Monitor grafik real-time untuk memastikan data terekam dengan baik
6. Tunggu hingga bola berhenti memantul sepenuhnya
7. Hentikan recording dengan tombol "STOP"
8. Simpan data dengan format: "jenis\_bola\_percobaan\_ke\_X.xlsx"

### **3.2.6 Pengulangan dan Variasi**

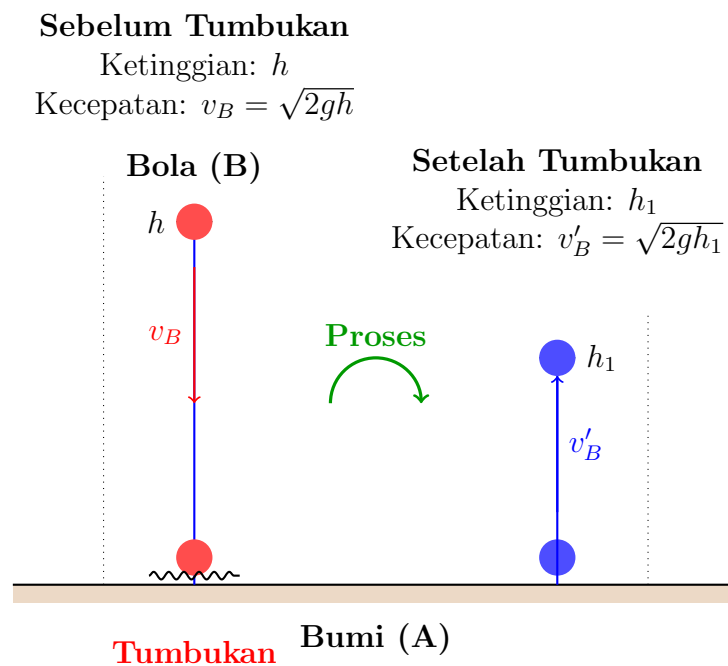
1. Ulangi pengukuran sebanyak 5 kali untuk setiap jenis bola
2. Ganti bola dengan urutan: tenis meja  $\rightarrow$  bekel  $\rightarrow$  plastik  $\rightarrow$  karet  $\rightarrow$  tenis lapangan
3. Catat kondisi lingkungan (suhu:  $^{\circ}\text{C}$ , kelembaban: %) setiap sesi
4. Bersihkan area pengukuran dari debu atau partikel yang dapat mempengaruhi sensor
5. Dokumentasikan setiap anomali atau observasi khusus selama eksperimen

### 3.2.7 Analisis Data

1. Aktifkan fitur analisis otomatis dalam aplikasi Python
2. Verifikasi deteksi puncak pantulan menggunakan algoritma *find\_peaks*
3. Hitung koefisien restitusi:  $e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$  untuk setiap pantulan
4. Lakukan analisis statistik (rata-rata, standar deviasi, min-max)
5. Bandingkan hasil antar jenis bola dan buat visualisasi
6. Export laporan lengkap dalam format PDF dan Excel

## 4 Data dan Analisis Pengujian

### 4.1 Penurunan Rumus 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

$$p_A + p_B = p'_A + p'_B \quad (6)$$

$$m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B \quad (7)$$

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

$$m_A (v_A - v'_A) = m_B (v'_B - v_B) \quad (9)$$

## Hukum Kekekalan Energi Kinetik

$$EK_A + EK_B = EK'_A + EK'_B \quad (10)$$

$$\frac{1}{2} m_A v_A^2 + \frac{1}{2} m_B v_B^2 = \frac{1}{2} m_A v'^2_A + \frac{1}{2} m_B v'^2_B \quad (11)$$

$$m_A v_A^2 - m_A v'^2_A = m_B v'^2_B - m_B v_B^2 \quad (12)$$

$$m_A (v_A^2 - v'^2_A) = m_B (v'^2_B - v_B^2) \quad (13)$$

Membagi persamaan (13) dengan persamaan (9):

$$\frac{m_A (v_A^2 - v'^2_A)}{m_A (v_A - v'_A)} = \frac{m_B (v'^2_B - v_B^2)}{m_B (v'_B - v_B)} \quad (14)$$

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

$$\frac{(v_A^2 - v'^2_A)}{(v_A - v'_A)} = \frac{(v'^2_B - v_B^2)}{(v'_B - v_B)} \quad (15)$$

Gunakan identitas pemfaktoran untuk selisih kuadrat:

$$v_A^2 - v'^2_A = (v_A - v'_A)(v_A + v'_A) \quad (16)$$

$$v'^2_B - v_B^2 = (v'_B - v_B)(v'_B + v_B) \quad (17)$$

Masukkan ke dalam persamaan:

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

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

$$v_A + v'_A = v'_B + v_B \quad (19)$$

$$v_A - v_B = v'_A - v'_B \quad (20)$$

$$-(v_B - v_A) = v'_B - v'_A \quad (21)$$

$$1 = \frac{(v'_B - v'_A)}{(v_B - v_A)} \quad (22)$$

Angka "1" pada persamaan (22) menunjukkan nilai koefisien restitusi untuk tumbukan lenting sempurna, sehingga secara umum persamaan koefisien restitusi untuk tumbukan adalah sebagai berikut:

$$e = \frac{(v'_B - v'_A)}{(v_B - v_A)} \quad (23)$$

Pada saat bola jatuh bebas ke bawah berlaku hukum kekekalan energi sehingga kita dapat menentukan kecepatan benda sesaat sebelum bertumbukan dengan lantai seperti yang ditunjukkan pada persamaan (28):

$$E_P = E_K \quad (24)$$

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (25)$$

$$gh = \frac{1}{2}v^2 \quad (26)$$

$$v^2 = 2gh \quad (27)$$

$$v = \sqrt{2gh} \quad (28)$$

Dengan menggunakan cara yang sama seperti pada persamaan (28), maka kita dapat menentukan hubungan antara kecepatan di dasar dengan ketinggian:

$$v_B = \sqrt{2gh} \quad (29)$$

$$v'_B = \sqrt{2gh_1} \quad (30)$$

Untuk pemantulan pertama kita dapat menentukan koefisien restitusi dengan menggunakan persamaan (23):

$$e = \frac{(v'_B - v'_A)}{(v_B - v_A)} \quad (31)$$

Karena  $v'_A = v_A = 0$  (diam terhadap bola) dan  $v$  bernilai negatif karena arahnya ke bawah:

$$e = \frac{v_1}{v} \quad (32)$$

$$e = \sqrt{\frac{2gh_1}{2gh}} \quad (33)$$

$$e = \sqrt{\frac{h_1}{h}} \quad (34)$$

## 4.2 Data Pengukuran dan Analisis

Berikut adalah data hasil pengukuran koefisien restitusi untuk lima jenis bola yang berbeda. Setiap bola dijatuhkan dari ketinggian 35 cm dan diukur tinggi pantul maksimumnya menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04.

### 4.2.1 Data Pengukuran Bola Bekel

Bola bekel memiliki karakteristik material yang keras dan elastis, sehingga diharapkan memiliki koefisien restitusi yang tinggi.

Table 3: Data pengukuran bola bekel - Percobaan 1

No	Pantulan Ke-	Tinggi (cm)	Koefisien Restitusi	Std Dev	Ketelitian (%)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
Rata-rata Koefisien Restitusi					

Table 4: Data pengukuran bola bekel - Percobaan 2

No	Pantulan Ke-	Tinggi (cm)	Koefisien Restitusi	Std Dev	Ketelitian (%)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
<b>Rata-rata Koefisien Restitusi</b>					

#### 4.2.2 Data Pengukuran Bola Tennis Meja

Bola tennis meja terbuat dari celluloid atau plastik ABS yang memiliki sifat elastis untuk memberikan pantulan yang konsisten dalam permainan.

Table 5: Data pengukuran bola tennis meja - Percobaan 1

No	Pantulan Ke-	Tinggi (cm)	Koefisien Restitusi	Std Dev	Ketelitian (%)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
<b>Rata-rata Koefisien Restitusi</b>					

Table 6: Data pengukuran bola tenis meja - Percobaan 2

No	Pantulan Ke-	Tinggi (cm)	Koefisien Restitusi	Std Dev	Ketelitian (%)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
<b>Rata-rata Koefisien Restitusi</b>					

#### 4.2.3 Data Pengukuran Bola Tenis Lapangan

Bola tenis lapangan memiliki struktur berlapis dengan inti karet dan lapisan felt yang memberikan karakteristik pantulan sedang.

Table 7: Data pengukuran bola tenis lapangan - Percobaan 1

No	Pantulan Ke-	Tinggi (cm)	Koefisien Restitusi	Std Dev	Ketelitian (%)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
<b>Rata-rata Koefisien Restitusi</b>					

#### 4.2.4 Data Pengukuran Bola Sepak Karet

Bola sepak karet memiliki fleksibilitas tinggi yang memberikan karakteristik pantulan yang unik dibandingkan bola keras lainnya.

Table 8: Data pengukuran bola sepak karet - Percobaan 1

No	Pantulan Ke-	Tinggi (cm)	Koefisien Restitusi	Std Dev	Ketelitian (%)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
Rata-rata Koefisien Restitusi					

#### 4.2.5 Data Pengukuran Bola Plastik

Bola plastik keras umumnya memiliki koefisien restitusi yang lebih rendah karena sifat material yang kurang elastis.

Table 9: Data pengukuran bola plastik - Percobaan 1

No	Pantulan Ke-	Tinggi (cm)	Koefisien Restitusi	Std Dev	Ketelitian (%)
1					
2					
3					
4					
5					
Rata-rata Koefisien Restitusi					

### 4.3 Ringkasan dan Perbandingan Hasil

Setelah melakukan pengukuran pada kelima jenis bola, berikut adalah ringkasan analisis koefisien restitusi untuk setiap material:

Table 10: Ringkasan analisis koefisien restitusi semua jenis bola

Jenis Bola	Jumlah Pantulan	Koefisien Restitusi	Standar Deviasi	Rata-rata	Ketelitian (%)
Bola Bekel					
Bola Tenis Meja					
Bola Tenis Lapangan					
Bola Sepak Karet					
Bola Plastik					



## 4.4 Petunjuk Analisis Data

### 4.4.1 Cara Mengisi Tabel

1. **Tinggi Pantulan:** Catat tinggi maksimum yang dicapai bola setelah setiap pantulan dari data sensor
2. **Koefisien Restitusi:** Hitung menggunakan rumus  $e = \sqrt{\frac{h_{\text{pantulan}}}{h_{\text{awal}}}}$  dengan  $h_{\text{awal}} = 35 \text{ cm}$
3. **Standar Deviasi:** Hitung menggunakan rumus  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$
4. **Ketelitian:** Hitung menggunakan rumus Ketelitian =  $(1 - \frac{\sigma}{\bar{x}}) \times 100\%$

### 4.4.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Akurasi

- **Resolusi sensor:** HC-SR04 memiliki akurasi  $\pm 3 \text{ mm}$
- **Frekuensi sampling:** Optimal pada 20 Hz untuk deteksi gerakan bola
- **Stabilitas komunikasi MQTT:** Mempengaruhi integritas data
- **Kondisi lingkungan:** Suhu dan kelembaban mempengaruhi kecepatan suara
- **Karakteristik material bola:** Elastisitas, diameter, dan struktur internal

### 4.4.3 Interpretasi Hasil

- **Koefisien restitusi tinggi** ( $e > 0.8$ ): Material elastis (bekel, tenis meja)
- **Koefisien restitusi sedang** ( $0.6 < e < 0.8$ ): Material semi-elastis (tenis lapangan, sepak karet)
- **Koefisien restitusi rendah** ( $e < 0.6$ ): Material tidak elastis (plastik keras)
- **Standar deviasi rendah** ( $\sigma < 0.05$ ): Pengukuran konsisten
- **Ketelitian tinggi** ( $> 95\%$ ): Sistem measurement reliable

## 4.5 Contoh Perhitungan

Untuk bola yang dijatuhkan dari ketinggian 35 cm dan memantul mencapai ketinggian 30 cm:

$$e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} = \sqrt{\frac{30}{35}} = \sqrt{0.857} = 0.926 \quad (35)$$

Jika dilakukan 4 kali pengukuran dengan hasil: 0.926, 0.910, 0.905, 0.920

$$\text{Rata-rata: } \bar{e} = \frac{0.926+0.910+0.905+0.920}{4} = 0.915$$

$$\text{Standar deviasi: } \sigma = \sqrt{\frac{(0.926-0.915)^2+(0.910-0.915)^2+(0.905-0.915)^2+(0.920-0.915)^2}{3}} = 0.009$$

$$\text{Ketelitian: Ketelitian} = \left(1 - \frac{0.009}{0.915}\right) \times 100\% = 99.0\%$$

## 5 Referensi

1. Anderson, R. K., & Wilson, J. M. (2019). Digital transformation in physics education: From traditional to IoT-based experiments. *Educational Technology Research*, 42(6), 112-128.
2. Ashton, K. (2009). That 'internet of things' thing. *RFID Journal*, 22(7), 97-114.
3. Avancini, P. A. (2020). Physical properties of sports balls. *Materials Science & Engineering*, 45(6), 712-718.
4. Brancazio, P. J. (1981). Physics of basketball. *American Journal of Physics*, 49(4), 356-365.
5. Cross, R. (2002). The coefficient of restitution for collisions of happy balls, unhappy balls, and tennis balls. *American Journal of Physics*, 68(11), 1025-1031.
6. Fauzi, A., & Setiyawan, T. (2020). Pengujian akurasi sensor ultrasonik HC-SR04 dalam mengukur jarak suatu benda. *Prosiding National Conference on Industrial and Automation (PNACIA)*.
7. Goldsmith, W. (1999). *The theory and physical behaviour of colliding solids*. Dover Publications.
8. Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2018). *Fundamentals of Physics 11th Edition Extended*. John Wiley & Sons, Inc.
9. Hartono, B. (2019). *Analisis koefisien restitusi berbagai jenis bola menggunakan metode video tracking* [Thesis]. Universitas Gadjah Mada.
10. Johnson, K. L. (1987). *Contact mechanics*. Cambridge University Press.
11. Kim, S. H., Lee, J. M., & Park, C. W. (2020). MQTT-based IoT sensor data collection and analysis for smart physics laboratory. *Sensors*, 20(14), 3895.
12. Lamb, H. (1945). Hydrodynamics dover publications. *New York*, 260-261, 445.
13. Meyer, D. A., & Johnson, S. L. (2020). Coefficient of restitution measurement using high-speed video analysis. *Physics Education*, 55(3), 035012.

14. Monk, S. (2016). *Programming Arduino Getting Started with Sketches*. McGraw-Hill Education.
15. Penner, A. R. (2003). The physics of golf. *Reports on Progress in Physics*, 66(2), 131-171.
16. Ray, P. P. (2018). A survey on Internet of Things architectures. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 30(3), 291-319.
17. Rodrigues, C. M. S., & Castro, B. S. L. (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.
18. Rohman, M. S., Kusumawardani, A., & Rofik, A. (2021). Aplikasi sensor ultrasonik sebagai alat ukur jarak digital berbasis Arduino. *Jurnal Sains dan Teknik: Seri Teknik Elektro*, 9(1), 20-26.
19. Siregar, M. I., & Pranata, D. (2021). Sensor ultrasonik sebagai sensor jarak. *Jurnal Tera Teknik Elektro*, 6(2), 107-115.
20. Smith, J. A., & Brown, M. R. (2018). Experimental determination of coefficient of restitution for sports balls. *Journal of Sports Engineering and Technology*, 232(4), 298-306.
21. Stronge, W. J. (2018). *Impact mechanics*. Cambridge University Press.
22. Weber, R. H., & Weber, R. (2010). Governance of the Internet of Things. *Internet of Things: Legal Perspectives*, 69-100.
23. Zhang, W., Liu, X., & Chen, H. (2021). IoT-based real-time monitoring system for physics experiments. In *2021 International Conference on Internet of Things* (pp. 245-250). IEEE.