

Analisis Parameter Dinamika Fenomena *Bouncing ball* Berbasis Aplikasi Phyphox

Jesi Pebralia^{1*}

¹ Program Studi Fisika, Universitas Jambi, Indonesia

ARTICLE INFO

Riwayat Artikel:

Draft diterima: 4 April 2022

Revisi diterima: 21 April 2022

Diterima: 21 April 2022

Tersedia Online: 25 April 2022

Corresponding author: jesipebralia@gmail.com

ABSTRAK

Peristiwa bola yang memantul dapat digunakan sebagai model untuk mendeskripsikan banyak sekali aspek yang ada dalam mekanika. Pada penelitian ini dirancang fenomena *bouncing ball* dimana bola dijatuhkan dari ketinggian tertentu tanpa kecepatan awal dan menumbuk permukaan lantai yang keras. Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimen menggunakan *smartphone* yang terintegrasi dengan aplikasi Phyphox sebagai alat bantu untuk menentukan parameter-parameter yang ada pada fenomena *bouncing ball*. Adapun parameter yang dianalisis pada penelitian ini yaitu berupa kebergantungan energi, ketinggian, dan waktu. Hasil dari penelitian ini menunjukkan secara umum nilai error rata-rata antara perhitungan ketinggian awal kelereng yang terukur oleh Phyphox dibandingkan dengan nilai standar yaitu sebesar 3,92%. Ketinggian pantulan *bouncing ball* mengalami penurunan secara eksponensial terhadap jumlah pantulan yang terjadi dengan nilai R^2 untuk kelereng dengan diameter 14,1 mm, 15,2 mm, dan 27,4 mm berturut-turut yaitu sebesar 0,9914, 0,9897, dan 0,9949. Energi *bouncing ball* juga mengalami penurunan secara eksponensial terhadap jumlah pantulan yang terjadi dengan nilai R^2 persamaan eksponensial untuk kelereng dengan diameter 14,1 mm, 15,2 mm, dan 27,4 mm berturut-turut yaitu sebesar 0,9866, 0,9923, dan 0,9926. Terdapat hubungan yang menarik antara kebergantungan perubahan energi terhadap waktu dan kebergantungan perubahan ketinggian pantulan *bouncing ball* terhadap waktu yaitu keduanya mengalami penurunan secara eksponensial dengan nilai R^2 yang identik untuk masing-masing diameter kelereng. Nilai R^2 tersebut yaitu berada dalam rentang 0,97 – 1. Selain itu, pada penelitian ini juga disimpulkan bahwa massa dan diameter kelereng tidak berpengaruh terhadap trayektori dari ketinggian pantulan, perubahan energi, maupun interval waktu pantulan pada *bouncing ball*.

Kata kunci: *bouncing ball*, energi, ketinggian, phyphox, *smartphone*

ABSTRACT

The *bouncing ball* can be used as a model to describe various aspects of mechanics. In this study, the ball was dropped from a certain height without initial velocity and hit a hard floor surface. This study uses a *smartphone* which integrated to the Phyphox application as a tool to determine the parameters that exist in the *bouncing ball* phenomenon. The parameters analyzed in this study are in the form of dependence on energy, height and time. The results of this study indicate that in general the average error value between the calculation of the initial height of the marbles measured by Phyphox compared to the standard value is 3.92%. The bounce height decreased exponentially with respect to the number of bounces that occurred with R^2 values for marbles with diameters of 14.1 mm, 15.2 mm, and 27.4 mm, respectively are 0.9914,

0.9897, and 0.9949. The energy of the ball's bounce also decreases exponentially with respect to the number of bounces that occur with the value of the exponential equation for marbles with diameters of 14.1 mm, 15.2 mm, and 27.4 mm, respectively are 0.9866, 0.9923, and 0.9926. There is an interesting relationship between the dependence of the change in energy on time and the dependence of the change in height on time, which is they have exponential decrease with the identical number of R^2 values for each marble diameter. In this case, the value of R^2 is in the range of 0.97 – 1. In addition, this study also concluded that the mass and diameter of the marbles did not significantly affect to the trajectory of the bounce height, energy changes, and the time interval of the bounce.

Keywords: bouncing ball, energy, height, phyphox, smartphone

1. PENDAHULUAN

Peristiwa bola yang memantul dapat digunakan sebagai model untuk mendeskripsikan banyak sekali aspek yang ada dalam mekanika. Selain itu, percobaan menggunakan bola yang dipantulkan merupakan eksperimen yang mudah dan murah untuk dilakukan di rumah, sehingga dapat membantu mahasiswa dalam membuktikan teori-teori fisika yang berlaku pada peristiwa pantulan bola. Sebagai contoh melalui percobaan sebuah bola yang dijatuhkan secara vertikal tegak lurus dengan permukaan lantai dari ketinggian tertentu dapat dianalisis berbagai parameter mekanika diantaranya waktu tempuh bola jatuh, ketinggian, kecepatan bola setiap saat dan lain-lain. Modifikasi percobaan lainnya dapat dilakukan dengan menjatuhkan bola tidak dalam keadaan tegak lurus dengan permukaan lantai, yaitu bola dijatuhkan membentuk sudut tertentu sehingga dinamika bola yang jatuh akan lebih kompleks melibatkan parameter-parameter gerak translasi dan rotasi [1].

Beberapa parameter pada kasus *bouncing ball* yang dapat dianalisis antara lain nilai kecepatan sesaat sebelum menumbuk lantai (v_1), nilai kecepatan sesaat setelah menumbuk lantai (v_2), ketinggian bola (h), energi kinetik sesaat sebelum menumbuk lantai (Ek_1), energi kinetik sesaat setelah menumbuk lantai (Ek_2), secara matematis dinyatakan oleh persamaan berikut,

$$v_1 = \sqrt{2gh_1}, \quad (1)$$

$$v_2 = -\sqrt{2gh_2}, \quad (2)$$

$$h = \frac{1}{2}gt^2, \quad (3)$$

$$Ek_1 = \frac{1}{2}mv_1^2, \quad (4)$$

$$Ek_2 = \frac{1}{2}mv_2^2, \quad (5)$$

dengan g merupakan percepatan gravitasi bumi dan t merupakan waktu tempuh.

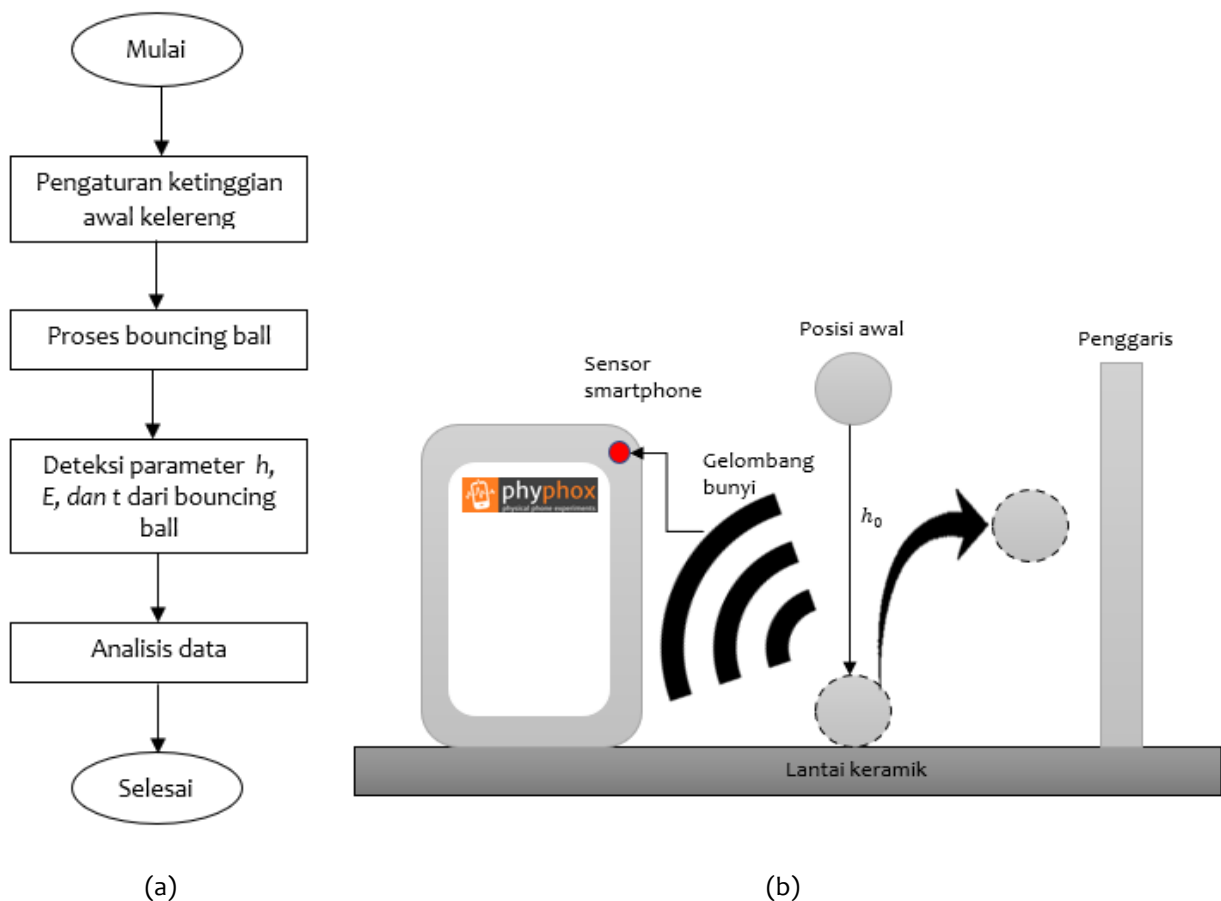
Analisis parameter-parameter pada peristiwa pantulan bola sangat bermanfaat untuk berbagai bidang diantaranya pada bidang olahraga bola basket [2], sinyal akustik yang dihasilkan dari pantulan sebuah objek dapat digunakan oleh pemain bola tenis, ping-pong, dan bola basket untuk memprediksi sifat dari objek tersebut [3], penggunaan *bouncing ball* untuk memprediksi dinamika dari material granular [4], dan sebagai pemodelan untuk memprediksi dinamika objek lainnya [5]–[9].

Penelitian untuk menganalisis dinamika dari *bouncing ball* telah banyak dilakukan, diantaranya eksperimen *bouncing ball* untuk menentukan kecepatan rotasi bola basket menggunakan metode *micro inertial measurement unit* [10], analisis parameter dinamika *bouncing ball* menggunakan mikroskop electron dan velocimetry [11], analisis dinamika *bouncing ball* menggunakan sensor induktif non-kontak [12], dan dinamika *bouncing ball* menggunakan pemodelan pegas [13]–[15].

Secara umum, berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan tersebut, teknik untuk menentukan parameter-parameter dinamika *bouncing ball* tergolong mahal, kompleks, dan sulit untuk dilakukan. Pada penelitian ini, digunakan teknik penentuan parameter dinamika *bouncing ball* yang murah dan praktis dengan menggunakan *smartphone*. Secara umum, dengan kemajuan teknologi yang sangat cepat pada saat ini, *smartphone* yang beredar telah dilengkapi dengan sensor-sensor canggih yang dapat mendukung pelaksanaan praktikum sains khususnya fisika. Hal tersebut juga didukung dengan adanya aplikasi-aplikasi pendukung eksperimen yang dapat diunduh dan dijalankan secara gratis pada *smartphone*. Salah satu aplikasi yang dapat digunakan untuk eksperimen fisika yaitu aplikasi Phyphox. Beberapa penelitian yang menggunakan aplikasi Phyphox diantaranya yaitu penelitian penentuan konstanta pegas pada peristiwa osilasi pegas [16], eksperimen gerak jatuh bebas menggunakan fitur akustik *stopwatch* [17], eksperimen gerak pendulum [18], dan penentuan momen inersia serta gaya gesek [19][20].

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis parameter dinamika yang terjadi pada proses *bouncing ball*. Parameter dinamika yang dianalisis yaitu ketinggian pantulan *bouncing ball*, energi, dan interval waktu pantulan. Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimen. Eksperimen *bouncing ball* dilakukan pada bola kelereng dengan diameter dan massa yang berbeda-beda untuk mendapatkan nilai dari parameter dinamika sebagaimana tujuan awal dari penelitian ini. Adapun diagram alir penelitian dan desain eksperimen ditampilkan pada gambar di bawah ini,



Gambar 1. (a) Diagram alir penelitian, (b) desain eksperimen *bouncing ball*

Ketinggian awal kelereng diatur sebesar 15 cm dari permukaan lantai. Pengaturan ketinggian kelereng dilakukan secara manual menggunakan penggaris. Peneliti mendesain eksperimen dengan cara menjatuhkan bola kelereng ke lantai secara tegak lurus pada ketinggian 15 cm, dan membiarkan bola kelereng memantul membentuk *bouncing ball*. Selama proses *bouncing ball* berlangsung, *smartphone* akan mendeteksi bunyi pantulan kelereng hanya sampai pada pantulan kelima. Untuk pantulan

keenam dan seterusnya sampai kelereng berhenti memantul akan diabaikan. Hasil dari deteksi bunyi pantulan *bouncing ball* ditampilkan pada layar *smartphone* berupa variasi ketinggian kelereng dari ketinggian awal (h_0) sampai ketinggian pada pantulan kelima (h_5), interval waktu antara pantulan ke-1 sampai pantulan ke-5, dan perubahan energi *bouncing ball*. Alat yang digunakan yaitu sebuah *smartphone* yang dilengkapi dengan aplikasi Phyphox, penggaris, dan laptop. Objek yang digunakan pada penelitian ini yaitu tiga buah kelereng dengan massa dan diameter berbeda-beda. Eksperimen *bouncing ball* dibagi menjadi tiga tahapan yaitu tahap I merupakan eksperimen *bouncing ball* menggunakan kelereng berdiameter 14,1 mm, tahap II merupakan eksperimen *bouncing ball* menggunakan kelereng berdiameter 15,2 mm, dan tahap III merupakan eksperimen *bouncing ball* menggunakan kelereng berdiameter 27,4 mm.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan tiga tahapan eksperimen dimana masing-masing eksperimen dilakukan sebanyak lima kali perulangan. Pada eksperimen tahap I digunakan bola kelereng berukuran kecil, kemudian dilakukan pengukuran diameter menggunakan jangka sorong digital dan diperoleh hasil diameter sebesar 14,1 mm. Pada eksperimen tahap II digunakan bola kelereng berukuran sedang dengan diameter 15,2 mm dan pada eksperimen tahap III digunakan bola kelereng berukuran besar dengan diameter 27,4 mm. Nilai ketinggian pantulan bola dan interval waktu pantulan *bouncing ball* ditampilkan pada tabel berikut ini,

Tabel 1. Variasi ketinggian terhadap waktu pada eksperimen tahap I

| No | h_0 (cm) | h_1 (cm) | h_2 (cm) | h_3 (cm) | h_4 (cm) | h_5 (cm) | t_0 (s) | t_1 (s) | t_2 (s) | t_3 (s) | t_4 (s) | t_5 (s) |
|----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 15,27 | 12,56 | 10,33 | 9,04 | 7,73 | 6,84 | 0 | 0,32 | 0,29 | 0,272 | 0,251 | 0,236 |
| 2 | 14,6 | 12,18 | 10,16 | 8,64 | 7,16 | 2,91 | 0 | 0,315 | 0,288 | 0,265 | 0,242 | 0,154 |
| 3 | 15,7 | 13,54 | 11,68 | 10,28 | 8,91 | 7,79 | 0 | 0,332 | 0,309 | 0,29 | 0,27 | 0,252 |
| 4 | 15,6 | 13,34 | 11,41 | 9,89 | 8,51 | 7,33 | 0 | 0,33 | 0,305 | 0,284 | 0,263 | 0,244 |
| 5 | 15,56 | 13,07 | 10,97 | 9,11 | 4,42 | 3,75 | 0 | 0,326 | 0,299 | 0,272 | 0,19 | 0,175 |

Tabel 2. Variasi ketinggian terhadap waktu pada eksperimen tahap II

| No | h_0 (cm) | h_1 (cm) | h_2 (cm) | h_3 (cm) | h_4 (cm) | h_5 (cm) | t_0 (s) | t_1 (s) | t_2 (s) | t_3 (s) | t_4 (s) | t_5 (s) |
|----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 14,25 | 12,33 | 10,66 | 8,55 | 7,14 | 6,16 | 0 | 0,317 | 0,295 | 0,264 | 0,241 | 0,224 |
| 2 | 14,1 | 11,81 | 9,89 | 6,52 | 4,33 | 3,44 | 0 | 0,31 | 0,284 | 0,231 | 0,188 | 0,167 |
| 3 | 15,73 | 11,84 | 8,92 | 5,51 | 3,73 | 2,66 | 0 | 0,311 | 0,27 | 0,212 | 0,174 | 0,147 |
| 4 | 14,99 | 12,39 | 10,24 | 8,34 | 6,7 | 5,52 | 0 | 0,318 | 0,289 | 0,261 | 0,234 | 0,212 |
| 5 | 14,71 | 12,34 | 10,35 | 8,56 | 5,92 | 3,93 | 0 | 0,317 | 0,29 | 0,264 | 0,22 | 0,179 |

Tabel 3. Variasi ketinggian terhadap waktu pada eksperimen tahap III

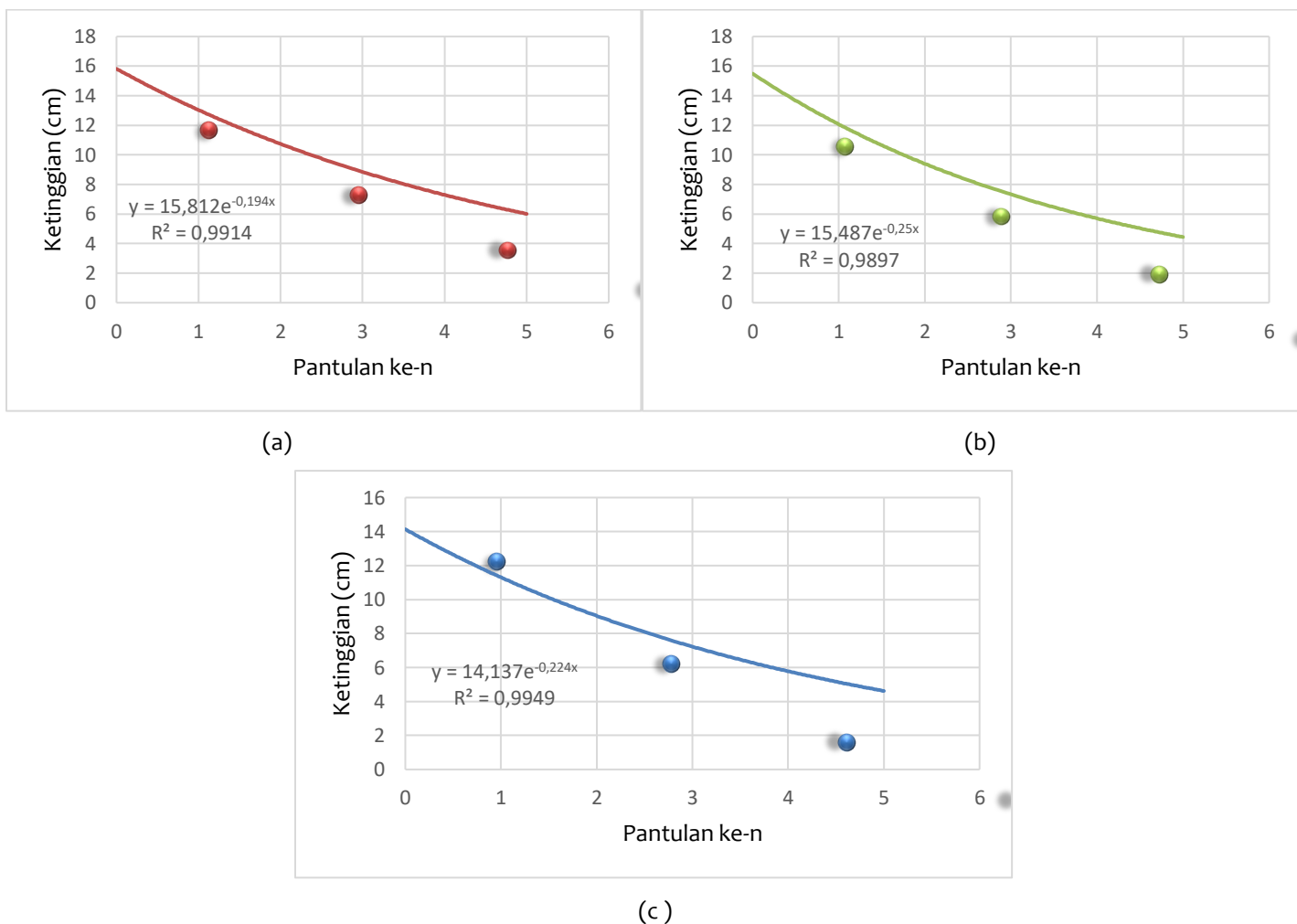
| No | h_0 (cm) | h_1 (cm) | h_2 (cm) | h_3 (cm) | h_4 (cm) | h_5 (cm) | t_0 (s) | t_1 (s) | t_2 (s) | t_3 (s) | t_4 (s) | t_5 (s) |
|----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 15,87 | 10,75 | 7,29 | 5,02 | 4,36 | 3,84 | 0 | 0,296 | 0,244 | 0,202 | 0,188 | 0,177 |
| 2 | 14,12 | 11,2 | 8,89 | 7,15 | 5,73 | 4,52 | 0 | 0,302 | 0,269 | 0,242 | 0,216 | 0,192 |
| 3 | 14,69 | 11,6 | 9,16 | 7,5 | 6,7 | 5,61 | 0 | 0,308 | 0,273 | 0,247 | 0,234 | 0,214 |
| 4 | 14,09 | 11,5 | 9,39 | 7,38 | 5,7 | 4,93 | 0 | 0,306 | 0,277 | 0,245 | 0,216 | 0,201 |
| 5 | 14,34 | 11,6 | 9,37 | 7,45 | 6,05 | 5,31 | 0 | 0,308 | 0,277 | 0,247 | 0,222 | 0,208 |

Table 1,2, dan 3 menampilkan data variasi ketinggian pantulan eksperimen *bouncing ball* dan interval waktu antar pantulan ke-n dan pantulan ke-n+1. Nilai h_0 yang ditampilkan pada tabel 1, 2, dan 3 merupakan nilai ketinggian awal kelereng sebelum dijatuhkan yang diukur oleh *smartphone* terintegrasi Phyphox. Pada saat dilakukan eksperimen, posisi ketinggian awal dari semua kelereng dibuat tetap sebesar 15 cm. Akan tetapi berdasarkan data yang ditampilkan pada tabel 1,2, dan 3 terdapat perbedaan nilai dari ketinggian awal yang terukur. Hal tersebut disebabkan karena adanya *error* yang terjadi pada saat pengukuran. Nilai ini diperoleh dari persamaan berikut,

$$error = \frac{\text{nilai standar}-\text{nilai terukur}}{\text{nilai standar}} \times 100\%, \tag{6}$$

pada penelitian ini nilai *error* rata-rata dari semua pengukuran yaitu sebesar 3,92%. *Error* yang terjadi dapat disebabkan oleh kondisi lantai yang tidak rata sempurna dimana terdapat pembatas antar keramik yang menyebabkan kelereng tidak dapat memantul secara vertical sempurna. Ukuran diameter kelereng yang relatif kecil menyebabkan kemungkinan terbentuknya sudut pada saat pemantulan menjadi besar sehingga hasil pengukuran Phythox mengalami penyimpangan. Akan tetapi nilai *error* ini masih relatif kecil sehingga data hasil pengukuran dapat digunakan untuk dilakukan analisis lebih lanjut.

Pada tabel 1 terdapat data yang cukup menarik pada eksperimen ke-2 dan ke-5. Pada eksperimen ke-2, nilai ketinggian kelereng pada pantulan ke-5 mengalami penurunan yang signifikan dibandingkan dengan ketinggian sebelumnya. Demikian juga pada eksperimen ke-5, terjadi penurunan ketinggian yang signifikan pada pantulan ke-4 dibanding dengan ketinggian sebelumnya. Hal ini disebabkan karena adanya gangguan faktor eksternal yang terjadi pada saat eksperimen berlangsung, seperti adanya suara lain yang ikut terekam pada saat melakukan percobaan, akan tetapi secara keseluruhan data yang dihasilkan sudah sangat baik sehingga data hasil eksperimen masih dapat diterima. Hal ini dapat dilihat berdasarkan nilai R^2 masing-masing eksperimen yang berada dalam rentang 0,98 sampai 1. Trayektori perubahan ketinggian rata-rata *bouncing ball* tiap pantulan ditampilkan pada gambar berikut,



Gambar 2. Grafik ketinggian rata-rata *bouncing ball* tiap pantulan (a) ketinggian rata-rata *bouncing ball* tiap pantulan pada eksperimen tahap I, (b) ketinggian rata-rata *bouncing ball* tiap pantulan pada eksperimen tahap II, (c) ketinggian rata-rata *bouncing ball* tiap pantulan pada eksperimen tahap III

Trayektori perubahan ketinggian pantulan *bouncing ball* tiap pantulan mengalami penurunan secara eksponensial dengan nilai R^2 yang sangat bagus. Untuk eksperimen tahap I, nilai R^2 grafik perubahan ketinggian terhadap jumlah pantulan yaitu sebesar 0,9914. Untuk eksperimen tahap II, nilai R^2 grafik perubahan ketinggian terhadap jumlah pantulan yaitu sebesar 0,9897, dan untuk eksperimen tahap I, nilai R^2 grafik perubahan ketinggian terhadap jumlah pantulan yaitu sebesar 0,9949. Selain parameter ketinggian, parameter lain yang dianalisis pada penelitian ini yaitu perubahan energi terhadap waktu, yang ditampilkan pada tabel di bawah ini,

Tabel 4. Variasi energi terhadap waktu pada eksperimen tahap I

| No | E_1 (J) | E_2 (J) | E_3 (J) | E_4 (J) | E_5 (J) | t_1 (s) | t_2 (s) | t_3 (s) | t_4 (s) | t_5 (s) |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 100 | 82,3 | 72 | 61,5 | 54,4 | 0,32 | 0,29 | 0,272 | 0,251 | 0,236 |
| 2 | 100 | 83,4 | 70,9 | 58,8 | 23,9 | 0,315 | 0,288 | 0,265 | 0,242 | 0,154 |
| 3 | 100 | 86,3 | 75,9 | 65,8 | 57,5 | 0,332 | 0,309 | 0,29 | 0,27 | 0,252 |
| 4 | 100 | 85,5 | 74,1 | 63,8 | 54,9 | 0,33 | 0,305 | 0,284 | 0,263 | 0,244 |
| 5 | 100 | 84 | 69,7 | 33,8 | 28,7 | 0,326 | 0,299 | 0,272 | 0,19 | 0,175 |

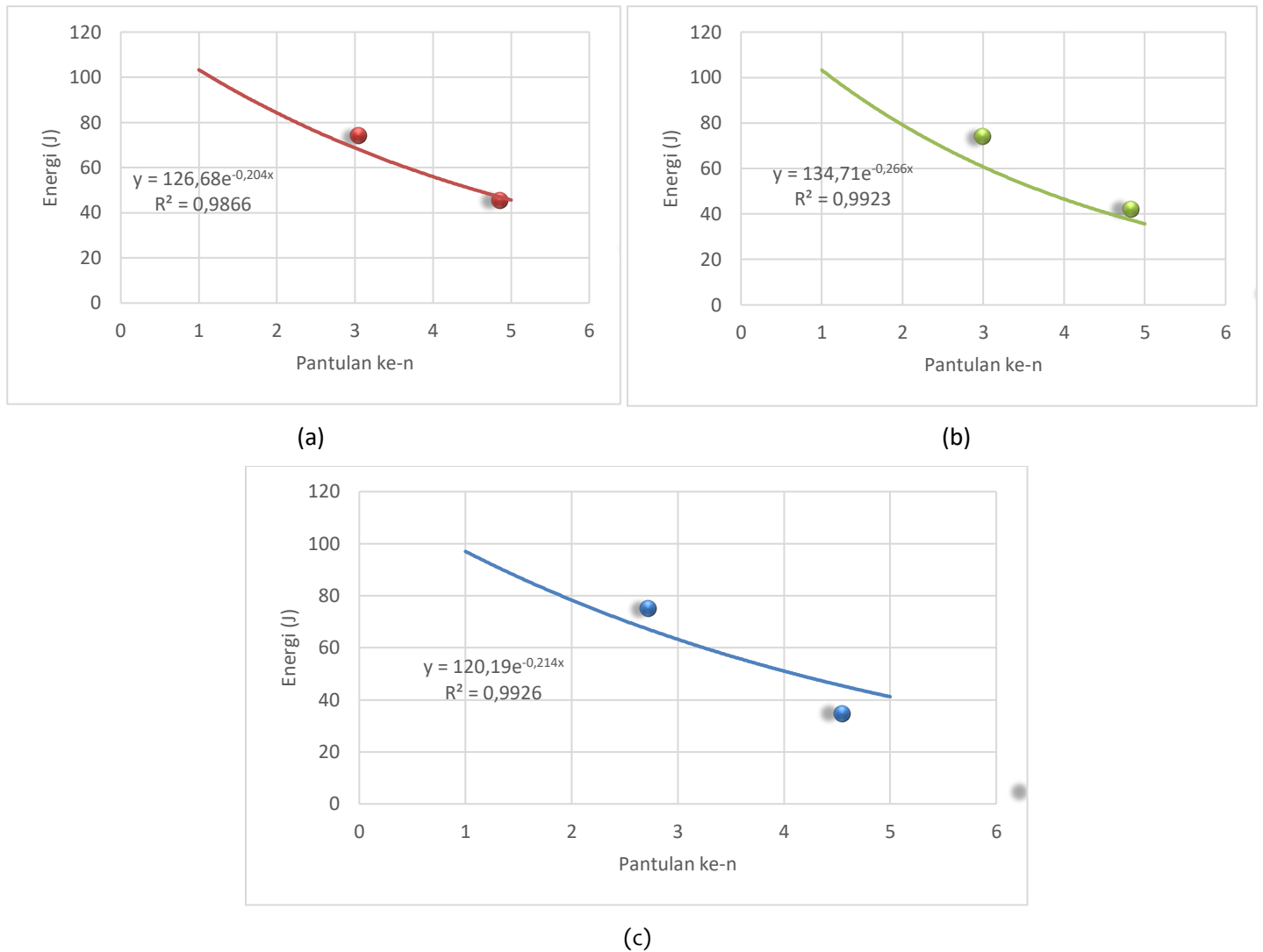
Tabel 5. Variasi energi terhadap waktu pada eksperimen tahap II

| No | E_1 (J) | E_2 (J) | E_3 (J) | E_4 (J) | E_5 (J) | t_1 (s) | t_2 (s) | t_3 (s) | t_4 (s) | t_5 (s) |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 100 | 86,5 | 69,4 | 57,9 | 50 | 0,317 | 0,295 | 0,264 | 0,241 | 0,224 |
| 2 | 100 | 83,8 | 55,2 | 36,7 | 29,1 | 0,31 | 0,284 | 0,231 | 0,188 | 0,167 |
| 3 | 100 | 75,3 | 46,5 | 31,5 | 22,4 | 0,311 | 0,27 | 0,212 | 0,174 | 0,147 |
| 4 | 100 | 82,7 | 67,3 | 54,1 | 44,6 | 0,318 | 0,289 | 0,261 | 0,234 | 0,212 |
| 5 | 100 | 83,9 | 69,4 | 48 | 31,9 | 0,317 | 0,29 | 0,264 | 0,22 | 0,179 |

Tabel 6. Variasi energi terhadap waktu pada eksperimen tahap III

| No | E_1 (J) | E_2 (J) | E_3 (J) | E_4 (J) | E_5 (J) | t_1 (s) | t_2 (s) | t_3 (s) | t_4 (s) | t_5 (s) |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 100 | 67,8 | 46,7 | 40,5 | 35,7 | 0,296 | 0,244 | 0,202 | 0,188 | 0,177 |
| 2 | 100 | 79,3 | 63,9 | 51,2 | 40,4 | 0,302 | 0,269 | 0,242 | 0,216 | 0,192 |
| 3 | 100 | 79 | 64,6 | 57,8 | 48,4 | 0,308 | 0,273 | 0,247 | 0,234 | 0,214 |
| 4 | 100 | 81,6 | 64,2 | 49,5 | 42,9 | 0,306 | 0,277 | 0,245 | 0,216 | 0,201 |
| 5 | 100 | 80,8 | 64,3 | 52,2 | 45,8 | 0,308 | 0,277 | 0,247 | 0,222 | 0,208 |

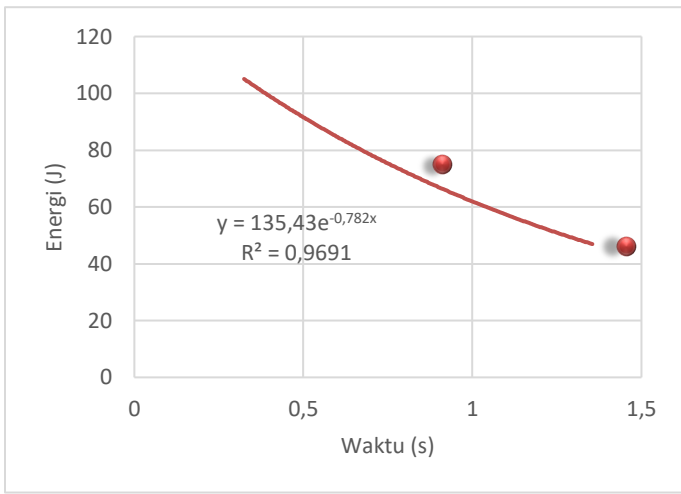
Tabel 4, 5, dan 6 memperlihatkan nilai perubahan energi *bouncing ball* selama proses pemantulan dan interval waktu yang terjadi antara pantulan ke-n sampai pantulan ke-n+1. Sebagaimana data yang ditampilkan pada tabel 1, pada data yang ditampilkan oleh tabel 4 juga terdapat data yang cukup menarik yaitu pada eksperimen ke-2 dan ke-5. Pada eksperimen ke-2, nilai perubahan energi kelereng pada pantulan ke-5 mengalami penurunan yang lebih besar dibandingkan dengan perubahan energi sebelumnya. Demikian juga pada eksperimen ke-5, terjadi penurunan energi yang lebih besar pada pantulan ke-4 dibanding dengan perubahan energi sebelumnya. Hal ini disebabkan karena adanya gangguan faktor eksternal yang terjadi pada saat eksperimen berlangsung. Akan tetapi secara keseluruhan data yang dihasilkan sudah sangat baik sehingga data hasil eksperimen masih dapat diterima. Hal ini dapat dilihat berdasarkan nilai R^2 dari grafik perubahan energi rata-rata tiap pantulan untuk masing-masing eksperimen yang berada dalam rentang 0,98 sampai 1. Trayektori perubahan energi rata-rata *bouncing ball* tiap pantulan ditampilkan pada gambar berikut,



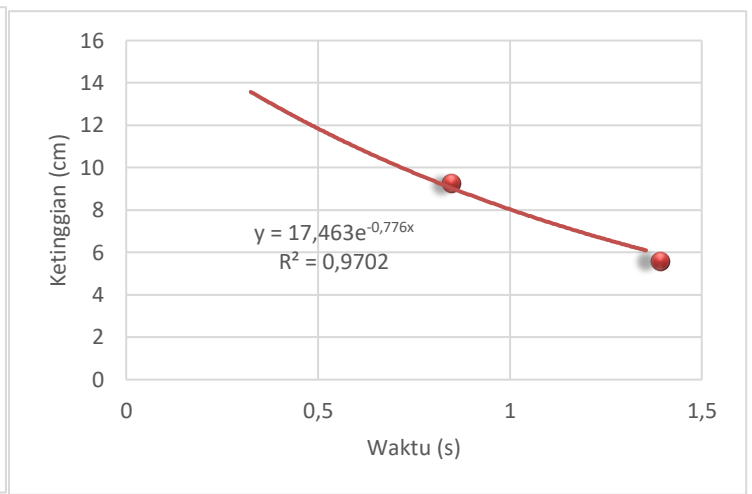
Gambar 3. Grafik perubahan energi *bouncing ball* tiap pantulan, (a) perubahan energi *bouncing ball* tiap pantulan pada eksperimen tahap I, (b) perubahan energi *bouncing ball* tiap pantulan pada eksperimen tahap II, (c) perubahan energi *bouncing ball* tiap pantulan pada eksperimen tahap III

Trayektori perubahan energi *bouncing ball* tiap pantulan mengalami penurunan secara eksponensial dengan nilai R^2 yang sangat bagus. Untuk eksperimen tahap I, nilai R^2 grafik perubahan energi terhadap jumlah pantulan yaitu sebesar 0,9866. Untuk eksperimen tahap II, nilai R^2 grafik perubahan energi terhadap jumlah pantulan yaitu sebesar 0,9923, dan Untuk eksperimen tahap I, nilai R^2 grafik perubahan energi terhadap jumlah pantulan yaitu sebesar 0,9926. Dengan demikian, berdasarkan data yang ditampilkan pada gambar 2 dan gambar 3 terdapat kecenderungan yang sama antara perubahan ketinggian bola terhadap jumlah pantulan dengan perubahan energi bola terhadap jumlah pantulan.

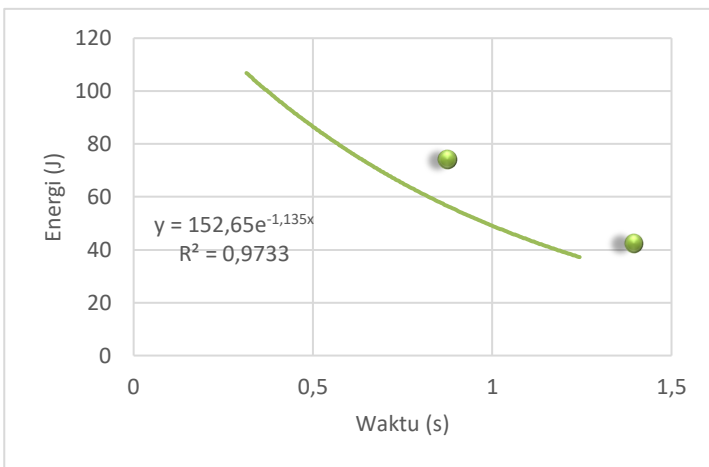
Selain memperlihatkan hubungan parameter energi dan ketinggian tiap pantulan, pada penelitian ini juga dianalisis hubungan antara perubahan energi dan ketinggian *bouncing ball* terhadap waktu. Trayektori perubahan energi dan ketinggian *bouncing ball* terhadap waktu ditampilkan pada gambar berikut,



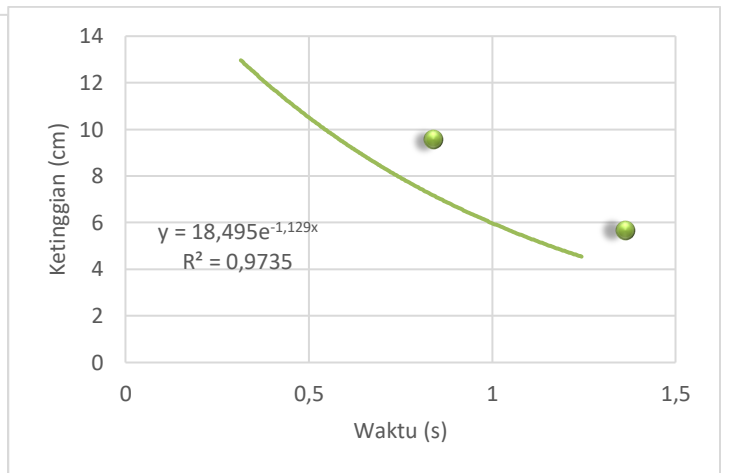
(a)



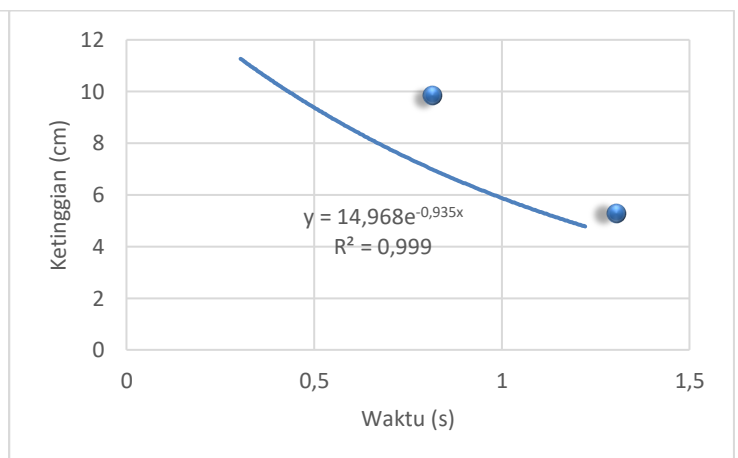
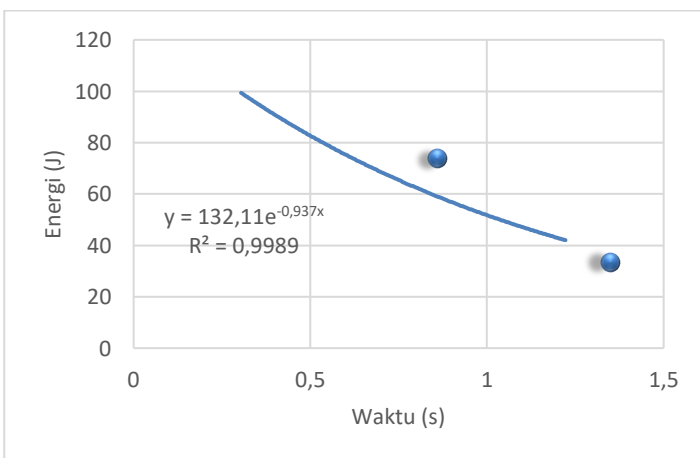
(b)



(c)



(d)



Gambar 4. Grafik perubahan energi dan perubahan ketinggian terhadap waktu, (a) perubahan energi terhadap waktu pada eksperimen tahap I, (b) perubahan ketinggian terhadap waktu pada eksperimen tahap I, (c) perubahan energi terhadap waktu pada eksperimen tahap II, (d) perubahan ketinggian terhadap waktu pada eksperimen tahap II, (e) perubahan energi terhadap waktu pada eksperimen tahap III, dan (f) perubahan ketinggian terhadap waktu pada eksperimen tahap III

Pada masing-masing eksperimen, grafik perubahan energi terhadap waktu dan grafik perubahan ketinggian terhadap waktu mengalami penurunan secara eksponensial. Berdasarkan gambar 4, besaran energi dan ketinggian pada peristiwa *bouncing ball* mempunyai trayektori yang identik. Hal ini ditunjukkan dengan nilai R^2 untuk grafik perubahan energi terhadap waktu dan grafik perubahan ketinggian terhadap waktu mempunyai nilai yang sama. Pada eksperimen tahap I, nilai R^2 untuk grafik perubahan energi terhadap waktu dan grafik perubahan ketinggian terhadap waktu yaitu sebesar 0,97. Pada eksperimen tahap II, nilai R^2 untuk grafik perubahan energi terhadap waktu dan grafik perubahan ketinggian terhadap waktu yaitu sebesar 0,97, dan pada eksperimen tahap III, nilai R^2 untuk grafik perubahan energi terhadap waktu dan grafik perubahan ketinggian terhadap waktu yaitu sebesar 0,99. Kecenderungan sifat trayektori yang identik tersebut mengindikasikan bahwa dengan mengetahui informasi perubahan energi *bouncing ball* maupun informasi perubahan ketinggian *bouncing ball* kita dapat menentukan kuantitas fisis yang muncul pada peristiwa tumbukan antara kelereng dengan lantai, yaitu koefisien restitusi. Secara teori nilai dari koefisien restitusi dapat diperoleh melalui persamaan berikut,

$$e = \sqrt{\frac{h_{n+1}}{h_n}}, \quad (7)$$

dimana h_n merupakan ketinggian kelereng pada pantulan ke-n, dan h_{n+1} merupakan ketinggian kelereng pada pantulan ke-n+1. Berdasarkan persamaan (7), nilai koefisien restitusi dapat diperoleh jika diketahui nilai dari perubahan ketinggian pantulan *bouncing ball*. Selain melalui persamaan (7), nilai dari koefisien restitusi secara teori juga dapat diperoleh melalui persamaan berikut,

$$e = \sqrt{\frac{E_{n+1}}{E_n}}, \quad (8)$$

dimana E_n merupakan perubahan energi kelereng pada pantulan ke-n, dan E_{n+1} merupakan perubahan energi kelereng pada pantulan ke-n+1. Berdasarkan persamaan (8), nilai koefisien restitusi dapat diperoleh jika diketahui nilai dari perubahan energi pada *bouncing ball*. Melalui persamaan (7) dan (8) dapat disimpulkan bahwa nilai koefisien restitusi dapat diperoleh melalui informasi perubahan ketinggian maupun melalui informasi perubahan energi pada *bouncing ball*. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan ketinggian dan energi *bouncing ball* mempunyai trayektori yang sama sebagaimana data hasil eksperimen yang ditampilkan pada gambar 4 sehingga dapat memberikan informasi yang sama mengenai nilai dari koefisien restitusi yang terjadi pada tumbukan kelereng dengan lantai. Selain dapat mengkonfirmasi kesamaan trayektori antara perubahan ketinggian dan energi *bouncing ball*, penelitian ini juga menunjukkan bahwa massa dan diameter kelereng tidak berpengaruh terhadap trayektori dari ketinggian pantulan, perubahan energi, maupun interval waktu pantulan pada *bouncing ball*.

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah berhasil diukur nilai dari parameter dinamika *bouncing ball* berupa variasi ketinggian pantulan, energi, dan interval waktu pantulan menggunakan *smartphone* yang terintegrasi dengan aplikasi Phyphox. Secara umum nilai *error* rata-rata antara perhitungan ketinggian awal kelereng yang terukur oleh Phyphox dibandingkan dengan nilai standar yaitu sebesar 3,92%. *Error* yang terjadi dapat disebabkan oleh kondisi lantai yang tidak rata sempurna dimana terdapat pembatas antar keramik yang menyebabkan kelereng tidak dapat memantul secara vertikal sempurna. Ukuran diameter kelereng yang relatif kecil menyebabkan kemungkinan terbentuknya sudut pada saat pemantulan menjadi besar sehingga hasil pengukuran Phyphox mengalami penyimpangan dari nilai standar. Namun demikian, nilai *error* ini relatif kecil sehingga data hasil pengukuran dapat digunakan.

Berdasarkan data eksperimen dari tiga jenis kelereng dengan diameter berbeda diperoleh hasil bahwa variasi ketinggian pantulan *bouncing ball* mengalami penurunan secara eksponensial terhadap jumlah pantulan yang terjadi. Berdasarkan analisis grafik dan persamaan eksponensial dari variasi ketinggian pantulan terhadap jumlah pantulan *bouncing ball* diperoleh nilai R^2 untuk kelereng dengan diameter 14,1 mm, 15,2 mm, dan 27,4 mm berturut-turut yaitu sebesar 0,9914, 0,9897, dan 0,9949.

Selain parameter variasi ketinggian terhadap jumlah pantulan, pada penelitian ini juga dilakukan analisis perubahan energi *bouncing ball* yang terjadi selama proses pemantulan. Berdasarkan analisis pada grafik energi *bouncing ball* terhadap jumlah pantulan, dapat disimpulkan bahwa energi *bouncing ball* juga mengalami penurunan secara eksponensial terhadap jumlah pantulan yang terjadi. Nilai R^2 persamaan eksponensial untuk kelereng dengan diameter 14,1 mm, 15,2 mm, dan 27,4 mm berturut-turut yaitu sebesar 0,9866, 0,9923, dan 0,9926.

Terdapat hubungan yang menarik antara kebergantungan perubahan energi terhadap waktu dan kebergantungan perubahan ketinggian pantulan *bouncing ball* terhadap waktu. Untuk ketiga jenis eksperimen yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa perubahan energi terhadap waktu mengalami penurunan secara eksponensial sebagaimana yang terjadi pada perubahan ketinggian pantulan terhadap waktu yang juga mengalami penurunan secara eksponensial dengan nilai R^2 yang identik untuk masing-masing diameter kelereng. Pada eksperimen tahap I nilai R^2 grafik energi terhadap waktu dan ketinggian terhadap waktu yaitu sebesar 0,97. Pada eksperimen tahap II nilai R^2 grafik energi terhadap waktu dan ketinggian terhadap waktu yaitu sebesar 0,97. Pada eksperimen tahap III nilai R^2 grafik energi terhadap waktu dan ketinggian terhadap waktu yaitu sebesar 0,99. Selain itu, pada penelitian ini juga disimpulkan bahwa massa dan diameter kelereng tidak berpengaruh terhadap trayektori dari ketinggian pantulan, perubahan energi, maupun interval waktu pantulan pada *bouncing ball*.

5. REFERENSI

- [1] R. Cross, "Behaviour of a *bouncing ball*," *Phys. Educ.*, vol. 50, no. 3, pp. 335–341, 2015, doi: 10.1088/0031-9120/50/3/335.
- [2] H. Okubo and M. Hubbard, "Dynamics of the basketball shot with application to the free throw," *J. Sports Sci.*, vol. 24, no. 12, pp. 1303–1314, 2006, doi: 10.1080/02640410500520401.
- [3] B. Gygi, B. L. Giordano, V. Shafiro, A. Kharkhurin, and P. X. Zhang, "Predicting the timing of dynamic events through sound: *Bouncing ball s*," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 138, no. 1, pp. 457–466, 2015, doi: 10.1121/1.4923020.
- [4] J. A. F. Balista and C. Saloma, "Modified inelastic *bouncing ball* model for describing the dynamics of granular materials in a vibrated container," *Phys. D Nonlinear Phenom.*, vol. 291, pp. 17–20, 2015, doi: 10.1016/j.physd.2014.10.003.
- [5] G. Avrin, I. A. Siegler, M. Makarov, and P. Rodriguez-Ayerbe, "The self-organization of ball bouncing," *Biol. Cybern.*, vol. 112, no. 6, pp. 509–522, 2018, doi: 10.1007/s00422-018-0776-8.
- [6] M. B. Chang, T. Ullman, A. Torralba, and J. B. Tenenbaum, "A compositional object-based approach to learning physical dynamics," *5th Int. Conf. Learn. Represent. ICLR 2017 - Conf. Track Proc.*, pp. 1–15, 2017.
- [7] M. Asenov, M. Burke, D. Angelov, T. Davchev, K. Subr, and S. Ramamoorthy, "Correction to 'vid2Param: Modelling of dynamics parameters from video,'" *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 5, no. 2, p. 2872, 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2973022.
- [8] S. Van Steenkiste, K. Greff, M. Chang, and J. Schmidhuber, "Relational neural expectation maximization: Unsupervised discovery of objects and their interactions," *6th Int. Conf. Learn. Represent. ICLR 2018 - Conf. Track Proc.*, pp. 1–15, 2018.
- [9] M. Fraccaro, S. Kamronn, U. Paquet, and O. Winther, "A disentangled recognition and nonlinear dynamics model for unsupervised learning," *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, vol. 2017-December, no. section 5, pp. 3602–3611, 2017.
- [10] M. Straeten, P. Rajai, and M. J. Ahamed, "Method and implementation of micro Inertial Measurement Unit (IMU) in sensing basketball dynamics," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 293, pp. 7–13, 2019, doi: 10.1016/j.sna.2019.03.042.
- [11] G. K. Kocur, Y. E. Harmanci, E. Chatzi, H. Steeb, and B. Markert, "Automated identification of the coefficient of restitution via *bouncing ball* measurement," *Arch. Appl. Mech.*, vol. 91, no. 1, pp. 47–60, 2021, doi: 10.1007/s00419-020-01751-x.
- [12] J.-Y. Chastaing, E. Bertin, and J.-C. Géminard, "Dynamics of a *bouncing ball*," *Am. J. Phys.*, vol. 83, no. 6, pp. 518–524, 2015, doi: 10.1119/1.4906418.
- [13] A. Wadhwa, "Study of the dynamic properties and effects of temperature using a spring model for the *bouncing ball*," *Eur. J. Phys.*, vol. 34, no. 3, pp. 703–713, 2013, doi: 10.1088/0143-0807/34/3/703.
- [14] L. Bencsik and A. Zelei, "Effects of human running cadence and experimental validation of the *bouncing ball* model," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 89, pp. 78–87, 2017, doi: 10.1016/j.ymsp.2016.08.001.

- [15] T. Du et al., "A self-powered and highly accurate vibration sensor based on bouncing-ball triboelectric nanogenerator for intelligent ship machinery monitoring," *Micromachines*, vol. 12, no. 2, pp. 1–14, 2021, doi: 10.3390/mi12020218.
- [16] H. A. Ewar, M. E. Bahagia, V. Jeluna, R. B. Astro, and A. Nasar, "Penentuan Konstanta Pegas Menggunakan Aplikasi Phyphox Pada Peristiwa Osilasi Pegas," *J. Kumparan Fis.*, vol. 4, no. 3, pp. 155–162, 2021, doi: 10.33369/jkf.4.3.155-162.
- [17] I. Boimau, A. Y. Boimau, and W. Liu, "EKSPERIMEN GERAK JATUH BEBAS BERBASIS SMARTPHONE MENGGUNAKAN APLIKASI PHYPHOX Infianto," in *Seminar Nasional Ilmu Fisika dan Terapannya*, 2021, pp. 67–75.
- [18] J. Pebralia and I. Amri, "EKSPERIMEN GERAK PENDULUM MENGGUNAKAN SMARTPHONE BERBASIS PHYPHOX: PENERAPAN PRAKTIKUM FISIKA DASAR SELAMA MASA COVID-19," *JIFP (Jurnal Ilmu Fis. dan Pembelajarannya)*, vol. 5, no. 2, pp. 10–14, 2021.
- [19] S. Yasaroh, H. Kuswanto, D. Ramadhanti, A. Azalia, and H. Hestiana, "Utilization of the phyphox application (physical phone experiment) to calculate the moment of inertia of hollow cylinders," *J. Ilm. Pendidik. Fis. Al-Biruni*, vol. 10, no. 2, pp. 231–240, 2021, doi: 10.24042/jipfalbiruni.v10i2.9237.
- [20] Y. F. Ilmi, A. B. Susila, and B. H. Iswanto, "Using accelerometer smartphone sensor and phyphyox for friction experiment in high school," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2019, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2019/1/012008.