



Penentuan Nilai Koefisien Restitusi Kelereng Kaca menggunakan Metode Pencitraan Jeda Waktu Sederhana

Mahendra Kusuma Nugraha^{1*}, Ernawatil Gani¹, Berton Maruli Siahaan¹, dan Afrioni Roma Rio¹

¹Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Sam Ratulangi

Email: mahendrakusuma@unsrat.ac.id

*Corresponding Author

Abstrak

Pencitraan jeda waktu (*time-lapse imaging*) telah dilakukan untuk mengamati fenomena fisis tumbukan lenting tidak sempurna antara kelereng kaca dengan permukaan lantai ubin. Kelereng kaca dijatuhkan pada ketinggian tertentu hingga menumbuk permukaan lantai dan mengalami pemantulan berulang. Kejadian tersebut direkam menggunakan kamera perangkat ponsel pintar Infinix[®] Hot S3 dengan kecepatan kerangka per detik adalah 30 kerangka. Analisis fotografi jeda waktu kemudian dilakukan dengan metode pemisahan kerangka (*frame splitting*) yang kemudian diamati secara visual untuk menentukan ketinggian setiap pantulan yang terjadi. Hasil analisis dan pengukuran tinggi maksimum untuk keadaan awal, keadaan pantulan pertama dan keadaan pantulan kedua masing-masing: 15,7 cm, 13,65 cm dan 11,45 cm. Angka koefisien restitusi kelereng kaca—berdasarkan data yang diperoleh—pada ketinggian maksimum mula-mula (H_0) menuju pantulan pertama (H_1) adalah sebesar $\pm 0,93242$ dan pantulan pertama (H_1) menuju pantulan kedua (H_2) adalah sebesar $\pm 0,91587$. Perolehan tersebut membuktikan bahwa interaksi yang terjadi adalah interaksi tumbukan lenting tak sempurna dikarenakan $e \neq 1$.

Kata kunci: koefisien restitusi, kelereng, *time-lapse imaging*, tinggi maksimum.

Abstract

Time-lapse imaging has been performed to observe the physical phenomena of imperfect elastic collisions between a glass marble and a tiled floor surface. The glass marble is dropped at a certain height until it hits the floor and experiences repeated rebounds. The event was recorded using the Infinix[®] Hot S3 smartphone device camera with a shutter speed of 30 frames per second. Analysis of time lapse photography is then carried out using the frame splitting method which is then observed visually to determine the height of each reflection that occurs. The results of the analysis and measurement of the maximum height for the initial state, the first bounce state and the second bounce state are respectively: 15.7 cm, 13.65 cm and 11.45 cm. The coefficient of restitution of glass marbles—based on the data obtained—at the initial maximum height (H_0) towards the first reflection (H_1) is ± 0.93242 and the first reflection (H_1) towards the second reflection (H_2) is equal to ± 0.91587 . These results prove that the interaction that occurs is an imperfect elastic collision interaction due to $e \neq 1$.

Keywords: marble, maximum height, restitution coefficient, *time-lapse imaging*.

1. PENDAHULUAN

Time-lapse imaging atau pencitraan jeda waktu adalah sebuah teknik analisis citra dengan melibatkan suatu rangkaian gambar yang diambil pada titik waktu tertentu dalam rentang waktu yang kontinyu dan berjangka lama (layaknya videografi).^[1, 2, 3] Informasi dan karakteristik yang terkandung dalam rangkaian citra jeda waktu tersebut nantinya dapat dianalisis secara komprehensif untuk memperoleh pemahaman mengenai kejadian atau peristiwa fisis yang sedang diteliti atau diamati, baik secara langsung ataupun menggunakan bantuan peralatan lainnya.^[1, 4]

Time-lapse imaging secara garis besar menyerupai *time-lapse photography*^[5, 6] dalam segi teknik akuisisi rangkaian gambar atau citra, perbedaannya terletak pada lama waktu eksposur (*exposure time*) yang digunakan. Pada *time-lapse imaging*, waktu eksposur tergolong sangat singkat dan cacah kerangka per detiknya (*frame per second*) pun cukup tinggi untuk mengakomodasi seluruh fenomena yang diamati ke dalam citra-citra yang dihasilkan.^[7, 8] Demikian, semakin besar cacah kerangka per detik akan berujung kepada perolehan citra-citra jeda waktu yang tajam.^[6, 7]

Pencitraan jeda waktu juga dapat dikombinasikan dengan teknik rekonstruksi citra lainnya seperti *Fourier transform*, *filtered backprojection*, dsb. untuk memudahkan kegiatan analisis dan memaksimalkan akuisisi informasi dan karakteristik terhadap fenomena fisis yang sedang diamati.

Teknologi dan metode pencitraan berbasis jeda waktu telah banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang riset dan eksperimen di antaranya mencakup bidang medis^[9, 10, 11], bidang alam^[12, 13, 14] dan geografi^[3, 15], dan bidang pendidikan^[16].

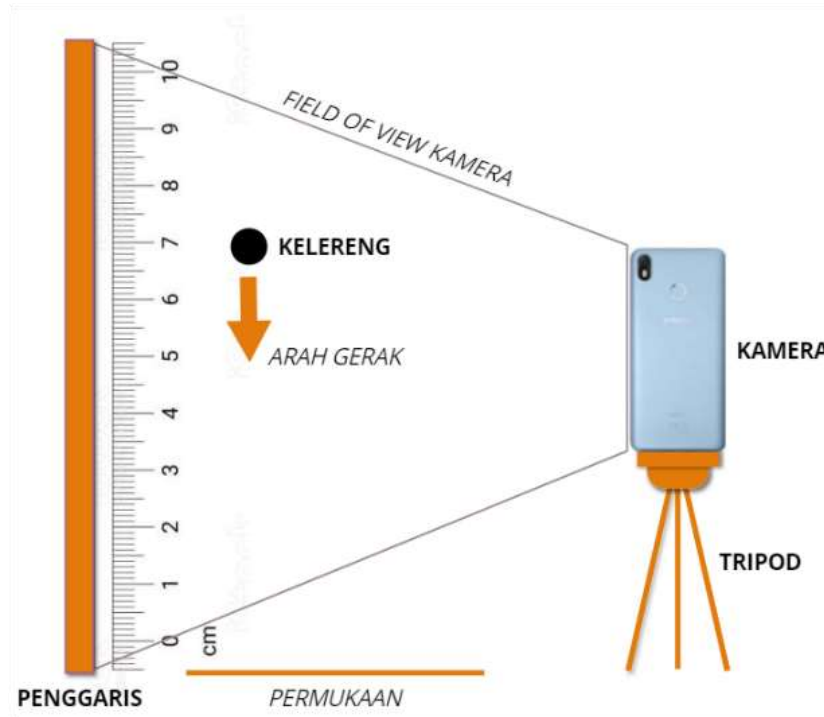
Pada eksperimen ini, akan ditinjau fenomena tumbukan lenting sebagian (*imperfect elastic collision*) dan hukum-hukum fisika yang berlaku yang melibatkan interaksi tumbukan dan pantulan antara sebuah kelereng kaca dengan permukaan lantai yang datar. Kegiatan analisis hasil penelitian mencakup pengambilan data eksperimen dan perhitungan secara analitik berdasarkan aspek – aspek fisis yang terlibat. Adapun keluaran eksperimen yang disajikan adalah angka koefisien restitusi dari kelereng kaca yang dimaksud.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian terbagi menjadi tiga tahap yakni persiapan alat dan bahan, penyusunan rangkaian eksperimen, metode analisis data dan pembahasan. Lokasi dan tempat pelaksanaan eksperimen berada di Laboratorium Terpadu, Unit Fisika, Universitas Sam Ratulangi.

Tahap persiapan alat dan bahan dilakukan dengan menyiapkan komponen-komponen yang diperlukan pada eksperimen ini yang mencakup: (i) kelereng kaca, (ii) penggaris atau mistar, (iii) penyangga, (iv) ponsel pintar Infinix[®] Hot S3 dan (v) laptop Asus[®] BR1100FKA 4/128 2C 1.1 Ghz sebagai media perangkat keras untuk keperluan pengoahan dan analisis data. Analisis data yang akan dilakukan juga memerlukan beberapa perangkat lunak komputer untuk membantu proses yang dimaksud, berupa: (i) aplikasi Wondershare Filmora9[®] dan (ii) aplikasi Video to JPG Converter[®] yang keduanya tersedia secara gratis

untuk Windows[®]. **Gambar 1.** di bawah ini menyajikan skema rangkaian eksperimen yang akan dilakukan.



Gambar 1. Desain skema eksperimen pencitraan jeda waktu sederhana menggunakan kamera ponsel pintar.

Tahap metode analisis data dimulai dengan perumusan prosedur eksperimen yang akan dilakukan melalui pertimbangan-pertimbangan yang diyakini mampu membawa pengaruh terhadap data pengukuran. Prosedur yang dimaksud terbagi menjadi beberapa langkah, antara lain: (i) pengaturan kemampuan citra dan resolusi kamera: 13 megapiksel (MP) dengan resolusi perekaman video sebesar 1080p atau 1920x1080, (ii) penentuan dan pengukuran tinggi mula-mula saat kelereng kaca akan dijatuhkan dengan menggunakan penggaris: pada eksperimen ini, tinggi mula-mula kelereng (H_0) adalah sekitar $15,7 \pm 0,05$ cm, (iii) pengaturan letak dan posisi kamera harus tegak lurus (*perpendicular*) dengan arah gerak tumbukan dari objek kelereng terhadap permukaan lantai, (iv) instalasi aplikasi perangkat lunak Wondershare Filmora9[®] dan aplikasi Video to JPG Converter[®] pada unit laptop yang telah disiapkan, (v) perekaman fenomena, pemisahan kerangka dan pengolahan data citra yang telah dipisahkan dan terakhir (vi) adalah pengamatan dan pengukuran tinggi maksimum kelereng (H) yang dicapai pada setiap pantulan (n) yang terjadi berdasarkan citra pantulan yang telah diperoleh.

Landasan teori yang harus dipahami sebelum melaksanakan eksperimen beberapa di antaranya adalah mengenai hukum kekekalan energi mekanik, fenomena tumbukan elastis/inelastis dan juga koefisien restitusi.

Koefisien restitusi (e) dapat dianggap sebagai ukuran yang muncul akibat dari keterlibatan hukum kekekalan energi mekanik ketika sebuah benda tegar menumbuk sebuah permukaan tegar dan mengalami pemantulan. Koefisien restitusi tidak mempunyai dimensi besaran karena hanya berfungsi sebagai perbandingan kuantitatif antara energi mekanik sebelum dan sesudah fenomena tumbukan terjadi.

Fenomena tumbukan dan pemantulan yang terjadi menyebabkan adanya perubahan energi potensial gravitasi akibat adanya perbedaan posisi (ketinggian) benda sesaat sebelum dan sesudah benda mengalami pemantulan. Adanya perbedaan ketinggian ini—selain berpengaruh terhadap energi potensial gravitasi—juga berpengaruh terhadap besar energi kinetik yang dimiliki oleh benda tersebut selama masa kejadian berlangsung. Demikian, hubungan antara energi potensial gravitasi dan energi kinetik yang dimiliki oleh objek (kelereng) dinyatakan terikat dengan kesatuan hukum kekekalan energi mekanik.

Angka koefisien restitusi (e) pada umumnya bernilai positif dan terletak antara 0 – 1, di mana parameter yang terlibat dan saling bersesuaian dengan nilai koefisiennya dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Jika $e = 0$, terjadi tumbukan tidak lenting sempurna. Yang mana seluruh energi kinetik benda terdisipasi menjadi panas/usaha ke lingkungan sekitarnya.
- Jika $0 < e < 1$, terjadi tumbukan lenting tidak sempurna. Yang mana energi kinetik benda terdisipasi sebagian ke lingkungan.
- Jika $e = 1$, terjadi tumbukan lenting sempurna. Yang mana tidak ada energi kinetik yang terdisipasi, sehingga kedua objek saling memantul dengan kecepatan relatif yang sama. Parameter ke-3 ini mustahil untuk dicapai dalam lingkungan nyata mengingat fenomena fisis yang berlaku juga dikungkung oleh hukum termodinamika yang mengatur tentang entropi.

Secara garis besar, persamaan matematis yang mewakili ukuran koefisien restitusi (e) dalam konteks eksperimen ini adalah sebagai berikut:

$$e = \sqrt{\frac{EK_{\text{setelah tumbukan}}}{EK_{\text{sebelum tumbukan}}}} \quad (1)$$

$$e = \sqrt{\frac{(1/2)mv^2}{(1/2)mu^2}} \quad (2)$$

$$e = \sqrt{\frac{v^2}{u^2}} = \frac{v}{u} \quad (3)$$

Persamaan (3) menyatakan bahwa angka koefisien restitusi diwakili oleh perbandingan antara kecepatan gerak jatuh bebas di setiap posisi sebelum (u) dan kecepatan gerak jatuh bebas di setiap posisi sesudah (v) tumbukan terjadi. Asumsikan kelereng bergerak jatuh bebas tanpa adanya gaya gesek udara dengan percepatan g akibat energi potensial gravitasi $E_p = mgH$ dengan m adalah massa kelereng. Demikian, kecepatan akhir pada kondisi sebelum (u) dan sesudah (v) tumbukan di setiap ketinggian maksimum (H_0 dan H_p) dinyatakan sebagai:

$$v^2 = v_o + 2gH_p \quad (4)$$

$$u^2 = u_o + 2gH_o \quad (5)$$

$$e = \sqrt{\frac{v^2}{u^2}} = \sqrt{\frac{v_o + 2gH_p}{u_o + 2gH_o}} \quad (6)$$

Pada fenomena gerak jatuh bebas, diketahui bahwa besar kecepatan mula-mula objek jatuh bebas adalah bernilai nol (0) sehingga persamaan (6) dapat dituliskan menjadi:

$$e = \sqrt{\frac{2gH_p}{2gH_o}} \quad (7)$$

$$e = \sqrt{\frac{H_p}{H_o}} \quad (8)$$

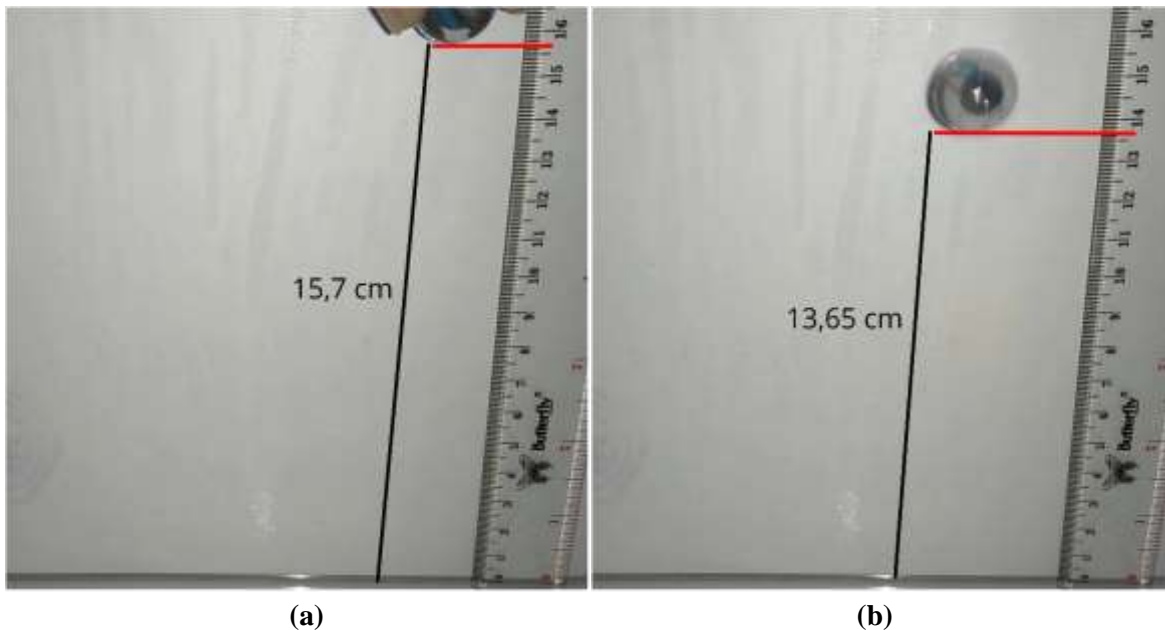
Persamaan (8) kemudian akan dimanfaatkan untuk mengetahui angka koefisien restitusi setelah data pengukuran ketinggian pantulan objek diperoleh melalui pencitraan jeda waktu yang akan dilakukan. Hasil perhitungan koefisien restitusi tersebut kemudian dapat menjadi indikator jenis fenomena tumbukan yang terjadi, antara tumbukan lenting sempurna, tidak lenting sempurna atau tidak lenting.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan disajikan analisis data hasil pengukuran yang melibatkan besaran ketinggian mula-mula (H_0), ketinggian pantulan pertama (H_1) dan ketinggian

pantulan kedua (H_2). Data pengukuran ketinggian tersebut digunakan untuk melakukan perhitungan koefisien restitusi (e) dari objek kelereng kaca pada eksperimen ini.

Pencitraan jeda waktu gerak jatuh kelereng kaca pada ketinggian mula-mula (H_0) dan ketinggian pantulan pertama (H_1) disajikan oleh **Gambar 2.** di bawah ini.



Gambar 2. (a) citra jeda waktu gerak jatuh kelereng pada ketinggian mula-mula (H_0) dan (b) citra jeda waktu gerak jatuh kelereng pada ketinggian pantulan pertama (H_1).

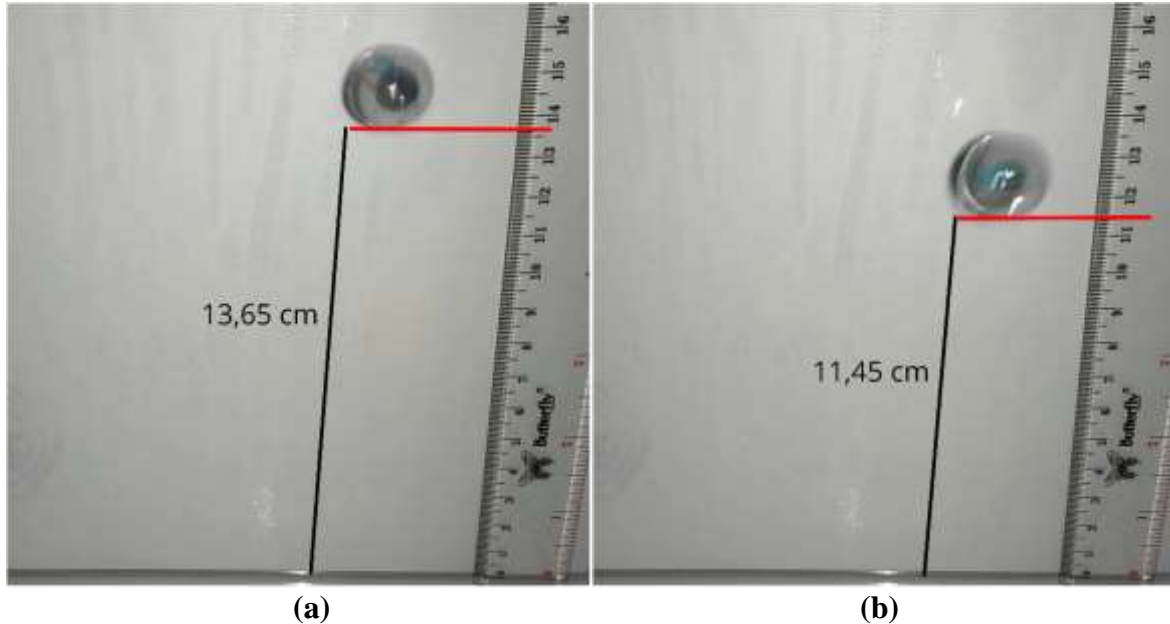
Sesuai dengan hasil pengukuran ketinggian kelereng secara visual pada masing-masing keadaan, diperoleh tinggi mula-mula kelereng adalah sebesar $H_0 = 15.7 \pm 0.05$ cm. Sementara itu, tinggi maksimum kelereng setelah pantulan pertama adalah sebesar $H_1 = 13.65 \pm 0.05$ cm. Perhitungan koefisien restitusi ($e_{H_{10}}$) kemudian dapat dilakukan dengan memasukkan data pengukuran ketinggian ke dalam persamaan (8) sebagaimana disajikan di bawah ini:

$$e_{H_{10}} = \sqrt{\frac{H_1}{H_0}} = \sqrt{\frac{13.65}{15.7}} \quad (9)$$

$$e_{H_{10}} = \sqrt{0.86942} \sim 0.93242 \quad (10)$$

Angka koefisien restitusi yang diperoleh dari hasil perhitungan pada keadaan tinggi mula-mula (H_0) dengan keadaan tinggi pantulan pertama (H_1) adalah $e_{H_{10}} \cong 0.93242$. Selanjutnya, **Gambar 3.** di bawah ini menyajikan citra citra jeda waktu gerak jatuh kelereng

pada ketinggian pantulan pertama (H_1) dan citra jeda waktu gerak jatuh kelereng pada ketinggian pantulan kedua (H_2).



Gambar 3. (a) citra jeda waktu gerak jatuh kelereng pada ketinggian pantulan pertama (H_1) dan (b) citra jeda waktu gerak jatuh kelereng pada ketinggian pantulan kedua (H_2).

Citra di atas menunjukkan bahwa ketinggian maksimum kelereng pada pantulan pertama (H_1) sebagaimana disajikan pada sisi kiri adalah sekitar $H_1 = 13.65 \pm 0.05$ cm. Sementara, citra di bagian sisi kanan menunjukkan bahwa ketinggian maksimum kelereng pada pantulan kedua adalah sebesar $H_2 = 11.45 \pm 0.05$ cm. Sama seperti sebelumnya, perhitungan koefisien restitusi ($e_{H_{21}}$) kemudian dapat dilakukan dengan memasukkan data pengukuran ketinggian ke dalam persamaan (8) sebagaimana disajikan di bawah ini:

$$e_{H_{21}} = \sqrt{\frac{H_2}{H_1}} = \sqrt{\frac{11.45}{13.65}} \quad (11)$$

$$e_{H_{21}} = \sqrt{0.83882} \sim 0.91587 \quad (12)$$

Demikian, rata-rata angka koefisien restitusi (\bar{e}) berdasarkan fenomena tumbukan berulang antara kelereng dan lantai ubin jika ditinjau dari keadaan tinggi maksimum yang dicapai di setiap pantulan yang terjadi adalah:

$$\bar{e} = \frac{1}{2} (e_{H_{10}} + e_{H_{21}}) \approx 0.92 \quad (13)$$

Adapun nilai selisih (deviasi) antara kedua angka koefisien restitusi yang diperoleh ($e_{H_{10}}$ dan $e_{H_{21}}$) adalah sekitar $\Delta e \approx 0.017$. Nilai tersebut diyakini cukup insignifikan (kecil) terhadap hasil perhitungan akhir sehingga dapat dinyatakan bahwa pengukuran yang dilakukan telah cukup akurat dan presisi. Beberapa faktor yang mempengaruhi perbedaan nilai antara angka $e_{H_{10}}$ dan $e_{H_{21}}$ di antaranya meliputi pengaruh lingkungan (getaran udara, gaya gesek, getaran lantai dan sebagainya), galat pengamatan oleh pelaku hingga faktor disipasi energi mekanik kelereng terhadap lantai yang berlangsung di setiap fenomena tumbukan/pantulan.

4. SIMPULAN

Pencitraan jeda waktu (*time-lapse imaging*) terhadap interaksi tumbukan gerak jatuh bebas antara kelereng kaca dengan permukaan lantai telah dilakukan menggunakan rangkaian skema sederhana. Perolehan angka koefisien restitusi kelereng kaca pada ketinggian maksimum mula-mula (H_0) dan ketinggian pada pantulan pertama (H_1) adalah $e_{H_{10}} \approx 0.93$. Sementara, angka koefisien restitusi kelereng kaca pada ketinggian maksimum pantulan pertama (H_1) dan ketinggian maksimum pantulan kedua (H_2) adalah $e_{H_{21}} \approx 0.91$. Demikian, nilai rata-rata \bar{e} adalah ≈ 0.92 dengan deviasi sebesar $\Delta e \approx 0.017$. Fenomena interaksi yang terjadi telah terbukti sebagai fenomen tumbukan lenting tak sempurna dikarenakan $\bar{e} \neq 1$ yang mana terjadi disipasi energi mekanik kelereng ke lingkungan sekitar.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. A. Mursalim, D. Atmajaya, and E. I. Alwi, "Pengembangan alat bantu timelapse photography berbasis Arduino," *Bul. Sist. Inf. dan Teknol. Islam*, vol. 2, no. 1, pp. 17–20, 2021, doi: 10.33096/busiti.v2i1.718.
- [2] C. Kienholz *et al.*, "Tracking icebergs with time-lapse photography and sparse optical flow, LeConte Bay, Alaska, 2016-2017.," *J. Glaciol.*, vol. 65, no. 250, pp. 195–211, 2019, doi: 10.1017/jog.2018.105.
- [3] R. Kenner, M. Phillips, P. Limpach, J. Beutel, and M. Hiller, "Monitoring mass movements using georeferenced time-lapse photography: Ritigraben rock glacier, western Swiss Alps," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 145, pp. 127–134, 2018, doi: 10.1016/j.coldregions.2017.10.018.
- [4] L. Persohn, "Exploring time-lapse photography as a means for qualitative data collection," *Int. J. Qual. Stud. Educ.*, vol. 28, no. 5, pp. 501–513, 2015, doi: 10.1080/09518398.2014.915999.
- [5] J. Revuelto, T. Jonas, and J. I. López-Moreno, "Backward snow depth reconstruction at high spatial resolution based on time-lapse photography," *Hydrol. Process.*, vol. 30, no. 17, pp. 2976–2990, 2016, doi: 10.1002/hyp.10823.
- [6] L. Gao, J. Liang, C. Li, and L. V. Wang, "Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second," *Nature*, vol. 516, no. 729, pp. 74–77, 2014, doi: 10.1038/nature14005.
- [7] M. Vollmer and K. P. Möllmann, "Slow speed - Fast motion: Time-lapse recordings

- in physics education,” *Phys. Educ.*, vol. 53, no. 3, 2018, doi: 10.1088/1361-6552/aaa954.
- [8] J. Yang, M. W. Park, P. A. Vela, and M. Golparvar-Fard, “Construction performance monitoring via still images, time-lapse photos, and video streams: Now, tomorrow, and the future,” *Adv. Eng. Informatics*, vol. 29, no. 2, pp. 211–224, 2015, doi: 10.1016/j.aei.2015.01.011.
- [9] R. H. Vera, E. Schwan, N. Fatsis-Kavalopoulos, and J. Kreuger, “A modular and affordable time-lapse imaging and incubation system based on 3D-printed parts, a smartphone, and off-the-shelf electronics.,” *PLoS One*, vol. 11, no. 12, pp. 1–15, 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0167583.
- [10] L. F. Urbano, P. Masson, M. Vermilyea, and M. Kam, “Automatic Tracking and Motility Analysis of Human Sperm in Time-Lapse Images,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 36, no. 3, pp. 792–801, 2017, doi: 10.1109/TMI.2016.2630720.
- [11] A. A. Chen, L. Tan, V. Suraj, R. Reijo Pera, and S. Shen, “Biomarkers identified with time-lapse imaging: Discovery, validation, and practical application,” *Fertil. Steril.*, vol. 99, no. 4, pp. 1035–1043, 2013, doi: 10.1016/j.fertnstert.2013.01.143.
- [12] N. Kramer and E. Wohl, “Estimating fluvial wood discharge using time-lapse photography with varying sampling intervals,” *Earth Surf. Process. Landforms*, vol. 39, no. 6, pp. 844–852, 2014, doi: 10.1002/esp.3540.
- [13] F. De Pascalis, P. M. Collins, and J. A. Green, “Utility of time-lapse photography in studies of seabird ecology.,” *PLoS One*, vol. 13, no. 12, pp. 1–17, 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0208995.
- [14] N. P. Huffeldt and F. R. Merkel, “Remote time-lapse photography as a monitoring tool for colonial breeding seabirds: A case study using thick-billed murre (Uria lomvia),” *Waterbirds*, vol. 36, no. 3, pp. 330–341, 2013, doi: 10.1675/063.036.0310.
- [15] E. Huintjes *et al.*, “Evaluation of a Coupled Snow and Energy Balance Model for Zhadang Glacier, Tibetan Plateau, Using Glaciological Measurements and Time-Lapse Photography,” *Arctic, Antarct. Alp. Res.*, vol. 47, no. 3, pp. 573–590, 2015, doi: 10.1657/AAAR0014-073.
- [16] M. Vollmer and K. P. Möllmann, “Time-lapse videos for physics education: specific examples.,” *Phys. Educ.*, vol. 53, no. 3, 2018, doi: 10.1088/1361-6552/aab6cf.