

Studi Pendahuluan Mekanika Pada Permainan Karambol Berbasis Citra Digital Dengan Teknik Fotografi *Long Exposure*

Fourier Dzar Eljabbar Latief^{1,2,a)}, Fahrizal Afrianto^{2,3,b)}

¹Kelompok Keilmuan Fisika Bumi dan Sistem Kompleks,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

²Program Studi Magister Pengajaran Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

³SMA Negeri 1 Tembilahan,
Jl. Pendidikan No.2, Tembilahan, Riau, Indonesia, 29281

^{a)} fourier@fi.itb.ac.id (corresponding author)

^{b)} fahrizal.afrianto@students.itb.ac.id

Abstrak

Pada penelitian ini dikembangkan metode dan perangkat yang dapat digunakan dalam melakukan analisis kuantitatif fenomena mekanika pada permainan karambol, yaitu dengan menggunakan analisis citra digital yang dihasilkan dengan teknik long exposure. Long exposure merupakan teknik pengambilan gambar pada kamera yang mampu merekam jejak benda, khususnya benda yang memancarkan cahaya, yang bergerak pada selang waktu tertentu. Jejak yang terrekam oleh teknik ini berupa kurva kontinu. Agar gerak benda dapat dianalisis dalam konteks mekanika, maka jejak gerak benda yang berupa kurva kontinu harus diubah menjadi jejak diskrit. Perangkat kamera yang telah dilengkapi fitur long exposure harus diletakkan di depan sebuah piringan berlubang yang berputar. Dalam penelitian ini, piringan tersebut berfungsi sebagai pencacah (chopper), yaitu celah bagi kamera untuk menangkap lintasan dari keping karambol dan mengubahnya menjadi jejak-jejak diskrit. Sebagai studi awal, validasi metode dilakukan dengan penentuan kecepatan awal keping karambol yang dilepaskan oleh pelontar. Hasil penentuan kecepatan awal dengan teknik long exposure ini (metode A) kemudian dibandingkan dengan acuan yang diambil dari data yang diperoleh dengan analisis video digital (metode B), yang selama ini sudah banyak digunakan dalam berbagai percobaan mekanika. Dari analisis yang dilakukan, diperoleh bahwa data kecepatan awal lontaran keping karambol yang diperoleh dari metode A menggunakan chopper dengan 4 lubang dan kecepatan putar ~1540 rpm mendekati hasil kecepatan awal referensi (metode B) dengan galat sebesar 1,13 %. Diperoleh pula standar deviasi relatif (SDR) dari metode A sebesar 1,01%. Dari studi pendahuluan ini, disimpulkan bahwa metode A (analisis citra digital dengan teknik long exposure) sudah cukup akurat dan dapat digunakan untuk analisis fenomena lebih lanjut pada permainan karambol, yaitu tumbukan dua dimensi.

Kata-kata kunci: eksperimen Fisika; tumbukan; kecepatan awal; long exposure

PENDAHULUAN

Mekanika Newton adalah salah satu cabang ilmu Fisika yang mendasari sebagian besar cabang ilmu Fisika lainnya. Oleh karena itu, pemahaman siswa tentang konsep-konsep pada mekanika Newton menjadi sangat

penting. Keberhasilan seorang siswa dalam memahami mekanika Newton umumnya akan menentukan kesuksesan mereka dalam mempelajari cabang ilmu Fisika lainnya [1]. Salah satu konsep yang dipelajari dalam mekanika Newton adalah momentum dan impuls. Banyak siswa yang mengalami kesulitan dalam memahami konsep momentum dan impuls dengan baik. Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa siswa mengalami kesulitan dalam mempelajari momentum, diantaranya oleh Bryce dan Macmillan yang menemukan bahwa sebagian besar siswa mengalami kesulitan dalam mengaplikasikan hukum kekekalan momentum pada persoalan tumbukan [2]. Singh dan Rosengrant serta Close dan Heron menemukan bahwa sebagian besar mahasiswa universitas berfikir bahwa momentum adalah besaran skalar [3,4]. Selain itu Saifullah [5] juga mengemukakan bahwa kesulitan siswa dalam mempelajari momentum dan impuls adalah karena siswa tidak memahami dengan baik hubungan antara gaya, percepatan dan kecepatan pada proses tumbukan. Oleh karena itu dibutuhkan upaya untuk membawa konsep Fisika yang diajarkan di kelas ke sesuatu yang lebih dekat dengan keseharian siswa, sehingga pembelajaran yang diberikan bersifat lebih kontekstual.

Konsep tumbukan, khususnya tumbukan dua dimensi dapat dimodelkan dalam permainan karambol. Karambol dipilih sebagai model untuk memberikan kesan bahwa Fisika sangat dekat dengan kehidupan sehari-hari, dan dalam mempelajari Fisika juga dapat dilakukan sambil bermain. Namun, tanpa alat bantu tertentu yang dapat melakukan analisis kuantitatif terhadap fenomena tumbukan, pembelajaran tumbukan dengan media karambol hanya dapat dilakukan secara kualitatif. Seiring dengan kemajuan teknologi, telah dikembangkan banyak metode untuk membantu melakukan pengamatan kuantitatif pada berbagai fenomena Fisika sehari-hari, khususnya fenomena yang berkaitan dengan mekanika Newton. Salah satu metode tersebut adalah dengan teknik analisis video digital. Di Indonesia sendiri telah banyak dilakukan penelitian mengenai penggunaan analisis video digital dalam mengamati dan menganalisis secara kuantitatif fenomena-fenomena Fisika, seperti penelitian yang dilakukan oleh Tirtasari dkk [6] yang menganalisis fenomena osilasi teredam pada pegas, Marliani dkk [7] yang menerapkan analisis video untuk menentukan koefisien viskositas fluida, Kurniasari [8] yang memanfaatkan analisis video sebagai media pembelajaran Fisika tentang koefisien restitusi, Fadholi dkk [9] yang menggunakan analisis video untuk menganalisis tumbukan 1 dimensi dan 2 dimensi, dan banyak lainnya yang telah menggunakan analisis video untuk menganalisis dan membuktikan konsep dan teori Fisika dengan baik.

Untuk mendapatkan hasil pengamatan yang baik, karakteristik penggunaan analisis video yang harus diperhatikan adalah kualitas video yang akan dianalisis. Salah satu parameternya adalah video harus memiliki frame rate atau frame-per-second (fps) yang cukup tinggi atau yang dikenal sebagai kamera *High Speed Video* (HSV). Namun, aksesibilitas siswa terhadap kamera dengan kamera HSV saat ini masih minim, salah satunya karena harga dari kamera dengan fitur HSV memang lebih mahal daripada kamera dengan fitur perekaman standar. Karakteristik lainnya yang juga harus diperhatikan adalah kapasitas data yang digunakan, video dengan kualitas yang baik, yaitu video dengan resolusi dan frame rate tinggi akan menghabiskan banyak memory atau penyimpanan, sehingga untuk pengolahan dan analisis video tersebut juga diperlukan perangkat (laptop atau PC) yang memiliki spesifikasi cukup tinggi. Oleh sebab itu, untuk menyiasati hal tersebut, dalam penelitian ini, dikembangkan perangkat untuk melakukan analisis kuantitatif fenomena Fisika, khususnya tumbukan pada permainan karambol dengan menggunakan analisis citra digital yang diambil dengan teknik *long exposure*. Analisis citra yang diambil dengan teknik *long exposure* sendiri telah dimanfaatkan oleh Amahoru dkk [10] dalam penentuan viskositas zat cair.

Jika dibandingkan dengan analisis video, proses pengolahan dan analisis gambar pada umumnya lebih mudah daripada analisis video. Selain itu, kapasitas data yang digunakan untuk melakukan analisis gambar tidak sebanyak yang diperlukan untuk melakukan analisis video. Hal yang paling penting adalah aksesibilitas terhadap proses analisis gambar lebih tinggi daripada proses analisis video, karena perangkat yang digunakan untuk pengambilan gambar tidak harus menggunakan kamera canggih, bahkan untuk teknik *long exposure* sendiri sudah tersedia secara terpisah dengan kamera, yaitu dengan menggunakan perangkat lunak, sehingga proses pengamatan dapat dilakukan walau hanya dengan menggunakan kamera *smartphone* saja. Namun demikian, tanpa bantuan perangkat tertentu, jejak gerak benda yang terekam dengan menggunakan teknik *long exposure* hanya akan berupa suatu garis kontinu tanpa dapat diketahui posisi dan kecepatan benda di suatu saat tertentu. Oleh karena itu untuk mengatasi masalah tersebut, dalam penelitian ini dikembangkan alat yang dapat melakukan diskritisasi terhadap jejak kontinu yang dihasilkan agar dapat menjadi jejak diskrit, sehingga dapat dilakukan pengolahan untuk menentukan besaran-besaran fisis dari gerak keping karambol yang diamati tersebut.

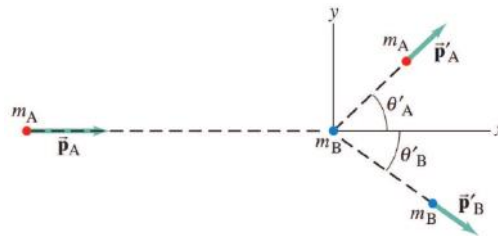
Pada penelitian yang merupakan studi awal ini, masalah yang akan dikaji adalah bagaimana mengembangkan perangkat bantu untuk analisis citra hasil teknik *long exposure*. Teknik dan perangkat yang dikembangkan tersebut kemudian divalidasi dengan acuan berupa hasil pengukuran dengan teknik pelacakan dari hasil perekaman video digital.

PERMAINAN KARAMBOL, MEKANIKA DAN TEKNIK *LONG EXPOSURE*

Permainan Karambol dan Mekanika

Karambol merupakan permainan tradisional Indonesia yang sarat dengan fenomena Fisika. Permainan ini bertujuan untuk memasukkan keping-keping ke dalam lubang yang terdapat pada empat ujung dari papan karambol yang berbentuk segi empat. Permainan ini mirip dengan bilyard, dengan keping yang digantikan oleh keping, dan tongkat digantikan dengan jari. Seperti halnya pada permainan bilyard, strategi diperlukan agar pemain dapat memasukkan sebanyak mungkin keping ke dalam lubang-lubang pada papan tersebut. Mengatur tumbukan antara pinggiran papan dan antar keping karambol menjadi inti dari permainan ini. Dengan demikian, cukup banyak prinsip-prinsip mekanika yang dapat diamati dalam permainan ini, mulai dari gerak lurus, gesekan, momentum linier, serta tumbukan, yang tentunya melibatkan konsep energi kinetik dan gaya impuls.

Pada permainan karambol, saat terjadi tumbukan antara keping karambol, dapat diamati adanya fenomena tumbukan dua dimensi, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. Keping A menumbuk keping B yang semula diam, kemudian setelah tumbukan terjadi, kedua benda bergerak pada arah yang berbeda, dengan membentuk sudut tertentu dari arah datangnya keping A sebelum tumbukan. Jika sistem keping A-B diasumsikan merupakan sistem terisolasi, maka momentum linier pada sistem ini akan konstan selama proses tumbukan terjadi.



Gambar 1. Ilustrasi tumbukan dua dimensi pada permainan karambol.

Pada sistem terisolasi tersebut, berlaku hukum kekekalan momentum linier yang dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = 0 \rightarrow \vec{p}_f = \vec{p}_i = 0, \quad (1)$$

dengan p adalah momentum linier total sistem (kg.m/s), indeks i menyatakan keadaan awal sistem, dan indeks f menyatakan keadaan akhir sistem. Persamaan (1) ini juga berarti bahwa untuk sistem terisolasi, momentum linier total sistem awal akan sama dengan momentum linier total sistem akhir.

Jika gaya yang bekerja diantara dua objek yang bertumbukan adalah gaya konservatif, maka total energi kinetik (K) tepat sebelum dan tepat sesudah tumbukan juga akan sama, atau tidak ada perubahan energi kinetik sistem sesaat sebelum dan sesaat sesudah tumbukan ($\Delta K = 0$). Sementara itu, jika gaya yang bekerja merupakan gaya non-konservatif, maka total energi kinetik sesaat sebelum dan sesaat sesudah tumbukan tidak akan sama. Tumbukan yang terjadi disebut tumbukan tak elastis (atau tak elastis sempurna jika benda menyatu setelah tumbukan), dengan $\Delta K \neq 0$.

Berdasarkan Gambar 1, untuk kasus keadaan awal benda B diam, hukum kekekalan momentum linier sepanjang sumbu- x dapat dituliskan sebagai berikut:

$$m_A \vec{v}_A = m_A \vec{v}'_A \cos \theta'_A + m_B \vec{v}'_B \cos \theta'_B, \quad (2)$$

dan sepanjang sumbu- y , hukum kekekalan momentum linier tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$0 = m_A \vec{v}'_A \sin \theta'_A - m_B \vec{v}'_B \sin \theta'_B. \quad (3)$$

Pada Persamaan (2) dan Persamaan (3), m_A dan m_B adalah massa benda A dan B (kg), v_A dan v_A' adalah kecepatan benda A sebelum dan sesudah tumbukan (m/s), v_B' adalah kecepatan benda B setelah tumbukan (m/s), sedangkan θ'_A dan θ'_B adalah sudut yang terbentuk antara vektor kecepatan benda A dan benda B terhadap garis horizontal (sumbu- x .)

Long Exposure

Long exposure adalah salah satu teknik fotografi yang mengkombinasikan antara objek diam dengan objek yang bergerak dengan cara menggunakan *shutter-speed* yang lambat untuk mendapatkan efek pergerakan (atau jejak) dari benda yang bergerak. Penggunaan *shutter-speed* lambat ini dimaksudkan agar cahaya yang masuk ke sensor kamera lebih banyak sampai *shutter* tertutup. Pada umumnya teknik ini digunakan di malam

hari. Jika teknik ini digunakan untuk menangkap gambar dari objek yang mengeluarkan cahaya, seperti lampu kendaraan yang berjalan, akan tampak efek geraknya berupa lintasan-lintasan cahaya. Teknik ini juga dapat digunakan di siang hari untuk menghasilkan efek lembut pada aliran sungai, air terjun atau pergerakan awan yang kemudian menjadi tampak halus.



Gambar 2. Kiri: gambar jejak lampu kendaraan (dokumentasi pribadi, 2018). Kanan: gambar air terjun dengan efek lembut (Hermawan [11]).

Eksposur dalam fotografi adalah fungsi dari jumlah cahaya yang masuk atau terekam oleh kamera. Jumlah cahaya yang masuk ke dalam kamera dikontrol oleh tiga pengaturan, yang dapat disesuaikan secara terpisah satu dan yang lainnya. Tiga pengaturan tersebut adalah *aperture* (bukaan), *shutter speed*, dan ISO. *Aperture* adalah area bukaan diafragma lensa yang dilalui cahaya untuk masuk ke dalam kamera. Pada umumnya nilai *aperture* ditandai dengan “f/angka”, semakin lebar bukaan diafragma (yang ditandai dengan semakin kecil nilai *aperture*), maka semakin banyak cahaya yang masuk ke dalam kamera. *Shutter speed* atau kecepatan rana atau waktu eksposur adalah lamanya paparan cahaya pada medium penangkap cahaya (film atau sensor digital) di dalam kamera. Semakin besar nilai *shutter speed* maka semakin banyak pula cahaya yang mencapai film atau sensor digital kamera. Pada kamera dengan film ISO mengacu pada kecepatan film, pada kamera digital, ISO mengacu pada tingkat sensitivitas dari sensor kamera terhadap cahaya yang mencapainya. Pengaturan ISO yang lebih tinggi membuat film atau sensor kamera semakin peka terhadap cahaya sehingga dapat menangkap citra gambar meski dalam keadaan pencahayaan yang kurang. Namun perlu diperhatikan untuk meningkatkan nilai ISO diperlukan penguatan sinyal-sinyal listrik. Selama proses penguatan sinyal ini akan dihasilkan *noise*, yang merujuk pada munculnya bintik-bintik pada gambar yang ditangkap dengan ISO tinggi. Ketiga pengaturan ini saling berkaitan satu sama lain. Berbagai kombinasi pengaturan *aperture*, *shutter speed*, dan ISO dapat menghasilkan eksposur yang sama. Perubahan dalam satu pengaturan kamera dapat diimbangi dengan mengubah pengaturan kamera lain secara proporsional.

Untuk menghasilkan citra yang merekam jejak gerak benda maka harus diatur agar *shutter speed* bernilai tinggi, oleh karena itu agar cahaya yang masuk ke dalam kamera tetap proporsional, maka nilai *aperture* dan ISO harus disesuaikan dengan nilai *shutter speed* yang digunakan. Pemilihan nilai *shutter speed* sebaiknya disesuaikan dengan kecepatan atau *field of view*/ruang pandang kamera terhadap benda yang ingin diamati jejak geraknya.

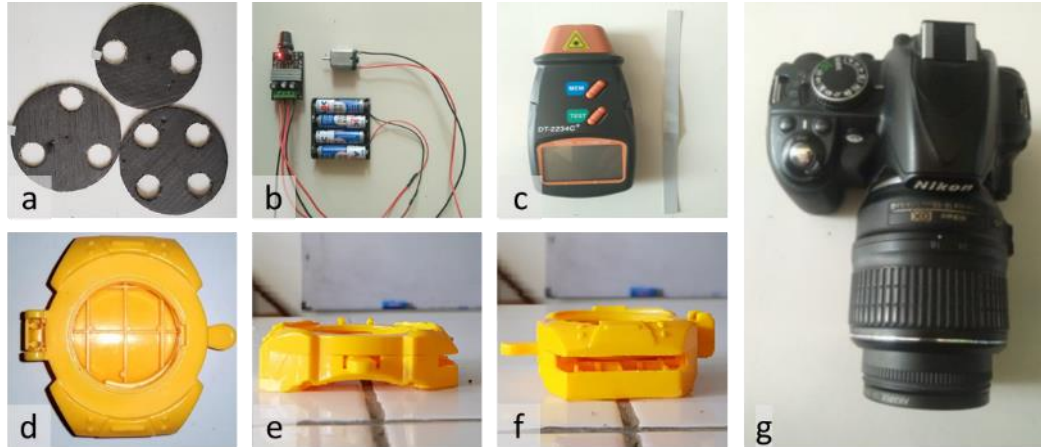
Karakteristik dasar dari citra yang dihasilkan dari teknik *long exposure* ini adalah bahwa jejak gerak benda berupa garis kontinu. Hal ini tentunya tidak sesuai dengan tujuan pengamatan dasar mekanika, di mana diperlukan setidaknya informasi mengenai posisi dan waktu dari benda di sepanjang geraknya. Kamera tidak mampu melakukan diskritisasi terhadap jejak gerak benda, sehingga pengamat tidak akan bisa menentukan besaran fisis dari gerak benda berupa posisi pada satu waktu tertentu. Oleh karena itu untuk mengatasi masalah tersebut, dalam penelitian ini dikembangkan alat bantu yang dapat melakukan diskritisasi terhadap jejak kontinu yang dihasilkan, agar dapat menjadi jejak diskrit. Dengan demikian, dari citra yang dihasilkan dapat dilakukan pengolahan untuk menentukan posisi terhadap waktu dari benda yang diamati geraknya tersebut.

METODE

Pengembangan Perangkat Bantu

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah kamera DSLR Nikon D3100 yang memiliki fitur *long exposure* dan dilengkapi dengan sistem pencacah (*chopper*). *Chopper* yang digunakan akan mampu untuk melakukan diskritisasi jejak kontinu perekaman kamera menjadi jejak diskrit. Terdapat pengembangan perangkat dari penelitian yang telah dilakukan oleh Amahoru dkk [10] yang melakukan pengukuran viskositas zat cair dengan menggunakan analisis citra hasil perekaman dengan fitur *long exposure*, dimana pada penelitian

ini terdapat piranti pengatur kecepatan motor, sehingga kecepatan putar *chopper* dapat diubah-ubah dan disesuaikan dengan kecepatan objek yang diamati. Selain itu pada penelitian ini, pengukuran perioda putar *chopper* juga dilakukan dengan menggunakan sensor tachometer digital, sehingga perioda putar *chopper* dapat ditentukan secara lebih praktis. Adapun bagian dari sistem pencacah ini terdiri dari *disc chopper* (cakram pencacah), rangkaian motor listrik (dan pengatur kecepatan), tachometer digital, serta pelontar keping karambol (lihat Gambar 3).



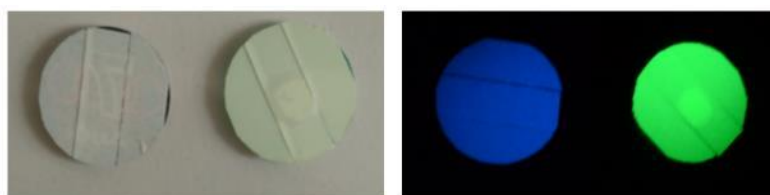
Gambar 3. (a) *Disc chopper* dengan variasi jumlah lubang. (b) Rangkaian motor listrik dengan pengatur kecepatan putar dinamo. (c) Tachometer digital dan stiker reflektif untuk pengukuran kecepatan putar *disc chopper*. (d,e,f) Mainan Tazos sebagai pelontar keping karambol. (g) Kamera DSLR Nikon D3100 yang memiliki fitur *long exposure*.

Disc chopper (Gambar 3a) berupa piringan tipis yang terbuat dari keping *Compact Disc* (CD) dengan diameter ~ 12 cm dan memiliki lubang di pinggirannya sebanyak 2, 3, dan 4 lubang dengan diameter ~ 3 cm. Bagian ini merupakan bagian utama dari sistem pencacah dengan fungsi mendiskritisasi jejak kontinu yang dihasilkan kamera. Keping CD dipilih sebagai langkah upaya pemanfaatan bahan bekas, selain juga karena keping CD sudah berbentuk lingkaran sempurna, dan karakteristiknya yang sangat ringan dan cenderung homogen, sehingga dapat menghasilkan perputaran yang stabil.

Pemutar cakram (Gambar 3b) terdiri atas rangkaian motor DC yang dihubungkan dengan pengatur kecepatan motor metode *Pulse Width Modulation* (PWM). Rangkaian ini dihubungkan dengan sumber tegangan DC berupa 1 buah dudukan baterai yang dilengkapi saklar. Pengaturan kecepatan putar motor DC diperlukan untuk menentukan kecepatan putar *disc chopper* yang optimal terkait dengan kecepatan benda dan jejak diskrit yang dihasilkan.

Tachometer Digital DT-2234C (Gambar 3c) dengan rentang pengukuran 2,5-100,000 RPM digunakan untuk mengukur kecepatan putar *disc chopper*. Selain untuk mengetahui nilai kecepatan putar *disc chopper*, pengukuran kecepatan dilakukan untuk melakukan kalibrasi waktu yang diperlukan saat pengolahan dan analisis data dengan perangkat lunak Tracker. Beda waktu antara satu titik cacahan ke titik cacahan lainnya (dt) ditentukan dengan cara menghitung periode putar dibagi jumlah lubang pada *chopper*.

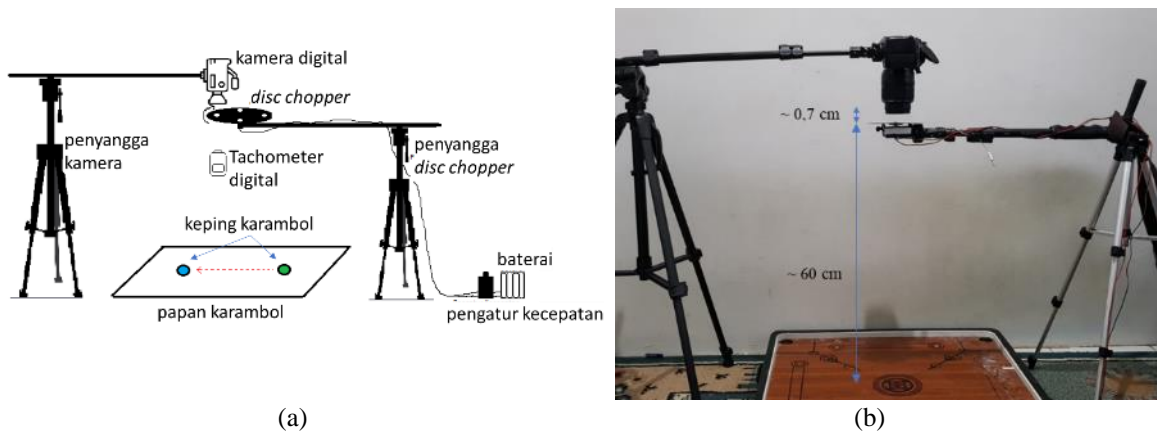
Keping karambol yang akan digerakkan harus memiliki kecepatan yang sama agar analisisnya mudah. Untuk menghasilkan kecepatan awal yang relatif konstan digunakan pelontar keping karambol berupa mainan Tazos (Gambar 3e-f-g). Selain itu, untuk dapat menggunakan teknik *long exposure*, benda yang akan direkam lintasannya harus memancarkan cahaya, atau diistilahkan dengan *lightmeter*. Agar keping karambol dapat memancarkan cahaya, keping karambol dilapisi dengan lakban fosfor, dimana lakban fosfor merupakan bahan yang dapat memancarkan cahaya pada keadaan gelap. Untuk membedakan pengamatan digunakan dua warna yang berbeda, yaitu hijau dan biru pada dua keping karambol yang akan bertumbukan. Keping karambol yang telah dilapisi dengan lakban fosfor ini berfungsi sebagai *lightmeter*, yaitu objek yang akan direkam jejaknya (lihat Gambar 4).



Gambar 4. Keping karambol yang telah dilapisi dengan lakban fosfor sebagai *lightmeter*.

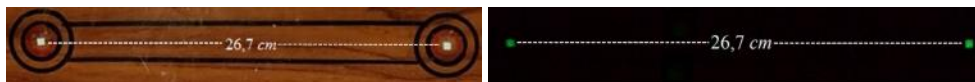
Desain Set Eksperimen

Perekaman gambar dilakukan dengan syarat *field of view* kamera harus paralel dengan bidang papan karambol. Penyangga kamera dan penyangga dinamo yang digunakan dalam set eksperimen ini berupa tripod standar yang telah dimodifikasi agar dapat mengambil gambar dengan arah pengambilan gambar *overhead*. *Chopper* dipasang ke penyangga dinamo dan diatur agar posisinya tepat sejajar di atas papan karambol. Kemudian kamera yang telah dipasangkan ke penyangga kamera diatur posisinya agar tepat berada di atas *chopper*. Penyangga ini berfungsi untuk menjaga kestabilan posisi kamera dan *chopper* selama proses pengambilan gambar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5a. Adapun susunan set eksperimen lengkap dapat dilihat pada Gambar 5b.



Gambar 5. (a) Sketsa susunan alat eksperimen dan (b) susunan lengkap set eksperimen.

Selain kalibrasi waktu, kalibrasi ruang juga diperlukan untuk memastikan data yang dianalisis akurat. Kalibrasi ruang yang dilakukan pada prinsipnya adalah konversi panjang pada citra dari piksel menjadi satuan metrik. Alat bantu kalibrasi dalam eksperimen ini berupa dua titik lakban fosfor yang terpisah pada jarak 26,7 cm (Gambar 6-kiri) dan ditempelkan pada papan karambol. Lakban fosfor digunakan agar perangkat kalibrasi ruang ini dapat berpendar ketika pencahayaan kurang (Gambar 6-kanan), yaitu pada saat pengambilan citra dengan teknik *long exposure*.



Gambar 6. Alat bantu kalibrasi ruang yaitu dua titik lakban fosfor yang terpisah pada jarak 26,7 cm.

Teknik Analisis Data Penelitian

Kualitas data yang dihasilkan menggunakan teknik ini dianalisis dengan meninjau tingkat presisi dan akurasi. Presisi merupakan kemampuan suatu alat untuk memberikan hasil ukur yang sama pada percobaan berulang. Presisi dari teknik ini dilakukan dengan menghitung standar deviasi (SD) dan standar deviasi relatif (SDR). Perhitungan SD dilakukan dengan menggunakan Persamaan (4), yaitu:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (4)$$

sedangkan perhitungan SDR dilakukan dengan menggunakan Persamaan (5), yaitu:

$$SDR = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100\%, \quad (5)$$

dimana x_i adalah data pengukuran ke- n , \bar{x} adalah rata-rata data pengukuran dan n adalah jumlah data.

Akurasi adalah kemampuan suatu alat untuk memberikan hasil ukur yang mendekati nilai yang sebenarnya atau nilai acuan. Dalam penelitian ini, hasil analisis menggunakan teknik *long exposure* (yang selanjutnya disebut dengan metode A) akan dibandingkan hasil analisis menggunakan teknik pelacakan video digital (yang selanjutnya disebut dengan metode B). Metode B dijadikan sebagai acuan metode ini sudah lazim dan banyak dilakukan dalam berbagai penelitian. Pada penelitian ini video yang digunakan memiliki resolusi 1280×720 dengan *frame rate* 30 fps. Meskipun video yang digunakan dalam penelitian ini bukan video yang

dihasilkan oleh kamera *High Speed Video* (HSV) dan masih terdapat gerakan benda yang terkesan *blur* akibat gerak benda yang terlalu cepat, namun secara umum, proses analisis pelacakan dari video yang dihasilkan masih dapat dilakukan dengan baik. Akurasi dianalisis dengan menghitung galat relatif dari nilai yang didapat dengan menggunakan Persamaan (6), dengan α mewakili besaran yang akan dianalisis akurasinya.

$$\text{Galat Relatif} = \left| \frac{\alpha_{\text{metodeA}} - \alpha_{\text{metodeB}}}{\alpha_{\text{metodeB}}} \right| \times 100\% \quad (6)$$

Dalam kasus ini, besaran yang akan dianalisis adalah kecepatan awal keping saat dilontarkan oleh alat pelontar (Tazos). Metode A disimpulkan baik dan valid jika galat relatif kecepatan keping karambol yang dihasilkan dari analisis menggunakan metode A ini nilainya cukup kecil (umumnya dinilai baik jika nilainya $< 2\%$).

Pada studi pendahuluan ini, validasi dilakukan dengan menguji nilai kecepatan awal yang dihasilkan oleh alat pelontar keping karambol (Tazos) yang dianalisis dengan metode A, dibandingkan dengan metode B sebagai acuan. Perbandingan dengan metode B dilakukan untuk beberapa kombinasi parameter *chopper*, yaitu kecepatan putar *chopper* dan jumlah lubang *chopper*. Dari beberapa kombinasi tersebut, ditentukan kombinasi parameter-parameter mana yang menghasilkan nilai kecepatan awal yang mendekati nilai kecepatan awal acuan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Nilai Kecepatan Keping Karambol dengan Analisis Video Digital

Metode B digunakan terlebih dahulu untuk analisis presisi, terkait kecepatan pelontaran keping karambol oleh mainan Tazos. Dilakukan 5 (lima) kali perekaman terlontarnya keping karambol oleh pelontar Tazos. Hasil analisis lima video tersebut dengan menggunakan Tracker, ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan data yang ditunjukkan pada Tabel 1, dapat dilihat bahwa nilai SDR yang dihasilkan sebesar 1,25%, yang dinilai cukup kecil, yang berarti pelontaran keping karambol oleh pelontar, menghasilkan kecepatan yang cukup presisi. Kecepatan rata-rata sebesar 4,443 m/s ini yang kemudian dijadikan sebagai acuan untuk menganalisis metode A.

Tabel 1. Hasil pengukuran kecepatan lontar keping karambol dengan metode B.

Percobaan ke-	Frame dt (s)	Frame rate (s^{-1})	Kecepatan Awal (m/s)	Kecepatan Awal rata-rata (m/s)	SD	SDR
1	0,033	29,97	4,427			
2	0,033	29,97	4,364			
3	0,033	29,97	4,445	4,443	0,0557	1,25 %
4	0,033	29,97	4,518			
5	0,033	29,97	4,460			

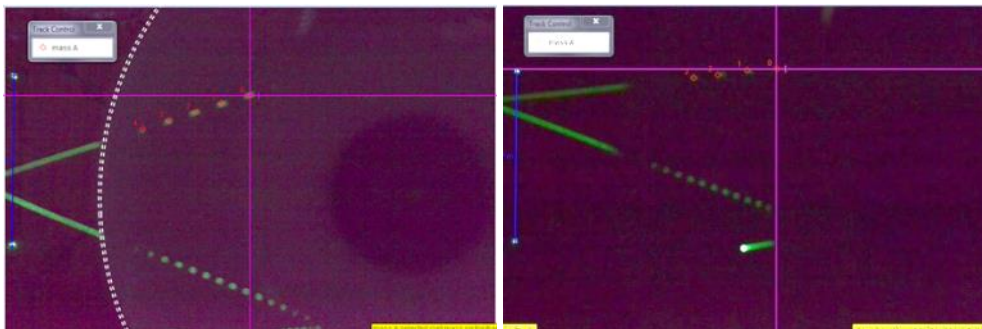
Data Penentuan Kecepatan Putar dan Jumlah Lubang *Chopper* yang Ideal

Kecepatan putar dan jumlah lubang *chopper* sangat mempengaruhi hasil analisis kecepatan keping karambol. Agar nilai kecepatan yang dihasilkan dari analisis menggunakan metode A ini akurat, diperlukan kombinasi kecepatan dan jumlah lubang *chopper* yang sesuai. Untuk itu, dilakukan beberapa percobaan untuk menentukan kecepatan putar dan jumlah lubang *chopper* yang ideal, sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 2. Berdasarkan data pada Tabel 2 terlihat bahwa kombinasi parameter *chopper* yang memberikan hasil analisis yang akurat adalah pada ~ 1540 rpm dengan 4 lubang. Selain itu, secara kualitatif data yang dihasilkan oleh *chopper* dengan 4 lubang secara kualitas juga lebih baik daripada data yang dihasilkan oleh kombinasi lain, misalnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 (untuk kombinasi 1880 rpm dengan 3 lubang). Hal ini teramati dari jumlah cacahan jejak cahaya keping karambol yang lebih banyak dihasilkan oleh *chopper* dengan 4 lubang dibandingkan dengan *chopper* dengan 3 lubang.

Tabel 2. Data pengamatan kecepatan awal keping karambol untuk berbagai kombinasi parameter *chopper*.

No	Kecepatan Putar (rpm)	Frame dt (s)	Frame rate (s^{-1})	Kecepatan Awal (m/s)	Kecepatan Awal Referensi (m/s)
			4 Lubang		
1	835	0,01796407	55,56	3,795	
2	1056	0,01420454	70,40	3,887	
3	1150	0,01304348	76,67	4,137	4,443
4	1210	0,0123967	80,67	4,311	

	5	1540	0,00974026	102,67	4,479	
				3 Lubang		
	1	910	0,021978022	45,50	3,493	
	2	1105	0,0180995475	55,25	3,723	
	3	1550	0,0129032258	77,50	3,689	4,443
	4	1820	0,010989011	91,00	4,387	
	5	1880	0,0106382979	94,00	4,477	
				2 Lubang		
	1	1450	0,02068966	48,33	2,686	
	2	1761	0,01703578	58,70	2,746	
	3	1790	0,01675978	59,67	3,825	4,443
	4	1820	0,01648352	60,67	4,390	
	5	1903	0,01576458	63,43	4,461	



Gambar 7. Kiri: jejak citra dengan *chopper* 4 lubang pada kecepatan ~1540 rpm. Kanan: jejak citra dengan *chopper* 3 lubang pada kecepatan ~1880 rpm.

Perlu diperhatikan bahwa pada kombinasi kecepatan putaran yang tinggi dan jumlah lubang yang besar, jumlah cacahan jejak gerak benda yang dihasilkan bisa menjadi terlalu rapat, yang menjadikan analisis bisa jadi sukar dilakukan. Jarak antara cacahan satu dengan cacahan lainnya sangat dekat, maka lintasan gerak benda cenderung membentuk lintasan kontinu. Berdasarkan hasil pengamatan di atas, untuk studi ini digunakan kombinasi parameter *chopper* dengan 4 lubang yang diputar dengan kecepatan putar ~1540 rpm.

Perbandingan Kecepatan Awal Karambol Metode A dan Metode B

Validasi pada metode analisis dengan metode A dilakukan dengan membandingkan nilai kecepatan awal yang dilakukan berulang (sebanyak lima kali), dengan menggunakan *chopper* 4 lubang dan diputar pada kecepatan ~1540 rpm. Nilai yang kecepatan awal yang dihasilkan pada percobaan ini akan menjadi standar akurasi dari metode analisis citra digital yang diambil dengan teknik *long exposure* yang akan digunakan dalam percobaan ini. Adapun data hasil percobaan penentuan kecepatan awal dengan menggunakan analisis citra digital yang diambil dengan teknik *long exposure* dapat dilihat pada Tabel 3. Dari data yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa data kecepatan awal yang diperoleh dengan analisis citra digital yang diambil dengan teknik *long exposure* pada *chopper* dengan 4 lubang dan berputar dengan kecepatan putar ~1540 rpm tidak jauh berbeda dengan hasil kecepatan awal referensi. Dari data di atas dapat diperoleh standar deviasi (SD) dan standar deviasi relatif (SDR) masing-masing sebesar 0,045 dan 1,01%. Adapun galat relatif kecepatan awal antara data hasil analisis citra digital dengan data hasil analisis video digital adalah 1,13%.

Tabel 3. Data kecepatan awal keping karambol pada kecepatan putar ~1540 rpm untuk *chopper* dengan 4 lubang.

No	Kecepatan Putar (rpm)	Frame dt (s)	Frame rate (s^{-1})	Kecepatan Awal (m/s)	Kecepatan awal rata-rata eksperimen (m/s)	Kecepatan awal referensi (m/s)
1	1540	0,0097402597	102,67	4,549		
2	1541	0,009733939	102,73	4,490		
3	1542	0,0097276265	102,80	4,505	4,493	4,443
4	1544	0,0097150259	102,93	4,423		
5	1550	0,0096774194	103,33	4,499		

KESIMPULAN

Dari studi pendahuluan yang bertujuan untuk melakukan validasi terhadap metode analisis gerak benda menggunakan teknik *long exposure*, kombinasi parameter *chopper* 4 lubang dan kecepatan putar ~ 1540 rpm merupakan kombinasi yang paling optimal. Diperoleh standar deviasi relatif (SDR) penentuan kecepatan lontaran keping karambil sebesar 1,01%, dan galat dari perbandingan terhadap metode B, diperoleh sebesar 1,13%. Dari dua analisis kualitas data tersebut, yaitu tingkat presisi dan akurasi, disimpulkan bahwa metode ini memiliki nilai akurasi yang cukup baik. Berdasarkan hal ini dapat disimpulkan bahwa metode analisis citra digital dengan teknik *long exposure* sudah cukup akurat dalam mengukur kecepatan awal keping karambol dan dapat digunakan untuk analisis fenomena tumbukan yang lebih lanjut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh “Hibah Penelitian Tesis Magister” dari kemenristekdikti tahun 2019 dengan judul “Pengembangan Perangkat Keras dan Perangkat Lunak untuk Pembelajaran Fisika Berbasis Pengolahan dan Analisis Citra dan Video Digital” dengan nomor kontrak penelitian 002/SP2H/PTNBH/DRPM/2019.

REFERENSI

1. Hestenes, D., Wells, M, “Force Concept Inventory,” The Physics Teacher, pp. 141-158, 1992.
2. Bryce, T. G. K., MacMillan, K, “Momentum and Kinetic Energy: Confusable Concepts in Secondary School Physics,” Journal of Research in Science Teaching, pp. 739-761, 2009.
3. Singh, C., & Rosengrant, D, “Multiple-choice test of energy and momentum concepts,” American Journal of Physics, 71(6), pp. 607-617, 2003.
4. Close, H. G., & Heron, P. R, “Research as a guide for improving student learning: An example from momentum conservation,” American Journal of Physics, pp. 961-969, 2010.
5. A. M. D. Saifullah, Senior High School Student’s Difficulties in solving impulse and momentum problem., 2017.
6. Tirtasari, Y., Latief, F. D. E., Amahoru, A. H, “Penggunaan Teknik Video Tracking Untuk Mengamati Fenomena Osilasi Teredam Pada Pegas,” dalam Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains 2016, Bandung, 2016.
7. Marliani, F., Wulandari, S., Fauziyah, M., Nugraha, M. G, “Penerapan Analisis Video Tracker dalam Pembelajaran Fisika SMA untuk Menentukan Nilai Koefisien Viskositas Fluida,” dalam Prosiding Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains, Bandung, 2015.
8. T. C. Kurniasari, “Pemanfaatan Program Analisis Video Traker sebagai Media Pembelajaran Fisika tentang Koefisien Restitusi,” Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga, 2015.
9. Fadholi, L., Harijanto, A., Lesmono, A., D, “Analisis Video Kejadian Fisika dengan Software Tracker sebagai Rancangan Bahan Ajar Momentum dan Impuls untuk Meningkatkan Kemampuan Berfikir Kritis Siswa SMA Kelas X,” Jurnal Pembelajaran Fisika, Vol. 7 No. 3, pp. 263-270, 2018.
10. Amahoru, A. H., Latief, F. D. E., Tirtasari, Y., “Pengukuran Viskositas Zat Cair Menggunakan Analisis Citra Hasil Perakaman dengan Fitur Long Exposure,” dalam Simposium Nasional dan Pembelajaran Sains, Bandung, 2016.
11. Hermawan, “5 Cara Bermain dengan Long Exposure,” Diakses dari <https://www.plazakamera.com/5-cara-bermain-dengan-long-exposure/>, 2016.