

Validasi Teknik Video Tracking Pada Pengukuran Percepatan Gravitasi Menggunakan Gerak Jatuh Bebas Dalam Tabung Hampa Udara

Nadia Azizah^{1,a)}, Fourier Dzar Eljabbar Latief^{2,b)}, Abd. Haji Amahoru^{1,c)} dan Yeni Tirta Sari^{1,d)}

¹Laboratorium Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

²Laboratorium Fisika Bumi,
Kelompok Keilmuan Fisika Bumi dan Sistem Kompleks,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} nadia.kh.18@gmail.com(corresponding author)

^{b)} fourier@fi.itb.ac.id

^{c)} aji14amahoru@gmail.com

^{d)} yn.tirtasari@gmail.com

Abstrak

Fisika adalah ilmu yang mempelajari tentang alam dan gejalanya. Salah satu bidang kajian dalam fisika adalah kinematika. Kinematika merupakan ilmu yang membahas tentang gerak suatu benda yang melibatkan analisis posisi, perpindahan, kecepatan, dan percepatan. Untuk menentukan besaran-besaran tersebut diperlukan alat ukur yang memadai. Pengukuran yang dilakukan dengan memanfaatkan panca indera seringkali memberikan hasil pengukuran dengan kesalahan yang cukup tinggi. Untuk memperkecil kesalahan yang disebabkan oleh manusia, pengukuran dapat dilakukan dengan menggunakan yang lebih akurat dibandingkan dengan panca indera. Dalam percobaan ini, teknik video tracking digunakan untuk mendapatkan data posisi sekaligus waktu. Video hasil pengamatan tersebut dianalisis menggunakan Tracker dimana objek yang berubah posisinya dalam bidang x-y dari satu frame ke frame berikutnya dapat dilacak posisinya. Tracker merupakan Open Source Physics (OSP) tool Java Workframe yang digunakan dalam pelacakan objek. Sebelum digunakan lebih lanjut untuk kasus-kasus kinematika, teknik video tracking menggunakan Tracker ini perlu diuji keabsahannya. Dalam pengujian ini, sebuah tabung hampa udara dibuat dan benda yang jatuh bebas dalam tabung tersebut direkam. Rekaman tersebut dianalisis menggunakan Tracker untuk memperoleh data posisi terhadap waktu. Dengan melakukan polinomial fitting orde dua pada data posisi terhadap waktu, nilai percepatan gravitasi dapat diperoleh. Pengamatan dilakukan menggunakan perekaman video dengan kecepatan 1000 fps. Ada tiga objek yang dijatuhkan dalam tabung. Objek ke-1 menghasilkan nilai percepatan gravitasi $10,6 \text{ m/s}^2$ dengan kesalahan 8,7%. Objek ke-2 menghasilkan nilai percepatan gravitasi $10,9 \text{ m/s}^2$ dengan kesalahan 11,9%. Objek ke-3 menghasilkan nilai percepatan gravitasi $9,6 \text{ m/s}^2$ dengan kesalahan 1,6%. Dari ketiga objek tersebut, nilai rata-rata percepatan gravitasi yang dihasilkan adalah $10,426 \text{ m/s}^2$ dengan kesalahan 7,541%. Dengan teknik video tracking, percepatan gravitasi dapat dihitung dengan rata-rata kesalahan $< 10\%$. sehingga teknik video tracking cukup valid untuk dapat digunakan dalam melakukan analisis kinematika lainnya.

Kata-kata kunci: Kinematika, Tracker, Percepatan Gravitasi, Tabung Hampa Udara.

PENDAHULUAN

Fisika merupakan ilmu yang mempelajari alam dan gejalanya. Mekanika ialah salah satu cabang ilmu fisika yang mempelajari tentang gerak. Mekanika terbagi atas dua bagian, yaitu: (1) Kinematika tentang bagaimana suatu objek yang bergerak tanpa menganalisis penyebab gerak; dan (2) Dinamika, menganalisis gerak objek dengan menyelidiki penyebabnya. Sebagai salah satu ilmu yang paling dasar dalam ilmu pengetahuan, fisika selalu berkaitan dengan pengukuran besaran-besaran fisika. Pengukuran yang dilakukan dengan memanfaatkan panca indera seringkali memberikan hasil dengan kesalahan cukup tinggi. Untuk memperkecil kesalahan yang disebabkan oleh manusia, pengukuran dapat dilakukan menggunakan yang lebih akurat dibandingkan panca indera. Teknik *video tracking* dengan perangkat Tracker dapat digunakan untuk menganalisis pergerakan objek. Tracker merupakan perangkat OSP (*Open Source Physics*) yang melacak gerak objek *frame* demi *frame* pada sebuah video dalam bidang x - y . Tracker sangat bermanfaat dalam pengamatan karena dalam pelacakan yang dilakukan dapat menghasilkan berbagai data yang diperlukan misalnya waktu, posisi, kecepatan dan percepatan. Sebelum digunakan lebih lanjut, validasi perlu dilakukan agar teknik *video tracking* dapat digunakan pada cabang ilmu fisika lainnya.

Gerak jatuh bebas merupakan cakupan materi dalam kinematika yang berkaitan dengan percepatan gravitasi Bumi yang bernilai $9,8 \text{ m/s}^2$. Konstanta tersebut dapat digunakan sebagai dasar untuk melakukan validasi teknik *video tracking*.

Teknik *video tracking* telah dimanfaatkan dalam berbagai penelitian. Dalam penelitian sebelumnya, C. Sirisathitkul, dkk telah melakukan teknik *video tracking* dalam menganalisis gerak jatuh bebas suatu benda, [1] Dalam penelitian ini, teknik *video tracking* dimanfaatkan untuk menganalisis gerak jatuh bebas dalam tabung hampa udara. Penggunaan tabung hampa udara sebagai ruang gerak jatuh bebas dimaksudkan untuk mengurangi pengaruh gesekan udara terhadap suatu benda ketika mengalami gerak jatuh bebas.

GERAK JATUH BEBAS DALAM TABUNG HAMPA UDARA

Gerak Jatuh Bebas

Gerak jatuh bebas adalah gerak benda yang hanya dipengaruhi gaya tarik gravitasi Bumi. Berdasarkan Hukum II Newton, apabila sebuah benda yang mengalami gerak jatuh bebas maka akan memenuhi persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \sum F &= m \cdot a \\ W - F_d &= m \cdot a \end{aligned} \quad (1)$$

Dengan W adalah gaya berat benda akibat pengaruh gaya gravitasi dan a adalah percepatan benda dalam arah vertikal. Dalam penelitian ini, gerak jatuh bebas yang terjadi merupakan gerak jatuh bebas dengan sedikit gesekan sehingga gaya gesek benda terhadap udara (F_d) diasumsikan bernilai sama dengan nol.

$$\begin{aligned} W &= m \cdot a \\ m \cdot g &= m \cdot a \\ g &= a \end{aligned} \quad (2)$$

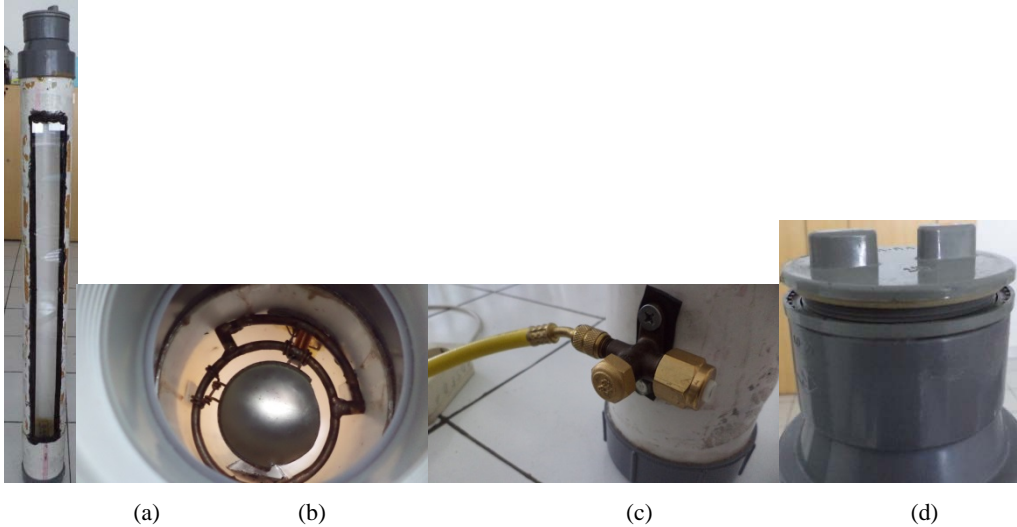
Percepatan benda jatuh bebas dalam tabung hampa udara sama dengan percepatan gravitasi. Berdasarkan referensi, nilai percepatan gravitasi Bumi di tempat pelaksanaan penelitian adalah $9,8 \text{ m/s}^2$. Nilai tersebut akan digunakan sebagai referensi nilai percepatan gravitasi Bumi.

$$\begin{aligned} \int a \, dt &= v(t) \\ \int g \, dt &= v(t) \\ v(t) &= v_0 + gt \\ \int v(t) \, dt &= y(t) \\ y(t) &= y_0 + v_0 t + \frac{gt^2}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

Dengan $y(t)$, y_0 , v_0 , dan t masing-masing adalah posisi sesaat benda dalam arah vertikal, posisi awal benda dalam arah vertikal, kecepatan awal benda, dan waktu.

Tabung Hampa Udara

Pembuatan tabung hampa udara dimaksudkan untuk mengurangi gesekan udara. Pembuatan tabung yang digunakan meliputi beberapa tahap, antara lain: (1) penempelan kaca *fiber* berukuran $4,68E-2 \times 8,5E-1 \text{ m}^2$ pada sebuah pipa paralon dengan diameter 4 inch yang tingginya $\pm 1,4 \text{ m}$; (2) pembuatan klap objek; (3) pemasangan pipa T; dan (4) pemasangan tutup drat.



Gambar 1. (a) tabung, (b) klap objek, (c) pipa T, (d) tutup drat



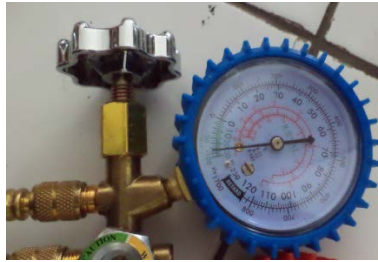
Gambar 2. Catu daya

Catu daya pada Gambar 2 merupakan sumber arus listrik DC (*Direct Current*) dengan tegangan keluaran +15 Volt. Catu daya digunakan untuk mengalirkan listrik ke lilitan kawat sehingga dapat menghasilkan medan magnet di ujung lilitan kawat pada klap objek. Medan magnet tersebut dimanfaatkan untuk menempelkan mangkuk objek. Mangkuk objek ini akan terlepas dari penempelannya dan menjatuhkan objek setelah aliran listrik diputuskan.



Gambar 3. Pompa vakum

Dalam proses penghampaan udara, penghisapan udara dari dalam tabung merupakan penghampaan mekanik, yaitu penghampaan udara menggunakan mesin pompa vakum. Pompa vakum digunakan untuk menghisap keluar udara dari dalam tabung.



Gambar 4. *Testing Manifold*

Testing Manifold merespon penghisapan udara dari dalam tabung keluar dengan bergesernya jarum analog menuju -75 KPa. Setelah jarum tetap pada angka tersebut dan tidak bergeser lagi, kondisi tersebut yang diasumsikan sebagai kondisi hampa tabung. Kehampaan udara dalam tabung tergolong dalam LV (*Low Vacuum*) yang rentang tekanannya ialah $3,3E3 - 1E5$ Pa, [4]

TEKNIK VIDEO TRACKING

Teknik *Video Tracking* merupakan suatu teknik yang digunakan dalam melakukan pengamatan. Dalam teknik ini, video dan perangkat Tracker digunakan dalam menganalisis hasil perekaman gerak jatuh bebas objek dalam tabung hampa udara yang telah dibuat.

Video dan Frame rate

Video adalah kumpulan gambar yang dijalankan dalam *frame rate* tertentu. *Frame rate* adalah jumlah bingkai gambar atau *frame* yang ditunjukkan setiap detik dalam membuat gambar itu bergerak dan diwujudkan dalam satuan fps (*frames per second*). Semakin tinggi angka fps-nya maka semakin mulus gambar Bergeraknya,[5].

Percepatan gravitasi merupakan variabel dalam kinematika yang nilainya tinggi. Sebuah objek yang bergerak dengan percepatan gravitasi sangat sulit ditangkap kamera dengan *frame rate* yang rendah. Kamera CASIO EX-ZR200 dengan *frame rate* 1000 fps digunakan untuk merekam gerak jatuh bebas objek dalam tabung hampa udara. Video hasil perekaman tersimpan dalam jenis *file* video (.MOV). Video yang dihasilkan memiliki ukuran bingkai 224 x 64 pixels sehingga sangat bergantung pada jenis pencahayaan saat perekaman. Untuk menghasilkan video yang *frame rate*-nya 1000 fps dengan kualitas baik diperlukan jenis pencahayaan langsung dari matahari pada cuaca yang cerah sehingga video memiliki warna yang konsisten. Video dengan warna yang tidak konsisten biasanya dihasilkan karena pencahayaan lampu AC (*Alternative Current*).

Tracker

Tracker merupakan perangkat OSP (*Open Sourced Physics*) *tool Java framework*. Pelacakan objek yang dihasilkan Tracker meliputi variabel waktu, posisi, kecepatan dan percepatan dilengkapi dengan grafiknya, penyaring efek video, bingkai referensi yang dapat dimunculkan lebih dari satu, kalibrasi titik, profil garis untuk menganalisis spektra dan pola interferensi, serta model partikel dinamis, [3].

Tracker memiliki dua fitur yang dapat digunakan dalam melakukan pelacakan objek, yaitu: *manual tracking* dan *auto tracking*. Penulis menggunakan fitur *auto tracking* dalam penelitian untuk mempermudah pelacakan posisi objek terhadap waktu dalam bidang *x-y* dari suatu *frame* awal ke *frame* berikutnya. Hasil pelacakan objek berupa data posisi objek sekaligus waktu disalin dan ditempel pada lembar kerja MS Excel untuk dibuat polinomial *fitting* orde dua. *Tredline* yang dihasilkan merupakan persamaan dalam bentuk $ax^2 + bx + c$. Berdasarkan Persamaan (3),

$$a = \frac{g}{2} \quad (4)$$

Untuk menghitung nilai percepatan gravitasi dari hasil pengamatan maka berdasarkan penurunan Persamaan 4 diperoleh:

$$g = 2a \quad (5)$$

Validasi Teknik

Nilai percepatan gravitasi referensi, yaitu $9,8 \text{ m/s}^2$, digunakan untuk menghitung persentase kesalahan penggunaan teknik *video tracking* dalam kinematika.

$$\text{Persentase kesalahan (pk)} = \frac{|\bar{g} - 9,8|}{9,8} \times 100\% \tag{15}$$

Klasifikasi validasi teknik *video tracking* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi validasi teknik *video tracking*

Klasifikasi	Persentase kesalahan (%)
Valid	$pk \geq 95$
Cukup valid	$90 \geq pk \geq 95$
Belum valid	$pk \leq 90$

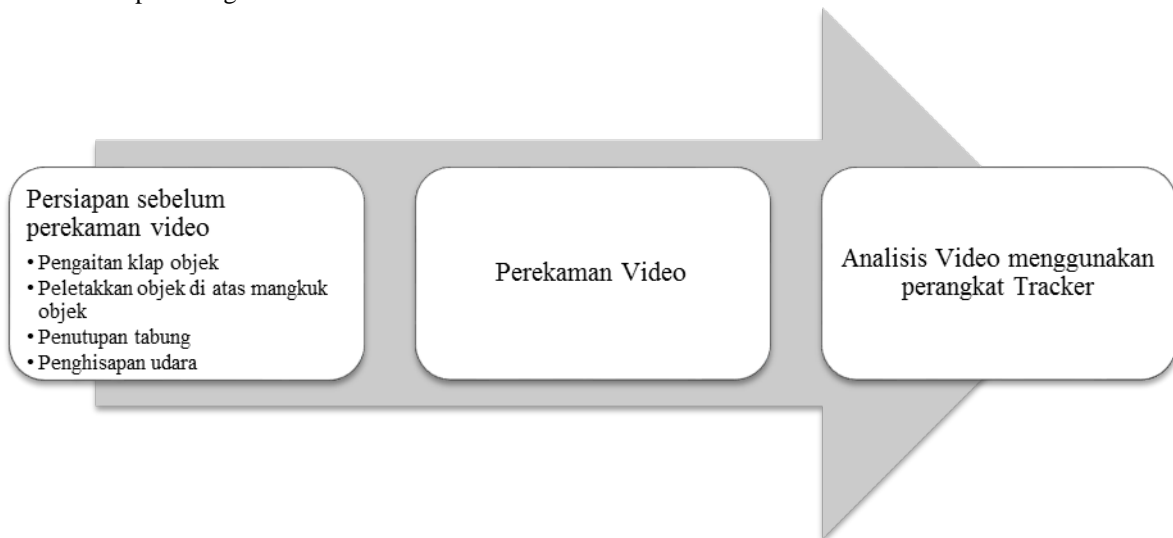
METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen. Pengamatan dilakukan menggunakan tiga objek dengan massa dan diameter yang berbeda yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Diameter dan massa objek-objek yang digunakan

Objek	Diameter (cm)	Massa (g)
1	3,940	2,32
2	3,165	30,36
3	3,155	30,51

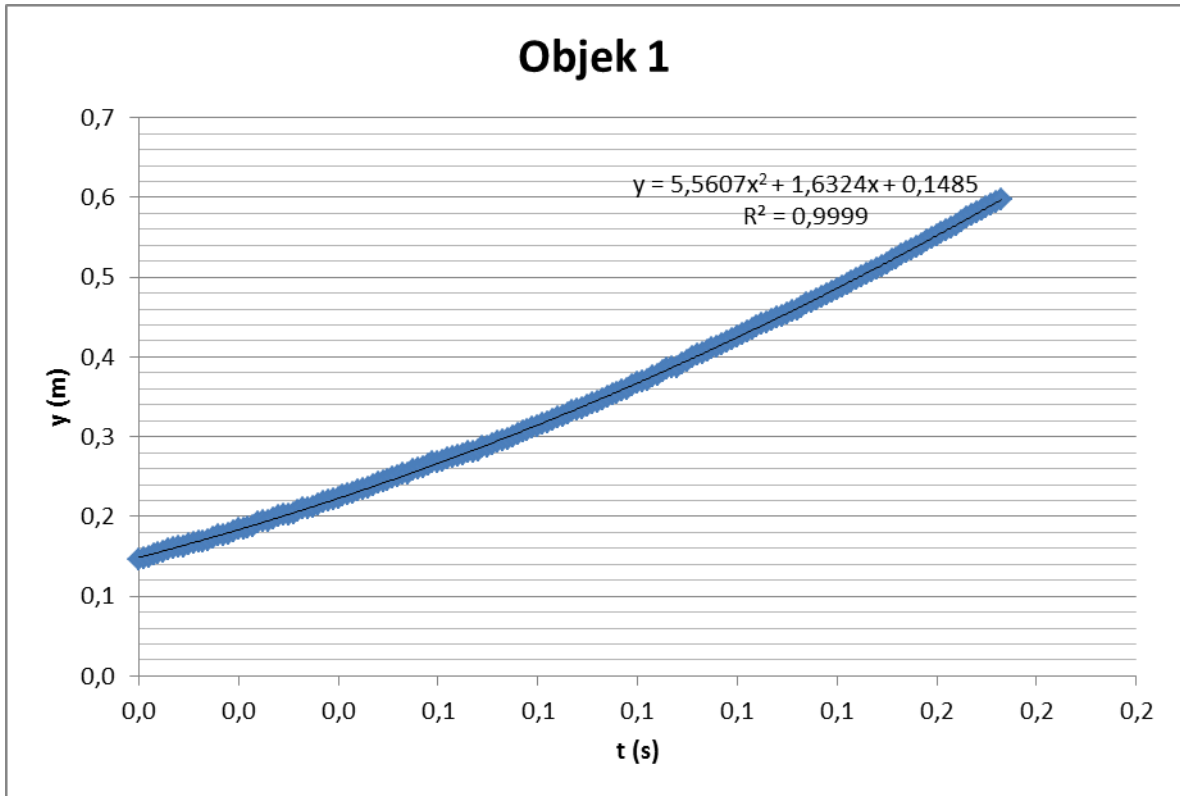
Pengambilan data untuk masing-masing objek dilakukan dua kali. Secara keseluruhan penelitian ini dilakukan seperti diagram alir berikut.



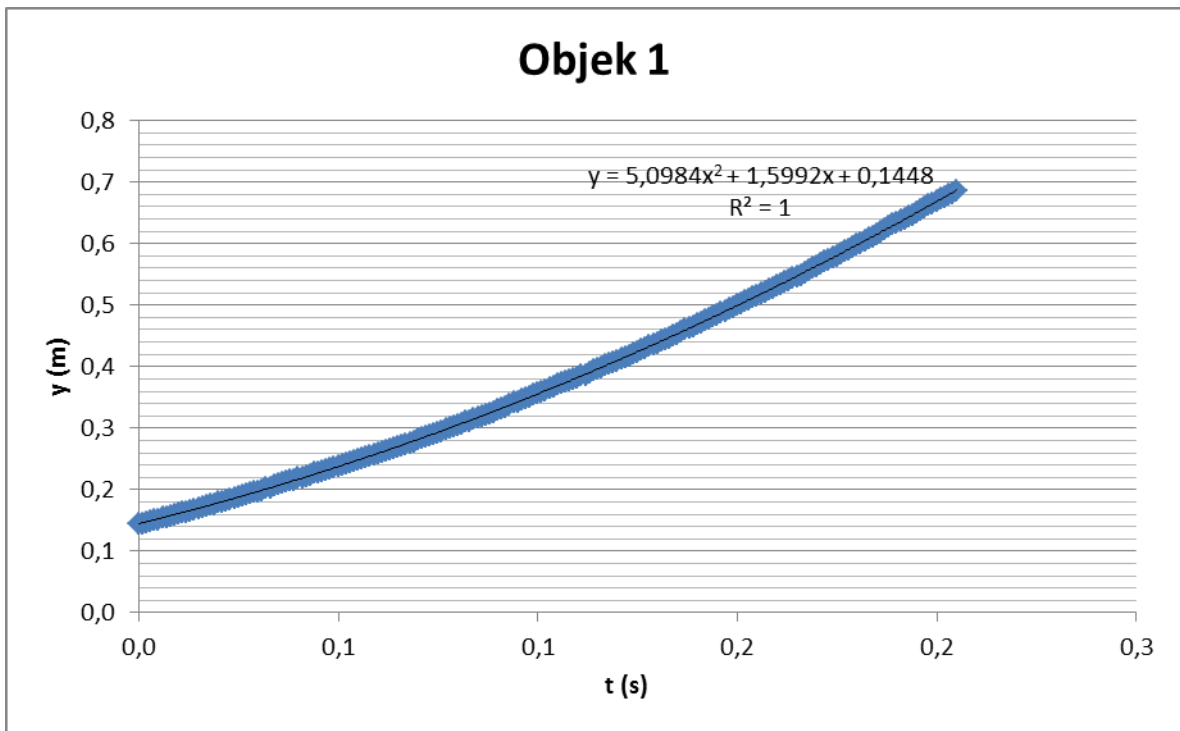
Gambar 5. Diagram alir penelitian

HASIL DAN DISKUSI

Pengambilan data setiap objek dilakukan dua kali. Hasil pengukuran nilai percepatan masing-masing objek dapat dilihat dari konstanta a yang diperoleh yang dapat dilihat pada Gambar 6, Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 6.a.

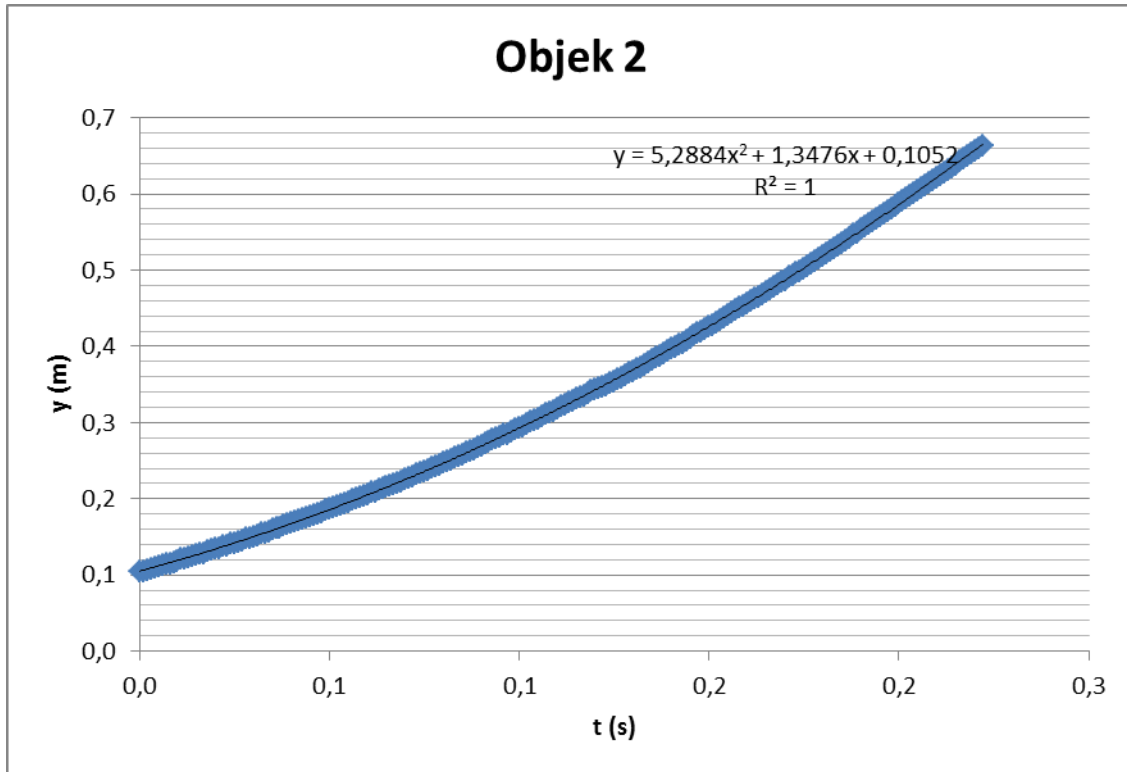


Gambar 6.b.

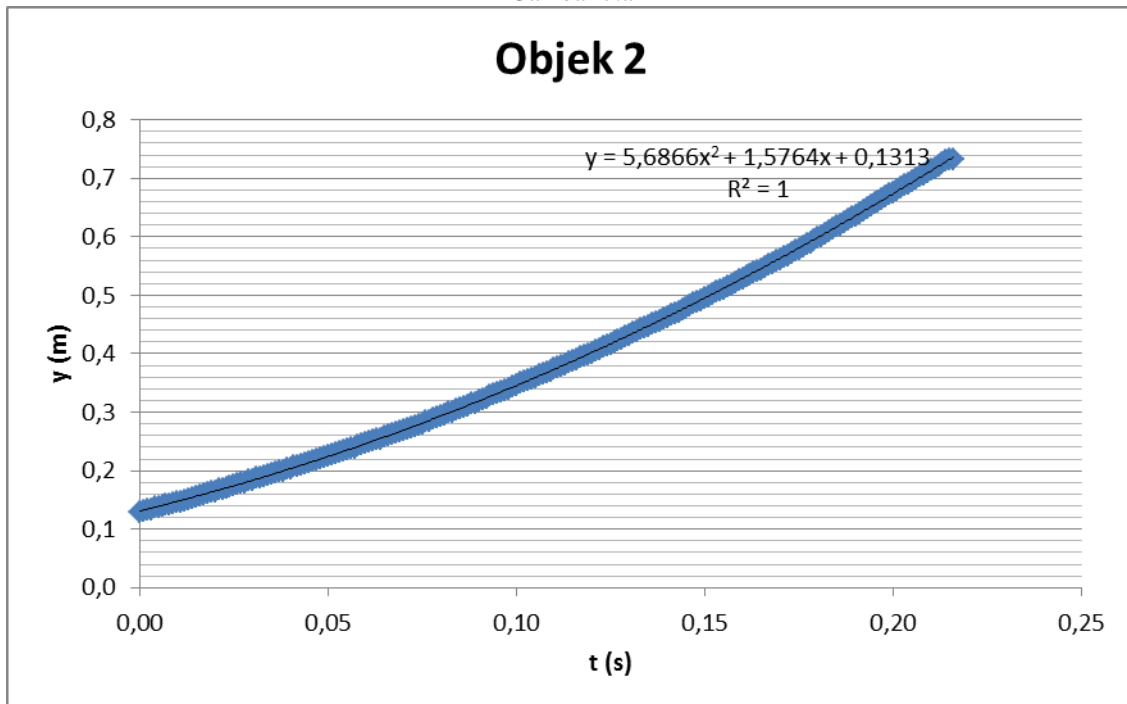
Gambar 6. Pelacakan posisi y terhadap waktu Objek 1

Gambar 6.a menunjukkan nilai konstanta $a = 5,5607$ sehingga nilai percepatan gravitasi yang terukur adalah $11,1214 \text{ m/s}^2$. Gambar 6.b menunjukkan nilai konstanta $a = 5,0984$ sehingga nilai percepatan gravitasi yang terukur adalah $10,1968 \text{ m/s}^2$. Namun, persamaan kurva $ax^2 + bx + c$ yang dihasilkan tidak

menunjukkan bahwa objek yang jatuh dalam tabung mengalami gerak jatuh bebas karena masih memiliki kecepatan awal yang dapat dilihat dari nilai konstanta b . Apabila objek mengalami gerak jatuh bebas, maka nilai konstanta b adalah nol. Hal ini disebabkan karena klap objek yang dibuat satu arah sehingga objek berputar saat jatuh di dalam tabung. Objek yang berputar seiring jatuhnya di dalam tabung menyebabkan nilai kecepatan awal objek 1 tidak sama dengan nol.



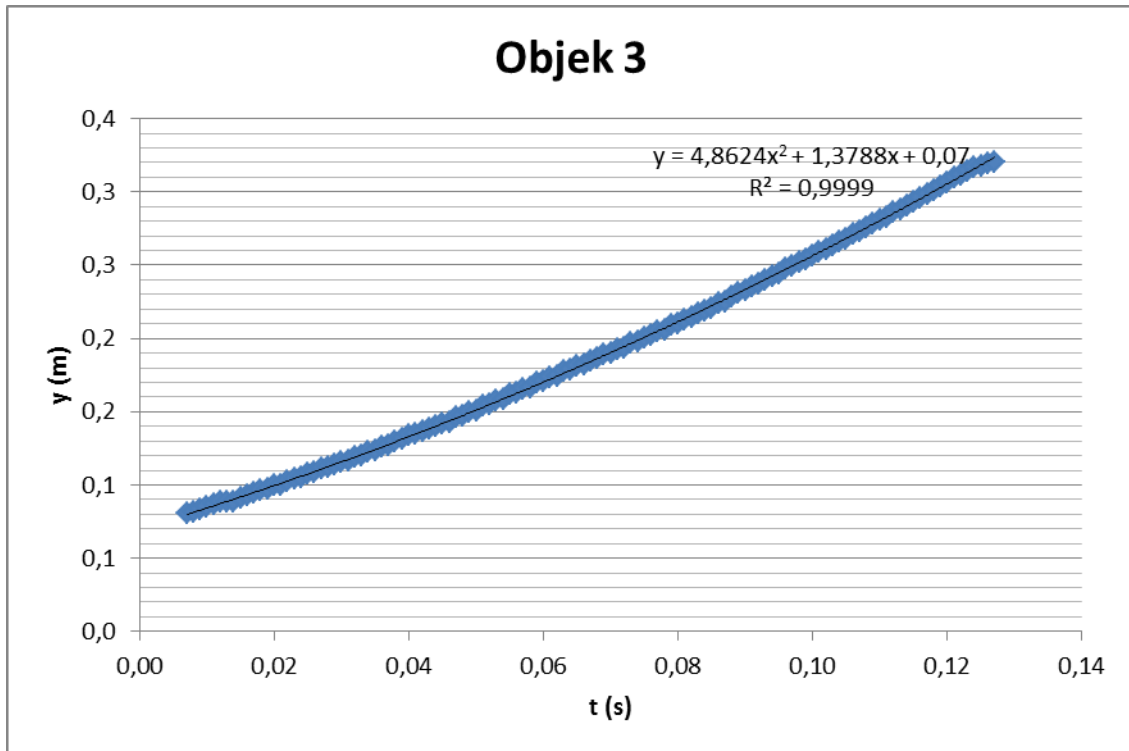
Gambar 7.a



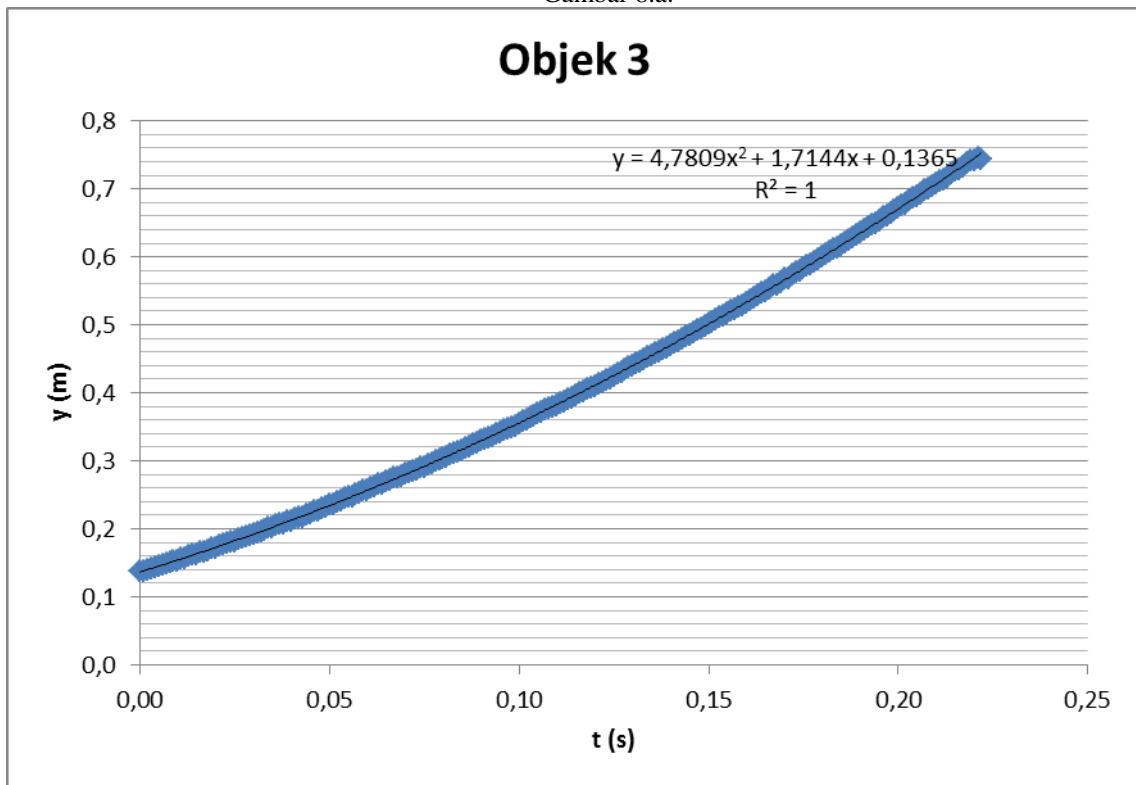
Gambar 7.b.

Gambar 7. Pelacakan posisi y terhadap waktu Objek 2

Gambar 7.a menunjukkan nilai konstanta $a = 5,2884$ sehingga nilai percepatan gravitasi yang terukur adalah $10,5768 \text{ m/s}^2$. Gambar 7.b menunjukkan nilai konstanta $a = 5,6866$ sehingga nilai percepatan gravitasi yang terukur adalah $11,3732 \text{ m/s}^2$. Hal yang sama terjadi pada objek 2, yaitu nilai konstanta b tidak bernilai nol karena pembuatan klap objek yang satu arah.



Gambar 8.a.



Gambar 8.b.

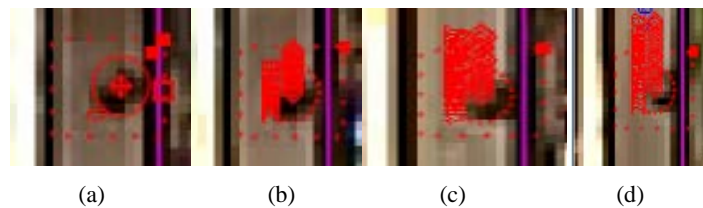
Gambar 8. Pelacakan posisi y terhadap waktu Objek 3

Gambar 8.a menunjukkan nilai konstanta $a = 4,8624$ sehingga nilai percepatan gravitasi yang terukur adalah $9,7248 \text{ m/s}^2$. Gambar 8.b menunjukkan nilai konstanta $a = 4,7809$ sehingga nilai percepatan gravitasi yang terukur adalah $9,5618 \text{ m/s}^2$. Nilai konstanta b tidak bernilai nol untuk pelacakan objek 3 karena pembuatan klap objek yang satu arah.

Hasil pengukuran percepatan gravitasi dalam tabung hampa udara dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengukuran percepatan gravitasi.

Objek	Nilai rata-rata percepatan gravitasi \bar{g} (m/s^2)	$\bar{g} - 9,8$ (m/s^2)	Persentase kesalahan (%)
1	10,659	0,859	8,766
2	10,975	1,175	11,989
3	9,6433	-0,1567	1,599
Nilai rata-rata total			7,451



Gambar 9. Salah satu *auto video tracking* objek 3. (a) *frame start* pada 0,24 detik; (b) *frame* pada 6,00 detik; (c) *frame* pada 30,94 detik; dan (d) *frame* pada 47,13 detik.

Gambar 10.a, pusat massa telah ditetapkan pada bidang $x-y$. Gambar 10.b menunjukkan bahwa pusat massa objek tidak berpindah. Gambar 10.c mulai menunjukkan pergeseran pusat massa pelacakan objek. Pada Gambar 10.d dapat dilihat bahwa pusat massa pelacakan objek sudah tidak berada pada pusat massa objek yang sesungguhnya. Fitur *auto tracking* melacak objek berdasarkan pola warna yang terekam sebagai *template* pelacakan objek pada *frame* berikutnya. Objek dijatuhkan dari klap objek yang dibuat satu arah sehingga objek berputar di dalam tabung. Pola warna awal yang terekam sebagai *template* tidak konsisten bersamaan dengan objek yang berputar di dalam tabung. Hal tersebut yang menyebabkan pergeseran pusat massa pelacakan objek. Pergeseran pusat massa menyebabkan posisi yang terdata tidak konsisten dan menghasilkan nilai percepatan gravitasi yang berbeda dengan nilai percepatan gravitasi Bumi, yaitu $9,8 \text{ m/s}^2$. Pergeseran ini tidak hanya terjadi pada salah satu video objek 3 tetapi semua video pelacakan objek dalam penelitian.

Selisih nilai percepatan gravitasi dengan hasil pengukuran menunjukkan pola pergeseran pusat massa pelacakan objek. Selisih yang bernilai positif menunjukkan pusat massa yang dilacak mendahului jatuhnya pusat massa objek karena pola warna yang dilacak oleh fitur *auto tracking* bergeser ke bawah. Selisih yang bernilai negatif menunjukkan pusat massa yang dilacak tertinggal dari gerak jatuhnya pusat massa objek karena pola warna yang dilacak oleh fitur *auto tracking* bergeser ke atas.

Adapun faktor lain yang menyebabkan data tidak konsisten adalah kapasitas kamera dalam perekaman video. Kamera Casio EX-ZR200 apabila merekam video dengan *frame rate* di atas 480 fps akan menghasilkan resolusi video yang tidak cukup baik. Resolusi video yang tidak cukup baik mengakibatkan pergeseran pusat massa objek saat pelacakan menggunakan perangkat Tracker.

Dari ketiga objek tersebut, nilai yang mendekati percepatan percepatan gravitasi adalah objek 3. Adanya kecepatan awal yang merupakan hasil analisis polinomial *curve fitting* orde dua memunculkan hipotesis bahwa kehampaan tabung dalam rentang LV masih terdapat gesekan udara. Analisis data seharusnya memperhitungkan faktor hambatan yang dirasakan objek karena ada kecepatan awal. Perbedaan massa dan diameter belum dapat dihubungkan dengan momen inersia objek dalam kasus ini. Namun, nilai rata-rata total percepatan gravitasi masih menunjukkan bahwa teknik *video tracking* cukup valid untuk dapat digunakan dalam analisis kinematika lainnya.

KESIMPULAN

Berdasarkan data ketiga objek tersebut, nilai rata-rata percepatan gravitasi yang dihasilkan adalah $10,685 \text{ m/s}^2$ dengan kesalahan $9,034\%$. Dengan teknik *video tracking*, percepatan gravitasi dapat dihitung dengan rata-rata kesalahan $< 10\%$ sehingga dapat dikatakan teknik *video tracking* cukup valid dan dapat digunakan untuk melakukan analisis kinematika lainnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini. Pengambilan data dilakukan di lingkungan Institut Teknologi Bandung.

REFERENSI

1. C. Sirisathitkul, *dkk, Digital video analysis of falling objects in air and liquid using Tracker. Jurnal(2013)*, <http://www.sbfisica.org.br>, diunduh pada 27 November 2015.
2. D. Gurarie, *Free fall and flight withy friction: parachut jump and volleyball serve*. Catatan kuliah, <http://www.cwru.edu/artsci/math/gurarie/classes/224/Notes/flight-w-fric.pdf>., diunduh pada 7 Januari 2016.
3. Douglas, *Tracker Help. Buku panduan*, <http://www.opensourcephysics.org>., diunduh pada 2 Oktober 2014.
4. H. Verlag, *The Vacuum Technology Book*. Vieweg Verlag publishing companies, http://www.triumf.ca/sites/default/files/lecture_vac_Pfeiffer-Vacuum-Technology-KnowHow.pdf., diunduh pada 7 Januari 2016.
5. Piu, *Apa itu Frame per Second (FPS) dalam gambar, video, dan game* Webpage, <http://renacesta.net/apa-itu-fps-pengertian-frame-per-second-fps-dalam-gambar-video-dan-game/>., diakses pada 7 Januari 2016.