

# Penentuan momen inersia benda tegar menggunakan metode osilasi bandul fisis berbasis mikrokontroler

P Indriana<sup>1a</sup>, I Wirawati<sup>1b</sup>, dan E Rahmawati<sup>1c</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Surabaya  
Jalan Ketintang, Surabaya 60231, Indonesia

<sup>a</sup>putriindriana@mhs.unesa.ac.id, <sup>b</sup>isnawirawati@mhs.unesa.ac.id, dan  
<sup>c</sup>e.rahmawati@gmail.com

**Abstrak.** Penelitian ini bertujuan untuk menentukan momen inersia benda tegar menggunakan kit bandul fisis hasil rancangan berbasis mikrokontroler. Penelitian penentuan momen inersia dilakukan dengan dua metode pengolahan data. Pertama, penentuan momen inersia menggunakan metode osilasi bandul fisis. Kedua, penentuan momen inersia pada pusat gravitasi berdasarkan rumus. Pada perancangan alat difokuskan untuk mengukur nilai periode ayunan menggunakan sensor rotary encoder. Selanjutnya data periode yang diperoleh diolah untuk menentukan nilai momen inersia pada pusat gravitasi benda. Untuk mengetahui pengaruh periode osilasi maka besar sudut simpangan yang diberikan diatur mulai sudut  $5^\circ$  sampai  $20^\circ$ . Benda uji berbentuk batang (*slander rod*) dengan massa, bahan, dan dimensi berbeda. Hasil penentuan momen inersia menggunakan metode pertama dibandingkan dengan metode kedua. Nilai kesalahan maksimal penentuan momen inersia ( $I_{cg}$ ) pada benda berbentuk batang (*slander rod*) 8,35 % sebesar  $0,001541\text{kgm}^2$  dan nilai kesalahan terendah 0,90 % sebesar  $0,002658\text{kgm}^2$ . Pada grafik hubungan sudut simpangan ( $^\circ$ ) dan  $I_{cg}$  ( $\text{kgm}^2$ ) dapat disimpulkan bahwa momen inersia ( $I_{cg}$ ) tidak bergantung pada periode ( $T$ ). Meskipun momen inersia ( $I_{cg}$ ) dapat ditentukan dengan data periode ( $T$ ) dari osilasi.

## 1. Pendahuluan

Pembelajaran fisika yang sering disampaikan secara teori dan rumus terkadang sulit untuk difahami sehingga menimbulkan rasa bosan dan kurang efektif. Untuk menciptakan motivasi baru yang tidak membosankan dalam pembelajaran fisika maka perlu adanya media penunjang pembelajaran. Tentunya dapat mendorong minat siswa untuk belajar fisika.

Salah satu solusi dengan pengembangan media penunjang pembelajaran yaitu dengan alat peraga atau KIT. Penggunaan media tersebut dapat membantu memahami materi yang diberikan. Sebagai contoh untuk materi mekanika telah dikembangkan alat praktikum berupa pendulum yang diantaranya dapat untuk menentukan gravitasi, periode, momen inersia dan kecepatan peluru pada pendulum balistik.

Sistem gerak pada pendulum memiliki kelebihan dalam hal pelaksanaan pengambilan data dan bahan mudah didapat. Pada umumnya pengambilan data dan percobaan pada pendulum adalah periode osilasi. Periode osilasi dapat diukur secara manual yaitu dengan menggunakan *stopwatch* [2]. Periode osilasi juga dapat diukur secara otomatis menggunakan sensor cahaya, dimana ketika pendulum melewati sensor sebanyak 3 kali maka akan dihitung 1 periode. Pada perancangan bandul fisis dengan pencatat waktu otomatis yang ditampilkan nilai periode ke LCD dan diperoleh nilai *error*

sebesar 1,37% (Rusmawati, 2010). Pengukuran periode osilasi dengan sinyal analog melalui *microphone port* pada komputer untuk menentukan nilai gravitasi menggunakan *photodiode* dengan kesalahan pengukuran hanya sebesar 0,1%. Kendala yang dialami adalah pada sistem mekanik yang stabil dan ketepatan pengukuran periode [5].

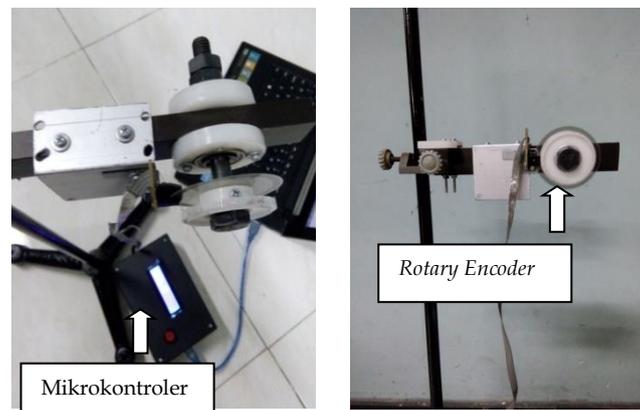
Pasco sebagai produsen alat peraga laboratorium atau alat praktikum juga telah menyediakan KIT percobaan momen inersia menggunakan osilasi pendulum. Pada KIT tersebut dilengkapi bandul yang berbeda-beda kemudian dicari momen inersia pada masing-masing benda.

Penulis termotivasi untuk membuat suatu alat atau media pembelajaran serupa dengan *pasco* berbasis mikrokontroler. Tentunya diharapkan dapat menjadi alternatif yang dapat digunakan untuk pembelajaran pada bidang mekanika khususnya momen inersia. Motivasi lain pada percobaan ini adalah tersedianya KIT percobaan dengan biaya yang relatif lebih terjangkau. Selain itu jika ada kendala dalam teknis pengoprasian, kerusakan, dan perawatan dapat dilaksanakan secara mandiri.

Penulis termotivasi membuat KIT yang memiliki kegunaan serupa dengan Pasco berbasis mikrokontroler. Diharapkan dapat menjadi alternatif untuk pembelajaran pada bidang mekanika khususnya momen inersia. Sistem pendulum pada penelitian ini memanfaatkan sensor *rotary encoder*. Sensor *rotary encoder* dapat merekam posisi sudut dari gerak osilasi pendulum dalam setiap mikrosekon oleh mikrokontroler Arduino melalui *USB port* ke komputer. Data yang diperoleh akan diolah menjadi bentuk kurva non-linier. Dengan KIT yang sederhana dan biaya yang relatif murah, metode osilasi menggunakan sensor *rotary encoder* dapat digunakan untuk eksperimen menentukan momen inersia. Dengan hanya memanfaatkan tegangan sebesar 5,5V dari komputer.

## 2. Metode Penelitian

KIT bandul fisis yang telah dibuat dan diuji pada penelitian ini terdiri dari sistem mekanik, sistem elektrik, dan benda uji. Sistem mekanik terdiri dari statif sebagai tiang penopang kit pendulum. Pada statif terdapat poros yang dapat berputar, dimana pada poros ini dipasang *rotary encoder* dan digantungkan benda uji. Sensor dan benda uji berada pada satu poros yang bertujuan untuk memiliki arah gerak yang sama seperti yang dapat dilihat pada gambar 1.



**Gambar 1** Sistem KIT bandul fisis.

Sistem elektrik terdiri dari sensor *rotary encoder* yang terhubung ke mikrokontroler. Sensor *rotary encoder* digunakan untuk mengetahui posisi bandul tiap waktu sehingga dapat diperoleh data berupa sinyal osilasi. Data periode dari tiga osilasi pertama yang dialami bandul dirata-rata untuk memperoleh data periode. Periode ditentukan dengan cara memberikan simpangan agar benda uji dapat berosilasi. Sebelum digunakan *rotary encoder* dikalibrasi dengan cara membandingkan dengan putaran sudut motor *stepper*. Kalibrasi dilakukan dengan cara memasang sensor *rotary encoder* dan motor *stepper* pada satu poros, lalu menjalankan motor *stepper* pada sudut tertentu mulai 30° sampai 360° dengan kenaikan tiap 30°. Data kalibrasi ditampilkan pada tabel 1.

Benda uji dipilih yang secara teori momen inersianya dapat dihitung menggunakan persamaan yang telah diketahui misalkan batang (*slander rod*). Hasil perhitungan secara teori digunakan sebagai pembanding. Berikut adalah gambar dari benda uji yang dipakai:

**Tabel 1.** Benda uji.

Benda Uji	Gambar Benda Uji	Keterangan
1		Massa : 0,118200 kg Panjang : 0,38 m Bahan : besi Bentuk : batang ( <i>slander rod</i> )
2		Massa : 0,115146 kg Panjang : 0,524 m Bahan : penggaris 50cm Bentuk : batang ( <i>slander rod</i> )
3		Massa : 0,077912 kg Panjang : 0,48 m Bahan : stainless pagar Bentuk : batang ( <i>slander rod</i> )

Setiap penentuan momen inersia benda uji disimpangkan sebesar  $\phi$  lalu dilepaskan sehingga terjadi osilasi. Posisi pendulum dalam sudut setiap waktu terekam pada PC, sehingga dapat diperoleh periode osilasi pendulum. Periode osilasi yang diambil adalah 3 periode awal. Percobaan dengan pengulangan simpangan yang sama dilakukan sebanyak 5 kali. Percobaan diulang untuk  $\phi$  yang berbeda (mulai  $5^\circ$  sampai  $20^\circ$ ). Cara yang sama dilakukan untuk pengambilan data periode tiga benda uji lainnya. Hasil pengukuran periode selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai momen inersia ( $I_{cg}$ ) untuk masing-masing benda uji dengan menerapkan persamaan

$$I_{cg} = \frac{T^2 MgL}{4\pi^2} - ML^2 \tag{1}$$

Untuk simpangan yang kecil gaya pemulih sebanding dengan simpangan dan berlawanan arah. Ini tidak lain dari pada kriteria gerak harmonik sederhana. Jadi periode bandul sederhana untuk amplitudo kecil adalah

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{mg/l}} \text{ atau } T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \tag{2}$$

Pada persamaan bandul sederhana massa benda yang digantungkan tidak berpengaruh terhadap nilai periode setiap ayunan. Untuk amplitudo atau sudut simpangan yang besar, maka perumusan periode osilasi adalah sebagai berikut :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left( 1 + \frac{1}{2^2} \sin^2 \frac{\phi_0}{2} + \frac{1}{2^2} \frac{3^2}{4^2} \sin^4 \frac{\phi_0}{2} + \dots \right) \tag{3}$$

### 3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Kalibrasi sensor *rotary encoder* dengan motor *stepper* dilakukan untuk mengetahui nilai sudut yang akurat. Hasil kalibrasi sensor *rotary* dan motor *stepper* seperti pada Tabel 2.

**Tabel 2** Hasil kalibrasi sensor *rotary encoder* dan motor *stepper*.

Sudut (°)	Rata-rata data counter	Sudut (°) dengan busur	Selisih sudut (°)	Error (%)
30	356,60	29,73	0,27	0,08
60	718,80	59,93	0,07	0,01
90	1074,00	89,55	0,45	0,04
120	1437,80	119,88	0,12	0,01
150	1796,60	149,79	0,21	0,01
180	2155,20	179,69	0,31	0,01
210	2512,40	209,47	0,53	0,02
240	2877,20	239,89	0,11	0,00
270	3236,60	269,85	0,15	0,00
300	3596,80	299,89	0,11	0,00
330	3957,20	329,93	0,07	0,00
360	4317,80	360,00	0,00	0,00

Data hasil pengukuran periode digunakan untuk menentukan nilai momen inersia ( $I_{cg}$ ) untuk masing-masing benda uji yang ditampilkan pada tabel 3, 4, dan 5. Momen inersia teori ( $I_{cg}$  teori) adalah momen inersia yang diperoleh dari persamaan berikut:

$$I_{cg} = \frac{1}{12}ML^2 \text{ untuk batang (slander rod)}$$

$$I_{cg} = \frac{1}{2}MR^2 \text{ untuk cakram}$$

sedangkan momen inersia alat ( $I_{cg}$  alat) adalah momen inersia yang diperoleh dari pengolahan data dengan menerapkan persamaan

$$I_{cg} = \frac{T^2MgL_{cg}}{4\pi^2} - ML_{cg}^2 \text{ untuk batang (slander rod)}$$

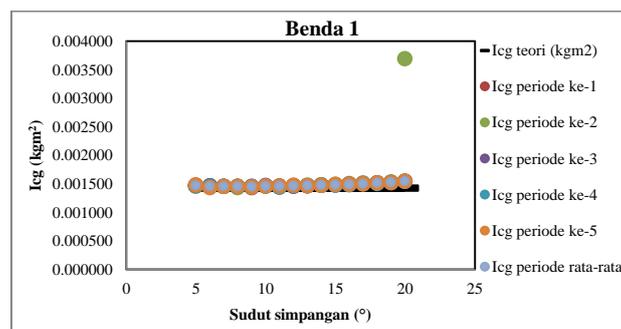
$$I_{cg} = \frac{T^2MgR}{4\pi^2} - MR^2 \text{ untuk cakram}$$

Pengukuran momen inersia pada pusat gravitasi ( $I_{cg}$ ) untuk benda 1 dimulai dari sudut simpangan  $5^\circ$  sampai sudut simpangan  $20^\circ$  dengan nilai periode (T) sebagai berikut :

**Tabel 3** Pengukuran momen inersia pada pusat gravitasi ( $I_{cg}$ ) benda 1.

		M= 0,118200 kg	L= 0,38 m		
Sudut (°)	Lcg (m)	Rata-rata T (s)	Icg teori (kgm <sup>2</sup> )	Icg alat (kgm <sup>2</sup> )	Error (%)
5	0,19	1,014	0,001422	0,001472	3,48
6	0,19	1,012	0,001422	0,001452	2,10
7	0,19	1,012	0,001422	0,001451	2,01
8	0,19	1,012	0,001422	0,001452	2,10
9	0,19	1,011	0,001422	0,001445	1,57
10	0,19	1,012	0,001422	0,001458	2,51
11	0,19	1,012	0,001422	0,001456	2,37
12	0,19	1,012	0,001422	0,001461	2,73
13	0,19	1,012	0,001422	0,001467	3,14
14	0,19	1,012	0,001422	0,001473	3,58
15	0,19	1,013	0,001422	0,001480	4,07
16	0,19	1,013	0,001422	0,001488	4,60
17	0,19	1,013	0,001422	0,001498	5,34
18	0,19	1,014	0,001422	0,001512	6,28
19	0,19	1,014	0,001422	0,001524	7,13
20	0,19	1,015	0,001422	0,001541	8,35

Pengambilan data dilakukan mulai  $\phi = 5^\circ$ . Untuk  $\phi < 5^\circ$ , osilasi pendulum cenderung cepat teredam sehingga tidak dapat diperoleh data periode osilasi. Perbandingan antara  $I_{cg}$  teori dan  $I_{cg}$  alat ditampilkan pada gambar 2.



**Gambar 2** Grafik hubungan sudut simpangan (°) dan  $I_{cg}$  (kgm<sup>2</sup>) pada benda.

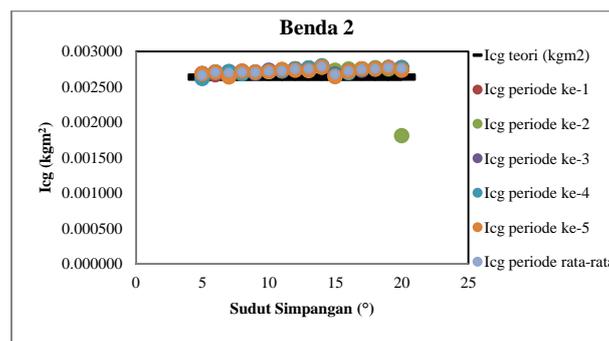
*Error* relatif terhadap teori adalah 1,57 % sampai dengan 8,35 %. Hal tersebut dikarenakan pengukuran periode untuk sudut simpangan yang besar memerlukan koreksi seperti pada persamaan (3). Gambar 2 merupakan grafik dari hasil 5 pengulangan pengambilan data periode pada setiap sudut simpangan.

Pengukuran momen inersia pada pusat gravitasi ( $I_{cg}$ ) untuk benda 2 dimulai dari sudut simpangan  $5^\circ$  sampai sudut simpangan  $20^\circ$  dengan nilai periode (T) sebagai berikut :

**Tabel 4** Pengukuran momen inersia pada pusat gravitasi ( $I_{cg}$ ) benda 2.  
 $M = 0,115146 \text{ Kg}$                        $L = 0,52 \text{ m}$

Sudut ( $^{\circ}$ )	Lcg (m)	Rata-rata T (s)	Icg teori ( $\text{kgm}^2$ )	Icg alat ( $\text{kgm}^2$ )	Error (%)
5	0,262	1,187	0,002635	0,002658	0,90
6	0,262	1,189	0,002635	0,002698	2,40
7	0,262	1,189	0,002635	0,002695	2,30
8	0,262	1,190	0,002635	0,002705	2,65
9	0,262	1,189	0,002635	0,002697	2,37
10	0,262	1,190	0,002635	0,002719	3,21
11	0,262	1,191	0,002635	0,002721	3,29
12	0,262	1,192	0,002635	0,002746	4,24
13	0,262	1,192	0,002635	0,002747	4,28
14	0,262	1,194	0,002635	0,002779	5,47
15	0,262	1,188	0,002635	0,002669	1,30
16	0,262	1,190	0,002635	0,002715	3,06
17	0,262	1,192	0,002635	0,002740	4,01
18	0,262	1,192	0,002635	0,002751	4,41
19	0,262	1,193	0,002635	0,002765	4,96
20	0,262	1,192	0,002635	0,002755	4,55

Pengambilan data dilakukan mulai  $\phi = 5^{\circ}$ . Untuk  $\phi < 5^{\circ}$ , osilasi pendulum cenderung cepat teredam sehingga tidak dapat diperoleh data periode osilasi. Perbandingan antara  $I_{cg}$  teori dan  $I_{cg}$  alat ditampilkan pada gambar 3.



**Gambar 3** Grafik hubungan sudut simpangan ( $^{\circ}$ ) dan  $I_{cg}$  ( $\text{kgm}^2$ ) pada benda 2.

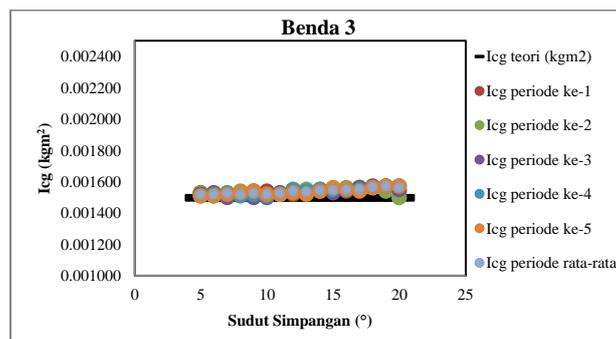
*Error* relatif terhadap teori adalah 0,90 % sampai dengan 5,47 %. Hal tersebut dikarenakan pengukuran periode untuk sudut simpangan yang besar memerlukan koreksi seperti pada persamaan (3). Gambar 3 merupakan grafik dari hasil 5 pengulangan pengambilan data periode pada setiap sudut simpangan.

Pengukuran momen inersia pada pusat gravitasi ( $I_{cg}$ ) pada benda 3 dimulai dari sudut simpangan  $5^{\circ}$  sampai sudut simpangan  $20^{\circ}$  dengan nilai periode (T) sebagai berikut:

**Tabel 5** Pengukuran momen inersia pada pusat gravitasi ( $I_{cg}$ ) benda 3  
 $M = 0,077912 \text{ kg}$      $L = 0,48 \text{ m}$ .

Sudut ( $^{\circ}$ )	Lcg (m)	Rata-rata T (s)	Icg teori ( $\text{kgm}^2$ )	Icg alat ( $\text{kgm}^2$ )	Error (%)
5	0,24	1,138	0,001496	0,001517	1,41
6	0,24	1,137	0,001496	0,001519	1,55
7	0,24	1,138	0,001496	0,001525	1,97
8	0,24	1,137	0,001496	0,001517	1,41
9	0,24	1,138	0,001496	0,001525	1,97
10	0,24	1,139	0,001496	0,001519	1,55
11	0,24	1,139	0,001496	0,001525	1,97
12	0,24	1,139	0,001496	0,001538	2,82
13	0,24	1,140	0,001496	0,001536	2,68
14	0,24	1,140	0,001496	0,001544	3,25
15	0,24	1,140	0,001496	0,001547	3,39
16	0,24	1,141	0,001496	0,001549	3,53
17	0,24	1,142	0,001496	0,001551	3,67
18	0,24	1,141	0,001496	0,001564	4,52
19	0,24	1,138	0,001496	0,001570	4,95
20	0,24	1,137	0,001496	0,001561	4,38

Pengambilan data dilakukan mulai  $\phi = 5^{\circ}$ . Untuk  $\phi < 5^{\circ}$ , osilasi pendulum cenderung cepat teredam sehingga tidak dapat diperoleh data periode osilasi. Perbandingan antara  $I_{cg}$  teori dan  $I_{cg}$  alat ditampilkan pada gambar 4.



**Gambar 4** Grafik hubungan sudut simpangan ( $^{\circ}$ ) dan  $I_{cg}$  ( $\text{kgm}^2$ ) untuk benda 3

Error relatif terhadap teori adalah 1,41 % sampai dengan 4,95 %. Hal tersebut dikarenakan pengukuran periode untuk sudut simpangan yang besar memerlukan koreksi seperti pada persamaan (3). Gambar 4 merupakan grafik dari hasil 5 pengulangan pengambilan data periode pada setiap sudut simpangan.

#### 4. Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dirancang KIT bandul fisis untuk menentukan momen inersia pada pusat gravitasi pada suatu benda. Benda yang diuji yaitu 3 bentuk batang (*slander rod*). Penentuan nilai



momen inersia ( $I_{cg}$ ) dilakukan melalui pengukuran nilai periode ( $T$ ) dengan sudut simpangan ( $\phi$ ), panjang benda ( $L$ ) dan massa benda ( $M$ ) dibuat tetap.

Hasil penentuan nilai momen inersia ( $I_{cg}$ ) memiliki nilai kesalahan maksimal penentuan momen inersia ( $I_{cg}$ ) pada benda berbentuk batang (*slender rod*) Nilai kesalahan maksimal penentuan momen inersia ( $I_{cg}$ ) pada benda berbentuk batang (*slender rod*) 8,35% sebesar 0,001541kgm<sup>2</sup> dan nilai kesalahan terendah 0,90% sebesar 0,002658 kgm<sup>2</sup>.

Momen inersia ( $I_{cg}$ ) tidak dipengaruhi oleh periode ( $T$ ) maupun sudut simpangan ( $\phi$ ). Momen inersia ( $I_{cg}$ ) yang diperoleh dari alat cenderung lebih besar dari teori. Meskipun demikian tidak ada pola tertentu yang menunjukkan hubungan momen inersia ( $I_{cg}$ ) terhadap periode ( $T$ ). Sehingga sesuai dengan teori bahwa momen inersia ( $I_{cg}$ ) tidak bergantung pada periode ( $T$ ). Meskipun momen inersia ( $I_{cg}$ ) dapat ditentukan dengan data periode ( $T$ ) dari osilasi.

Pengembangan sistem gerak bandul fisis untuk menentukan momen inersia benda tegar telah dilakukan untuk pembelajaran fisika. Hambatan yang ditemui adalah kesulitan dalam sistem mekanik yang ideal. Peredaman osilasi yang terekam oleh sensor sampai osilasi berhenti. Karakteristik benda uji yang sulit untuk disesuaikan terhadap massa dan ketebalan benda.

Jika massa terlalu ringan maka osilasi mudah teredam sehingga kit bandul fisis tidak mampu merekam data karena mudah dipengaruhi oleh gerak angin. Jika ketebalan benda terlalu tebal akan mempengaruhi osilasi sehingga mudah teredam dikarenakan benda memiliki gaya gesek yang besar terhadap udara. Sehingga diperlukan benda uji dengan karakteristik homogen, tipis, dengan massa yang relatif besar.

Pada KIT bandul fisis yang telah dibuat dapat diaplikasikan untuk beberapa pengukuran lain. Selain untuk pengukuran momen inersia, KIT juga dapat dikembangkan untuk menentukan gravitasi, periode pada panjang lengan yang berbeda dan momen inersia pada titik benda yang berbeda.

## Referensi

- [1] Wicaksono A dan Susanto I D W 2014 Sistem Otomasi Penggerak Kamera dengan Motor Step Sebagai Alat Bantu Kalibrasi Alat Ukur Panjang *J. Oto. Ktrl. Inst.* **6 (2)** 105
- [2] Aguiar C E dan Pereire M M 2011 Using the Sound Card as a Timer *Phys. Teach.* **49** 33
- [3] Akihiro O 2016 Angular Velocity Calibration System With a Self-Calibratable Rotary Encoder *Scientific Direct Measurement* **82** 246
- [4] Hans H S dan Puri S P 2003 *Mechanics Second Edition* (New Delhi: McGraw-Hill Company Limited)
- [5] Khairurrijal, Widiatmoko E, Srigutomo W, dan Kurniasih N 2012 Measurement of Gravitational Acceleration Using a Computer Microphone Port *Phys. Educ.* **47** 709
- [6] Ng, T. W., and K. T. Ang. 2005. The Optical Mouse for Harmonic Oscillator Experimentation *American Association of Physics Theacher* **73** 793
- [7] Saroyo G A 2002 *Mekanika* (Jakarta: Salemba Teknik)
- [8] Scientific P 1998 *Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO Physical Pendulum Set Model ME: 9833* (Canada: Pasco)
- [9] Sigit R 2007 *Robotika, Sensor dan Aktuator Persiapan Lomba Kontes Robot Indonesia dan Kontes Robot Cerdas Indonesia Edisi Pertama* (Yogyakarta: Graha Ilmu)
- [10] Susilo A, Yuniarto M, dan Variansi V I 2012 Simulasi Gerak Harmonik Sederhana dan Osilasi Teredam pada Cassy-E 524000 *Indon. J. Appl. Phys.* **2(2)** 124
- [11] Tipler P A 1998 *Fisika Untuk Sains dan Teknik* (Jakarta: Erlangga)
- [12] Torzo G dan Peranzoni P 2009 The Real Pendulum: Theory, Simulation, Experiment *Phys. Educ.* **3 (2)** 221
- [13] Vadas G dan Hübler A 2009 A Simple, Low Cost, Data-Logging Pendulum Built from a Computer Mouse *Phys. Educ.* **44 (5)** 488