# PENENTUAN MOMEN INERSIA BENDA TEGAR (*SLANDER ROD*) MENGGUNAKAN METODE OSILASI BANDUL FISIS BERBASIS MIKROKONTROLER

Oleh : Putri Indriana
MA Darussalam Krempyang Nganjuk
E-mail: putryrose.indriana@gmail.com

***Abstract:*** *This study aims to determine the moment of inertia of a rigid object by using physical pendulum kit results microcontroller-based design. Determination research of the moment of inertia is conducted with two different methods of data processing. Firstly, the pendulum system used is a physical pendulum, it is said by physical pendulum is a rigid object freely oscillates at a particular axis. Secondly, the calculation of the moment inertia at the center of gravity based on the moment of inertia formula in rigid object's center of gravity. In the design of tools focused on measuring the value of the swing period using the rotary encoder sensor. Furthermore, period data obtained are processed to determine the value of the moment of inertia at the center of gravity of the object. To determine the effect of a given large deviation angle then on every object manipulation angle from 5 ° to 30 °. The test object consists of two forms of the stem (slander rod) with different of mass, materials, and lengths. With the acceleration of gravity is 9.80 m/s$^2$, obtained the value of the moment of inertia at the center of gravity using formulas 2.9 and compared with theory. The maximum error value determination of the moment of inertia ($I_{cg}$) on the rod-shaped object (slander rod) 7.36% amounting to 0.002285 kgm$^2$ on objects 2 and the lowest error value 0.69% of 0.002143 kgm$^2$ on the object 2. In the graph of deviation angle (°) and $I_{cg}$ (km$^2$) can be concluded that the greater the value of the given angle deviation gives the value of moment of inertia at the center of gravity that tends to rise.*
***Keywords*** *: Moment of Inertia, Physical Pendulum, Rotary Encoder Sensor, Period*

**Abstrak:** Penelitian ini bertujuan menentukan momen inersia benda tegar menggunakan kit bandul fisis hasil rancangan berbasis mikrokontroler. Penelitian penentuan momen inersia dilakukan dengan dua metode pengolahan data yang berbeda. Pertama, sistem pendulum yang digunakan merupakan bandul fisis, dikatakan bandul fisis yaitu suatu benda tegar yang berosilasi bebas pada sumbu tertentu. Kedua, perhitungan momen inersia pada pusat gravitasi berdasarkan rumus momen inersia pada pusat gravitasi benda tegar. 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 besar sudut

simpangan yang diberikan maka pada setiap benda dilakukan manipulasi sudut dari 5° sampai 30°. Benda uji terdiri dari 2 bentuk batang (*slander rod*) dengan massa, bahan, dan panjang yang berbeda. Dengan percepatan gravitasi adalah 9,80 m/s$^2$, didapatkan nilai momen inersia pada pusat gravitasi menggunakan rumus 2.9 dan dibandingkan dengan teori. nilai kesalahan maksimal penentuan momen inersia ($I_{cg}$) pada benda berbentuk batang (*slander rod*) 7,36 % sebesar 0,002285 kgm$^2$ pada benda 2 dan nilai kesalahan terendah 0,69 % sebesar 0,002143 kgm$^2$ pada benda 2. Pada grafik hubungan sudut simpangan (°) dan $I_{cg}$ (km$^2$) dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai simpangan sudut yang diberikan memberikan nilai momen inersia pada pusat gravitasi yang berkecenderungan naik.
**Kata Kunci** : momen inersia, bandul fisis, sensor *rotary encoder*, periode

## PENDAHULUAN

Pembelajaran fisika untuk materi mekanika telah dikembangkan sebagai contoh alat praktikum berupa pendulum yang diantaranya untuk menentukan periode, gravitasi, kecepatan peluru dan momen inersia 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*.[1] Pengukuran periode osilasi dengan sinyal analog melalui *microphone port* pada komputer untuk menentukan nilai gravitasi menggunakan *photodioda* dengan kesalahan pengukuran hanya sebesar 0,1%. Kendala yang dialami adalah pada sistem mekanik yang stabil dan ketepatan pengukuran periode.[2]

*Pasco* sebagai produsen alat peraga laboratorium 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.

---

[1] Aguiar, C. E., and M. M. Pereire. *Using the sound card as a timer*. *Physics Teacher*,2011, Vol.49, pp. 33-35.

[2] Khairurrijal, Eko Widiatmoko, Wahyu Srigutomo, and Neny Kurniasih. *Measurement of gravitational acceleration using a computer microphone port*. *Physics Education*, 2012, Vol.47, pp. 709-713

Penulis termotivasi membuat KIT yang memiliki kegunaan serupa dengan *Pasco* berbasis Mikrokontroler. Diharapkan dapat menjadi alternatif untuk pembelajaran pada bidang makanika khususnya momen inersia. Sistem pendulum pada penelitian ini menggunakan sensor *rotary encoder* yang merekam posisi sudut pada gerak pendulum setiap mikrosekon oleh mikrokontroler Arduino menggunakan *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.

Berdasarkan pemaparan pada bagian latar belakang, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana merancang KIT bandul fisis untuk percobaan menentukan momen inersia pada benda ?
2. Bagaimana hasil pengujian bandul fisis untuk menentukan momen inersia benda ?

Berdasarkan rumusan masalah pada penelitian ini maka ditetapkan tujuan penelitian sebagai berikut :

1. Mendeskripsikan KIT bandul fisis hasil rancangan dan cara menentukan momen inersia pada benda
2. Mendeskripsikan hasil pengujian bandul fisis untuk menentukan momen inersia pada benda

Penelitian ini dilaksanakan dan dirancang dalam konteks penerapan dan perancangan alat pengukur momen inersia dengan menggunakan metode periode osilasi bandul fisis. Adapun manfaat yang dapat diberikan antara lain:

1. Pengukuran momen inersia pada benda tegar menggunakan metode periode osilasi pada bandul fisis.
2. Penelitian ini dapat menjadi referensi mengenai bandul fsisis bagi pembelajaran fisika.

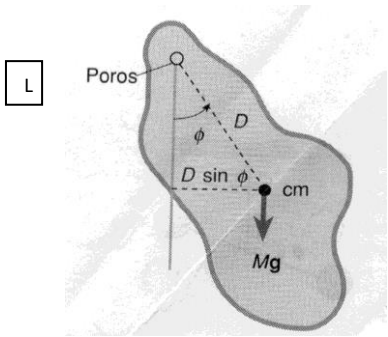
Pada penelitian berbasis Laboratorium ini, kendala yang dihadapi terdapat pada penentuan sistem mekanik yang stabil dalam mendapatkan nilai periode yang akurat. Periode yang didapatkan secara otomatis dan telah terekam oleh sensor *rotary encoder* harus lebih efisien jika dibandingkan dengan pengukuran menggunakan

manual yaitu *stopwatch*. Namun pada percobaan ini tidak diragukan bahwa osilasi yang terjadi merupakan osilasi yang teredam. Oleh karena itu pengambilan periode hanya diambil pada ayunan awal yang mendekati osilasi harmonik dan untuk pengambilan simpangan awal yang tidak terlalu besar, sehingga didapat periode yang harmonik. Sensor yang digunakan adalah *Rotary encoder* pada *printer* Canon tipe ip2770 dengan resolusi sudut sebesar 0,08°/counter. Sedangkan untuk percepatan gravitasi digunakan nilai percepatannya sebesar 9,80 m/s$^2$.

## KAJIAN PUSTAKA

Sebuah benda tegar jika digantungkan pada sebuah titik yang merupakan bukan dari titik pusat *massa*-nya dan akan berosilasi jika disimpangkan dari posisi kesetimbangannya, maka sistem tersebut disebut bandul fisis. Apabila ditinjau dari bangun datar yang digantung pada sebuah titik dengan jarak $L$ dari pusat *massa* dan selanjutnya disimpangkan dari kesetimbangan dengan besar sudut $\phi$ seperti pada gambar 2.2 torka terhadap titik gantungnya bernilai $MgL\ sin\ \phi$. Percepatan sudut $\alpha$ yang dihubungkan dengan torka yaitu:

$$\tau = I\alpha = I\frac{d^2\phi}{dt^2} \qquad (2.1)$$




**Gambar 2.1** Bandul fisis (Tipler 1998)

Momen inersia $I$ pada sekitar titik gantung. Untuk torka total dengan mensubstitusikan $-MgL\sin\phi$ diperoleh

$$-MgL\sin\phi = I\frac{d^2\phi}{dt^2} \qquad (2.2)$$

Atau

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} = -\frac{MgL}{I}\sin\phi \qquad (2.3)$$

Pada bandul sederhana, $I = ML^2$. Jika simpangan sudutnya kecil maka berlaku $\sin\phi \approx \phi$ . dalam kasus ini dapat diperoleh

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} = -\frac{MgL}{I}\phi = -\omega^2\phi \qquad (2.4)$$

Dengan $\omega^2 = \frac{MgL}{I}$. Periodenya adalah

*Periode bandul fisis*

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{I}{MgL}} \qquad (2.5)$$

Untuk mengukur momen inersia bangun datar dapat digunakan persamaan (2.2). Sedangkan pusat massa dapat ditentukan dengan cara menggantungkan benda pada dua titik berbeda. Sehingga dapat ditentukan momen inersia benda di beberapa titik dengan mengukur periode osilasi pada titik itu. Momen inersia dapat diperoleh dari :

$$I = \frac{MgLT^2}{4\pi^2} \qquad (2.6)$$

Momen inersia pada sumbu sejajar ($Ipivot$) adalah penjumlahan dari momen inersia pada pusat gravitasi ($Icg$), dan momen inersia seluruh objek diperlakukan sebagai pusat massa gravitasi (pasco ME 9833)

$$I_{pivot} = I_{cg} + ML^2 \qquad (2.7)$$

dimana $L$ adalah jarak tegak lurus dari pusat gravitasi (gigi) untuk titik poros.

Periode osilasi ($T$) pada bandul fisis tergantung pada momen inersia tentang titik poros ($Ipivot$), *massa* ($M$) dan jarak dari titik poros ke pusat gravitasi ($L$) .

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I_{pivot}}{MgL}} = 2\pi\sqrt{\frac{I_{cg}+ML^2}{MgL}} \qquad (2.8)$$

Teorema sumbu sejajar menyatakan bahwa momen inersia tentang titik poros ($Ipivot$) adalah sama dengan jumlah dari momen inersia pada pusat gravitasi ($Icg$) dan momen inersia pada benda jika semua massanya berada di pusat gravitasi ($ML^2$). Sebaliknya, momen inersia pada pusat gravitasi dapat ditemukan sebagai berikut:

$$I_{cg} = \frac{T^2MgL}{4\pi^2} - ML^2 \qquad (2.9)$$

Dimana periode (T) merupakan periode dari hasil osilasi.

**Periode pada Sistem Bandul Sederhana**

Untuk simpangan yang kecil maka gaya pemulih sebanding dengan simpangan (berlawanan arah). Jadi periode pada bandul sederhana untuk amplitudo kecil adalah

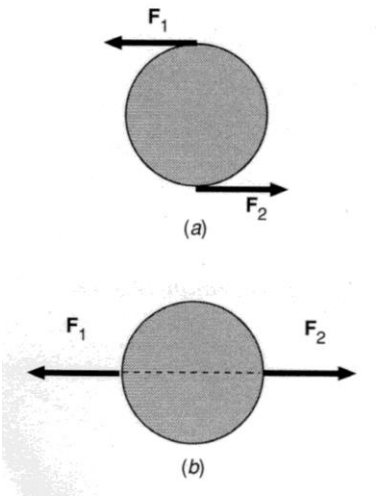
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{mg/l}} \; atau \; T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad (2.10)$$

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 :

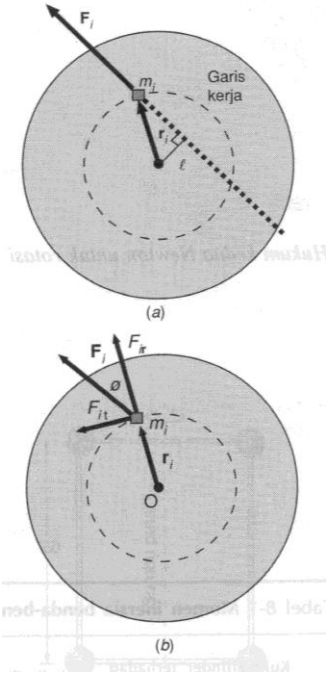
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\left(1 + \frac{1}{2^2}sin^2\frac{\phi_0}{2} + \frac{1}{2^2}\frac{3^2}{4^2}sin^4\frac{\phi_0}{2} + \cdots\right) \qquad (2.11)$$

**Momen Inersia dan Torsi**

Apabila ingin memutar sebuah gasing maka yang dilakukan adalah memuntirnya. Dalam gambar 2.2 (a) cakram diam pada posisi horizontal dibuat berputar dengan memberinya gaya $F_1$ dan $F_2$ yang bekerja di tepi cakram. Kedua gaya tersebut jika dikerjakan sedemikian rupa sehingga garis kerjanya melalui pusat cakram seperti pada gambar 2.3 (b), tidak akan membuat cakram berputar ,garis kerja gaya adalah garis dimana sepanjang gaya itu bekerja. Jarak tegak lurus antara garis gaya yang bekerja dengan sumbu rotasi disebut lengan gaya $\ell$. Hasil kali dari lengan dan gaya adalah torsi $\tau$. Besaran yang mempengaruhi besar kecepatan angular benda adalah torsi yang diberikan pada benda oleh sebuah gaya.




**Gambar 2.2** (a) Gaya $F_1$ dan $F_2$ akan menyebabkan cakram berputar mengelilingi sumbunya. (b) gaya-gaya tersebut tidak akan menyebabkan cakram berputar (Tipler 1998)




**Gambar 2.3** (a) sumbu putar tepat masuk ke atas. (b) komponen radial tidak mempengaruhi rotasi cakram. (Tipler 1998)

Pada gambar 2.3 (a) memperlihatkan gaya $F_i$ yang bekerja pada sebuah partikel ke $i$ dari sebuah cakram. Lengan dari gaya ini adalah $\ell = r_i \sin\phi$, dimana $\phi$ adalah sudut antar gaya $F_i$ dan vektor posisi $r_i$ pada titik tangkap gaya. Sehingga torsi yang didapatkan dari gaya ini adalah

$$\tau_i = F_i \ell = F_i r_i \sin\phi \qquad (2.12)$$

Pada gambar 2.3 (b) dapat menguraikan gaya $F_i$ menjadi dua komponen, $F_{ir} = F_i \cos\phi$ di sepanjang garis radial $r_i$ dan $F_{it} = F_i \sin\phi$ yang tegak lurus garis radial. Komponen radial $F_{ir}$ tidak memiliki pengaruh pada rotasi cakram. Torsi yang diberikan gaya $F_i$ dapat dinyatakan dalam $F_{it}$. Dari persamaan 2.23 , didapatkan

$$\tau_i = F_i \ell = F_i r_i \sin\phi = F_{it} r_i \qquad (2.13)$$

Percepatan angular pada benda tegar sebanding dengan torsi neto yang bekerja. Diasumsikan bahwa $F_i$ merupakan gaya eksternal neto yang bekerja pada partikel ke-$i$. Percepatan pada partikel ke-$i$ dengan hukum kedua Newton, yaitu

$$F_{it} = m_i a_{it} = m_i r_i \qquad (2.14)$$

Hubungan antara $a_{it} = r_i \alpha$, antara percepatan tangensial partikel ke-$i$ dan percepatan angular benda (persamaan 2.28). Apabil setiap ruas dikalikan dengan $r_i$, didapatkan

$$r_i F_{it} = m_i r_i^2 \alpha \qquad (2.15)$$

Torsi $\tau_i = F_{it} r_i$ adalah gaya F yang dilakukan terhadap sumbu O, sehingga

$$\tau_i = m_i r_i^2 a \qquad (2.16)$$

Jika dijumlahkan semua partikel pada benda, diperoleh

$$\sum_i \tau_i = \sum_i m_i r_i^2 a \qquad (2.17)$$

Besaran $\sum \tau_i$ merupakan torsi neto yang bekerja pada benda, yang dinyatakan dengan $\tau_{neto}$. Pada benda tegar, percepatan angular sama untuk semua partikel benda, dan maka dari itu dapat dikelurkan dari penjumlahan. Besaran $\sum m_i r_i^2$ merupakan sifat benda serta sumbu rotasi yang kemudian dinamakan momen inersia I :

$$I = \sum_i m_i r_i^2 \qquad (2.18)$$

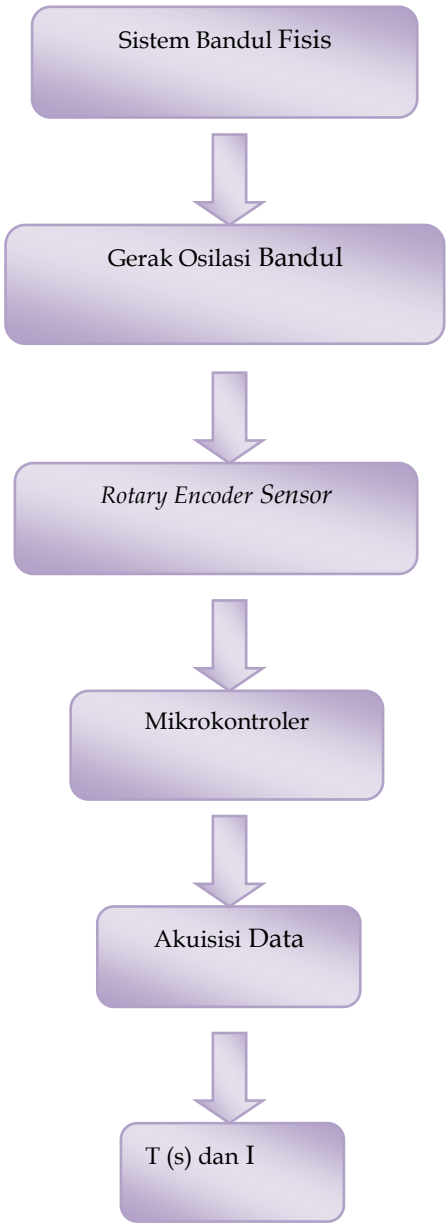
## METODE PENELITIAN

Sistematika yang dirancang yaitu menggunakan bandul fisis yang bertujuan lebih mudah dalam pengambilan data tanpa ada gangguan friksi yang dialami. Mekanika sistem meliputi teknik gerak osilasi, pengukuran atau perekaman, dan perhitungan. Osilasi pada bandul adalah langkah awal untuk pengambilan data, osilasi bandul direkam dengan menggunakan sensor *rotary encoder*. Teknik perhitungan dilakukan setelah mendapatkan periode yang diperoleh dari waktu bandul bergerak terhadap jumlah ayunan, sehingga persamaan penentuan nilai momen inersia pada pusat gravitasi dapat digunakan.

Sistem instrumentasi pada penelitian ini meliputi mikrokontroler Arduino berfungsi untuk mengolah akuisisi data dengan memonitor jalannya posisi sudut dari gerak bandul yang berosilasi. Nilai periode yang bergantung pada panjang batang bandul dari pusat massa beban bandul. Pada gambar 3.1 alur yang menjelaskan jalannya penelitian dengan hasil akhir berupa momen inersia.

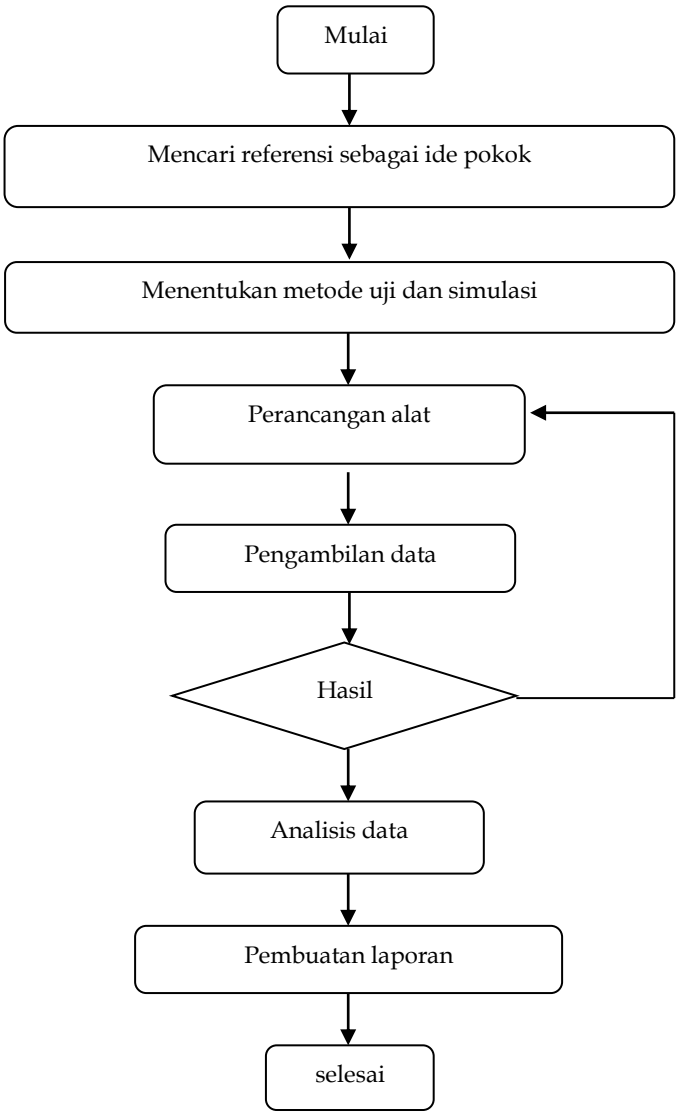
Agar didapatkan data yang maksimal maka dibutuhkan suatu kalibrasi sensor sebelum pengambilan data dimulai, yaitu dengan membandingkan sudut yang diperoleh menggunakan motor *stepper* dan alat ukur busur. Mikrokontroler diprogram menampilkan data posisi sudut dengan nilai positif pada simpangan awal dan setelah dilepas, bandul akan melewati posisi kesetimbangan atau posisi awal maka gerak selanjutnya memiliki nilai negatif begitu seterusnya. Dari data yang

diperoleh melalui perekaman tersebut, gelombang osilasi akan tampak yaitu menjelaskan hubungan antara sudut terhadap waktu jalan gerak bandul. Analisis data dilakukan menggunakan *excel* dan luaran periode akan dibandingkan dengan perolehan periode perhitungan secara teori begitu juga untuk nilai momen inersianya. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Elektronika, Instrumentasi, Jurusan Fisika FMIPA dengan data yang diperoleh berasal dari hasil percobaan osilasi gerak bandul menggunakan metode bandul fisis.




**Gambar 3.1** Diagram blok sistem gerak bandul dalam menentukan periode untuk mendapatkan nilai momen inersia.

Langkah-langkah dan prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini disajikan sebagai berikut :




**Gambar 3.2** Diagram alur penelitian

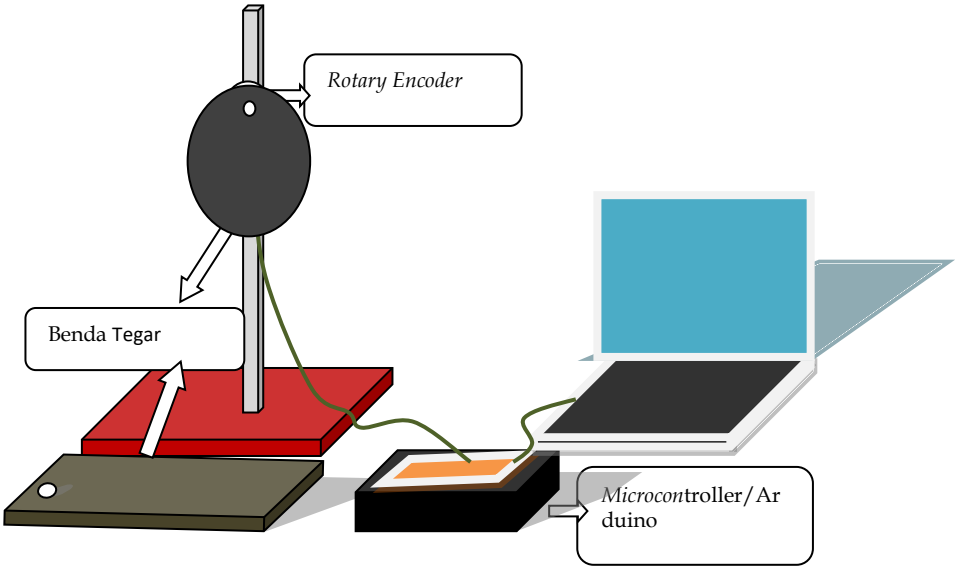
## Variabel Operasional Penelitian

Definisi operasional merupakan definisi yang digunakan dalam penelitian. Terdapat tiga variabel operasional penelitian, yaitu variabel kontrol, variabel manipulasi, dan variabel respon. Variabel kontrol adalah suatu hal yang tidak berubah dan dalam penelitian ini sesuatu yang tidak diubah adalah massa dan panjang. Variabel manipulasi (faktor yang mempengaruhi) pada penelitian skripsi

ini adalah sudut simpangan dan bentuk benda. Variabel respon dalam penelitian ini adalah periode yaitu waktu yang dicapai dalam satu getaran penuh dan berfungsi sebagai variabel perhitungan nilai momen inersia.

**Aparatus dan Instrumen Penelitian**

Pada penelitian penentuan momen inersia pada pusat gravitasi, aparatus yang digunakan adalah sebuah benda dengan sistem fisis yang digantung pada statif. Instrumen penelitian ini adalah sistem pengukuran yang berbasis mikrokontroler Arduino yang terdiri dari sensor *rotary encoder* berfungsi memonitor posisi sudut setiap mikrosekon. Gambar 3.2 di bawah merupakan sketsa alat yang dirancang dengan tujuan mempermudah dalam pengambilan data, mikrokontroler mengirimkan data pada komputer melalui *USB port* sehingga tidak membutuhkan sumber tegangan yang lain.




**Gambar 3.3** Rancangan Bandul dan posisi sensor

**Teknik Pengumpulan Data**

Pada penelitian ini, teknik pengumpulan data diperoleh dari serial monitor yang ditampilkan oleh mikrokontroler. Mikrokontroler Arduino yang dipasangkan pada *port* komputer melalui kabel *USB* yang berfungsi sebagai sumber tegangan 5V dan terhubung dengan sensornya. Data posisi sudut setiap mikrosekon didapatkan dari pergerakan sensor yang seporos dengan ujung batang dari bandul, sedangkan

periode diperoleh melalui perhitungan waktu jalan bandul bergerak dibagi berapa kali ayunan yang dapat dikatakan satu getaran.

Kalibrasi dilakukan dengan memasang sensor *rotary encoder* satu poros dengan motor *stepper*. Motor *stepper* berfungsi sebagai pembanding untuk menghitung data *counter* sensor *rotary* yang ditampilkan pada layar komputer oleh mikrokontroler. Data *counter* diperoleh dari simpangan sudut dengan kelipatan 30 yang dimulai darai sudut 30°, yang diambil dengan lima kali pengulangan dengan presentase *error* terbesar 0,08% dan presentase *error* terendah 0,00%.

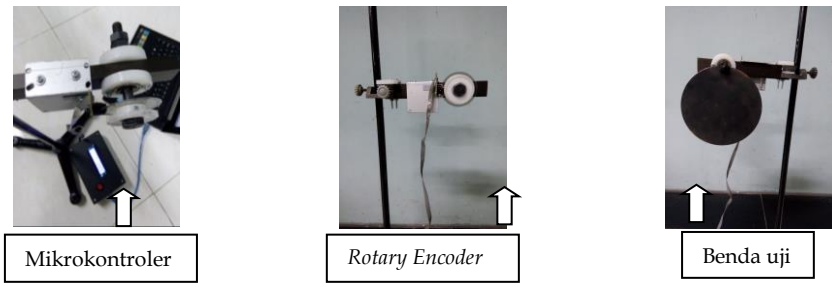
**Teknik Pengolahan Data**

Penelitian penentuan momen inersia pada pusat gravitasi ini dilakukan dengan dua metode pengolahan data yang berbeda dengan metode pengolahan seperti biasanya. Pertama adalah sistem bandul yang digunakan merupakan bandul fisis, dikatakan bandul fisis yaitu suatu benda tegar yang berosilasi bebas pada sumbu tertentu. Kedua adalah penghitungan momen inersia pada pusat gravitasi berdasarkan rumus momen inersia pada pusat gravitasi benda tegar.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

**Sistem Mekanik**

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 4.1.




**Gambar 4.1** Sistem KIT bandul fisis

**Sistem Elektrik**

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 motor *stepper* dan *rotary encoder* pada satu poros, lalu menjalankan motor stepper pada sudut tertentu mulai 30° sampai 360° dengan kenaikan tiap 30°. Data kalibrasi ditampilkan pada tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Data Kalibrasi Sensor *Rotary Encoder*

| Rotary Encoder | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **No** | **Sudut (°)** | **Rata-rata data counter** | **Sudut (°) dengan busur** | **Selisih sudut (°)** | ***Error* (%)** |
| 1 | 30 | 356,60 | 29,73 | 0,27 | 0,08 |
| 2 | 60 | 718,80 | 59,93 | 0,07 | 0,01 |
| 3 | 90 | 1074,00 | 89,55 | 0,45 | 0,04 |
| 4 | 120 | 1437,80 | 119,88 | 0,12 | 0,01 |
| 5 | 150 | 1796,60 | 149,79 | 0,21 | 0,01 |
| 6 | 180 | 2155,20 | 179,69 | 0,31 | 0,01 |
| 7 | 210 | 2512,40 | 209,47 | 0,53 | 0,02 |
| 8 | 240 | 2877,20 | 239,89 | 0,11 | 0,00 |
| 9 | 270 | 3236,60 | 269,85 | 0,15 | 0,00 |
| 10 | 300 | 3596,80 | 299,89 | 0,11 | 0,00 |
| 11 | 330 | 3957,20 | 329,93 | 0,07 | 0,00 |
| 12 | 360 | 4317,80 | 360,00 | 0,00 | 0,00 |

**Benda Uji**

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

**Tabel 4.2** Benda Uji

| Benda Uji | Gambar Benda Uji | Keterangan |
|---|---|---|
| 1 |  | Massa : 0,077912 kg<br>Panjang : 0,48 m<br>Bahan : stainless pagar<br>Bentuk : batang (*slander rod*) |
| 2 |  | Massa : 0,111334 kg<br>Panjang : 0,479 m<br>Bahan : stainless pagar<br>Bentuk : batang (*slander rod*) |

**Penentuan momen inersia**

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° sampai 25°). Cara yang sama dilakukan untuk pengambilan data periode enam benda uji lainnya. Hasil pengukuran periode selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai momen inersia ($I_{cg}$) untuk masing-masing benda uji dengan menerapkan persamaan 2.9.

Pengujian KIT pendulum dilakukan untuk menentukan momen inersia empat benda uji berbentuk batang (slander rod) dan dua benda uji berbentuk cakram dengan cara yang telah disebutkan pada bagian penentuan momen inersia.

Data hasil pengukuran periode digunakan untuk menentukan nilai momen inersia ($I_{cg}$) untuk masing-masing benda uji yang ditampilkan pada tabel 4.3, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, dan 4.9. Momen inersia teori ($I_{cg}$ teori) adalah momen inersia yang diperoleh dari persamaan berikut :

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

$I_{cg} = \frac{1}{2} M R^2$ untuk cakram

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

$I_{cg} = \frac{T^2 M g L_{cg}}{4\pi^2} - M L_{cg}^2$ untuk batang (slander rod)

$I_{cg} = \frac{T^2 M g R}{4\pi^2} - M R^2$ untuk cakram

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

**Tabel 4.3** Pengukuran momen inersia pada pusat gravitasi ($I_{cg}$) benda 1

M = 0,077912 kg

L = 0,48 m

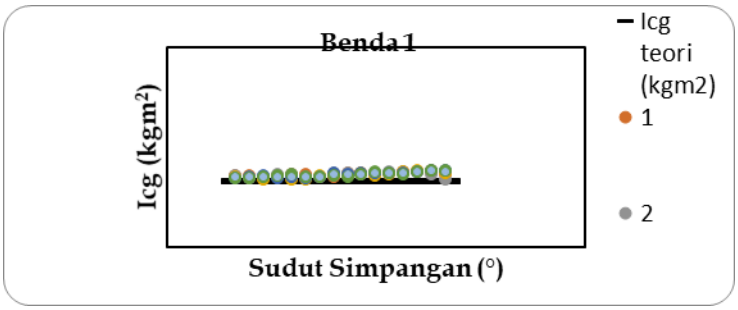
Π = 3,14

G = 9,80 m/s$^2$

| Sudut (°) | Lcg (m) | Rata-rata T (s) | Icg teori (kgm$^2$) | Icg alat (kgm$^2$) | Selisih | *Error* (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 0,24 | 1,138 | 0,001496 | 0,001517 | 0,000021 | 1,41 |
| 6 | 0,24 | 1,137 | 0,001496 | 0,001519 | 0,000023 | 1,55 |
| 7 | 0,24 | 1,138 | 0,001496 | 0,001525 | 0,000030 | 1,97 |
| 8 | 0,24 | 1,137 | 0,001496 | 0,001517 | 0,000021 | 1,41 |
| 9 | 0,24 | 1,138 | 0,001496 | 0,001525 | 0,000030 | 1,97 |
| 10 | 0,24 | 1,139 | 0,001496 | 0,001519 | 0,000023 | 1,55 |
| 11 | 0,24 | 1,139 | 0,001496 | 0,001525 | 0,000030 | 1,97 |
| 12 | 0,24 | 1,139 | 0,001496 | 0,001538 | 0,000042 | 2,82 |
| 13 | 0,24 | 1,140 | 0,001496 | 0,001536 | 0,000040 | 2,68 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 14 | 0,24 | 1,140 | 0,001496 | 0,001544 | 0,000049 | 3,25 |
| 15 | 0,24 | 1,140 | 0,001496 | 0,001547 | 0,000051 | 3,39 |
| 16 | 0,24 | 1,141 | 0,001496 | 0,001549 | 0,000053 | 3,53 |
| 17 | 0,24 | 1,142 | 0,001496 | 0,001551 | 0,000055 | 3,67 |
| 18 | 0,24 | 1,141 | 0,001496 | 0,001564 | 0,000068 | 4,52 |
| 19 | 0,24 | 1,138 | 0,001496 | 0,001570 | 0,000074 | 4,95 |
| 20 | 0,24 | 1,137 | 0,001496 | 0,001561 | 0,000065 | 4,38 |

Pengambilan data dilakukan mulai $\phi = 5°$. Untuk $\phi < 5°$, osilasi pendulum cenderung cepat teredam sehingga tidak dapat diperoleh data periode osilasi. Perbandingan antara $I_{cg}$ teori dan $I_{cg}$ alat ditampilkan pada gambar 4.2.




**Gambar 4.2** Grafik hubungan sudut simpangan (°) dan $I_{cg}$ (kgm$^2$) untuk benda 1.

*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 (2.11).

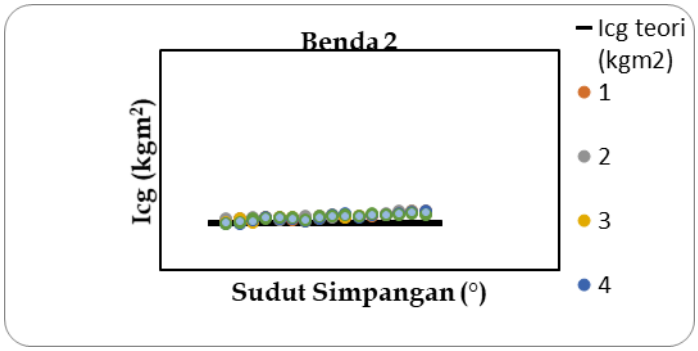
Pengukuran momen inersia pada pusat gravitasi ($I_{cg}$) untuk benda 2 dimulai dari sudut simpangan 5° sampai sudut simpangan 20° dengan nilai periode (T) sebagai berikut :

**Tabel 4.4** Pengukuran momen inersia pada pusat gravitasi ($I_{cg}$) benda 2

M = 0,111334 kg
L = 0,48 m
Π = 3,14
G = 9,80 m/s$^2$

| Sudut (°) | Lcg (m) | Rata-rata T (s) | Icg teori ($kgm^2$) | Icg alat ($kgm^2$) | Selisih | *Error* (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 0,24 | 1,135 | 0,002129 | 0,002143 | 0,000015 | 0,69 |
| 6 | 0,24 | 1,136 | 0,002129 | 0,002161 | 0,000033 | 1,54 |
| 7 | 0,24 | 1,136 | 0,002129 | 0,002170 | 0,000042 | 1,96 |
| 8 | 0,24 | 1,139 | 0,002129 | 0,002207 | 0,000078 | 3,66 |
| 9 | 0,24 | 1,139 | 0,002129 | 0,002207 | 0,000078 | 3,66 |
| 10 | 0,24 | 1,138 | 0,002129 | 0,002195 | 0,000066 | 3,09 |
| 11 | 0,24 | 1,137 | 0,002129 | 0,002186 | 0,000057 | 2,67 |
| 12 | 0,24 | 1,139 | 0,002129 | 0,002213 | 0,000084 | 3,95 |
| 13 | 0,24 | 1,141 | 0,002129 | 0,002234 | 0,000105 | 4,94 |
| 14 | 0,24 | 1,141 | 0,002129 | 0,002234 | 0,000105 | 4,94 |
| 15 | 0,24 | 1,140 | 0,002129 | 0,002225 | 0,000096 | 4,51 |
| 16 | 0,24 | 1,142 | 0,002129 | 0,002252 | 0,000123 | 5,79 |
| 17 | 0,24 | 1,142 | 0,002129 | 0,002255 | 0,000126 | 5,93 |
| 18 | 0,24 | 1,143 | 0,002129 | 0,002267 | 0,000138 | 6,50 |
| 19 | 0,24 | 1,144 | 0,002129 | 0,002285 | 0,000157 | 7,36 |
| 20 | 0,24 | 1,144 | 0,002129 | 0,002282 | 0,000154 | 7,21 |

Pengambilan data dilakukan mulai $\phi = 5°$. Untuk $\phi < 5°$, osilasi pendulum cenderung cepat teredam sehingga tidak dapat diperoleh data periode osilasi. Perbandingan antara $I_{cg}$ teori dan $I_{cg}$ alat ditampilkan pada gambar 4.3.




**Gambar 4.3** Grafik hubungan sudut simpangan (°) dan $I_{cg}$ (kgm$^2$) pada benda 2

*Error* relatif terhadap teori adalah 0,69 % sampai dengan 7,36 %. Hal tersebut dikarenakan pengukuran periode untuk sudut simpangan yang besar memerlukan koreksi seperti pada persamaan (2.11).

*Massa* dan panjang benda berpengaruh terhadap osilasi sehingga mempengaruhi nilai periode (T) dan momen inersia pada pusat gravitasi ($I_{cg}$). 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).

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

## PENUTUP

### Simpulan

Pada penelitian ini telah dirancang KIT bandul fisis penentu momen inersia pada pusat gravitasi pada suatu benda. Dua bentuk benda yang diuji yaitu 4 bentuk batang (*slander rod*) dan 2 cakram. Penentuan nilai momen inersia ($I_{cg}$) dilakukan melalui pengukuran nilai periode (T) dengan sudut simpangan ($\phi$), panjang benda (L/d) 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 (*slander rod*) 7,36 %

sebesar 0,002285 $kgm^2$ pada benda 2 dan nilai kesalahan terendah 0,69 % sebesar 0,002143 $kgm^2$ pada benda 2.

Momen inersia ($I_{cg}$) tidak dipengaruhi periode (T) dan sudut simpangan ($\phi$). Momen inersia ($I_{cg}$) yang diperoleh cenderung lebih besar dari teori. Meskipun demikian tidak ada yang menunjukkan hubungan momen inersia ($I_{cg}$) terhadap periode (T). Maka sudah sesuai dengan teori yaitu momen inersia ($I_{cg}$) tidak bergantung pada periode (T). Meskipun momen inersia ($I_{cg}$) dapat ditentukan dengan data periode (T) dari osilasi.

**Saran**

Pengembangan sistem gerak bandul fisis untuk menentukan momen inersia benda tegar telah dilakukan untuk bembelajaran 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.

## DAFTAR PUSTAKA

Adam Wicaksono dan Iwan D.W. Susanto, 2014. Sistem Otomasi Penggerak Kamera dengan Motor Step Sebagai Alat Bantu Kalibrasi Alat Ukur Panjang. J. Otomasi Kontrol dan Instrumentasi 2, 105-120.

Aguiar, C. E., and M. M. Pereire. 2011. Using the sound card as a timer. *Physics Teacher*, Vol.49, pp. 33-35.

Akihiro Ota, 2016. Angular Velocity Calibration System With a Self-calibartable Rotary Encoder. *Scientific Direct, Measurement* 82, 246-253.

FisikaReview.2016.https://fisikareview.wordpress.com/2014/01/19/momen-inersia-dan-energi-kinetik-rotasi/.Diakses tanggal 20-21 November 2016

Hans, H. S. And S. P. Puri. 2003. Mechanics. 2th ed. McGraw-Hill Company Limited. New Delhi, India.

Khairurrijal, Eko Widiatmoko, Wahyu Srigutomo, and Neny Kurniasih. 2012. Measurement of gravitational acceleration using a computer microphone port. *Physics Education*, Vol.47, pp. 709-713

Ng, T. W., and K. T. Ang. 2005. The optical mouse for harmonic oscillator experimentation. *American Association of Physics Theacher*, Vol.73, pp. 793-795.

Sarojo, Ganinjati Aby. 2002. Mekanika. Jakarta: Salemba Teknik.

Scientific, P. 1998. Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO Physical Pendulum Set Model ME : 9833. CANADA: Pasco

Sigit, R. 2007. Robotika, Sensor dan Aktuator persiapan lomba kontes robot indonesia dan kontes robot cerdas indonesia, pertama. Ed. Yogyakarta: Graha Ilmu

Susilo, Anton, Mohtar Yunianto, Viska Inda Variani. 2012. Simulasi gerak harmonik sederhana dan osilasi teredam pada *Cassy-E* 524000. *Indonesian journal of applied physics*, Vol.2, No.2, pp. 124-137.

Tipler, Paul A. 1998. FISIKA :Untuk Sains dan Teknik. Jakarta: Erlangga

Torzo, G., and Paolo Peranzoni. 2009. The real pendulum: theory, simulation, experiment. *Physics Education*, Vol.3, No. 2, pp. 221-228.

Vadas, Gintautas dan Alfred Hubler. 2009. A simple, low cost, data-logging pendulum built from a computer mouse. *Physics Education*