

Mengukur Kebenaran Konsep Momen Inersia dengan Penggelindingan Silinder pada Bidang Miring

Raja Muda^{1,a)}, Triati Dewi Kencana Wungu^{2,b)} Lilik Hendrajaya^{3,c)}

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

²Laboratorium Nuklir dan Biofisika
Kelompok Keilmuan Nuklir dan Biofisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

³Laboratorium 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)} rajamudapurbasiboro@gmail.com

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

^{c)} lilik.hendrajaya3@gmail.com

Abstrak

Momen inersia, I , adalah konsep teoritik (abstrak) untuk menggambarkan adanya kelembaman pada hukum dinamika Newton pada gerak rotasi. Dengan memilih massa silinder yang menggelinding pada bidang miring, keberadaan momen inersia dapat dibuktikan dan ditentukan besarnya yang dapat dibandingkan dengan rumus teoritiknya.

Kata-kata kunci: momen inersia, menggelinding pada bidang miring, pengukuran empirik

PENDAHULUAN

Prinsip inersia pertama kali diusulkan oleh Galileo yang menyatakan bahwa sebuah benda yang sedang bergerak pada permukaan licin akan tetap terus bergerak dengan kelajuan tetap jika tidak ada gaya eksternal yang mempengaruhinya. Berdasarkan pendapat Galileo tersebut maka pada tahun 1678 Issac Newton menyatakan hukum-hukum fisika tentang gerak, Hukum I Newton menyatakan kelembaman suatu benda atau momen inersia, hukum II menyatakan bahwa percepatan disebabkan oleh gaya yang bekerja pada suatu benda bermassa dan hukum III menyatakan hukum gaya aksi-reaksi.

Dalam fisika penyebab gerak disebut gaya. Ilmu yang mempelajari tentang gerak dan memperhitungkan gaya penyebab tersebut dinamakan dinamika gerak. Sedangkan ilmu yang mempelajari tentang gerak tanpa memperhitungkan penyebab terjadinya gerak disebut kinematika gerak. Dalam kehidupan sehari-hari, suatu benda yang bergerak dapat mengalami perlambatan dan percepatan dan kemudian berhenti tanpa terlihat adanya gaya yang bekerja pada benda tersebut, seperti pada kasus silinder yang mengalami percepatan saat

menggelinding pada permukaan bidang miring. Dalam penelitian ini akan diselidiki hukum-hukum newton dan kebenaran momen inersia silinder pejal homogen.

TUJUAN

Tujuan dari penelitian ini yaitu :

1. Menentukan momen inersia silinder pejal homogen
2. Memperlihatkan berlakunya hukum Newton (gerak translasi dan gerak rotasi)
3. Membandingkan nilai momen inersia silinder teoritik dan terukur

DASAR TEORI

Hukum I Newton

Hukum I Newton menyatakan bahwa sebuah benda akan berada dalam keadaan diam atau bergerak lurus beraturan apabila resultan gaya yang bekerja pada benda sama dengan nol. Secara matematis, hukum I Newton dinyatakan dengan persamaan

$$\sum F = 0 \quad (1)$$

Persamaan tersebut menyatakan bahwa suatu benda yang mula-mula dalam keadaan diam maka benda akan tetap diam jika tidak diberi gaya luar. Sebaliknya benda yang dalam keadaan bergerak akan terus bergerak kecuali jika ada gaya yang menghentikannya.

Konsep gaya dan massa pada hukum I Newton menyatakan sifat benda yang cenderung untuk mempertahankan keadaannya. Sifat ini disebut kelembaman atau inersia. Hukum I Newton disebut juga hukum kelembaman.

Hukum II Newton

Hukum II Newton menyatakan bahwa setiap benda yang dikenai gaya akan mengalami percepatan yang besarnya berbanding lurus dengan besarnya gaya dan berbanding terbalik dengan besarnya massa benda.

$$a = \frac{\sum F}{m} \quad (2)$$

Dengan a adalah percepatan benda (m/s^2), m adalah massa benda (kg) dan F adalah gaya (Newton). Berdasarkan persamaan tersebut, arah percepatan suatu benda sama dengan arah gaya yang bekerja pada benda dan memiliki nilai yang sebanding. Apabila diberi gaya konstan maka percepatan benda juga konstan.

Jika suatu benda bergerak melingkar maka benda tersebut memiliki besaran fisis momen inersia yang ekuivalen dengan besaran fisis massa dan jari-jari benda terhadap titik putarnya.

Hukum III Newton

Hukum III Newton menyatakan bahwa suatu benda pertama yang mengerjakan gaya pada benda kedua maka benda tersebut akan memberikan gaya pada benda pertama yang sama besar namun berlawanan arah. Secara matematis dinyatakan dengan persamaan

$$\sum F_{aksi} = \sum F_{reaksi} \quad (3)$$

Suatu pasangan gaya aksi reaksi memiliki besar yang sama, berlawanan arah, bekerja pada satu garis kerja gaya yang sama, tidak saling meniadakan dan bekerja pada benda yang berbeda.

Gerak Translasi

Gerak translasi sering disebut gerak lurus yang lintasannya berupa garis lurus. Gerak lurus dapat dikelompokkan menjadi gerak lurus beraturan dan gerak lurus berubah beraturan.

Gerak lurus beraturan adalah gerak yang memiliki kecepatan tetap atau tanpa percepatan, sehingga jarak yang ditempuh sebanding dengan kecepatan kali waktu

$$s = vt \quad (4)$$

Dengan s adalah jarak (m), v adalah kecepatan (m/s) dan t adalah waktu (sekon).

Gerak lurus berubah beraturan adalah gerak lurus dengan percepatan tetap atau kecepatan berubah terhadap waktu. Benda yang bergerak dari keadaan diam akan memiliki kecepatan yang meningkat seiring waktu disebut percepatan, dan benda dengan kecepatan tertentu yang mengalami penurunan kecepatan disebut perlambatan. Pada umumnya gerak lurus berubah beraturan didasari oleh hukum II Newton, benda mengalami percepatan karena gaya yang mempengaruhinya. Berikut adalah persamaan-persamaan untuk gerak lurus berubah beraturan.

$$v_2 = v_0 + at \quad (5)$$

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (6)$$

$$v_2^2 = v_1^2 + 2as^2 \quad (7)$$

Dengan v_0 adalah kecepatan awal benda, v_t adalah kecepatan akhir benda, dan s perpindahan benda.

Gerak Rotasi

Gerak melingkar atau gerak rotasi merupakan gerak melingkar suatu benda pada porosnya. Persamaan gerak pada gerak melingkar ekuivalen dengan persamaan gerak linier. Momen inersia merupakan representasi dari tingkat kelembaman benda yang bergerak rotasi. Semakin besar momen inersia suatu benda maka semakin sulit untuk berputar dari keadaan diam. Suatu silinder baja yang memiliki momen inersia besar akan sulit untuk digelindingkan dibandingkan silinder kayu yang memiliki momen inersia lebih kecil.

Momen inersia pada gerak rotasi dianalogikan dengan massa pada gerak translasi. Torsi pada gerak rotasi dianalogikan dengan momen gaya pada gerak translasi. Pada gerak translasi gaya menyebabkan percepatan, maka torsi pada gerak rotasi akan menyebabkan percepatan sudut.

Bentuk persamaan hukum II Newton adalah $\sum F = ma$ maka dengan menganalogikan persamaan ini pada gerak rotasi adalah $\tau = I\alpha$. Dengan τ adalah momen gaya (Nm), I adalah momen inersia (kg m^2) dan α adalah percepatan sudut (rad/s^2).

Momen Inersia

Benda tegar mengandung beberapa partikel, inersia rotasi benda tegar dapat dihitung dengan persamaan $I = \sum m_i r_i^2$ dengan r adalah jarak tegak lurus sebuah partikel dari titik rotasi. Jika benda tegar mengandung banyak partikel maka persamaan inersia dapat diganti dalam bentuk integral menjadi $I = \int r^2 dm$. Untuk benda silinder padat dengan sumbu putar pada pusat lingkarannya digunakan formula

$$\text{inersia } I = \frac{1}{2} MR^2.$$

Rumus momen inersia pada silinder pejal diperoleh dengan cara sebagai berikut :

$$I = \int r^2 dm.$$

Dengan,

$$dm = \rho dV$$

$$dV = 2\pi r dr dz$$

$$m = \pi r^2 h \rho$$

$$I = \int \rho dV$$

$$I = \int_0^R r^2 (\rho 2\pi) r dr dz$$

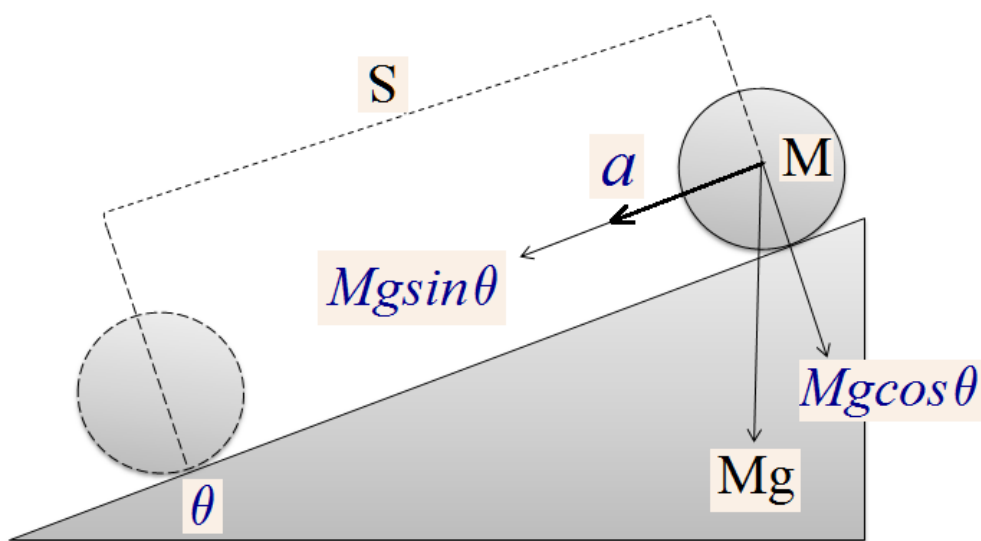
$$I = 2\pi h \rho \int_0^R r^3 dr$$

$$I = 2\pi h \rho \left(\frac{1}{4} R^4 \right)$$

$$I = (R^2 \pi h \rho) \frac{1}{2} R^2$$

$$I_{\text{Silinder}} = \frac{1}{2} m R^2 \quad (8)$$

METODE PENELITIAN



Gambar 1. Skema percobaan penggelindingan silinder pejal homogen

Persamaan untuk gaya gesek pada silinder adalah :

$$\sum \tau = I \alpha$$

$$F \cdot R = I \alpha$$

$$f_s = \frac{I \alpha}{R}$$

$$f_s = \frac{I a}{R^2}$$

(9)

Dimana :

f_s = gaya gesek pada silinder oleh permukaan lantai (N)

I = momen inersia silinder yang menggelinding (kg m^2)

a = percepatan silinder pada bidang miring (m/s^2)

R = jari-jari silinder yang menggelinding (m)

Percepatan yang dialami oleh silinder

$$\begin{aligned}
 \sum F &= ma \\
 mg \cdot \sin \theta - f_s &= ma \\
 mg \cdot \sin \theta - \frac{Ia}{R^2} &= ma \\
 mgR^2 \cdot \sin \theta - Ia &= maR^2 \\
 mgR^2 \cdot \sin \theta &= a(I + mR^2) \\
 a &= \frac{mgR^2 \cdot \sin \theta}{(I + mR^2)} \\
 a &= \frac{mgR^2 \cdot \sin \theta}{R^2(m + \frac{I}{R^2})} \\
 a &= \frac{mg \cdot \sin \theta}{(m + \frac{I}{R^2})} \tag{10}
 \end{aligned}$$

Dimana :

m = massa silinder (kg)

I = momen inersia silinder yang menggelinding (kg m^2)

a = percepatan silinder pada bidang miring (m/s^2)

R = jari-jari silinder yang menggelinding (m)

θ = kemiringan bidang miring

Jarak yang ditempuh oleh silinder :

$$\begin{aligned}
 s &= v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad \text{dengan } v_0 = 0 \text{ sehingga} \\
 s &= \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \tag{11}
 \end{aligned}$$

Dimana :

s = jarak yang ditempuh oleh silinder (m)

t = waktu tempoh silinder (detik)

a = percepatan silinder pada bidang miring (m/s^2)

**Silinder I****Silinder II**

Gambar 2. Skema percobaan penggelindingan silinder pejal homogen

HASIL**Data Silinder I**

Massa silinder = 0,5848 kg

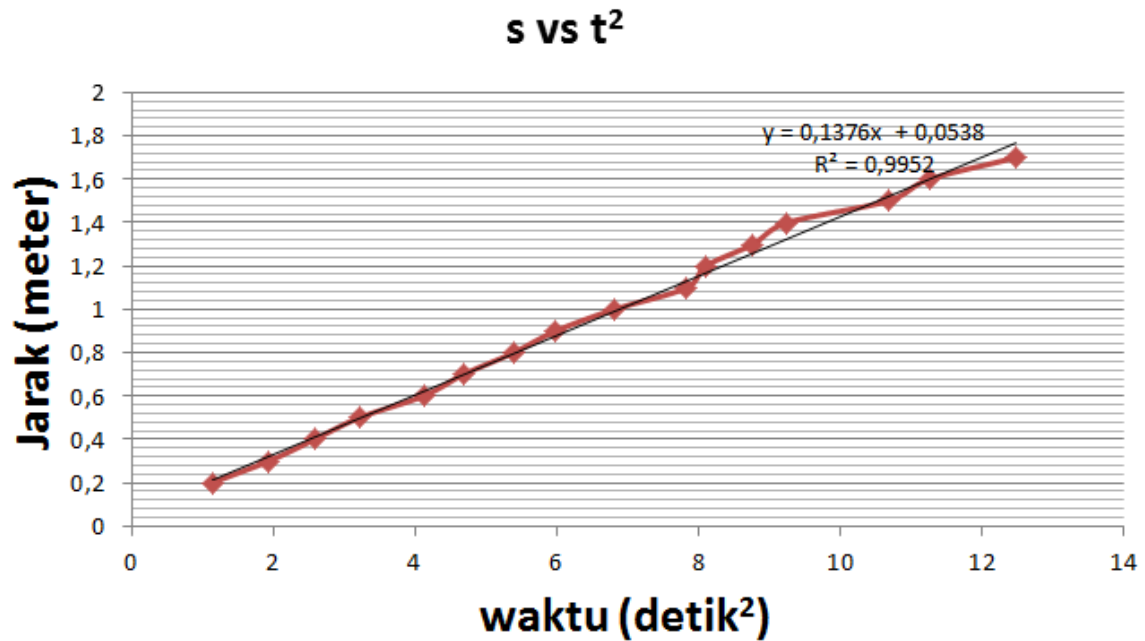
Jari-jari silinder = 4,4 cm = $4,4 \times 10^{-2}$ meter

Tabel 1. Hasil pengukuran waktu terhadap jarak tempuh

Jarak (m)	Waktu (s)	Waktu ² (s ²)
1,7	3,53	12,46
1,6	3,35	11,25
1,5	3,26	10,67
1,4	3,04	9,24
1,3	2,96	8,76
1,2	2,85	8,10
1,1	2,80	7,83
1	2,61	6,81
0,9	2,45	5,98
0,8	2,32	5,39
0,7	2,16	4,69
0,6	2,03	4,12
0,5	1,79	3,21
0,4	1,61	2,58
0,3	1,39	1,94
0,2	1,70	1,14

Momen inersia silinder pejal teoritik

$$I = \frac{1}{2}mr^2 = \frac{1}{2}(0,5847)(4,4 \times 10^{-2})^2 = 5,66 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$$



Gambar 3. Kurva perpindahan terhadap waktu kuadrat

Berdasarkan gambar diperoleh persamaan garis pada grafik $y = 0,1376x + 0,0538$

Gradien

$$m = \frac{y}{x} = 0,1376$$

Persamaan kinematika gerak lurus berubah beraturan

$$s = \frac{1}{2}at^2$$

$$\frac{s}{t^2} = \frac{1}{2}a$$

$$a = 0,275 \text{ m/s}^2$$

Persamaan momen inersia pada bidang miring

$$a = \frac{mg \cdot \sin \theta}{\left(m + \frac{I}{R^2}\right)}$$

$$0,275 = \frac{0,5847 \cdot \sin 5^\circ}{0,5847 + \frac{I}{4,4 \times 10^{-2}}} \quad \text{dengan } \sin 5^\circ = 0,087$$

$$I = 23,77 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$$

Nilai momen inersia $I = 23,77 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$

Data Silinder II

Massa silinder = 0,9723 kg

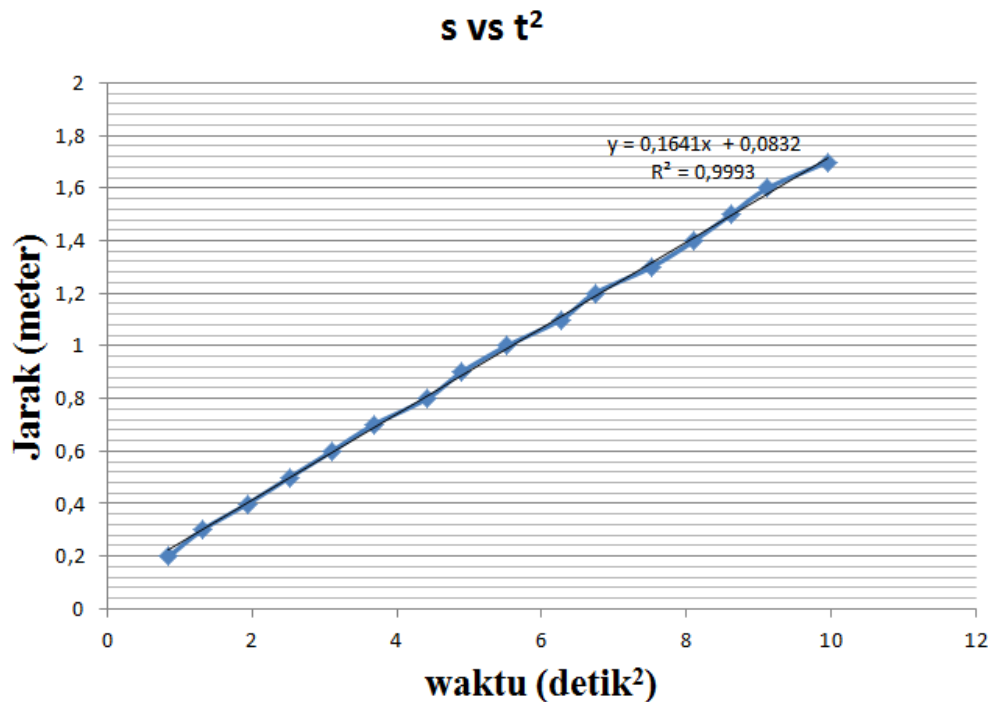
Jari-jari silinder = 6 cm = 6×10^{-2} meter

Tabel 2. Hasil pengukuran waktu terhadap jarak tempuh silinder II

Jarak (m)	Waktu(s)	Waktu ² (s ²)
1,7	3,15	9,95
1,6	3,02	9,12
1,5	2,93	8,61
1,4	2,85	8,10
1,3	2,74	7,51
1,2	2,59	6,73
1,1	2,50	6,26
1	2,35	5,52
0,9	2,21	4,89
0,8	2,10	4,41
0,7	1,92	3,68
0,6	1,76	3,10
0,5	1,58	2,52
0,4	1,39	1,99
0,3	1,14	1,31
0,2	0,92	0,85

Momen inersia silinder pejal teoritik

$$I = \frac{1}{2}mr^2 = \frac{1}{2}(0,9723)(6 \times 10^{-2})^2 = 17,59 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$$



Gambar 4. Kurva perpindahan terhadap waktu kuadrat

Berdasarkan gambar diperoleh persamaan garis pada grafik $y = 0,1641x + 0,0832$

Gradien

$$m = \frac{y}{x} = 0,1641$$

Persamaan kinematika gerak lurus berubah beraturan

$$s = \frac{1}{2}at^2$$

$$\frac{s}{t^2} = \frac{1}{2}a$$

$$0,1641 = \frac{1}{2}a$$

$$a = 0,328 \text{ m/s}^2$$

Persamaan momen inersia pada bidang miring

$$a = \frac{mg \cdot \sin \theta}{(m + \frac{I}{R^2})}$$

$$0,328 = \frac{0,9723 \cdot \sin 5^\circ}{0,9723 + \frac{I}{4,4 \times 10^{-2}}}$$
 dengan $\sin 5^\circ = 0,087$

$$I = 55,98 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$$

Nilai momen inersia $I = 55,98 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$

PEMBAHASAN

Penelitian ini merupakan pengukuran momen inersia silinder dengan cara menggelindingkannya pada bidang miring. Momen inersia merupakan konsep teoritik dalam ilmu fisika namun dapat diukur besarnya berdasarkan dinamika Newton, gerak rotasi dan gerak translasi. Dalam penelitian ini digunakan dua buah silinder homogen. Silinder pertama bermassa $0,5847 \text{ kg}$ dengan jari-jari $4,4 \times 10^{-2} \text{ meter}$ dan silinder kedua bermassa $0,9723 \text{ kg}$ dengan jari-jari $6 \times 10^{-2} \text{ meter}$. Kedua silinder tersebut menggelinding pada bidang miring dengan sudut kemiringan 5° .

Silinder menggelinding pada bidang miring mengalami percepatan, semakin besar sudut kemiringan maka silinder akan memiliki percepatan yang semakin besar. Percepatan silinder pertama adalah $0,275 \text{ m/s}^2$ dan percepatan silinder yang kedua adalah $0,328 \text{ m/s}^2$. Percepatan gravitasi $9,78 \text{ m/s}^2$ untuk daerah Bandung.

Momen inersia silinder pertama secara teori adalah $5,66 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$ sedangkan secara terukur $23,77 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$. Momen inersia silinder kedua secara teori adalah $17,59 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$ sedangkan secara terukur adalah $55,98 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$. Perbedaan hasil ini dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor ketepatan dalam pengukuran waktu tempuh silinder, keakuratan pengukuran waktu sangat mempengaruhi hasil nilai percepatan silinder. Percepatan silinder pada bidang miring akan mempengaruhi hasil momen inersia silinder terukur. Faktor lain yang mempengaruhi hasil adalah hambatan udara, secara teori yang diperhitungkan dalam dinamika Newton adalah gaya gesek antara benda dan permukaan bidang miring namun pada kenyataannya ada gaya gesek dengan udara yang akan mempengaruhi nilai percepatan silinder.

Semakin besar nilai momen inersia suatu benda maka semakin besar energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan benda tersebut. Demikian juga jika suatu benda yang sedang bergerak dengan momen inersia yang besar maka akan semakin sulit untuk menghentikannya. Momen inersia dalam gerak rotasi menyatakan ukuran kemampuan benda untuk mempertahankan kecepatan sudut/kecepatan gerak benda ketika melakukan gerak rotasi. Semakin besar momen inersia maka semakin kecil percepatannya dan demikian sebaliknya.

KESIMPULAN DAN SARAN

Melalui penelitian ini, hukum-hukum dinamika Newton dapat teramati dengan baik. Besar momen inersia suatu benda dapat diukur dengan metode penggelindingan pada bidang miring. Silinder mengalami percepatan karena dipengaruhi oleh gravitasi bumi.

Momen inersia silinder I

Momen inersia teori = $5,66 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$

Momen inersia terukur = $23,77 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$

Momen inersia silinder II

Momen inersia teori = $17,59 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$

Momen inersia terukur = $55,98 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$

Momen inersia secara teori seharusnya sama dengan yang terukur, namun hasil yang diperoleh momen inersia terukur pada kedua silinder memiliki nilai yang lebih besar dari pada nilai teoritiknya. Untuk penelitian berikutnya keberadaan momen inersia dapat diukur dengan menggunakan konsep energi dan pengukuran waktu dapat menggunakan sensor waktu sehingga hasil lebih akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada laboratorium fisika atas dukungan pada penelitian ini dan teman-teman yang ikut serta dalam kegiatan ilmiah ini. Penulis juga berterimakasih kepada Pak Lilik Hendrajaya dan Ibu Triati Dewi Kencana Wungu atas diskusinya yang sangat bermanfaat.

REFERENSI

1. Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., *Fundamentals of Physics*, John Wiley and Sons, 2010.
2. Sutrisno, *Seri Fisika Dasar*, Penerbit ITB, 2000.