

## Penentuan momen inersia bola pejal menggunakan sensor gyroscope MPU6050 dan sensor photodiode

Umi Pratiwi\*, Ika Maulita, Efita Pratiwi Adi, Adilla Luthfia

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman,  
Jl. DR. Soeparno No.61, Karang Bawang, Karangwangkal, Purwokerto Utara, Banyumas 53122

\*email:umi.pratiwi.fis@unsoed.ac.id.

**Abstrak** – Momen inersia sebagai konsep penting dalam sistem kerja mesin yang memerlukan gerak rotasi dan pengukuran secara manual belum mendapatkan hasil maksimal. Oleh karena itu diperlukan sistem pengukuran momen inersia bola pejal yang lebih akurat. Tujuan penelitian adalah perancangan sistem pengukuran momen inersia bola pejal berbasis digital menggunakan sensor Mpu6050 Gyroscope Angle dan sensor photodiode. Metode yang dilakukan dalam merancang sistem pengukuran momen inersia bola pejal, dilakukan melalui beberapa tahapan yaitu membuat flowchart prinsip kerja sistem, membuat flowchart pemrograman sistem, dan perhitungan momen inersia bola pejal dan ketelitiannya. Variabel yang diukur berupa waktu tempuh bola pejal, panjang lintasan, dan sudut lintasan bidang miring. Perhitungan menggunakan variasi panjang lintasan 2m, 1,8 m dan 1,6m dengan sudut tetap, dan variasi sudut yang berbeda yaitu 15°, 10° dan 5° dengan jarak tetap. Hasil uji alat pengukuran momen inersia bola pejal diperoleh besar konstanta momen inersia bola pejal terbaik dengan  $k$  sebesar  $(0,415 \pm 0,009)$ . Hasil terbaik tersebut diukur pada sudut kemiringan 5° dengan panjang lintasan 2 meter. Hasil uji sistem pengukuran momen inersia bola pejal menunjukkan bahwa sistem dapat bekerja dengan baik dan sistem menghasilkan nilai ralat yang cukup kecil. Berdasarkan hasil analisis data tersebut, alat penentuan momen inersia bola pejal menggunakan MPU6050 Gyroscope Angle Sensor dan Sensor Photodiode berbasis arduino dapat digunakan sebagai alternatif sistem pengukuran momen inersia yang lebih tepat dan lebih handal.

**Kata Kunci:** momen inersia bola pejal, sensor Gyroscope MPU6050, sensor photodiode, arduino.

**Abstract** – Moment of inertia as an important concept in machine working systems that require rotational motion and manual measurements has not yet achieved maximum results. Therefore, a more accurate system for measuring the moment of inertia of a solid ball is needed. The aim of the research is to design a digital-based system for measuring the moment of inertia of a solid ball using the Mpu6050 Gyroscope Angle sensor and a photodiode sensor. The method used in designing a system for measuring the moment of inertia of a solid ball is carried out through several stages, namely making a flowchart of the system's working principles, making a system programming flowchart, and calculating the moment of inertia of a solid ball and its accuracy. The variables measured are the travel time of the solid ball, the length of the path, and the angle of the inclined plane. The calculation uses variations in path lengths of 2m, 1.8m and 1.6m with fixed angles, and different angle variations, namely 15°, 10° and 5° with fixed distances. The test results of the tool for measuring the moment of inertia of a solid ball obtained the best constant moment of inertia of a solid ball with  $k$  of  $(0.415 \pm 0.009)$ . The best results were measured at a slope angle of 5° with a path length of 2 meters. The test results of the solid ball moment of inertia measurement system show that the system can work well and the system produces quite small error values. Based on the results of this data analysis, a tool for determining the moment of inertia of a solid ball using the MPU6050 Gyroscope Angle Sensor and an Arduino-based Photodiode Sensor can be used as an alternative moment of inertia measurement system that is more precise and more reliable.

**Key words:** moment of inertia of a solid ball, MPU6050 Gyroscope sensor, photodiode sensor, Arduino.

## PENDAHULUAN

Pengukuran momen inersia dalam fisika memiliki peranan penting dalam memahami perilaku rotasi suatu objek terhadap sumbu tertentu. Momen inersia, atau sering juga disebut inertia rotasional adalah ukuran dari kecenderungan suatu benda untuk tetap dalam

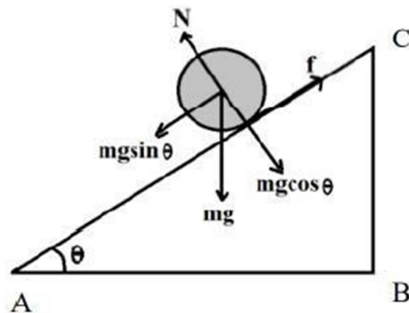
keadaan rotasi atau tidak berotasi. Salah satu eksperimen yang penting dalam memahami momen inersia rotasional adalah penentuan momen inersia bola pejal [1].

Penentuan momen inersia bola pejal melibatkan pengukuran karakteristik rotasi suatu objek terhadap sumbu tertentu [2]. Momen inersia sebuah objek adalah ukuran dari

seberapa sulit objek tersebut untuk berubah kecepatan sudutnya saat diberi gaya yang memutar [3], [4]. Dalam eksperimen ini momen inersia bola pejal dapat ditentukan dengan menggunakan kombinasi sensor *gyroscope* MPU6050 dan sensor fotodioda [5].

Penggunaan sensor *gyroscope* dan sensor fotodioda dalam penentuan momen inersia bola pejal memberikan keunggulan dalam akurasi pengukuran, kemudahan dalam pengolahan data [6] dan dapat dilakukan melakukan pengukuran secara langsung [7]. Sensor *gyroscope* mampu memberikan informasi langsung tentang perubahan kecepatan sudut bola pejal pada tiga sumbu ruang: *roll*, *pitch*, dan *yaw* [8], [9]. Sedangkan sensor fotodioda memiliki kepekaan terhadap intensitas cahaya sehingga dapat memberikan data waktu yang dibutuhkan oleh bola pejal untuk berputar sepanjang sumbu tertentu [10], [11]. Dengan menggunakan kedua sensor tersebut dapat diperoleh data yang akurat dan komprehensif mengenai karakteristik rotasi bola pejal.

Perhitungan momen inersia (kelembaman/ $k$ ) sebuah bola pejal dengan massa  $m$  dan jari  $r$  yang berotasi terhadap sumbu pusat massa, dapat ditentukan berdasarkan ilustrasi Gambar 1 dan Persamaan 1 [12], [13].



**Gambar 1.** Gerak menggelinding pada bidang miring

Persamaan 1 menunjukkan percepatan bola pejal berotasi dengan lintasan sudut tertentu.

$$a = \frac{g \sin \theta}{1 + \frac{I}{mr^2}} \quad (1)$$

Jika  $I = kmr^2$  maka diperoleh, Persamaan 2:

$$k = \frac{g \sin \theta}{a} - 1 \quad (2)$$

Dengan mengganti nilai  $a = \frac{s}{t^2}$  maka diperoleh:

$$k = \frac{gt^2 \sin \theta}{a} - 1 \quad (3)$$

Hasil dari penurunan tersebut dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang, termasuk ilmu material, rekayasa mesin, dan rekayasa struktur. Dalam ilmu material, pengetahuan tentang momen inersia bola pejal dapat digunakan untuk memahami sifat-sifat mekanik dari bahan dan material yang digunakan dalam berbagai aplikasi teknik [14]. Sementara dalam rekayasa mesin, pemahaman tentang momen inersia bola pejal sangat penting dalam merancang dan mengoptimalkan kinerja mesin-mesin yang melibatkan gerakan rotasi, seperti motor listrik, turbin, dan mesin pemutar lainnya. Begitu juga dalam rekayasa struktur, pengetahuan tentang momen inersia bola pejal dapat membantu dalam merancang struktur bangunan atau konstruksi yang efisien dan aman terhadap beban rotasi yang bekerja pada struktur tersebut [15]–[17].

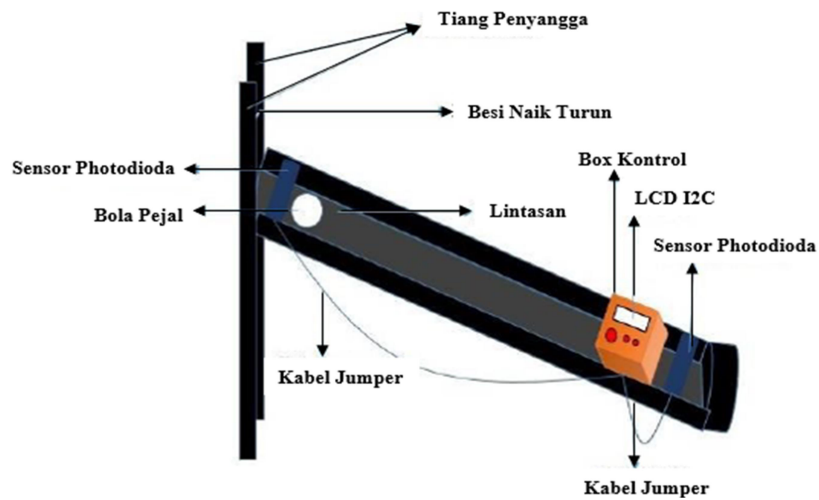
Berdasarkan pemaparan di atas, tujuan penelitian ini adalah perancangan sistem pengukuran momen inersia bola pejal berbasis digital menggunakan sensor Mpu6050 Gyroscope Angle dan sensor photodioda. Pengukuran menggunakan mikrokontroler dalam mengontrol sensor yang digunakan agar lebih presisi.

## METODE PENELITIAN

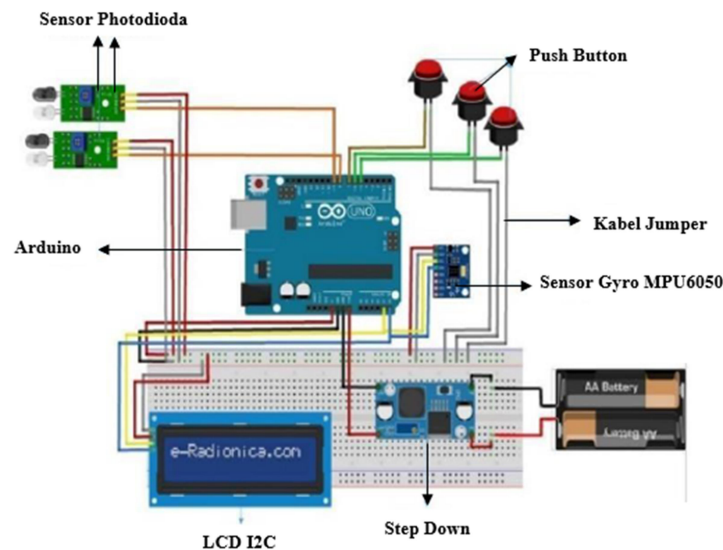
### A. Desain Sistem Penentuan Momen Inersia Bola Pejal

Desain sistem penentuan momen inersia bola pejal menggunakan MPU6050 *Gyroscope Angle* Sensor Berbasis Arduino disajikan pada Gambar 2a dan sistem elektronika pada Gambar 2b. Peralatan yang digunakan dalam penentuan momen inersia terdiri dari arduino, MPU6050 Gyroscope Angle Sensor, sensor photodioda, push button, step dow. Casing alat menggunakan bahan dasar dari besi galvalum dan kayu. Pemilihan besi galvalum karena memiliki sifat ringan dan tahan lama. Sedangkan pemilihan kayu karena mudah dibentuk. Komponen elektronika yang diperlukan untuk menampilkan hasil berupa *bread board* dan LCD I2C. Ketinggian peyangga 1 m, panjang lintasan bidang miring 2 m dengan lebar 3,5 cm.

Bola pejal yang digunakan berupa kelereng dengan diameter 2,40 cm.



(a)



(b)

**Gambar 2.** a) Desain sistem, b) Rangkaian elektronika sistem penentuan momen inersia bola pejal menggunakan MPU6050 *Gyroscope Angle Sensor*

## B. Rangkaian Elektronika dan Diagram Alir Sistem

Diagram alir rangkaian sistem penentuan momen inersia bola pejal menggunakan MPU6050 *Gyroscope Angle Sensor* Berbasis Arduino disajikan pada Gambar 2b. Diagram alir terdiri dari diagram alir prinsip kerja sistem secara keseluruhan dan diagram alir program algoritma menggunakan mikrokontroler arduino. Sensor photodioda digunakan untuk memperoleh variabel waktu

luncur bola pejal berdasarkan selisih deteksi obyek oleh photodioda 1 dan photodioda 2. Sensor MPU6050 *Gyroscope Angle* untuk memperoleh nilai momen inersia berdasarkan sudut yang diukur. Penentuan nilai momen inersia dilakukan dengan tiga variasi jarak tempuh bola pejal dan tiga variasi sudut permukaan luncur.

Gambar 3 menunjukkan diagram alir pemrograman algoritma menggunakan Arduino IDE. Sistem diberikan input berupa sudut, jarak,

dan waktu. Jarak sudah ditentukan terlebih dahulu dengan tiga variasi dan besarnya sudut diperoleh dari sensor MPU6050 *Gyroscope Angle*. Variabel waktu diperoleh oleh sensor photodiode. Dari ketiga variabel tersebut diperoleh perhitungan konstanta kelembamana sebagai proses perhitungan momen inersia bola pejal.

### C. Pengujian Ketelitian

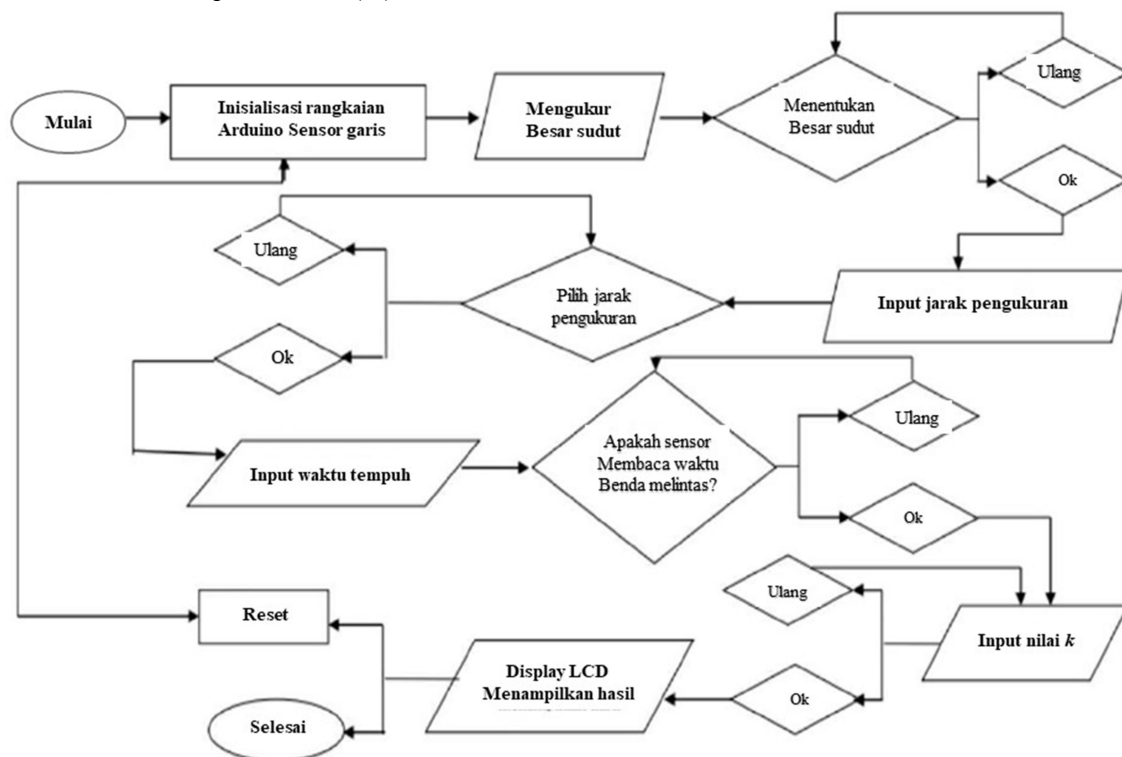
Berikut ini skema pengujian ketelitian alat yang direalisasikan. Setelah diperoleh data dari pengujian, maka langkah selanjutnya adalah menganalisa data tersebut dan melakukan perhitungan analisis nilai persentase (%) keberhasilan dan persentase (%) kesalahan

(*error*) pada alat viskositas fluida. Rumus-rumus pencarian persentase kesalahan dan keberhasilan adalah berdasarkan persamaan berikut ini [18].

$$\%Kbr = \frac{NS - NT}{NS} \times 100\% \quad (5)$$

$$Ralat = \frac{\%Kslhn}{100\%} \times NS \quad (6)$$

dengan  $\%Kbr$  persentase keberhasilan,  $\%Kslhn$  persentase kesalahan,  $NS$  nilai sebenarnya, dan  $NT$  nilai terukur.



**Gambar 3.** Flowchart prinsip kerja alat penentuan momen inersia menggunakan sensor MPU6050 Gyroscope Angle dan sensor photodiode

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan momen inersia bola pejal secara konvensional mengalami kesulitan dalam menentukan besar sudut dan waktu yang dibutuhkan karena masih menggunakan alat yang manual berupa busur dan stopwatch. Hal ini akan mempengaruhi akurasi data yang diperoleh. Oleh karena itu peneliti ini dilakukan untuk pengembangan alat peraga momen inersia bola pejal menggunakan MPU6050 Gyroscope Angle Sensor dan sensor photodiode, sehingga dapat mencatat data sudut dan waktu secara otomatis.

Ketika bola pejal digelindingkan ke bidang miring yang dibagian atas dan bawah telah ditempatkan sensor maka sensor akan menangkap pergerakan benda. Pada saat benda melewati atau mengenai sensor yang telah dipasang sesuai gambar desain alat peraga, maka sensor akan mengirimkan sinyal. Sinyal tersebut digunakan sebagai tanda waktu yang dibutuhkan benda untuk melaju dari sensor pertama sampai sensor terakhir. Semua data yang terdiri dari jarak, waktu, percepatan gravitasi bumi, dan sudut kemiringan bidang miring dikirimkan ke sistem arduino dan ditampilkan pada layar monitor.

Sebelum dilakukan perhitungan dilakukan pengujian terhadap komponen yang dipakai pada sistem. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk menguji kinerja komponen sistem agar berjalan dengan baik. Langkah pertama dilakukan pengujian sensor photodiode untuk mengetahui tingkat keakuratan kecepatan yang terukur pada sistem,. Pengukuran dilakukan dengan bantuan alat *stopwatch* manual. Selain untuk mengetahui tingkat akurasi (keakuratan), pengujian terhadap ketepatan sensor photodiode juga bertujuan untuk mengetahui nilai kesalahan (*error*) yang terjadi pada pembacaan sistem. Hasil dari pengujian ketepatan sensor photodiode menggunakan stopwatch disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil pengujian ketepatan sensor photodiode

Jarak (m)	Perhitungan	Rata-rata (t)	Selisih	Error
2	Manual	1,065	-0,002	0,2%
	Sensor photodiode	1,063		
1,8	Manual	1,009	-0,001	0,1%
	Sensor photodiode	1,008		
1,6	Manual	0,949	-0,001	0,1%
	Sensor photodiode	0,948		

*Kedua*, pengujian pembacaan sensor sudut MPU6050 Gyroscope. Pengujian terhadap sensor MPU6050 Gyroscope Angle dilakukan untuk mengetahui tingkat keakuratan pembacaan sensor tersebut terhadap sudut antara lintasan dan lantai, sensor presentase nilai kesalahan (*error*) yang terjadi pada sensor tersebut. Pengujian dilakukan dengan mengamati hasil yang ditampilkan pada layar LCD dan dibandingkan dengan busur manual. Hasil pengujian sensor MPU6050 Gyroscope *angel* dan perhitungan manual disajikan pada Tabel 2. Pada sudut  $15^0$  menghasilkan kesalahan (*error*) paling kecil diantara sudut lainnya.

**Tabel 2.** Hasil pengujian sensor MPU6050 Gyroscope Angle

Sudut (m)	Perhitungan	Rata-rata (t)	Selisih	Error
$15^0$	Manual	1,064	-0,0014	0,1%
	Sensor MGA	1,063		
$10^0$	Manual	1,301	-0,0064	0,6%
	Sensor MGA	1,295		
$5^0$	Manual	1,822	-0,003	0,3%
	Sensor MGA	1,819		

*Ketiga*, pengujian sistem peraga penentuan momen inersia menggunakan sensor MPU6050 Gyroscope *angel* dan sensor photodiode. hasil pengujian sensor photodiode dan menggunakan sensor MPU6050 Gyroscope *angel* memiliki ralat terkecil pada sudut  $15^0$ . Percobaan dengan variasi jarak ditunjukkan dan menghasilkan *k* konstanta kelembaman bola pejal pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Hasil pengujian sistem peraga dengan variasi jarak

Jarak (m)	Sudut	<i>K</i> manual	<i>K</i> sistem	Error (%)	Ralat
2	$15^0$	0,432	0,420	1,229	0,005
1,8	$15^0$	0,427	0,410	1,723	0,007
1,6	$15^0$	0,425	0,408	1,700	0,007

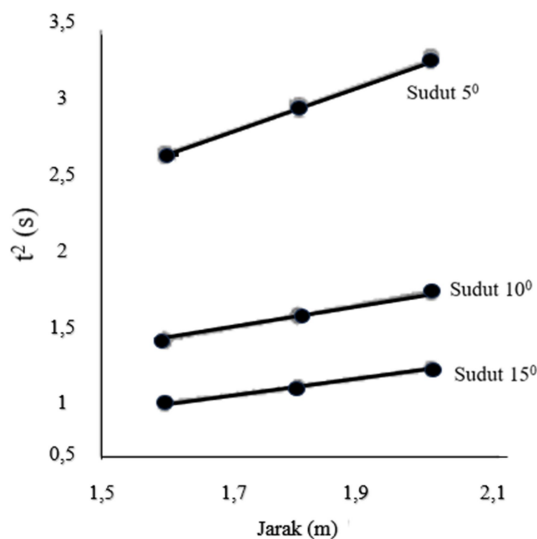
*Keempat*, pengujian sistem peraga penentuan momen inersia menggunakan sensor MPU6050 Gyroscope *angel* dan sensor photodiode. Hasil pengujian dengan variasi sudut menghasilkan nilai momen inersia bola pejal (*k*) ditunjukkan pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Hasil pengujian sistem peraga dengan variasi sudut untuk menentukan nilai *k*

Jarak (m)	Sudut	<i>k</i> manual	<i>k</i> sistem	Error (%)	Ralat
2	$15^0$	0,432	0,420	1,230	0,005
2	$10^0$	0,436	0,434	0,171	0,001
2	$5^0$	0,415	0,390	2,523	0,010

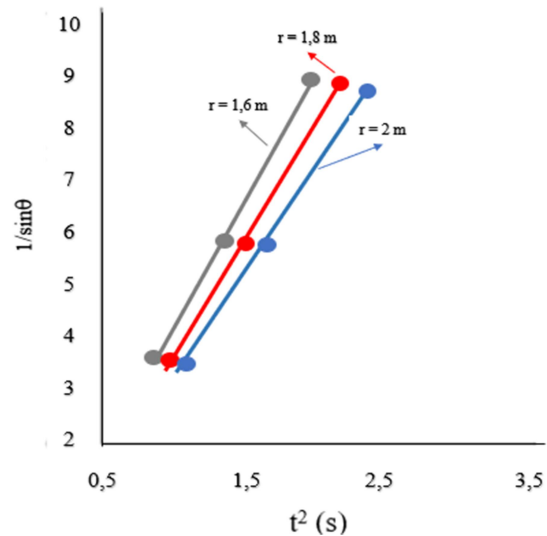
Hasil pengujian menggunakan variasi sudut dan variasi jarak diperoleh nilai momen inersia bola pejal ( $k$ ) dengan ralat bervariasi. Pada sudut  $10^\circ$  menghasilkan ralat paling kecil. Hasil ralat ini sangat tergantung pada pemasangan posisi bidang miring dengan sudut pandang paralaks yang tepat.

Perhitungan momen inersia bola pejal ( $k$ ) dapat dilihat pada Gambar 4. Berdasarkan Gambar 4 menunjukkan bahwa semakin besar lintasan yang ditempuh maka akan menghasilkan nilai  $k$  yang semakin besar. Nilai  $k$  dengan mengganti nilai  $a$  menunjukkan bahwa nilai  $s$  berbanding lurus dengan kuadrat  $t$  menghasilkan Gambar 4.



**Gambar 4.** Grafik kuadrat waktu tempuh terhadap panjang lintasan dengan sudut tetap

Pada Gambar 5 memperlihatkan kuadrat waktu tempuh terhadap  $1/\sin \theta$  pada jarak tetap. Berdasarkan Gambar 5 menunjukkan grafik linear sesuai dengan Persamaan 4. Grafik 5 menunjukkan kuadrat waktu berbanding dengan  $1/\sin \theta$ .



**Gambar 5.** Grafik kuadrat waktu tempuh terhadap  $1/\sin \theta$  dengan jarak tetap

Hasil uji terhadap sistem pengukuran momen inersia bola pejal, diperoleh nilai konstanta momen inersia bola pejal sebesar  $(0,415 \pm 0,009)$ . Hasil terbaik tersebut diukur pada sudut kemiringan  $5^\circ$  dengan panjang lintasan 2 meter. Nilai momen inersia bola pejal mendekati ketetapan (referensi).

## KESIMPULAN

Telah berhasil dilakukan perancangan sistem peraga pengukuran momen inersi bola pejal menggunakan MPU6050 *Gyroscope Angle Sensor* berbasis arduino yang dapat menghitung nilai sudut, jarak, waktu dan konstanta momen inersia bola pejal. Hasil uji sistem peraga pengukuran momen inersi bola pejal menunjukkan bahwa alat dapat bekerja dengan baik. Selain itu, hasil uji coba sistem menghasilkan nilai ralat yang cukup kecil. Alat peraga sistem pengukuran momen inersia bola pejal berbasis sensor dapat digunakan sebagai alat untuk menentukan momen inersia suatu benda dan lebih presisi dengan pengukuran digital.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada tim riset Instrumentasi dan Elektronika Protechno dan seluruh pihak yang telah membantu dalam penelitian ini hingga pembuatan laporan dan uji esensi penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. C. Paendong, J. C. Rende, and A. Komansilan, "Manajemen Pembelajaran Collaborative Pada Materi Momen Inersia Di Sma Negeri 2 Tondano," *Charm Sains J. Pendidik. Fis.*, vol. 4, no. 3, pp. 129–136, 2023.
- [2] L. Sholihah and N. B. H. Putri, "Analisis konsep momen gaya, momen inersia, dan keseimbangan benda tegar pada rumah adat osing banyuwangi," *J. Inov. Pendidik. Sains dan Terap.*, vol. 2, no. 2, pp. 76–84, 2023.
- [3] D. Mulhayatiah, H. Y. Suhendi, R. Zakwandi, Y. Dirgantara, and M. A. Ramdani, "Moment of inertia: development of rotational dynamics KIT for physics students," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 434, p. 012014, Dec. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/434/1/012014.
- [4] V. A. Zorich, "On the asymptotics of the principal moments of inertia of a convex body in the isotropic state," *J. Math. Sci.*, vol. 259, no. 1, pp. 104–107, Nov. 2021, doi: 10.1007/s10958-021-05603-z.
- [5] A. I. Dumitrascu, A. Bordea, and F. Cazan, "On the improvement of performance in motorsport by means of acceleration measurements," in *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies X*, Dec. 2020, p. 102, doi: 10.1117/12.2572059.
- [6] J. K. Ma and Y.-R. Tong, "Design and Development of Intelligent Torsion Pendulum Method for Rotational Inertia Measurement Experiment," in *2018 9th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME)*, Oct. 2018, pp. 442–446, doi: 10.1109/ITME.2018.00105.
- [7] L. Sun, S. Wang, H. Wang, W. Zhao, J. Li, and C. Shang, "Design and accuracy test of polar moment of inertia measuring equipment for projectile and rocket," *Vibroengineering Procedia*, vol. 44, pp. 87–92, Aug. 2022, doi: 10.21595/vp.2022.22695.
- [8] V. Choudhary and K. Iniewski, Eds., *MEMS*. CRC Press, 2017.
- [9] Y. Wu and L. Pei, "Gyroscope Calibration via Magnetometer," *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 16, pp. 5269–5275, Aug. 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2720756.
- [10] H.Y. Tsai *et al.*, "Wearable Inverse Light-Emitting Diode Sensor for Measuring Light Intensity at Specific Wavelengths in Light Therapy," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 5, pp. 1561–1574, May 2019, doi: 10.1109/TIM.2019.2899444.
- [11] D. Tohl, M. N. Teferra, A. Wallace, A. T. T. Pham, and Y. Tang, "Re-Referencing and Calibration for Robust Ratiometric Light Intensity Measurement," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1–8, 2022, doi: 10.1109/TIM.2022.3194929.
- [12] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker, *Fundamentals of physics*. John Wiley & Sons, 2013.
- [13] E. Olguín Díaz, "Classical Mechanics," 2019, pp. 101–144.
- [14] I. Sriyanti, M. Ariska, N. Cahyati, and J. Jauhari, "Moment of inertia analysis of rigid bodies using a smartphone magnetometer," *Phys. Educ.*, vol. 55, no. 1, p. 013005, Jan. 2020, doi: 10.1088/1361-6552/ab58ba.
- [15] T. Yanrong, L. Huiping, C. Lei, and S. Wanting, "Design of Wireless Automatic Detection System for Moment of Inertia," in *2023 13th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME)*, Nov. 2023, pp. 684–687, doi: 10.1109/ITME60234.2023.00142.
- [16] D. V. Villamizar, "Moments of inertia by summation," *Rev. Bras. Ensino Física*, vol. 45, 2023, doi: 10.1590/1806-9126-rbef-2023-0277.
- [17] X. M. Zhang, D. M. Wang, J. Y. Li, C. M. Shang, J. X. Xiong, and H. C. Xie, "Deviation analysis of rotational inertia measurement based on torsion bar method," *Vibroengineering Procedia*, vol. 21, pp. 178–183, Dec. 2018, doi: 10.21595/vp.2018.20317.
- M. Afdali, M. Daud, and R. Putri, "Perancangan alat ukur digital untuk tinggi dan berat badan dengan output

suara berbasis arduino uno,” *ELKOMIKA*  
*J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun.*  
*Tek. Elektron.*, vol. 5, no. 1, p. 106, 2017.