JPAGS
Journal of Physics & General Science

การพัฒนาชุดทดลองการตกอิสระต้นทุนต่ำด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

Development of a Low-cost Apparatus for Free Fall Experiment using a Microcontroller

แตน กิ่งกันยา* อมร เทศกุลวงศ์ และอุดม ทิพราช

Tan Kingkunya*, Amorn Thedsakhulwong and Udom Tipparach

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Department of Physics, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

*Corresponding author e-mail: tan.ki.63@ubu.ac.th

(Received: December 19, 2022, Revised: January 9, 2023, Accepted: March 6, 2023)

บทคัดย่อ

คณะผู้วิจัยได้พัฒนาชุดทดลองการตกอิสระต้นทุนต่ำด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อวัดความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก ชุดทดลองที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมการทำงานและบันทึกผลโดยการใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาร์ดูโน นาโน ATmega328 และเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุอินฟราเรด E18-D80NK ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและเวลาของวัตถุตกอิสระได้ถูกหาจากการตกของลูกทรงกลมเหล็ก การทดลองได้ใช้ลูกทรงกลมเหล็ก 3 ขนาด ได้แก่ ขนาด มวล 33.0 กรัม เส้นผ่าศูนย์กลาง 18.0 มิลลิเมตร มวล 66.0 กรัม เส้นผ่าศูนย์กลาง 25.2 มิลลิเมตร และมวล 45.0 กรัม เส้นผ่าศูนย์กลาง 30.5 มิลลิเมตร ลูกทรงกลมเหล็กถูกจับยึดและปล่อยให้ตกอิสระด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (magnetic choke) ที่ความสูงแตกต่างกัน 15 ระดับ จาก 0.10 เมตร ถึง 0.80 เมตร เวลาที่ตกถูกวัดในหน่วยมิลลิวินาที ผลการทดลองพบว่า ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่วัดได้ไม่ต่างกัน ค่าเฉลี่ยของความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกมีค่า 9.8502 m/s^2 เมื่อเทียบกับค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงที่ได้จากการคำนวณจากสูตรมาตรฐานที่อุบลราชธานี 9.7948 m/s^2 คิดเป็นความคลาดเคลื่อน 0.56 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่หาได้จากชุดทดลองที่สร้างขึ้นด้วยงบประมาณ 1,380 บาทนั้น สามารถหาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่มีความแม่นยำสูงและใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากสูตรมาตรฐาน เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาที่ได้จากเครื่องจับเวลา J0201-4C ที่มีความละเอียด 0.01 มิลลิวินาที พบว่า เวลาจากชุดทดลองที่สร้างขึ้นมีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์จากเวลาของเครื่องจับเวลา J0201-4C น้อยที่สุดเท่ากับ 1.5 มิลลิวินาที

คำสำคัญ: ไมโครคอนโทรลเลอร์ อาร์ดูโนนาโน ชุดทดลองการตกอิสระ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

ABSTRACT

The authors have developed a low-cost apparatus for a free fall experiment using a microcontroller to measure an acceleration due to gravity of the earth. The developed apparatus can be controlled and collects data by using the Arduino Nano microcontroller board with ATmega328 and IR-Sensor switch E18-D80NK. The relation of position and time of the falling object was obtained by letting stainless steel spheres fall. The experiments were tested with three different balls with mass of steel balls 33.0 grams diameter 18.0 millimeters, 66.0 grams diameter 25.2 millimeters and 45.0 grams diameter 30.5 millimeters. Each ball was held and released by solenoid electromagnets at 15 different heights from 0.10 meters to 0.85 meters. The falling times were measured in milliseconds. The results show that the accelerations due to gravity of the earth obtained from different balls were not different. The average of the acceleration due to gravity of the earth was 9.8502 m/s^2 when compared to the acceleration due to gravity of the earth calculated using standard formula at Ubon Ratchathani

Province 9.7948 m/s^2, the average error was 0.56 percent. These data show that the developed apparatus with a budget of 1,380 Baht yields the precise value of the acceleration due to gravity close to the value obtained from the calculation from standard formula. When compared to an expensive commercial timer (J0201-4C) with resolution 0.01 microseconds, the time from the developed experiment set has an absolute error of 1.5 ms from the J0201-4C timer.

Keywords: microcontroller, Arduino Nano, free fall apparatus, gravitational acceleration

บทนำ

การเรียนรู้ด้วยการฝึกปฏิบัติการเป็นสิ่งที่จำเป็นที่ทำให้นักเรียนสามารถเข้าใจวิทยาศาสตร์และสร้างโอกาสให้นักเรียนได้ฝึกทักษะการคิดวิเคราะห์ [1] นอกเหนือจากการเรียนรู้ด้วยการบรรยาย แต่สิ่งหนึ่งที่เป็นปัญหาสำคัญ คือ การขาดแคลนอุปกรณ์สำหรับการฝึกปฏิบัติ ปัจจุบันมีหลายบริษัทที่พัฒนา และจำหน่ายอุปกรณ์ ชุดการทดลองวิทยาศาสตร์ เช่น ชุดศึกษาการตกอย่างอิสระ CODE: 20173443 และ CODE: 20GFYE14 ที่ใช้ระบบตรวจจับข้อมูลอัตโนมัติแสดงเป็นตัวเลขดิจิทัล ซึ่งมีราคา 17,000 บาท และ 8,000 บาท [2] ตามลำดับ ซึ่งชุดอุปกรณ์เหล่านี้มีราคาสูง โรงเรียนทั่วไปไม่สามารถจัดหาชุดทดลองดังกล่าวมาใช้งานได้ ด้วยข้อจำกัดด้านงบประมาณ แต่ในสาขาวิชาฟิสิกส์ดั้งเดิม การศึกษาเรื่องการเคลื่อนที่ใน 1 มิติเป็นหัวข้อสำคัญที่มีในหลักสูตรการเรียนการสอนในระดับชั้นมัธยมปลาย [3] และมหาวิทยาลัย [4] โดยมีแนวคิดศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและเวลาของวัตถุ ซึ่งชุดปฏิบัติการการตกอิสระเป็นชุดการทดลองหนึ่งที่อยู่ในกระบวนการฝึกปฏิบัติที่ใช้ทดลอง เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวและทดลองหาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) ซึ่งพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี มีค่าเท่ากับ เท่ากับ 9.7948 m/s^2 [5, 6]

ทั้งนี้การศึกษาการตกอิสระมีการทดลองหลายรูปแบบ อาทิเช่น การใช้เครื่องเคาะสัญญาณเวลา การใช้หลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กโดยใช้หลักการเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การใช้เซ็นเซอร์อัลตราโซนิคร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ การใช้วิธีการวิเคราะห์วีดิโอด้วยโปรแกรมแทรกเกอร์ การใช้เซ็นเซอร์อินฟราเรด อย่างไรก็ตามการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและเวลาของวัตถุที่อย่างตกอิสระด้วยวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ยังมีข้อจำกัด การใช้เครื่องเคาะสัญญาณเวลา [2] เกิดข้อผิดพลาด เนื่องจากจุดบนแถบกระดาษไม่ชัดเจน จุดซ้อนทับกัน หรือระยะจุดชิดกันเกินไปส่งผลต่อการแปรผล ส่วนการใช้หลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [7] นั้น ต้องใช้ออสซิลโลสโคป ซึ่งเป็นเครื่องมือตรวจวัดสัญญาณที่มีราคาสูง ขั้นตอนการใช้งานมีความซับซ้อน ผู้ใช้งานต้องมีทักษะในการใช้งาน ซึ่งไม่เหมาะสมสำหรับการเรียนรู้ของนักเรียนระดับชั้นมัธยมปลาย สำหรับการใช้เซ็นเซอร์อัลตราโซนิคร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ [8] โดยใช้หลักการ Echolocation นั้น เป็นชุดการทดลองที่มีกระบวนการทดลองที่ง่าย แต่รูปแบบการทดลองจำเป็นต้องระมัดระวังเพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ และพื้นที่ผิวของจานรองที่มีขนาดใหญ่ทำให้เกิดแรงต้านอากาศ จึงไม่สอดคล้องกับการศึกษาการตกอย่างอิสระซึ่งไม่คิดแรงต้านอากาศ นอกจากนั้น การใช้วิธีการวิเคราะห์วีดีโอด้วยโปรแกรมแทรกเกอร์ [9] ยังมีขั้นตอนในการติดตั้งเครื่องมือและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ซับซ้อน อีกทั้งจำเป็นต้องมีสมาร์ทโฟนเพื่อใช้งาน ซึ่งบางโรงเรียนมีข้อจำกัดในด้านนี้ ส่วนการใช้เซ็นเซอร์อินฟราเรดตรวจนับเวลาตกของวัตถุ [10, 11] นับเป็นวิธีที่น่าสนใจ แต่ชุดทดลองนี้ไม่สามารถปรับค่าระยะการตกอย่างอิสระของวัตถุได้ และมีเซ็นเซอร์อินฟราเรดหลายตัว ทำให้มีราคาสูง และมีขนาดใหญ่ ไม่สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย และการเก็บรักษา

จากข้อจำกัดที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการพัฒนาชุดทดลองการตกอิสระต้นทุนต่ำด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้นักเรียนได้ฝึกทักษะการทดลองการตกอิสระด้วยชุดเครื่องมือที่สามารถสร้างขึ้นด้วยอุปกรณ์ที่เรียบง่าย มุ่งพัฒนาชุดอุปกรณ์การทดลองที่มีราคาเหมาะสมด้วยงบประมาณ 1,380 บาท โดยออกแบบให้ชุดอุปกรณ์สามารถถอดชิ้นส่วนและติดตั้งชุดทดลองได้ง่าย มีขนาดเล็ก สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย และเก็บรักษา มีรูปแบบการใช้งานที่ง่ายเหมาะสมสำหรับการเรียนรู้ของนักเรียนระดับชั้นมัธยมปลาย นอกจากนั้น ยังอ่านค่าเวลาจากจอแสดงผลได้อย่าง

ชัดเจน และการวิเคราะห์ข้อมูลที่ไม่ซับซ้อน โดยพัฒนาชุดทดลองร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาร์ดูโน รุ่นนาโน (Arduino Nano) ใช้ไอซี ATmega328 เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงาน ร่วมกับเซ็นเซอร์อินฟราเรด 2 ตัว เพื่อตรวจจับวัตถุ ใช้ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (magnetic choke) ยึดจับลูกทรงกลมเหล็กและออกแบบตัวยึดเซ็นเซอร์ที่สามารถเลื่อนปรับเปลี่ยนความสูงได้

การดำเนินงานวิจัย

การออกแบบชุดอุปกรณ์ประกอบการปฏิบัติการนั้น ได้อ้างอิงสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง และเวลาของวัตถุที่ตกอย่างอิสระตามสมการ (1) ซึ่งเทียบกับสมการเชิงเส้น นั่นคือ สมการ (2)

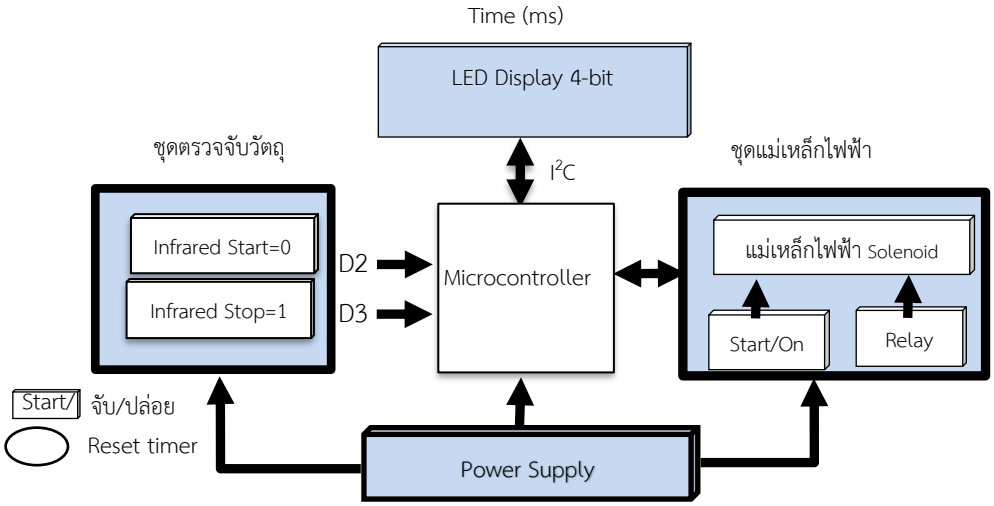
$$y_f = \frac{1}{2}at^2 + y_i \quad (1)$$

$$y = mx + c \quad (2)$$

โดย m คือ ค่าความชัน (slope) ของกราฟระหว่างระยะการตกของวัตถุ y_f กับค่ากำลังสองของเวลา t^2 ดังนั้น ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับสองเท่าของค่าความชันที่ได้จากกราฟ ดังแสดงในสมการ (3)

$$a = g = 2(\text{slope}) = 2\frac{\Delta y}{\Delta t^2} \quad (3)$$

การพัฒนาชุดอุปกรณ์ประกอบการปฏิบัติการประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก คือ ส่วนตรวจนับเวลาการตกของวัตถุอัตโนมัติและแสดงผล ส่วนควบคุมการตกของวัตถุ โดยมีแผนผังของระบบซึ่งแสดงรายละเอียดความสัมพันธ์ของแต่ละส่วน ดังแสดงตามภาพที่ 1



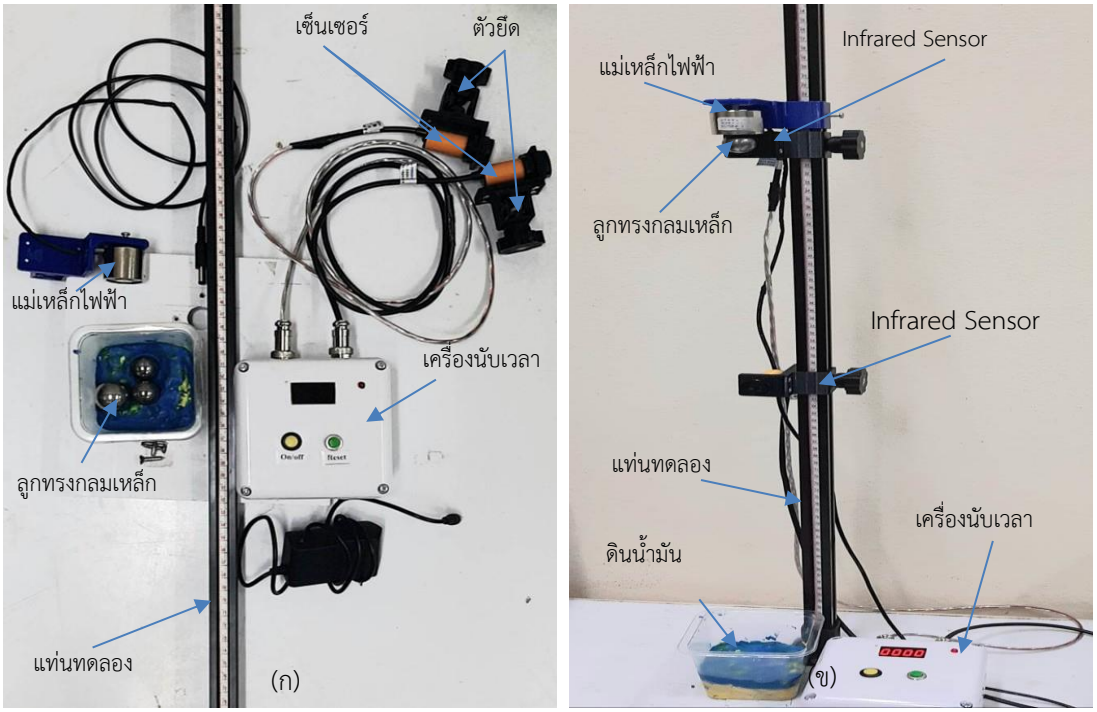
ภาพที่ 1 ระบบการทำงานของชุดการทดลอง

ส่วนตรวจนับเวลาการตกของวัตถุอัตโนมัติและแสดงผล ประกอบด้วยเซ็นเซอร์อินฟราเรด (E18-D80NK) จำนวน 2 ตัว เชื่อมต่อเข้ากับดิจิทัลอินพุต D2 ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน นาโน เริ่มนับเวลา เมื่อตรวจไม่พบวัตถุและดิจิทัลอินพุต D3 หยุดนับเวลาเมื่อตรวจพบวัตถุ ซึ่งตำแหน่งขาดิจิทัลทั้งสองปรากฏที่ขา 4 และ 5 ตามลำดับ ดังแสดงในเอกสารคู่มือการจัดเรียงขา [12] โดยได้พัฒนาโปรแกรม เพื่อตรวจสอบสถานะของพอร์ตดิจิทัลทั้งสอง เพื่อตรวจนับเวลาที่ใช้ในการตกของวัตถุผ่านเซ็นเซอร์ทั้งสองตัว เมื่อมีการกดสวิตช์ส่วนควบคุมการตกเพื่อให้วัตถุตก โดยส่งผลให้เซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งจุดปล่อยตรวจสอบไม่พบวัตถุ ตัวนับจึงเริ่มทำการนับเวลา และเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่านเซ็นเซอร์ที่จุดตรวจวัด ตัวนับจึงหยุดนับ และนำค่า

เวลาที่ตรวจนับได้ส่งไปแสดงผลผ่านโมดูล 7 segment LED ขนาด 4 หลัก แบบสำเร็จรูป ในหน่วย มิลลิวินาที และออกแบบให้สามารถเลื่อนตำแหน่งจุดตรวจวัดเพื่อปรับเปลี่ยนระยะการตกขณะทำการทดลองได้ตามต้องการ ซึ่งปรับได้ตั้งแต่ 10.00 เซนติเมตร ถึง 80.00 เซนติเมตร บนแกนเลื่อนในแนวตั้งที่มีสเกลความละเอียด 0.10 เซนติเมตร

ส่วนควบคุมการปล่อยวัตถุตก ประกอบด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (magnetic choke) ทำหน้าที่ยึดจับลูกทรงกลมเหล็กควบคุมการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดโดยใช้สวิตช์กดติดกดดับ เป็นตัวควบคุมการทำงานของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเปิด-ปิดการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังขดลวดแม่เหล็กเหนี่ยวนำ

สำหรับการสร้างแรงแม่เหล็กเพื่อดูดจับลูกปืนเหล็กที่เป็นวัตถุ เมื่อมีการกดสวิตช์ให้ติด กระแสไฟฟ้าจะถูกปล่อยให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ จึงเกิดแรงแม่เหล็กขึ้น และสามารถดูดจับวัตถุให้ติดอยู่ แต่เมื่อกดสวิตช์อีกครั้งให้ดับ จะส่งผลไม่ให้เกิดแรงแม่เหล็ก วัตถุที่ยึดติดอยู่จึงหลุดตกลงสู่พื้นด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก



ภาพที่ 2 (ก) ส่วนประกอบของชุดทดลองที่สร้างขึ้น และ (ข) แสดงการติดตั้งชุดทดลอง

สำหรับชุดอุปกรณ์การทดลองที่ได้สร้างขึ้นนั้น ในภาพที่ 2 (ก) คือ ส่วนประกอบในการตรวจนับเวลาการตกของวัตถุอัตโนมัติและแสดงผล สำหรับภาคส่วนควบคุมการปล่อยวัตถุนั้น อยู่ภายในกล่องสีขาวขนาด 4 นิ้ว x 4 นิ้ว x 2.5 นิ้ว ด้านหน้ากล่องมีหน้าจอแอลอีดีแสดงเวลาตรวจนับขนาดสี่หลักในหน่วยมิลลิวินาที มีปุ่มกดควบคุมการปล่อย ปุ่มรีเซต และไฟแอลอีดีแสดงสถานะ สำหรับภาพที่ 2 (ข) นั้น ได้แสดงการติดตั้งชุดทดลองนี้

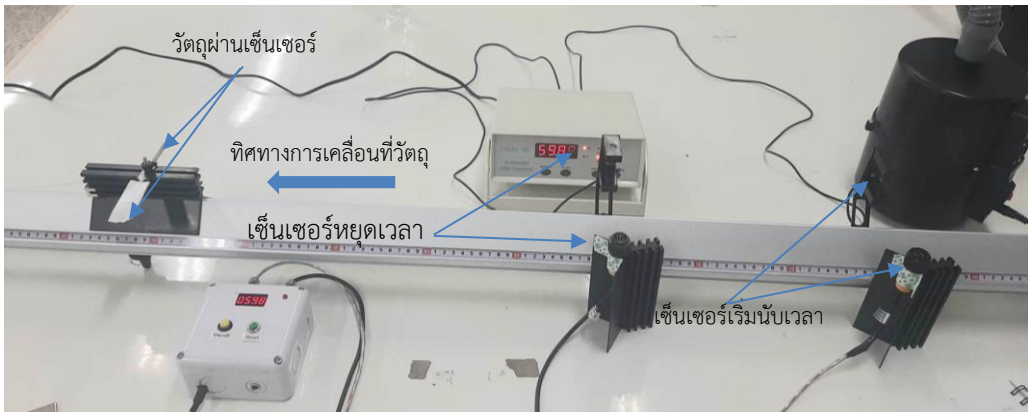
หลังจากนั้น จึงตรวจสอบการทำงานของส่วนตรวจนับเวลาการตกของวัตถุอัตโนมัติและแสดงผล โดยเทียบกับอุปกรณ์ตรวจนับเวลาแบบดิจิทัล J0201-4C ที่มีความละเอียดในการจับเวลา 0.01 มิลลิวินาที และตรวจสอบความสามารถในการยึดจับวัตถุที่ใช้ในการทดลองด้วยการวางน้ำหนักถ่วง 120 กรัม ถึง 2,320 กรัม

ผลการวิจัย

การออกแบบส่วนตรวจนับเวลาการตกของวัตถุอัตโนมัติและแสดงผล ประกอบด้วยส่วนควบคุมหลัก คือ ไมโครคอน-

โทรลเลอร์อาดูโน นาโน ซึ่งทำหน้าที่ตรวจสอบการทำงานของเซ็นเซอร์อินฟราเรด เพื่อเริ่มและหยุดการนับเวลา โดยตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณของขาดิจิทัลที่เชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์ เพื่อเปิด-ปิดการทำงานของอินเตอร์รัพท์ และคำนวณหาผลต่างของเวลาของเซ็นเซอร์ทั้งสอง แล้วส่งค่าเวลาที่ได้ไปแสดงผลยังหน้าจอแอลอีดีขนาดสี่หลัก ซึ่งสามารถตรวจนับเวลาได้สูงสุด 9.999 วินาที มีความละเอียด 0.001 วินาที

ได้ตรวจสอบค่าเวลาที่ได้จากชุดการทดลองที่สร้างขึ้น ด้วยการเปรียบเทียบเวลากับเครื่องนับเวลาแบบดิจิทัล J0201-4C โดยวางบนรางลม และติดตั้งตำแหน่งเซ็นเซอร์เริ่มต้นและเซ็นเซอร์สุดท้ายให้อยู่ตำแหน่งเดียวกัน ดังภาพที่ 3



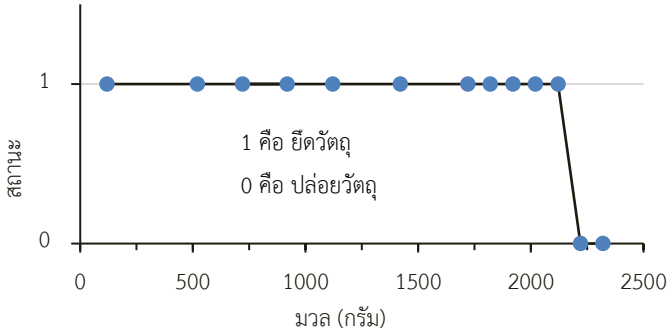
ภาพที่ 3 การทวนสอบการวัดเวลากับอุปกรณ์ J0201-4C

ตารางที่ 1 เวลาจากชุดทดลองการตกอย่างอิสระที่สร้างกับเวลาจากเครื่องจับเวลา J0201-4C

ระยะ (cm)	เครื่องจับเวลา J0201-4C (ms)						เครื่องจับเวลาที่สร้าง (ms)						ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (ms)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย	S.D.	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย	S.D.	
20.0	439.5	443.5	455.5	439.9	445.4	7.5	440	446	458	444	447.4	7.7	2.0
30.0	598.8	598.9	589.7	598.8	597.1	4.6	598	596	591	595	595.6	3.0	1.5
40.0	746.6	744.4	742.8	744.3	744.1	1.6	748	746	746	746	746.0	1.1	1.9
50.0	744.2	736.5	740.6	739.1	739.6	3.2	744	734	739	738	738.0	4.2	1.6
60.0	1004	1006	999.8	1001	1003.4	2.9	1005	1008	1003	1003	1005.2	2.4	1.8
70.0	1109	1106	1105	1114	1109.6	4.2	1110	1104	1103	1112	1107.8	4.4	1.8
80.0	1200	1195	1207	1204	1198.0	6.5	1201	1193	1204	1200	1196.2	6.0	1.8

จากตารางที่ 1 พบว่าข้อมูลที่กระจายสูงสุดอยู่ในช่วง 20.0 เซนติเมตร ซึ่งนับได้ 447.4±7.7 มิลลิวินาที และข้อมูลที่กระจายต่ำสุดนั้น อยู่ในช่วง 40.0 เซนติเมตร นับได้ 746.0±1.1 มิลลิวินาที ส่วนความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (absolute error) ของค่าเฉลี่ยเวลาที่ได้จากชุดทดลองที่สร้างกับเครื่องดิจิทัล J0201-4C มีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.0 มิลลิวินาที มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (relative error) ร้อยละ 0.44 ซึ่งถือว่าเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานตรวจนับเวลาได้จริง [13-14]

สำหรับภาคส่วนควบคุมการปล่อยวัตถุนั้น ได้ควบคุมการยึดและปล่อยวัตถุด้วยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้กับขดลวด โดยใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์ไฟฟ้าและรับค่าลอจิกจากสวิตช์ ผลจากการทดสอบความสามารถในการยึดจับวัตถุ พบว่าขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถยึดจับวัตถุที่มีน้ำหนักมากที่สุด 2,120 กรัม ซึ่งได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การทดสอบความสามารถในการยึดวัตถุ

ตารางที่ 2 เวลาที่ได้เมื่อเปลี่ยนความสูงและขนาดของลูกทรงกลมเหล็ก

ความสูง (m)	ลูกทรงกลมเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 18.00 mm		ลูกทรงกลมเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 25.23 mm		ลูกทรงกลมเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 30.50 mm	
	เวลาเฉลี่ย (s)	เวลาเฉลี่ยยกกำลังสอง (s^2)	เวลาเฉลี่ย (s)	เวลาเฉลี่ยยกกำลังสอง (s^2)	เวลาเฉลี่ย (s)	เวลาเฉลี่ยยกกำลังสอง (s^2)
0.10	0.1366	0.0187	0.1334	0.0178	0.1340	0.0180
0.15	0.1712	0.0293	0.1666	0.0278	0.1656	0.0274
0.20	0.1988	0.0395	0.1952	0.0381	0.1934	0.0374
0.25	0.2214	0.0490	0.2190	0.0480	0.2188	0.0479
0.30	0.2434	0.0592	0.2414	0.0583	0.2408	0.0580
0.35	0.2634	0.0694	0.2614	0.0683	0.2628	0.0691
0.40	0.2830	0.0801	0.2798	0.0783	0.2808	0.0788
0.45	0.2996	0.0898	0.2978	0.0884	0.2976	0.0886
0.50	0.3170	0.1005	0.3142	0.0987	0.3146	0.0990
0.55	0.3324	0.1105	0.3298	0.1088	0.3296	0.1086
0.60	0.3466	0.1201	0.3454	0.1190	0.3454	0.1193
0.65	0.3614	0.1306	0.3596	0.1293	0.3594	0.1292
0.70	0.3774	0.1424	0.3738	0.1397	0.3724	0.1387
0.75	0.3878	0.1504	0.3874	0.1501	0.3872	0.1499
0.80	0.4002	0.1602	0.3996	0.1597	0.3992	0.1594

สำหรับการตรวจสอบการใช้งานของชุดทดลองที่สร้างขึ้น ได้เลือกวัตถุที่เป็นลูกทรงกลมเหล็ก 3 ขนาด คือ มวล 33.0 กรัม เส้นผ่าศูนย์กลาง 18.0 มิลลิเมตร มวล 66.0 กรัม เส้นผ่าศูนย์กลาง 25.2 มิลลิเมตร และมวล 45.0 กรัม เส้นผ่าศูนย์กลาง

30.5 มิลลิเมตร โดยได้ทดลองตรวจวัดเวลาของการตกอย่างอิสระของลูกทรงกลมเหล็กที่ความสูงตั้งแต่ 0.10 เมตร, 0.15 เมตร, 0.20 เมตร, เพิ่มขึ้นทีละ 0.05 เมตร จนถึง 0.80 เมตร โดยที่ความสูงค่าหนึ่งนั้น ได้ทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง หลังจากนั้น จึงหาค่าเวลาเฉลี่ยและค่าเวลายกกำลังสอง ในหน่วยวินาที (s) และวินาทียกกำลังสอง (s^2) ตามลำดับ ผลการทดลองได้แสดงในตารางที่ 2 หลังจากนั้น สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการตกของวัตถุ Δy กับค่ากำลังสองของเวลา Δt^2 ตามสมการ (3) และได้กราฟดังแสดงในภาพที่ 5 (ก) โดยได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 4.9233 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกได้เป็น

$$g = 2(\text{slope}) = 2\frac{\Delta y}{\Delta t^2} = 2(4.9233) = 9.8466\ \text{m/s}^2$$

ในขณะที่ ภาพที่ 5 (ข) และ 5 (ค) ได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 4.9222 และ 4.9299 ตามลำดับ (เส้นตรงทั้งสามเส้นนี้มีความชันใกล้เคียงกันมาก) เมื่อใช้วิธีคำนวณตามข้างต้น จึงได้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 9.8444 m/s^2 และ 9.8598 m/s^2 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของการหมุนรอบตัวเองของโลก ยังมีแรงคอริโอลิส (Coriolis force) มาเกี่ยวข้อง ดังนั้น ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก ณ ละติจูด (latitude) ต่าง ๆ บนโลกนั้น สามารถประมาณค่าความเร่งโน้มถ่วง $g(\phi)$ ณ ละติจูด ϕ โดยใช้สมการของ Helmert [5] ได้ดังนี้

$$g(\phi) = \mathbf{g_0}(1 + 0.0053024\sin^2\phi - 0.0000058\sin^2 2\phi) \quad (4)$$

เมื่อ $\mathbf{g_0}$ คือ ความเร่งโน้มถ่วงที่เส้นศูนย์สูตร มีค่า 9.780327 m/s^2 โดยที่จังหวัดอุบลราชธานีตั้งอยู่ที่ละติจูดที่ 15 องศา 15 ลิปดาเหนือ ดังนั้น จากสมการ (4) ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่า

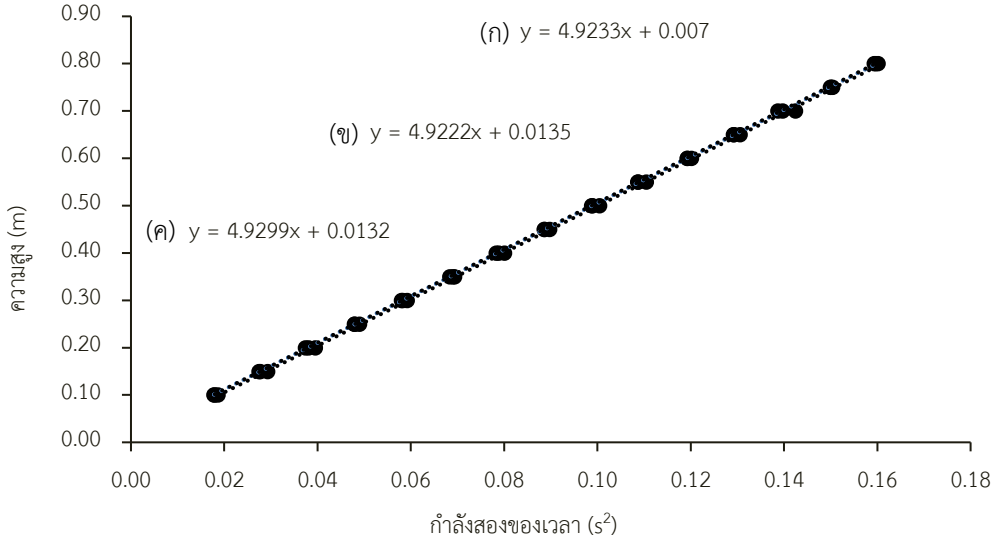
$$g(\phi) = 9.780327(1 + 0.0053024\sin^2\phi - 0.0000058\sin^2 2\phi)$$

$$g(\phi) = 9.7948\ \text{m/s}^2$$

จากผลการทดลองจากชุดทดลองที่สร้างขึ้น ได้ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเฉลี่ย 9.8502 m/s^2 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเร่งที่ได้จากการคำนวณจากสมการ (4) ของพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี มีค่าเท่ากับ 9.7948 m/s^2 พบว่ามีความแตกต่างเท่ากับ 0.56 %

สรุปผลการวิจัย

ชุดทดลองการตกอย่างอิสระต้นทุนต่ำที่ควบคุมและบันทึกผลได้โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328 และเซ็นเซอร์อินฟราเรด E18-D80NK ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ภาคส่วนตรวจนับเวลาการตกของวัตถุอัตโนมัติและแสดงผล ภาคส่วนควบคุมการตกของวัตถุ โดยได้ทดสอบความเที่ยงตรงของชุดทดลองที่สร้างขึ้นกับเครื่องตรวจนับเวลาดิจิทัล J0201-4C พบว่า มีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.0015 วินาที และได้ทดสอบความสามารถในการยึดวัตถุของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่า สามารถยึดน้ำหนักมากที่สุด 2,120 กรัม และทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับเวลาของวัตถุในการตกอย่างอิสระ โดยใช้ลูกทรงกลมเหล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ขนาด คือ มวล 33.0 กรัม เส้นผ่าศูนย์กลาง 18.00 มิลลิเมตร มวล 66.0 กรัม เส้นผ่าศูนย์กลาง 25.23 มิลลิเมตร และมวล 45.0 กรัม เส้นผ่าศูนย์กลาง 30.50 มิลลิเมตร ที่ความสูงแตกต่างกัน 15 ระดับ จาก 0.10 -0.80 เมตร ซึ่งทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง ในระดับความสูงเดียวกัน หลังจากนั้น ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและกำลังสองของเวลา เพื่อวิเคราะห์หาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกด้วยการคำนวณหาค่าความชันของสมการเชิงเส้น พบว่า ได้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเฉลี่ย 9.8502 m/s^2 เทียบกับค่า



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับกำลังสองของเวลาในการตกของลูกทรงกลมเหล็ก (ก) เส้นผ่าศูนย์กลาง 18.00 มิลลิเมตร (ข) เส้นผ่าศูนย์กลาง 25.23 มิลลิเมตร และ (ค) เส้นผ่าศูนย์กลาง 30.50 มิลลิเมตร

ความเร่งที่ได้จากการคำนวณจากสูตร [5] ได้ g = 9.7948 m/s^2 มีความคลาดเคลื่อน 0.56 % ซึ่งสามารถยืนยันประสิทธิภาพของชุดทดลองการตกอย่างอิสระต้นทุนต่ำที่สร้างขึ้นโดยใช้งบประมาณ 1,380 บาท มีความแม่นยำสูง เนื่องจากชุดทดลองการตกอย่างอิสระนี้มีงบประมาณในการสร้างต่ำ จึงเหมาะสมกับโรงเรียนที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณ สามารถสร้างและจัดกิจกรรมการเรียนรู้เกี่ยวกับการตกอย่างอิสระ เพื่อเสริมสร้างประสบการการเรียนรู้ของผู้เรียนด้วยการฝึกปฏิบัติได้

ข้อเสนอแนะ

หากลูกทรงกลมเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 26.00 มิลลิเมตร แนะนำให้วางอินฟราเรดเซนเซอร์ตรงกลางวัตถุ และต้องบวกเพิ่มรัศมีลูกทรงกลมเหล็กเข้าไปในการคิดเวลาด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] วิชัย วงษ์ใหญ่ และมารุต พัฒผล, *การจัดการเรียนรู้ เพื่อพัฒนาการคิดวิเคราะห์.* กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ ศูนย์ผู้นำนวัตกรรมหลักสูตรและการเรียนรู้, 2562.

[2] บริษัท จัดจำหน่ายอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ อุปกรณ์ห้องแลป ตามมาตรฐานสากล, (2519), ชุดศึกษาการตกอย่างอิสระ CODE: 20173443, [ออนไลน์]. จาก: https://gammaco.com/gammaco/blog

[3] ช่วง ทมทิตชงค์ และเพลินจิต ทมทิตชงค์, *Hi-ED'S Physics ฟิสิกส์ กลศาสตร์ ม. 4 เทอม 1*. โรงพิมพ์ บริษัท ไทเนรมิต-กิจ อินเตอร์ โปรเกรสซิฟ จำกัด, 2544.

[4] J. S. Walker, *Physics*, 4th ed. Boston: Pearson, 2010.

[5] Johannes, (2014), Physics, Explained latitude, [Online]. Available: https://physics.stackexchange.com /posts/153212/revisions

[6] M. Shoaib, A. M. Iqbal and M. A. Imran, "Measurement of acceleration due to gravity using Arduino and ultrasonic sensor," *Journal of Sensor Technology*, vol. 11, no. 4, pp. 55-63, 2021.

[7] D. Amrani, "Faraday's law of induction gets free-falling magnet treatment," *Physics Education*, vol. 40, no. 4, pp. 313-314, 2005.

[8] A. A. Moya, “An Arduino experiment to study free fall at schools,” *Physics Education*, vol. 53, no. 5, 055020, 2018.

[9] ธันย์ชนก รุยัน, มารีนา มะหนิ และนิคม ชูศิริ, “การใช้โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอแทรกเกอร์ เรื่อง การตกอย่างอิสระ,” ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 29*, สงขลา, 2562, น. 293-299.

[10] P. Musik, “Development of computer-based experimental set in physics for free falling object,” in *Proceeding of The European Conference on Education 2014*, United Kingdom, 2014, pp. 309-322.

[11] ชนกนันท์ บางเลี้ยง, จรัส บุณยธรรมา และจันทนี อุทธิสินธุ์, “ชุดทดลองตกอิสระควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.*, ปีที่ 1, ฉ. 9, น. 55-65, 2562.

[12] Arduino, (2021), Arduino Nano (V2.3) User Manual, [Online]. Available: https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoNanoManual23.pdf

[13] วีระพันธ์ ติยัพเสน, *ทฤษฎีเครื่องมือและการวัดทางไฟฟ้า*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์สกายบุ๊กส์, 2546.

[14] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, (2561), การประเมินความน่าเชื่อถือของข้อมูล, [ออนไลน์]. จาก: https://web.rmutp.ac.th/woravith/upload/AnalChem/ppt-evaluation.pdf