



การพัฒนาชุดการทดลองฟิสิกส์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว
และการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน

DEVELOPMENT OF PHYSICS EXPERIMENT KITS USING
THE SMARTPHONE'S SENSORS FOR STUDYING LINEAR MOTION
WITH CONSTANT SPEED AND TORSIONAL PENDULUM

วิชาพร นามจันทร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2563

การพัฒนาชุดการทดลองฟิสิกส์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว
และการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

การศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

DEVELOPMENT OF PHYSICS EXPERIMENT KITS USING
THE SMARTPHONE'S SENSORS FOR STUDYING LINEAR MOTION
WITH CONSTANT SPEED AND TORSIONAL PENDULUM



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF EDUCATION
(Physics)

Faculty of Science, Srinakharinwirot University

2020

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาชุดการทดลองฟิสิกส์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว

และการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิดของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน

ของ

วิชาญพร นามจันทร์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โชคชัย พุทธิรักษา)

(อาจารย์ ดร.ชินวุธ พิพัฒน์ภานุกุล)

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.สุพิชญ์ แหม่มณี)

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาชุดการทดลองฟิสิกส์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว และการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน
ผู้วิจัย	วิชญาพร นามจันทร์
ปริญญา	การศึกษามหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โชคชัย พุทธิรักษา

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาชุดการทดลองฟิสิกส์โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน สำหรับใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุ 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว และ 2) การแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต โดยชุดการทดลองที่ 1 ดำเนินงานกับเวลาของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว หาได้จากการใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 ที่ติดตั้งอยู่บนรถไฟของเล่น ร่วมกับแอปพลิเคชัน Phyphox เป็นเครื่องมือวัดความส่องสว่างของหลอดไฟ LED เทียบกับเวลา ขณะรถไฟของเล่นเคลื่อนที่ผ่านแสงจากชุดหลอดไฟ LED ที่ติดตั้งกันเป็นช่วงเท่า ๆ กันบนข้างหนึ่งของรางรถไฟของเล่นยาว 2 เมตร จะได้ค่าความส่องสว่างที่มีค่าสูงสุดเป็นช่วง ๆ ซึ่งแทนตำแหน่งใด ๆ ที่สัมพันธ์กับเวลาของรถไฟของเล่นขณะเคลื่อนที่ ผลการศึกษา พบว่า อัตราเร็วเฉลี่ยและอัตราเร่งเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่คำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและอัตราเร็วกับเวลา มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญกับผลการทดลองจากการใช้เทคนิคการวิเคราะห์หาค่าด้วยโปรแกรม Tracker และทุกกรณีได้ค่าอัตราเร่งเฉลี่ยใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี ในส่วนของชุดการทดลองที่ 2 การแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต ซึ่งประกอบด้วยจานโลหะกลมและแท่งโลหะ วัดโดยใช้เซนเซอร์ 2 ชนิด คือ เซนเซอร์ตรวจจับความเร่ง เซนเซอร์ไจโรสโคป และระบบตรวจจับตำแหน่งของสมาร์ทโฟน iPhone 4s ร่วมกับแอปพลิเคชัน Sensorlog ในการวัดความเร่งเชิงมุม ความเร็วเชิงมุม การกระจัดเชิงมุมเทียบกับเวลา ตามลำดับ พร้อม ๆ กันอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังเพิ่มทอร์กกระบอกโลหะตัน 2 อันในระบบ เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์หาค่าคงตัวในการบิดและพลังงานต่าง ๆ ขณะเกิดการแกว่งต่อไป พบว่า ผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการศึกษาทั้ง 2 ชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่า เซนเซอร์ต่าง ๆ ของสมาร์ทโฟนมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นอุปกรณ์การทดลองในการวัดและบันทึกค่าปริมาณทางฟิสิกส์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ใช้งานง่าย ช่วยลดต้นทุนและสามารถนำมาใช้ในการจัดการเรียนการสอน การสาธิตหน้าชั้นเรียน หรือสร้างสรรค์การทดลองฟิสิกส์ได้หลากหลายรูปแบบทั้งในห้องเรียนและนอกห้องเรียน

คำสำคัญ : ชุดการทดลองฟิสิกส์, เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน, การเคลื่อนที่ในแนวตรง, อัตราเร็วคงตัว, การแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต

Title	DEVELOPMENT OF PHYSICS EXPERIMENT KITS USING THE SMARTPHONE'S SENSORS FOR STUDYING LINEAR MOTION WITH CONSTANT SPEED AND TORSIONAL PENDULUM
Author	WITCHAYAPORN NAMCHANTHRA
Degree	MASTER OF EDUCATION
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Assistant Professor Chokchai Puttharugsa , Ph.D.

This research proposed low-cost physics experiment kits to study two motions of an object including linear motion and torsional pendulum, using smartphone sensors. For linear motion, the position-time of a moving object with constant speed was measured with an ambient light sensor with a 'Phyphox' application. The LEDs were arranged at equal intervals on one side of 2.0 m rail. A Samsung Galaxy S4 was attached to a toy train and acted as the moving object. The ambient light sensor measured the illuminance, which fluctuated on the LEDs with respect to time, while the smartphone was traveling in a straight line. The results obtained with the smartphone sensor method was very close to the results obtained from the video analysis method. With regard to the torsion pendulum, the oscillation of the disk was measured using a device motion service, a gyroscope and an accelerometer with the 'Sensorlog' application simultaneously. These sensors recorded the angular position, angular speed and angular acceleration vs. time, respectively. An iPhone 4S was placed on a metal disk hanging by a wire. In addition, two metal cylinders were added to the system to find a torsion constant. These physical quantities were processed to calculate and demonstrate how the torsion constant can conserve mechanical energy. The experimental data were in good agreement with the theoretical values. The results from the two experiments indicated that smartphone sensors are suitable due to the fact that it is an easy, practical and effective tools in physics experiments. Moreover, it can be used to perform experiments in many ways during class or in daily life.

Keyword : Physics experiment kits, Smartphone sensors, Linear motion, Constant speed, Torsional pendulum

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โชคชัย พุทธรักษา อาจารย์ที่ปรึกษา ปรินญาณิพนธ์และ อาจารย์ ดร. สุพิชญ์ แหมมณี ที่คอยติดตาม ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ตลอดจนช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนทำให้ปรินญาณิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ชินวุธ พิพัฒน์ภานุกุล ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็น คณะกรรมการในการสอบปากเปล่าปรินญาณิพนธ์รวมทั้งให้คำแนะนำและข้อแก้ไขเพิ่มเติมเพื่อให้ปรินญาณิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณธัญญพ นิลกำจร คุณเสริมสุข รัตเร่ง และคุณวิวัฒน์ เครือวงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ประดิษฐ์อุปกรณ์สำหรับการทดลอง และช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ อีกทั้งสถานที่ในการทำการทดลอง ตลอดจนการทำปรินญาณิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณนางสาวเหมจิรา มะลิซ้อน รวมถึงเพื่อน พี่ และน้อง ๆ ทุกคนในหลักสูตรปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจให้กันและกันตลอดช่วงเวลาเรียนปริญญาโท

ขอขอบคุณนางสาวพีรดา วิชามุข ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำเกี่ยวกับการจัดทำเล่ม ปรินญาณิพนธ์ฉบับนี้ให้เรียบร้อยสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณโครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) โดยสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ผู้สนับสนุนทุนการศึกษาตลอดการเรียนระดับปริญญาโททางการศึกษาของผู้วิจัย

ขอกราบขอบพระคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผู้สนับสนุนการทำวิจัยแผนงานพัฒนาบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2563 ให้การดำเนินการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัวนามจันทราและครอบครัววงศ์คำแก้วทุกคน ที่ให้การสนับสนุนทางการศึกษา คอยให้กำลังใจและเป็นแรงผลักดันให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณตัวเองอย่างที่สุด ที่ยังมีความหวัง กำลังใจและคำปณิธานให้ตัวเองเสมอ ทั้งในวันที่ท้องฟ้าเป็นสีนิลหรือในวันที่ฝนตกจนเปียกปอน ขอขอบคุณที่อดทนต่อปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้น ทั้งจากสิ่งที่คุณควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ และพยายามมาก ๆ ที่จะทำสิ่งนี้ให้สำเร็จ ขอขอบคุณมากนะ

วิญญาพร นามจันทรา

สารบัญ

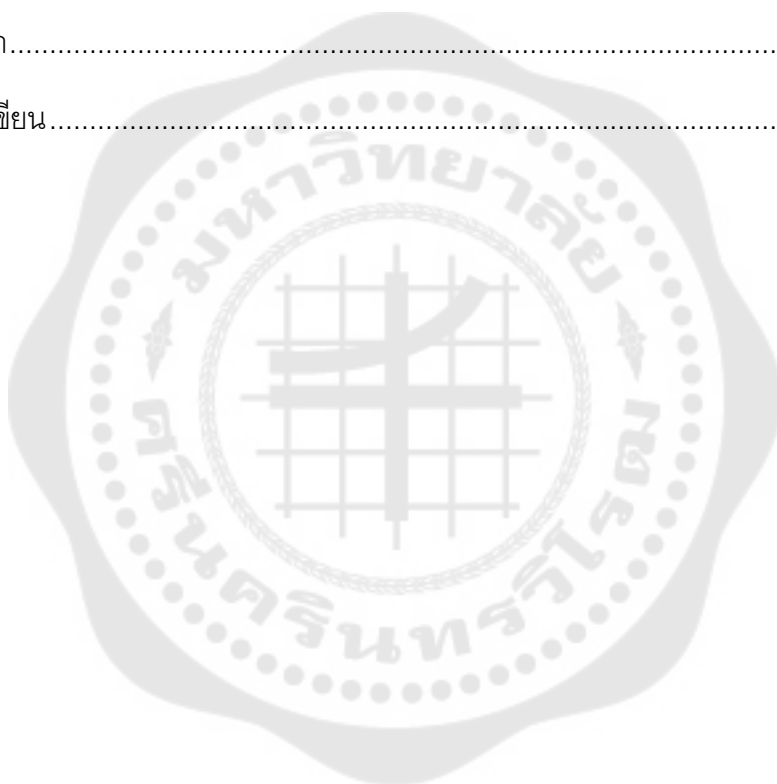
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	4
ความสำคัญของงานวิจัย.....	4
ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	5
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	7
1. การเคลื่อนที่ในแนวตรง.....	7
1.1 ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ในแนวตรง.....	8
1.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $x-t$, $v-t$ และ $a-t$	13
1.3 การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว.....	15
2. การแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด (Torsional pendulum).....	18
2.1 ลักษณะการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด (Torsional pendulum).....	18
2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ กับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้ม ชนิดบิด.....	21
2.3 พลังงานของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด.....	22

3. โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia)	24
3.1 การวิเคราะห์หาโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุแข็งเกร็งภายใต้ทอร์กสุทธิ.....	24
3.2 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงเรขาคณิตแบบต่าง ๆ.....	25
3.3 ทฤษฎีแกนขนาน (Parallel-axis theorem)	26
3.4 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงเรขาคณิตที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ที่หมุนรอบ แกนที่ผ่านศูนย์กลางมวล	27
4. หลักการทำงานของเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน	29
4.1 เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer)	29
4.2 เซนเซอร์ไจโรสโคป (Gyroscope Sensor)	31
4.3 ระบบตรวจวัดตำแหน่ง (Device motion service)	33
4.4 เซนเซอร์ตรวจวัดแสง (Ambient light sensor)	34
5. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับชุดการทดลองฟิสิกส์	35
5.1 การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์คู่กับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์	35
5.2 การใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโออัตราเร็วสูงร่วมกับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์.....	38
5.3 การใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนเพื่อเป็นเครื่องมือวัดและเก็บข้อมูล	42
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	52
6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรง	52
6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก	60
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	65
1. การพัฒนาชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว.....	66
1.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง	66
1.2 การออกแบบและสร้างชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว ของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟน	67
1.3 แอปพลิเคชันที่ใช้ในการทดลอง	73

1.4 วิธีการทดลอง	75
1.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	79
2. การพัฒนาชุดการทดลองที่ 2: เรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิด	85
2.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง	85
2.2 การออกแบบและพัฒนาชุดการทดลองเรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิด โดยใช้ เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน.....	85
2.3 แอปพลิเคชันที่ใช้ในการทดลอง	86
2.4 วิธีการทดลอง	87
2.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	90
บทที่ 4 ผลการศึกษา	95
1. ชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว	96
1.1 การหาช่วงเวลาที่สั้นที่สุดที่เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนสามารถวัดและแยก ความต่างของความส่องสว่างจากแสงกระพริบได้	96
1.2 การหาอัตราเร็วเฉลี่ยของวัตถุที่เคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวจากกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลา.....	100
1.3 การหาอัตราเร่งเฉลี่ยของวัตถุที่เคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวจากกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา.....	102
2. ชุดการทดลองที่ 2: เรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิด.....	106
2.1 การศึกษาปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัด เชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิด	106
2.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคาบการแกว่งกับโมเมนต์ความเฉื่อยรวมและหาค่าคง ตัวในการปิดของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิด	117
2.3 การศึกษากฎอนุรักษ์พลังงานกลในการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิด.....	121
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	128

สรุป128

1. ชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว.....	128
2. ชุดการทดลองที่ 2: เรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต	131
อภิปรายผล.....	133
ข้อเสนอแนะ	137
บรรณานุกรม.....	138
ภาคผนวก.....	144
ประวัติผู้เขียน.....	171



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 แสดงค่าความถี่และคาบในการกระพริบจากแฟลชของสมาร์ทโฟน	96
ตาราง 2 อัตราเร็วเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่งกับเวลา โดยการใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนเปรียบเทียบกับการใช้เทคนิคการ วิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker	102
ตาราง 3 อัตราเร่งเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราเร็วกับเวลา โดยการใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนเปรียบเทียบกับเทคนิคการ วิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker	105
ตาราง 4 เวลาที่ลูกตุ้มชนิดบิดแกว่งครบ 20 รอบ โดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล	107
ตาราง 5 ปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานเกี่ยวกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดในการทดลองครั้งที่ 1	108
ตาราง 6 ปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานเกี่ยวกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดในการทดลองครั้งที่ 2	109
ตาราง 7 ปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานเกี่ยวกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดในการทดลองครั้งที่ 3	110
ตาราง 8 แสดงคาบและความถี่เชิงมุมของการแกว่ง ของลูกตุ้มชนิดบิด จำนวน 3 ครั้ง โดยใช้นาฬิกาจับเวลา แบบดิจิทัลและเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน	113
ตาราง 9 แสดงค่าการกระจัดเชิงมุมสูงสุด ความเร็วเชิงมุมสูงสุดและความเร่งเชิงมุมสูงสุดที่วิเคราะห์ได้จากกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณเชิงมุมกับเวลา จำนวน 3 ครั้ง	114
ตาราง 10 แสดงค่าเฟสเริ่มต้นและความต่างเฟส ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการ กระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลา	115
ตาราง 11 ค่าคงตัวในการบิดที่คำนวณได้จากการทดลอง ตอนที่ 1	117
ตาราง 12 ค่าเฉลี่ยคาบการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดของการทดลองตอนที่ 2	119
ตาราง 13 ค่าคงตัวในการบิดที่คำนวณได้จากการทดลอง ตอนที่ 2	120
ตาราง 14 สรุปค่าคงตัวในการบิดของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด	120
ตาราง 15 สรุปค่าพลังงานกลรวม ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด	124



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ความแตกต่างระหว่างระยะทางกับการกระจัด.....	8
ภาพประกอบ 2 อัตราเร็วและความเร็วของวัตถุ	10
ภาพประกอบ 3 (ก) วัตถุเคลื่อนที่ในแนวตรงจากจุด A ไปจุด B (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาของวัตถุ	12
ภาพประกอบ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลา	13
ภาพประกอบ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา	14
ภาพประกอบ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา	15
ภาพประกอบ 7 การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยความเร็วคงตัวของวัตถุ จากจุด A ไปจุด B.....	15
ภาพประกอบ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาของวัตถุที่เคลื่อนที่ ด้วยความเร็วคงตัว.....	17
ภาพประกอบ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาของวัตถุที่เคลื่อนที่ ด้วยความเร็วคงตัว.....	17
ภาพประกอบ 10 ลูกตุ้มชนิดบิต.....	19
ภาพประกอบ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ กับเวลาของการแกว่งของ.....	21
ภาพประกอบ 12 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์และพลังงานศักย์กับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต เมื่อ $\phi = 0$ (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์และพลังงานศักย์กับการกระจัดเชิงมุม θ ของตัวแกว่ง.....	23
ภาพประกอบ 13 วัตถุแข็งเกร็งหมุนรอบแกนหมุนที่ผ่านจุด O มีมวลย่อย m_i หมุนรอบแกนหมุนด้วยความเร่งเชิงมุมเท่ากัน.....	24
ภาพประกอบ 14 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงเรขาคณิตที่หมุนรอบแกนหนึ่ง ๆ ..	26
ภาพประกอบ 15 ทฤษฎีแกนขนาน	27

ภาพประกอบ 16 (ก) เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งขณะไม่มีความเร่ง (ข) เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งขณะมีความเร่งกระทำ (ค) โครงสร้างของเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง.....	30
ภาพประกอบ 17 แกนอ้างอิงของเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งของสมาร์ทโฟน	30
ภาพประกอบ 18 (ก) หลักการทำงานของเซนเซอร์ไจโรสโคป (ข) ตำแหน่งของเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งของสมาร์ทโฟน iPhone 4S	31
ภาพประกอบ 19 การหมุนรอบแกนอ้างอิงของเซนเซอร์ไจโรสโคป.....	32
ภาพประกอบ 20 กรอบอ้างอิง (Reference Frames).....	33
ภาพประกอบ 21 เซนเซอร์ตรวจวัดแสง.....	34
ภาพประกอบ 22 ชุดทดลองเรื่องการตกอย่างอิสระ (A) โครงสร้างทั้งหมดของอุปกรณ์การทดลอง	36
ภาพประกอบ 23 (ก) การติดตั้งชุดการทดลองการแกว่งของมวลติดปลายสปริง 1 ตัวและ 2 ตัวในแนวดิ่ง โดยใช้บอร์ดอาคิโน โยนและอินฟราเรดเซนเซอร์ (ข) ข้อมูลดิบในรูปความต่างศักย์กับลำดับ (ซ้าย) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะกับเวลาของการออสซิลเลตแบบแอมป์ของมวลติดปลายสปริง 1 ตัวที่แปลงจากกราฟซ้ายมือ (ขวา).....	37
ภาพประกอบ 24 (ก) การวิเคราะห์ผลของแรงต้านอากาศจากการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของวัตถุด้วยโปรแกรม Tracker (ข) กราฟการกระจัดกับเวลาของการตกในแนวดิ่งของลูกบิงปอง เปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบ Linear drag (บน) และแบบ Quadratic drag (ล่าง)	39
ภาพประกอบ 25 (ก) ชุดการทดลองแรงต้านในของเหลว (ข) ตัวอย่างกราฟตำแหน่งกับเวลาของการลื่นของมวลทรงกลมในน้ำ	40
ภาพประกอบ 26 การวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง เรื่อง การเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์	41
ภาพประกอบ 27 (ก) การวิเคราะห์อัตราเร็วของคลื่นน้ำในถาดคลื่นด้วยการเคลื่อนที่ของเมดโฟม (ข) กราฟระยะกับเวลาของการเคลื่อนที่ของเมดโฟมสีน้ำเงิน ขนาด 6 mm.....	41
ภาพประกอบ 28 (ก) ชุดการทดลองเพื่อศึกษาความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งของสมาร์ทโฟน (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลาจากผลการทดลอง ..	43

ภาพประกอบ 29 (ก) ชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมอย่างสม่ำเสมอ โดยใช้เซนเซอร์ ความเร่ง (ข) กราฟความเร่งเชิงเส้นในแนวแกน y กับเวลา (ค) ความเร็วเชิงมุมที่คำนวณได้จาก 2 วิธี.....	44
ภาพประกอบ 30 (ก) ชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมด้วยความเร่งเชิงมุมคงตัว โดย ใช้เซนเซอร์ความเร่ง (ข) กราฟความเร่งเชิงเส้นในแนวแกน y กับเวลา (ค) ความเร่งเชิงมุมที่ คำนวณได้จาก 3 วิธี.....	45
ภาพประกอบ 31 (ก) ชุดการทดลองเรื่องโมเมนตัมและการชน โดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง (ข) กราฟความเร่งในแนวแกน y กับเวลา (ค) กราฟความเร็วกับเวลาของสมาร์ทโฟน 2 เครื่อง ขณะชนกัน.....	46
ภาพประกอบ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงมุมกับค่า $\sin \theta$	47
ภาพประกอบ 33 ชุดการทดลองเรื่องการวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากลวดไฟฟ้า	48
ภาพประกอบ 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะจากลวดถึงสมาร์ต โฟน (ซ้าย) ลวดแบบตรง (ขวา) ลวดแบบห่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร.....	48
ภาพประกอบ 35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า (ซ้าย) ลวด แบบตรง (ขวา) ลวดแบบห่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร	49
ภาพประกอบ 36 (ก) ชุดการทดลองการหาค่า g โดยใช้แมกนีโตเซนเซอร์บนสมาร์ตโฟน (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลา (ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคาบ ยกกำลังสองกับความยาวเชือก.....	50
ภาพประกอบ 37 (ก) ชุดการทดลองการเคลื่อนที่แบบคาบ โดยใช้เซนเซอร์วัดแสงของสมาร์ตโฟน	51
ภาพประกอบ 38 ชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรง (ก) ชุดเครื่องจับเวลาและความเร็ว ของวัตถุ (ข) ชุดปล่อยวัตถุแบบแม่เหล็กไฟฟ้า (ค) ชุดแกนรางเอียงปรับมุมได้ 0-90 องศา	53
ภาพประกอบ 39 ชุดการทดลองการเคลื่อนที่แนวตรง โดยใช้โฟโตเกต (Photogate)	54
ภาพประกอบ 40 ชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แนวตรง โดยใช้โฟโตเกต (บน) และโปรแกรม แสดงผลการทดลองที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW (ล่าง).....	55

ภาพประกอบ 41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยกับเวลา (ซ้าย) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขณะใดขณะหนึ่งกับเวลา (ขวา)	55
ภาพประกอบ 42 (a) การติดตั้งชุดการทดลองการตกอย่างอิสระด้วยสมาร์ทโฟน (b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลาในช่วงที่สมาร์ทโฟนตก ความเร่งมีค่าเท่ากับ 0 m/s^2	56
ภาพประกอบ 43 การทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงของวัตถุ (ซ้าย) การเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง (ขวา) การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว	57
ภาพประกอบ 44 ชุดการทดลองสำหรับหาค่าอัตราเร็วเฉลี่ย โดยใช้เซนเซอร์วัดแสงของสมาร์ทโฟน	58
ภาพประกอบ 45 ชุดการทดลองสำหรับหาค่าความเร่งและอัตราเร็วปลาย โดยใช้เซนเซอร์วัดแสง	59
ภาพประกอบ 46 (ก) ชุดการทดลองเรื่องการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย โดยใช้เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นร่วมกับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ โปรแกรม Visual Basic และ Scilab (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคาบยกกำลังสองกับความยาวเชือก เมื่อเพิ่มความยาวครั้งละ 0.05 เมตร	61
ภาพประกอบ 47 แผนภาพขั้นตอนดำเนินการวิจัย	65
ภาพประกอบ 48 ชุดการทดลองที่พัฒนาขึ้นจากหัวใจของเล่นแบบใส่ถ่านพร้อมติดตั้ง สมาร์ทโฟน (ก) ภาพด้านหลัง (ข) ภาพด้านหน้า (ค) ภาพด้านข้าง	68
ภาพประกอบ 49 ร่างสำหรับการทดลองการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว	68
ภาพประกอบ 50 (ก) การบัดกรีหลอดไฟ LED เข้ากับสายไฟสีดำและสีแดงที่กำหนดตำแหน่งและปลอกพลาสติกหุ้มออก (ข) สายไฟหลอด LED ความยาว 2 เมตร	70
ภาพประกอบ 51 (ก) ร่างไม้เจาะรูสำหรับใส่สายไฟหลอดไฟ LED (ข) ขาตั้งร่างไม้	71
ภาพประกอบ 52 การต่อวงจรลดกระแสไฟฟ้า	72
ภาพประกอบ 53 วงจรลดกระแสไฟฟ้า	72
ภาพประกอบ 54 ชุดแหล่งกำเนิดแสง	73
ภาพประกอบ 55 (ก) แอปพลิเคชัน Phyphox (ข) แอปพลิเคชันไฟฉาย	74

ภาพประกอบ 56 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง ตอนที่ 1 การหาค่าความถี่ที่มากที่สุด ที่เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟนสามารถวัดและแยกความส่องสว่างได้	75
ภาพประกอบ 57 (ก) แอปพลิเคชันไฟฉายบนสมาร์ทโฟน iPhone4S สำหรับทำไฟกระพริบ (ข) แอปพลิเคชัน Phyphox บนสมาร์ทโฟน Samsung GalaxyS4 สำหรับเป็นเครื่องมือวัด.....	76
ภาพประกอบ 58 หน้าจอแสดงผลของแอปพลิเคชัน Phyphox (ก) ขณะยังไม่บันทึกผล (ข) ขณะทำการบันทึกผล	77
ภาพประกอบ 59 การส่งไฟล์ข้อมูลการทดลองออกจากสมาร์ทโฟนในแอปพลิเคชัน Phyphox...	77
ภาพประกอบ 60 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง ตอนที่ 2 การหาตำแหน่งและเวลาของรถทดลองที่เคลื่อนที่บนรางในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวเป็นระยะทาง 2 เมตร	78
ภาพประกอบ 61 การติดตั้งอุปกรณ์การบันทึกวิดีโอ	79
ภาพประกอบ 62 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลาที่วัดจาก แอปพลิเคชัน Phyphox ในการทดลองชุดที่ 2 ตอนที่ 1.....	80
ภาพประกอบ 63 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลาที่วัดได้ จาก แอปพลิเคชัน Phyphox ในการทดลองชุดที่ 2 ตอนที่ 2.....	82
ภาพประกอบ 64 วิธีการวิเคราะห์ห้วงวิดิโอการเคลื่อนที่ของวัตถุด้วยโปรแกรม Tracker 1.....	83
ภาพประกอบ 65 วิธีการวิเคราะห์ห้วงวิดิโอการเคลื่อนที่ของวัตถุด้วยโปรแกรม Tracker 2.....	84
ภาพประกอบ 66 แอปพลิเคชัน Sensor log	86
ภาพประกอบ 67 การทดลองตอนที่ 1 การหาปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด (ก) ชุดลูกตุ้มชนิดบิดสำหรับการทดลองตอนที่ 1 (ข) ลักษณะสมาร์ทโฟน (iPhone4s) ที่ติดอยู่บนจานโลหะกลม	87
ภาพประกอบ 68 การตั้งค่าก่อนการบันทึกข้อมูลการทดลองในโหมด Configuration ของแอปพลิเคชัน Senserlog.....	88
ภาพประกอบ 69 หน้าจอแสดงผลของแอปพลิเคชัน Sensorlog (ก) ขณะยังไม่บันทึกผล (ข) ขณะทำการบันทึกผล	88
ภาพประกอบ 70 การส่งไฟล์ข้อมูลการทดลองออกจากสมาร์ทโฟน iPhone4s ผ่านแอปพลิเคชัน Sensorlog.....	89

ภาพประกอบ 71 การทดลองตอนที่ 2 การหาค่าคงตัวในการบิดของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต (ก) ชุดลูกตุ้มชนิดบิตสำหรับการทดลองตอนที่ 2 (ข) ลักษณะทรงกระบอกโลหะตัน 2 อัน ที่วางบนจานโลหะกลม	90
ภาพประกอบ 72 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลา เมื่อคาบในการกระพริบเท่ากับ 0.500 ± 0.002 วินาที	97
ภาพประกอบ 73 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลา เมื่อคาบในการกระพริบเท่ากับ 0.200 ± 0.002 วินาที	98
ภาพประกอบ 74 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลา เมื่อคาบในการกระพริบเท่ากับ 0.125 ± 0.002 วินาที	98
ภาพประกอบ 75 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลา เมื่อคาบในการกระพริบเท่ากับ 0.111 ± 0.002 วินาที	99
ภาพประกอบ 76 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลา เมื่อคาบในการกระพริบเท่ากับ 0.100 ± 0.002 วินาที	99
ภาพประกอบ 77 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาที่รถไฟของเล่นเคลื่อนที่บนรางตรง ด้วยอัตราเร็วระดับ 1 และระดับ 2 โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน	100
ภาพประกอบ 78 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาที่รถไฟของเล่นเคลื่อนที่บนรางตรง ด้วยอัตราเร็วระดับ 1 และระดับ 2 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker	101
ภาพประกอบ 79 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่	103
ภาพประกอบ 80 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่	103
ภาพประกอบ 81 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่	104
ภาพประกอบ 82 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่	104
ภาพประกอบ 83 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลา ของแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต ในการทดลองครั้งที่ 1 จำนวน 1 คาบ	108
ภาพประกอบ 84 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลา ของแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต ในการทดลองครั้งที่ 2 จำนวน 1 คาบ	109

ภาพประกอบ 85 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลา ของแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต ในการทดลองครั้งที่ 3 จำนวน 1 คาบ	110
ภาพประกอบ 86 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตเป็นเวลา 1 คาบ จำนวน 3 ครั้ง	111
ภาพประกอบ 87 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคาบยกกำลังสองกับโมเมนต์ความเฉื่อยรวม ของการทดลองตอนที่ 2 โดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอลและเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน	120
ภาพประกอบ 88 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ และพลังงานกล ที่คำนวณจากสมการ (2.28) กับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตครบ 2 คาบ	122
ภาพประกอบ 89 พลังงานชนิดต่าง ๆ ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตในการทดลอง ครั้งที่ 1 (A) ตำแหน่ง A ถึง E ของสมาร์ทโฟนที่แกว่งพร้อมลูกตุ้มชนิดบิตครบ 1 รอบ (B) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์และพลังงานกลของการ แกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตกับเวลา (C) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์และพลังงานกลรวมของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตกับ การกระจัดเชิงมุม	125
ภาพประกอบ 90 พลังงานชนิดต่าง ๆ ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตในการทดลองครั้งที่ 2 (A) ตำแหน่ง A ถึง E ของสมาร์ทโฟนที่แกว่งพร้อมลูกตุ้มชนิดบิตครบ 1 รอบ (B) กราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์และพลังงานกลของการแกว่งของลูกตุ้ม ชนิดบิตกับเวลา (C) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงาน ศักย์และพลังงาน กลรวมของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตกับการกระจัดเชิงมุม	126
ภาพประกอบ 91 พลังงานชนิดต่าง ๆ ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตในการทดลอง ครั้งที่ 3 (A) ตำแหน่ง A ถึง E ของสมาร์ทโฟนที่แกว่งพร้อมลูกตุ้มชนิดบิตครบ 1 รอบ (B) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์และพลังงานกลของการ แกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตกับเวลา (C) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงาน ศักย์และพลังงานกลรวมของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตกับการกระจัดเชิงมุม	127

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

การเคลื่อนที่รูปแบบต่าง ๆ ของวัตถุเป็นหัวข้อหนึ่งในเรื่อง กลศาสตร์ ที่มีการจัดการเรียนการสอนในรายวิชาฟิสิกส์ทั้งระดับมัธยมศึกษาและอุดมศึกษา โดยศึกษาและอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง เช่น ตำแหน่ง ระยะทาง การกระจัด ความเร็ว ความเร่ง เวลา เป็นต้น ซึ่งแนวคิดในบทเรียนนี้จะเป็นพื้นฐานสำคัญในการศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุในรูปแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น รวมทั้งเชื่อมโยงไปถึงหัวข้ออื่น ๆ ต่อไป รูปแบบการเคลื่อนที่ที่ง่ายที่สุด คือ การเคลื่อนที่ใน 1 มิติ หรือการเคลื่อนที่ในแนวตรง ซึ่งเป็นเนื้อหาพื้นฐานที่นำไปใช้ในการศึกษาการเคลื่อนที่ใน 2 มิติ อย่างการเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์ หรือการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์มอนิก ซึ่งเป็นรูปแบบการเคลื่อนที่พื้นฐานของการเคลื่อนที่อีกลักษณะหนึ่งในธรรมชาติ นั่นคือการแกว่งกวัด (Oscillation)

งานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาและพัฒนาสื่อการเรียนการสอนที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่รูปแบบต่าง ๆ ของวัตถุด้วยวิธีการที่หลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น Vogt, Kuhn, และ Müller (2011, September, pp.383-384) ใช้คอมพิวเตอร์และโปรแกรม SPEAR วิเคราะห์และคำนวณหาค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลกในกรณีวัตถุตกอย่างอิสระโดยใช้ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ พัชญา เชื้อสิงห์ (2552, น.2-3) ได้พัฒนาบทเรียนบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์ เรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลม ในขณะที่ธัญญะ โพธิ์รัง (2550, น.84-86) สร้างชุดทดลองวิชากลศาสตร์ เรื่อง แรงสู่ศูนย์กลาง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงสู่ศูนย์กลางกับมวลและความเร็วเชิงมุม วุฒิพล รัตนพร (2553, น.2) และ จิตรา สอนพงษ์ (2558, น.2) มีความเห็นที่คล้ายกันว่าการลงมือปฏิบัติจริงจะช่วยให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ เกิดทักษะทางวิทยาศาสตร์ มีความเข้าใจเพิ่มขึ้นและสร้างองค์ความรู้ได้ด้วยตนเอง จึงได้พัฒนาชุดกิจกรรมการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์มอนิกขึ้น เป็นต้น จะเห็นได้ว่า งานวิจัยเหล่านี้มีความมุ่งหมายเพื่อพัฒนาสื่อการสอนในหลายรูปแบบให้ผู้เรียนมีความเข้าใจในแนวคิดเรื่องการเคลื่อนที่แบบต่าง ๆ ของวัตถุเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการพัฒนาชุดการทดลองซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องปฏิบัติควบคู่ไปกับการจัดการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ในทุกระดับชั้น เนื่องจากการทดลองจะเป็นสื่อกลางที่กระตุ้นให้ผู้เรียนเกิดความสงสัยและได้เผชิญกับปัญหา นำมาซึ่งการค้นหาคำตอบอย่างเป็นระบบตามขั้นตอนของกระบวนการแสวงหาความรู้

ทางวิทยาศาสตร์ และก่อให้เกิดการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างความรู้เชิงทฤษฎีกับสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในชีวิตประจำวันด้วยตนเองได้ในที่สุด

ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัย เทคนิควิธีการใหม่ ๆ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่าง ๆ เข้ามาใช้ในการจัดการเรียนการสอนทั้งในชั้นเรียนและในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ โดยเฉพาะเรื่องของการเคลื่อนที่ของวัตถุ ซึ่งมีการพัฒนาอุปกรณ์ในการตรวจวัดและบันทึกตำแหน่งของวัตถุที่เคลื่อนที่ลักษณะต่าง ๆ เช่น การใช้เมาส์แบบใช้แสง (Ng และ Ang, 2005) การใช้ Nintendo Wii Controller (Tomarken และ คนอื่น ๆ, 2012; Abellán, Arenas, Núñez, และ Victoria, 2013) การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม Tracker (Poonyawatpornkul และ Wattanakasiwich, 2013) การใช้โฟโตเกต ไมโครคอนโทรลเลอร์และบอร์ด Arduino (Sari, 2019) เป็นต้น แม้ว่าอุปกรณ์เหล่านี้จะสามารถตรวจวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุได้ดีและได้ผลการทดลองที่มีความถูกต้อง แม่นยำสูง แต่อย่างไรก็ตาม การสร้างและประยุกต์อุปกรณ์มาใช้งานมีความยุ่งยาก อาจต้องมีความรู้ความชำนาญเกี่ยวกับเครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์และระบบต้องเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หลายชิ้น อีกทั้งต้องใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์เฉพาะ ทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลมีหลายขั้นตอนและซับซ้อนมากขึ้น นอกจากนี้อุปกรณ์บางชิ้นยังมีราคาแพง จากข้อจำกัดที่กล่าวมาทำให้มีความพยายามที่จะเลือกใช้อุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ ที่ทำให้การทดลองมีความกระชับ ไม่ยุ่งยาก แต่ให้ผลการวิเคราะห์ละเอียดแม่นยำและเหมาะสมสำหรับเป็นชุดการทดลองในชั้นเรียนได้เช่นกัน จากความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการสื่อสารในยุคสมัยนี้ จึงทำให้ลักษณะห้องเรียนเปลี่ยนไป จากอดีต ผู้เรียนมีอุปกรณ์ที่สามารถเข้าถึงแหล่งความรู้ได้จากทุกที่ทุกเวลาด้วยตนเอง ภาพของผู้เรียนที่มีคอมพิวเตอร์พกพา (Notebook) แท็บเล็ต (Tablet) ไอแพด (iPad) หรือสมาร์ทโฟน (Smartphone) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์การเรียนจึงเป็นเรื่องปกติ ดังนั้นผู้สอนจึงมีหน้าที่เป็นผู้อำนวยการ ความสะดวก แนะนำและส่งเสริมให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ช่วยกระตุ้นและเอื้อประโยชน์ให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้และพัฒนาศักยภาพของตนเองให้มากที่สุด (พรทิพย์ ศิริภทราชัย, 2556, เมษายน-มิถุนายน, น.49)

สมาร์ทโฟน (Smartphone) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีบทบาทต่อการดำเนินชีวิตในปัจจุบันอย่างมากและมีการพัฒนาให้สามารถใช้งานได้หลากหลายขึ้นอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังมีเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอุปกรณ์ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดและบันทึกค่าปริมาณทางฟิสิกส์ในการทำการทดลองแทนเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์บางชนิดได้ โดยจะใช้งานร่วมกับแอปพลิเคชันเกี่ยวกับการวัดปริมาณทางฟิสิกส์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมากมายเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer) ถูกนำมาใช้ในการศึกษาความเร่ง

ของวัตถุที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการตกอย่างเสรี การเคลื่อนที่แบบลูกตุ้ม นาลิภา การเคลื่อนที่แบบวงกลม การเคลื่อนที่ของลิฟต์และการชนของวัตถุ เป็นต้น (Vogt และ Kuhn, 2012, October, pp.182-183,439-440; 2013: 2182-2183; 2014: 2055-2056,2118-2119) เซนเซอร์ไจโรสโคป (Gyroscope) ถูกใช้การวัดปริมาณเชิงมุมต่าง ๆ และโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุในการเคลื่อนที่แบบหมุน (Pörn และ Braskén, 2016, November, p.065021; Braskén และ Pörn 062017, p. 045024) แมกนีโทมิเตอร์ (Magnetometer) ถูกใช้เพื่อวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในขดลวดแบบตรงและแบบห้ว (Setiawan, Septianto, Suhendra, และ Iskandar, 2017, November, p. 065011) ระบบรับเสียงของสมาร์ทโฟน (Sound Storage System) ถูกนำมาใช้งานร่วมกับหูฟังและลำโพงเพื่อวัดค่าความเข้มเสียงจากการแทรกสอดเพื่อหาอัตราเร็วของเสียง (A. Yavuz, 2015, May, pp.281-284,Yavuz; และ Temiz. 2016, p. 015009) และเซนเซอร์ตรวจจับแสง (Ambient Light sensor) ถูกใช้เพื่อวัดความส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสงเพื่อนำไปประยุกต์หาปริมาณเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แนวตรงและแบบคาบ (Kapucu, 2017, July, p.045001; Sans; et al. 042013: pp. 041349-041354) จากงานวิจัยที่กล่าวมาพบว่าสมาร์ทโฟนสามารถวัดและบันทึกข้อมูลการทดลองได้อย่างละเอียดมากขึ้น สามารถนำข้อมูลออกมาวิเคราะห์ได้ทันทีโดยส่งผ่านอีเมล และผลการทดลองมีความถูกต้องใกล้เคียงกับทฤษฎี จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการพัฒนาชุดการทดลองทางฟิสิกส์ให้มีประสิทธิภาพ ใช้อุปกรณ์ที่อยู่ใกล้ตัวผู้เรียนและมีความยุ่งยากน้อยลง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะออกแบบและพัฒนาชุดการทดลองฟิสิกส์เพื่อศึกษาวิชากลศาสตร์ โดยเน้นศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ 2 ลักษณะ คือ การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวและการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกในรูปแบบการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน ศึกษาปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ ได้แก่ ตำแหน่ง ระยะทาง อัตราเร็ว อัตราเร่ง ความถี่เชิงมุม คาบ ความถี่ ปริมาณเชิงมุมต่าง ๆ แอมพลิจูด เป็นต้น อีกทั้งศึกษาประสิทธิภาพของชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน เพื่อส่งเสริมการเรียนรู้เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของวัตถุของผู้เรียน

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวและการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวและการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชุดการทดลองเรื่อง การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวและการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน กับวิธีการทดลองอื่น ๆ

ความสำคัญของงานวิจัย

1. ได้ชุดการทดลองเรื่อง การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวและการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนที่มีผลการทดลองถูกต้อง ใกล้เคียงกับทฤษฎีและวิธีการทดลองอื่น ๆ
2. เป็นแนวทางในการนำสมาร์ทโฟนและเทคโนโลยีมาประยุกต์เป็นเครื่องมือในการวัดปริมาณต่าง ๆ ในการทดลองในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับมัธยมศึกษาและอุดมศึกษา

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวและการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตของวัตถุ ซึ่งมีปริมาณที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ตำแหน่ง ระยะทาง อัตราเร็ว อัตราเร็วเร่ง เวลา ความถี่เชิงมุม คาบ ความถี่ แอมพลิจูด เป็นต้น และการนำสมาร์ทโฟนมาใช้ในการทดลองทางฟิสิกส์
2. ออกแบบและพัฒนาชุดการทดลองเรื่อง การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวและการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน
3. ทดลองเก็บข้อมูลจากชุดการทดลองเรื่อง การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวและการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนและคำนวณหาค่าปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
4. ปรับปรุงแก้ไขปัญหา ประเมินความถูกต้องและประสิทธิภาพของชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวและการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน เทียบกับวิธีการทดลองอื่น ๆ

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. **อัตราเร็ว (Speed)** หมายถึง ปริมาณที่แสดงให้ทราบว่าวัตถุเคลื่อนที่ได้ระยะทางมากน้อยเพียงใดในหนึ่งหน่วยเวลา เป็นปริมาณสเกลาร์ โดยในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยพิจารณาเฉพาะขนาดของความเร็วเฉลี่ย ไม่ได้พิจารณาทิศทางของการเคลื่อนที่ของวัตถุ จึงนิยามให้อัตราเร็วเฉลี่ย (Average speed) หมายถึง ขนาดของความเร็วเฉลี่ย (Average velocity) ที่ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลา

2. **อัตราเร่งเฉลี่ย (Magnitude of Average acceleration)** หมายถึง ขนาดของความเร่งเฉลี่ย (Average acceleration) ที่ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วขณะใดขณะหนึ่งกับเวลา

3. **การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว (Linear motion with constant speed)** หมายถึง การเคลื่อนที่ใน 1 มิติ เป็นเส้นตรงในแนวแกน x ของวัตถุ โดยที่วัตถุ ณ ตำแหน่งใด ๆ ของการเคลื่อนที่มีอัตราเร็วขณะใดขณะหนึ่งเท่ากับอัตราเร็วเฉลี่ย

4. **การแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด (Torsional pendulum)** หมายถึง การเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกรูปแบบหนึ่ง ลักษณะของลูกตุ้มชนิดบิดเป็นจานโลหะกลมที่แขวนด้วยลวดโลหะยาว เมื่อบิดจานโลหะเป็นมุมน้อย ๆ จากตำแหน่งสมดุลแล้วปล่อย จะทำให้จานโลหะกลมบิดกลับไปกลับมารอบตำแหน่งสมดุล เนื่องจากทอร์กคืนตัวภายในลวดโลหะ

5. **เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน (Smartphone sensors)** หมายถึง อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ มีลักษณะเป็นไมโครชิพ มีขนาดเล็กมากที่บรรจุอยู่ในสมาร์ทโฟนทั้งในระบบปฏิบัติการ iOS และแอนดรอยด์ เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งเชิงเส้น (Accelerometer) เซนเซอร์ไจโรสโคป (Gyroscope sensor) เซนเซอร์วัดความส่องสว่าง (Ambient light sensor) ระบบตรวจวัดตำแหน่ง (Device motion service) เป็นต้น

6. **ชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว** หมายถึง การทดลองเพื่อศึกษาและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวของวัตถุด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและอัตราเร็วกับเวลา โดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy 4S เป็นเครื่องมือวัด ซึ่งวัตถุในการวิจัยครั้งนี้ คือ รถไฟของเล่นแบบถ่านไฟที่ติดตั้งสมาร์ทโฟนลงบนตัวรถ ซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ทำให้รถไฟของเล่นเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัวบนรางตรง สามารถปรับระดับอัตราเร็วได้ 2 ระดับ กำหนดให้เป็น ระดับ 1 และระดับ 2 โดยเปรียบเทียบกับการใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker

7. เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker หมายถึง การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยการบันทึกวิดีโอสูงการเคลื่อนที่ที่สนใจด้วยกล้องวิดีโอสูงหรือกล้องถ่ายรูป แล้วนำมาวิเคราะห์ในโปรแกรม Tracker ซึ่งเป็นโปรแกรมสร้างแบบจำลองและมีฟังก์ชันในการกำหนดตำแหน่งของวัตถุที่แต่ละเฟรมของวิดีโอ ทำให้ได้ข้อมูลตำแหน่งและเวลาของการเคลื่อนที่ของวัตถุ จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ต่อ โดยใช้การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยใช้กล้องของสมาร์ทโฟน iPhone 8plus เป็นอุปกรณ์บันทึกวิดีโอการเคลื่อนที่ของรถไฟของเล่น ในชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว

8. ชุดการทดลองที่ 2: เรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต หมายถึง การทดลองเพื่อศึกษาและวิเคราะห์การแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต ได้แก่ ปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น คาบ ความถี่เชิงมุม ตำแหน่งเชิงมุม ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุม ค่าคงตัวในการบิด เป็นต้น และศึกษาทฤษฎีพลังงานกลในการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน iPhone 4s จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งเชิงเส้น (Accelerometer) เซนเซอร์ไจโรสโคป (Gyroscope sensor) และระบบตรวจวัดตำแหน่ง (Device motion service) โดยเปรียบเทียบวิธีการทดลองโดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล

9. วิธีการทดลองโดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล หมายถึง การทดลองเรื่องโมเมนต์ความเฉื่อยในคู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ ฟส180 ปฏิบัติการฟิสิกส์ทั่วไป ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2553 (ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2553)

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสาร งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่ในแนวตรง
2. การแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิวด
3. หลักการทำงานของเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน
4. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับชุดการทดลองฟิสิกส์
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การเคลื่อนที่ในแนวตรง

การเคลื่อนที่ (Motion) เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุหนึ่งเทียบกับอีกวัตถุหนึ่ง ซึ่งการศึกษาถึงการอยู่นิ่งและการเคลื่อนที่ของวัตถุขณะที่มีแรงหรือไม่มีแรงมากระทำต่อวัตถุนั้น ๆ เรียกว่า กลศาสตร์ (Mechanics) โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555, น.20-28) คือ

จลนศาสตร์ (Kinematics) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของวัตถุและปริมาณที่เกี่ยวข้องโดยไม่พิจารณาถึงสาเหตุที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่ กล่าวคือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของวัตถุกับเวลาที่วัตถุเคลื่อนที่

พลศาสตร์ (Dynamics) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของวัตถุอันเนื่องมาจากแรง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่และลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้แรงนั้น ๆ (พงษ์ศักดิ์ ชินนาบุญ, 2556, น.76-86, 135-136)

โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ใน 1 มิติ เป็นการเคลื่อนที่พื้นฐานที่สุด นั่นคือ การเคลื่อนที่ในแนวตรง (Linear Motion) ซึ่งหมายถึง การเคลื่อนที่ที่วัตถุอยู่บนแนวเส้นตรงเส้นหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นแนวราบ แนวตั้งหรือแนวเอียง และวัตถุสามารถเคลื่อนที่ไปด้านหน้าหรือย้อนกลับได้แต่ยังคงอยู่ในแนวเส้นตรงเส้นเดิม (สมพงษ์ ใจดี, 2550)

1.1 ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แนวตรง

ปริมาณทางฟิสิกส์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท (สมพงษ์ ใจดี, 2550, น.56-67) ได้แก่

1. ปริมาณเวกเตอร์ (Vector Quantity) คือ ปริมาณที่บอกทั้งขนาดและทิศทาง เช่น การกระจัด ความเร็ว ความเร่ง แรง น้ำหนัก โมเมนตัม เป็นต้น
2. ปริมาณสเกลาร์ (Scalar Quantity) คือ ปริมาณที่บอกขนาดเพียงอย่างเดียว เช่น เวลา มวล ระยะทาง อัตราเร็ว ปริมาตร ความหนาแน่น เป็นต้น

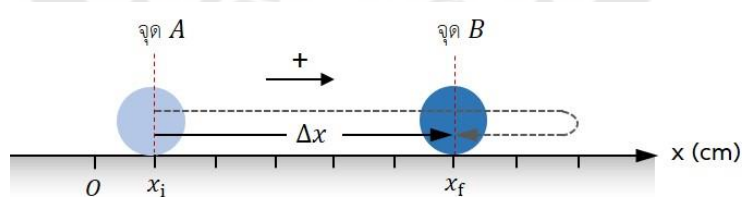
ปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานที่ใช้ระบุเส้นทางและลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวตรง ประกอบไปด้วย ตำแหน่ง ระยะทาง การกระจัด ช่วงเวลา อัตราเร็ว ความเร็ว และความเร่ง (ประธาน บุรณศิริ และ และคณะ, 2558) ดังนี้

1.1.1 ตำแหน่ง

เมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่ วัตถุนั้นย่อมมีตำแหน่งที่เปลี่ยนไปตามเวลา การบอกตำแหน่งที่ชัดเจนจะต้องเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงหรือจุดอ้างอิง (Reference point) ซึ่งเป็นตำแหน่งหรือจุดที่อยู่นิ่งและอยู่บนแนวเส้นตรงเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยการบอกตำแหน่งของวัตถุ ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ จุดอ้างอิง ระยะห่างของวัตถุจากจุดอ้างอิงและทิศของวัตถุเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง

1.1.2 ระยะทางและการกระจัด

พิจารณาภาพประกอบ 1 เมื่อวัตถุเคลื่อนที่จากตำแหน่ง A ไปตำแหน่ง B



ภาพประกอบ 1 ความแตกต่างระหว่างระยะทางกับการกระจัด

ระยะทาง (Distance) เป็นความยาวตามเส้นทางการเคลื่อนที่ทั้งหมดของวัตถุ เป็นปริมาณสเกลาร์ มีหน่วยเป็นเมตร ใช้สัญลักษณ์เป็น s หรือ Δx

การกระจัด (Displacement) เป็นปริมาณที่บอกถึงการเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุ โดยเป็นเส้นตรงที่เขียนหัวลูกศรกำกับ ลากจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดปลายของการเคลื่อนที่ ซึ่งความยาวของเส้นตรงแทนขนาดของการกระจัดและทิศที่หัวลูกศรชี้แทนทิศของการกระจัด

การกระจัดจึงเป็นปริมาณเวกเตอร์ มีหน่วยเป็นเมตร ใช้สัญลักษณ์เป็น $\vec{s}$ หรือ $\Delta\vec{x}$ สามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\Delta\vec{x} = \vec{x}_f - \vec{x}_i \quad (2.1)$$

เมื่อ $\Delta\vec{x}$ คือ การกระจัด มีหน่วยเป็น เมตร หรือ m
 $\vec{x}_f$ คือ ตำแหน่ง ณ จุดปลายของการเคลื่อนที่
 $\vec{x}_i$ คือ ตำแหน่ง ณ จุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่

และเมื่อวัตถุเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงและไม่มีการกลับทิศทางการเคลื่อนที่ ระยะทางจะเท่ากับขนาดของการกระจัด

1.1.3 อัตราเร็ว (Speed)

เมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่ ปริมาณที่ใช้ระบุว่าวัตถุเคลื่อนที่ได้ระยะทางมากน้อยเพียงใดในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งไม่สนใจทิศทางการเคลื่อนที่ เรียกว่า อัตราเร็ว (Speed) และเมื่อวัตถุเคลื่อนที่เป็นแนวตรงและไม่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ อัตราเร็วจะเท่ากับขนาดของความเร็ว การคำนวณสามารถทำได้ ดังนี้

1.1.3.1 อัตราเร็วเฉลี่ย (Average Speed)

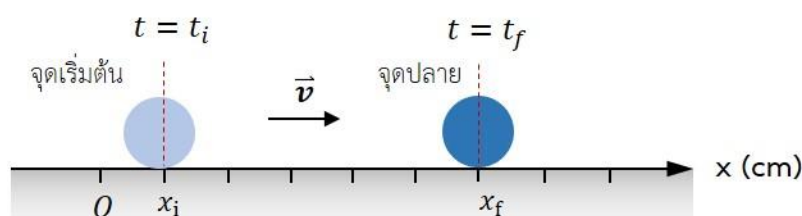
หมายถึง ระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา เป็นปริมาณสเกลาร์ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที ใช้สัญลักษณ์เป็น v_{avg} ดังนั้น จะได้ว่า

$$\text{อัตราเร็วเฉลี่ย} = \frac{\text{ระยะทาง}}{\text{เวลาทั้งหมดในการเคลื่อนที่}}$$

จากภาพประกอบ 2 พิจารณาการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวตรง โดยระบุตำแหน่งของวัตถุตามแนวแกน x ของระบบพิกัดฉากที่เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นที่ตำแหน่ง x_i และที่เวลา t_i ไปยังจุดปลายของการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่ง x_f และที่เวลา t_f

จะได้ ระยะทางทั้งหมดของการเคลื่อนที่ เท่ากับ $x_f - x_i$ หรือ Δx
 เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเคลื่อนที่ เท่ากับ $t_f - t_i$ หรือ Δt
 ดังนั้น อัตราเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ คำนวณได้จาก

$$v_{avg} = \frac{s}{t} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} \quad (2.2)$$



ภาพประกอบ 2 อัตราเร็วและความเร็วของวัตถุ

1.1.3.2 อัตราเร็วขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous Speed)

หมายถึง อัตราเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ในช่วงเวลา Δt ที่สั้นมากๆ จนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เป็นปริมาณสเกลาร์ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที ใช้สัญลักษณ์เป็น v_x และเขียนสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (2.3)$$

1.1.4 ความเร็ว (Velocity)

ความเร็ว เป็นปริมาณที่แสดงให้ทราบว่าวัตถุมีการเปลี่ยนตำแหน่งไปมากน้อยเพียงใดในช่วงเวลาหนึ่ง โดยพิจารณาทิศทางการเคลื่อนที่ด้วย สามารถคำนวณได้ดังนี้

1.1.4.1 ความเร็วเฉลี่ย (Average Speed)

หมายถึง การกระจัดของวัตถุที่เคลื่อนที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลา เป็นปริมาณเวกเตอร์ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที ใช้สัญลักษณ์เป็น $\vec{v}_{avg}$ จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วเฉลี่ย} = \frac{\text{การกระจัด}}{\text{เวลาทั้งหมดในการเคลื่อนที่}}$$

พิจารณาภาพประกอบ 2 วัตถุเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นที่ตำแหน่ง $\vec{x}_i$ และที่เวลา t_i ไปยังจุดปลายของการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่ง $\vec{x}_f$ และที่เวลา t_f โดยพิจารณาการกระจัดของวัตถุเทียบกับจุด O ซึ่งเป็นจุดอ้างอิง จะได้การกระจัดมีทิศจากจุด O ไปยังตำแหน่ง $\vec{x}_f$

ดังนั้นจะเขียนสมการคณิตศาสตร์ ได้ดังสมการ (2.4) โดยทิศของความเร็วเฉลี่ยอยู่ในทิศเดียวกับการกระจัดเสมอ

$$\vec{v}_{avg} = \frac{\vec{s}}{t} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} = \frac{\vec{x}_f - \vec{x}_i}{t_f - t_i} \quad (2.4)$$

1.1.4.2 ความเร็วขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous Speed)

หมายถึง ความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ในช่วงเวลา Δt ที่สั้นมาก ๆ จนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เป็นปริมาณเวกเตอร์ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที ใช้สัญลักษณ์เป็น $\vec{v}_x$ และเขียนสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$\vec{v}_{avg} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} = \frac{d\vec{x}}{dt} \quad (2.5)$$

สำหรับการเคลื่อนที่แบบสม่ำเสมอ (Uniform motion) หมายถึง วัตถุมีความเร็วคงตัวหรือมีอัตราเร็วคงตัวและมีทิศคงตัว ความเร็วขณะใดขณะหนึ่งจะเท่ากับความเร็วเฉลี่ยเสมอ

1.1.5 ความเร่ง (Acceleration)

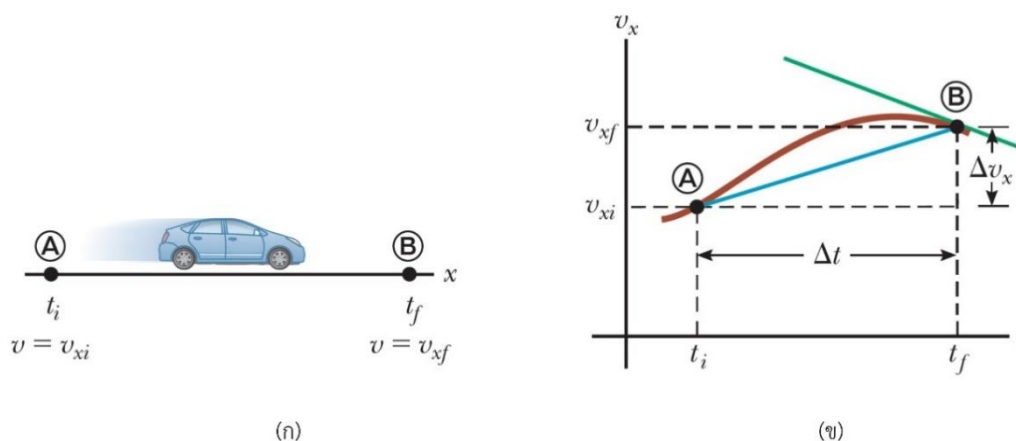
ความเร่ง คือ ความเร็วที่เปลี่ยนไปในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วนี้ อาจเปลี่ยนแปลงเฉพาะขนาดของความเร็ว หรือเฉพาะทิศทางของความเร็ว หรือทั้งขนาดและทิศทางพร้อมกัน โดยความเร่งเป็นปริมาณเวกเตอร์ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาทียกกำลังสอง ใช้สัญลักษณ์เป็น $\vec{a}$ ซึ่งการเคลื่อนที่ของวัตถุมีทั้งกรณีที่วัตถุเคลื่อนที่เร็วขึ้นและช้าลง

เมื่อ $\Delta \vec{v}$ คือ ความเร็วของวัตถุที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา Δt

และ $\vec{a}$ คือ ความเร่ง

ถ้า $\Delta \vec{v}$ และ $\vec{a}$ มีทิศทางเดียวกัน หมายถึง วัตถุเคลื่อนที่เร็วขึ้น หรือ วัตถุมีความเร่ง

ถ้า $\Delta \vec{v}$ และ $\vec{a}$ มีทิศตรงข้ามกัน หมายถึง วัตถุเคลื่อนที่ช้าลง หรือ วัตถุมีความหน่วง



ภาพประกอบ 3 (ก) วัตถุเคลื่อนที่ในแนวตรงจากจุด A ไปจุด B
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาของวัตถุ

ที่มา: Serway และ Jewett (2014, p.31)

สำหรับค่าความเร่งในช่วงเวลาการเคลื่อนที่ใด ๆ เรียกว่า ความเร่งเฉลี่ย $\bar{a}_{avg}$ (Average Acceleration) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วที่เปลี่ยนไปทั้งหมดกับช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนความเร็วนั้น เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 3 ความเร่งของวัตถุ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\bar{a}_{avg} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{t_f - t_i} \quad (2.6)$$

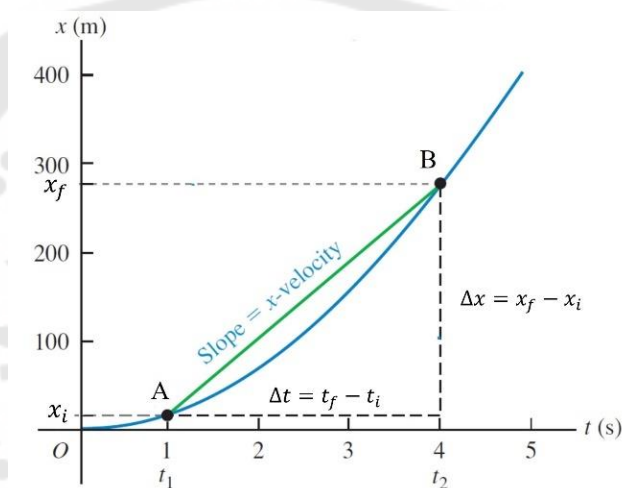
สำหรับความเร่งในช่วงเวลา Δt มีค่าน้อย ๆ จนเข้าใกล้ศูนย์ เรียกว่า ความเร่งขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous Acceleration) สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\bar{a}_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (2.7)$$

1.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง x - t , v - t และ a - t

การศึกษาการเคลื่อนที่แนวตรงที่ผ่านมาเป็นการพิจารณาจากธรรมชาติทางฟิสิกส์ จากนั้นเขียนในรูปภาษาคณิตศาสตร์ ซึ่งนำมาหาปริมาณการเคลื่อนที่ที่ต้องการได้ นอกจากนั้น กราฟทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงข้อมูลการเคลื่อนที่ รวมไปถึงใช้หาปริมาณการเคลื่อนที่ที่ต้องการได้เช่นกัน การศึกษากราฟแต่ละรูปแบบจะพิจารณา 3 ส่วน คือ 1) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับตัวแปรตามบนเส้นกราฟ 2) ความชันของกราฟ และ 3) พื้นที่ใต้กราฟ โดยนำข้อมูลการเคลื่อนที่มาเขียนเป็นกราฟ 3 รูปแบบ ได้แก่

1.2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลา (x - t)



ภาพประกอบ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลา

ที่มา: Young และ Freedman (2012, p. 38)

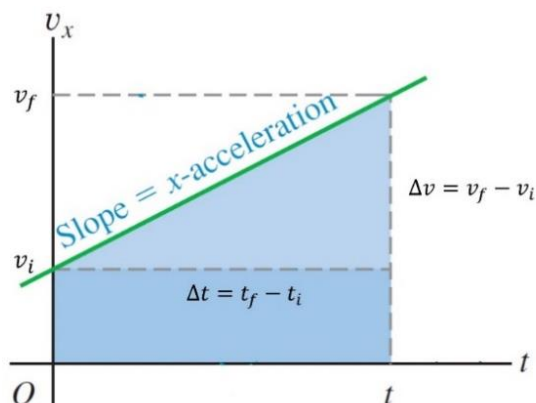
จากภาพประกอบ 4 จะได้ว่า

ความชันของกราฟตำแหน่งกับเวลา ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ๆ คือ ความเร็ว ณ เวลานั้น ๆ

$$\vec{v} = \text{slope} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} = \frac{\vec{x}_f - \vec{x}_i}{t_f - t_i} \quad (2.8)$$

และพื้นที่ใต้กราฟของกราฟตำแหน่งกับเวลา ไม่มีความหมายทางฟิสิกส์

1.2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา (v-t)



ภาพประกอบ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา

ที่มา: Young และ Freedman (2012, p. 47)

จากภาพประกอบ 5 ได้ว่า

ความชันของกราฟความเร็วกับเวลาที่ช่วงเวลาหนึ่ง ๆ คือ ความเร่ง ณ เวลา

นั้น ๆ

$$\bar{a} = \text{slope} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{t_f - t_i} \quad (2.9)$$

และพื้นที่ใต้กราฟของกราฟความเร็วกับเวลา ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ๆ คือ การกระจัดของวัตถุ ณ ช่วงเวลานั้น ๆ

$$\bar{r} = \text{พื้นที่ใต้กราฟ} \quad (2.10)$$

1.2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา (a-t)



ภาพประกอบ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา

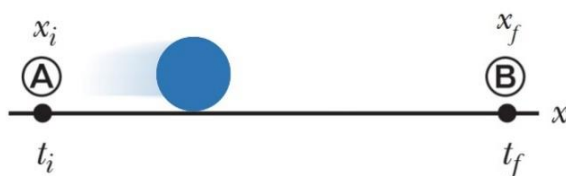
ที่มา: Young และ Freedman (2012, p. 47)

จากภาพประกอบ 6 จะได้ว่า

ความชันกราฟความเร่งกับเวลา ไม่มีความหมายทางฟิสิกส์
และพื้นที่ใต้กราฟความเร่งกับเวลา คือ การเปลี่ยนแปลงความเร็ว

$$\Delta \vec{v} = \vec{v}_f - \vec{v}_i = \vec{a} \times \Delta t = \text{พื้นที่ใต้กราฟ} \quad (2.11)$$

1.3 การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว



ภาพประกอบ 7 การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยความเร็วคงตัวของวัตถุ จากจุด A ไปจุด B

จากภาพประกอบ 7 พิจารณาวัตถุหนึ่งที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัวจากตำแหน่ง $\bar{x}_i$ ไปถึงตำแหน่ง $\bar{x}_f$ ในแนวแกน x จะได้ว่าความเร็วขณะใดขณะหนึ่งของวัตถุที่เวลาใด ๆ จะมีค่าเท่ากับความเร็วเฉลี่ยของวัตถุภายในช่วงเวลาทั้งหมด กล่าวคือ $\bar{v} = \bar{v}_x = \bar{v}_{avg}$ ดังนั้นจากสมการ (2.4) จะได้สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับกรณีนี้เป็น

$$\bar{v} = \frac{\Delta \bar{x}}{\Delta t} = \frac{\bar{x}_f - \bar{x}_i}{t_f - t_i}$$

หรือ

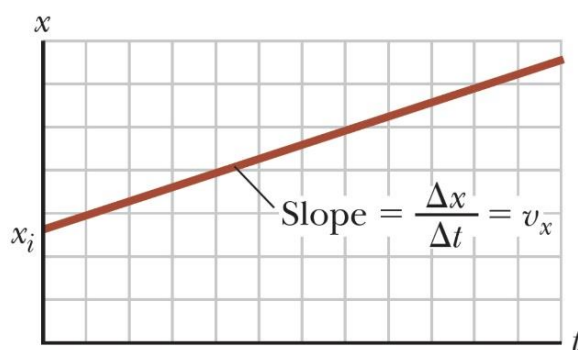
$$\bar{x}_f = \bar{x}_i + \bar{v} \Delta t$$

จากสมการ (12) ตำแหน่งของวัตถุได้จากผลรวมของตำแหน่งที่จุดเริ่มต้นของวัตถุ $\bar{x}_i$ ที่เวลา $t=0$ บวกกับการกระจัด $\bar{v} \Delta t$ ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป Δt โดยใช้ทางปฏิบัติจะให้เวลา ณ จุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่เป็น $t_i = 0$ และให้เวลา ณ จุดปลายของการเคลื่อนที่เป็น $t_f = t$ ดังนั้น จะได้สมการเป็น

$$\bar{x}_f = \bar{x}_i + \bar{v} t \quad (2.12)$$

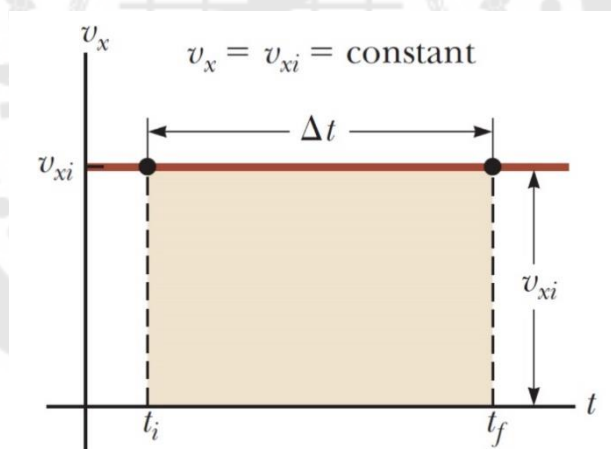
เมื่อ	$\bar{x}_f$	คือ	ตำแหน่ง ณ จุดปลายของการเคลื่อนที่
	$\bar{x}_i$	คือ	ตำแหน่ง ณ จุดเริ่มของการเคลื่อนที่
	$\bar{v}$	คือ	ความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่
	t	คือ	เวลา ณ จุดปลายของการเคลื่อนที่

จากภาพประกอบ 8 ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลา แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของวัตถุในภาพประกอบ 7 มีลักษณะคงที่และมีค่าเท่ากับขนาดของความเร็วเฉลี่ย และสอดคล้องกับสมการ (2.12) ซึ่งเป็นสมการเส้นตรง โดยความชันของสมการเส้นตรงเท่ากับ $\bar{v}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\bar{x}_i$ และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา จะได้ว่า ความเร็ว ณ เวลาใด ๆ มีค่าเท่ากัน และความชันของกราฟ คือ ความเร่งเฉลี่ยของวัตถุ มีค่าเท่ากับศูนย์ กล่าวคือ วัตถุไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วขณะเคลื่อนที่ วัตถุจึงไม่มีความเร่ง (ประธาน บุรณศิริ และ และคณะ, 2558)



ภาพประกอบ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาของวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว

ที่มา: Serway และ Jewett (2014, p. 29)



ภาพประกอบ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาของวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว

ที่มา: Serway และ Jewett (2014, p. 44)

2. การแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด (Torsional pendulum)

การเคลื่อนที่แบบคาบ (Periodic motion) หรือการแกว่งกวัด (Oscillation) เป็นการเคลื่อนที่ที่กลับไปกลับมาบนเส้นทางเดิมผ่านจุดคงที่จุดหนึ่ง เรียกว่า จุดสมดุล หรือเป็นการเคลื่อนที่ออกจากจุดเริ่มต้นแล้วเคลื่อนที่กลับมายังตำแหน่งเดิมหลังจากเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งที่มีลักษณะเป็นรอบหรือคาบ จึงอาจเรียกลักษณะการเคลื่อนที่ซ้ำรอบนี้ว่า การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก (Harmonic motion) รูปแบบพื้นฐานของการเคลื่อนที่แบบคาบ คือ กรณีที่แรงที่กระทำต่อวัตถุหรือแรงดึงกลับ (Restoring force) แปรผันตรงกับตำแหน่งของวัตถุแล้วทำให้วัตถุนั้นเคลื่อนที่กลับไปกลับมาะหว่างจุดสมดุลในช่วงเวลาเท่าเดิม โดยแรงนั้นมีทิศชี้ไปยังจุดสมดุลและความเร่งของวัตถุแปรผันตรงกับการกระจัด แต่มีทิศตรงข้ามกันเมื่อเทียบกับจุดสมดุลเสมอ การเคลื่อนที่ลักษณะนี้เรียกว่า การเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์มอนิก (Simple Harmonic Motion; SHM) และระบบมวลที่แกว่งกวัด เรียกว่า ตัวแกว่งกวัด (Oscillator) (ประธาน บุรณศิริ และ และคณะ, 2558)

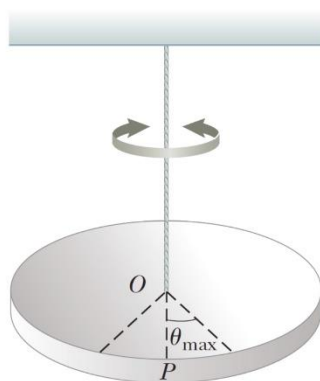
การเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์มอนิกของวัตถุในชีวิตประจำวันมีหลายลักษณะ เช่น การเคลื่อนที่ของวัตถุที่ติดกับสปริง การสั่นของเส้นลวดหรืออะตอมในโมเลกุลหรือของแข็ง กระแสไฟฟ้าในวงจรกระแสสลับ การแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา การแกว่งของลูกตุ้มฟิลิกัล รวมถึงการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด (ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555) ซึ่งเป็นเนื้อหาที่ผู้วิจัยนำมาศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ลักษณะการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด (Torsional pendulum)

ลูกตุ้มชนิดบิด ประกอบด้วย แท่งโลหะยาวขนาดสม่ำเสมอ ปลายบนถูกตรึงไว้และปลายล่างแขวนจานโลหะกลมแบนที่จุดศูนย์กลางในแนวตั้ง ดังภาพประกอบ 10 ขณะยังไม่มีแกว่ง เส้น OP บอกตำแหน่งสมดุลของระบบ เมื่อหมุนจานเป็นมุม $\theta_{\max}$ น้อย ๆ แล้วปล่อยให้แกว่งรอบแกนของแท่งโลหะจะทำให้จานโลหะกลมบิดกลับไปกลับมาอยู่ระหว่างเส้นประ แรงจากการบิดของจานโลหะกลมทำให้แท่งโลหะบิดไปด้วย และเกิดแรงดึงกลับโดยทอร์กเนื่องจากการบิดของแท่งโลหะกระทำในทิศที่พยายามดึงให้จานโลหะกลมกลับสู่ตำแหน่งสมดุล เรียกว่า ทอร์กคืนตัว (Restoring Torque; τ) ดังนั้น ทอร์กคืนตัวจะแปรผันตรงกับการกระจัดเชิงมุม θ ของการแกว่งของจานโลหะกลมแต่มีทิศตรงข้ามเสมอ

$$\tau = -k\theta \quad (2.13)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ของการบิด (Torsional constant) ของแท่งโลหะ



ภาพประกอบ 10 ลูกตุ้มชนิดบิด

ที่มา : Serway และ Jewett (2014, p. 468)

และสมการการเคลื่อนที่ของลูกตุ้มชนิดบิด ตามสมการ (2.15) หาได้จากกฎข้อที่สองของนิวตันสำหรับการเคลื่อนที่แบบหมุน เมื่อ α คือ ความเร่งเชิงมุม และ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรวมรอบแกนหมุนในแนวตั้ง จะได้

$$\sum \tau = I\alpha \rightarrow -\kappa\theta = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.14)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{\kappa}{I}\theta = 0 \quad (2.15)$$

อาจกล่าวได้ว่า การแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดเป็นการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกเชิงมุม (Angular simple harmonic motion) และสามารถหาการกระจัดเชิงมุมของจานโลหะกลมในรูปฟังก์ชันของเวลา จากสมการ (2.15) เมื่อ $t(0) = 0s$, $x(0) = \theta_m$ ได้เป็น

$$\theta(t) = \theta_m \cos \omega_0 t \quad (2.16)$$

ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเชิงมุมในรูปฟังก์ชันของเวลา ได้จากการหาอนุพันธ์อันดับ 1 และ 2 ของสมการ (2.16) เทียบกับเวลา ดังนี้

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = -\theta_m \omega_0 \sin \omega_0 t = \omega_m \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.17)$$

$$\alpha(t) = \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = -\theta_m \omega_0^2 \cos \omega_0 t = \alpha_m \cos(\omega_0 t + \pi) \quad (2.18)$$

เมื่อ θ_m คือ การกระจัดเชิงมุมสูงสุด หรือ แอมพลิจูดของการแกว่ง (A) หน่วยเป็น เรเดียน

ω_m คือ ความเร็วเชิงมุมสูงสุด หน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที และ $\omega_m = \theta_m \omega_0$ (2.19)

α_m คือ ความเร่งเชิงมุมสูงสุด หน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที² และ $\alpha_m = \theta_m \omega_0^2$ (2.20)

ω_0 คือ ความถี่เชิงมุมของการแกว่ง (Angular frequency) มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที
ดังนั้น จะได้ความถี่ (f) และ คาบ (T) ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิวด เป็น

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\kappa}{I}} \quad (2.21)$$

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa}{I}} \quad (2.22)$$

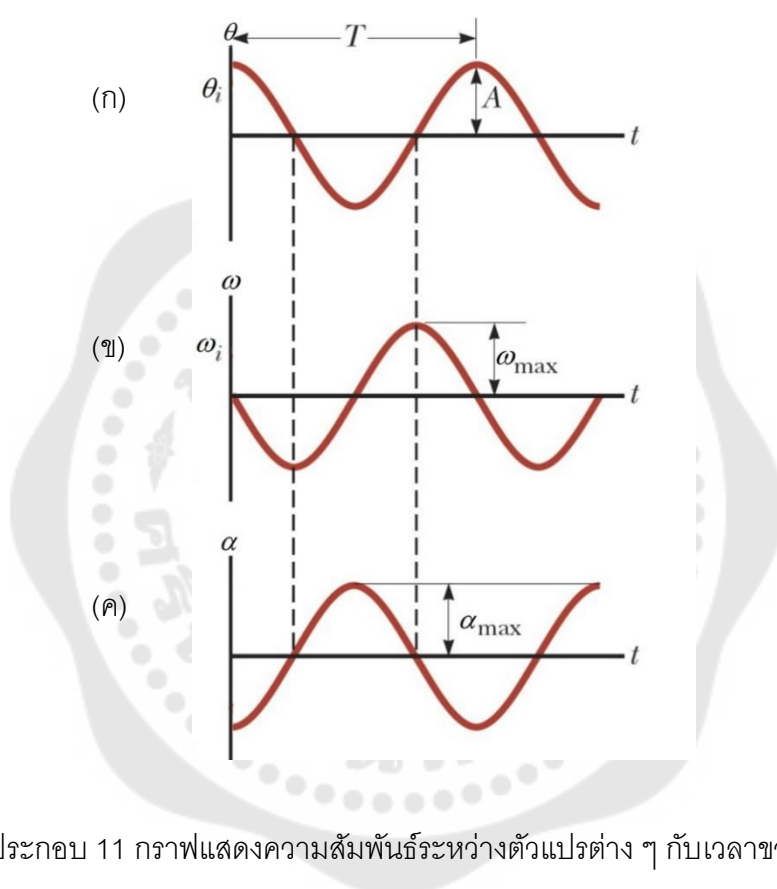
$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\kappa}} \quad (2.23)$$

ซึ่งจะเห็นว่า คาบการแกว่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุที่นำมาแกว่ง (I) รวมทั้งชนิดและขนาดของโลหะที่ใช้ทำแท่งโลหะยาว และหาค่าคงที่ของการบิด (κ) ได้จาก

$$\kappa = \frac{4\pi^2 I}{T^2} \quad (2.24)$$

2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ กับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต

จากสมการ (2.16), (2.17) และ (2.18) ภายในเงื่อนไขเริ่มต้น $t(0) = 0\text{s}$, $x(0) = \theta_m$ จะสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม (θ) ความเร็วเชิงมุม (ω) และความเร่งเชิงมุม (α) กับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตได้ ตามภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ กับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต (ก) การกระจัดเชิงมุมกับเวลา (ข) ความเร็วเชิงมุมกับเวลา และ (ค) ความเร่งเชิงมุมกับเวลา

ที่มา : Serway และ Jewett (2014, p. 455)

จากกราฟทั้ง 3 กราฟ แสดงให้เห็นว่า เฟสของความเร็วเชิงมุมต่างจากเฟสของการกระจัดเชิงมุมอยู่ $\pi/2$ เรเดียน หรือ 90° และความเร่งเชิงมุมมีเฟสต่างจากการกระจัดเชิงมุมเท่ากับ π เรเดียน หรือ 180° (ประธาน บุรณศิริ และ และคณะ, 2558)

2.3 พลังงานของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต

เมื่อไม่มีการสูญเสียพลังงานจากแรงเสียดทานหรือรูปแบบอื่น ๆ ผลรวมของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของตัวแกว่งจะเท่ากับพลังงานกลรวมของระบบ (E) ซึ่งมีค่าคงตัวตลอดเวลาตามกฎอนุรักษ์พลังงานกล โดยพลังงานจลน์จะมีการเปลี่ยนแปลงไปมา เนื่องจากความเร็วเชิงมุมของตัวแกว่งมีค่าเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าสูงสุดและศูนย์ เมื่อพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นหรือลดลง พลังงานส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานศักย์ที่สะสมในตัวแกว่งที่มีการบิดไปมาเป็นการกระจัดเชิงมุม $\pm\theta_m$ (ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555)

พลังงานจลน์ (K) และพลังงานศักย์ (U) ที่สะสมอยู่ในตัวแกว่ง ขณะใดขณะหนึ่งเท่ากับ

$$K = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2.25)$$

$$K = \frac{1}{2} \kappa \theta_m^2 \sin^2(\omega_0 t + \phi) \quad (2.26)$$

$$U = \frac{1}{2} \kappa \theta^2 \quad (2.27)$$

$$U = \frac{1}{2} \kappa \theta_m^2 \cos^2(\omega_0 t + \phi) \quad (2.28)$$

ดังนั้น จะได้

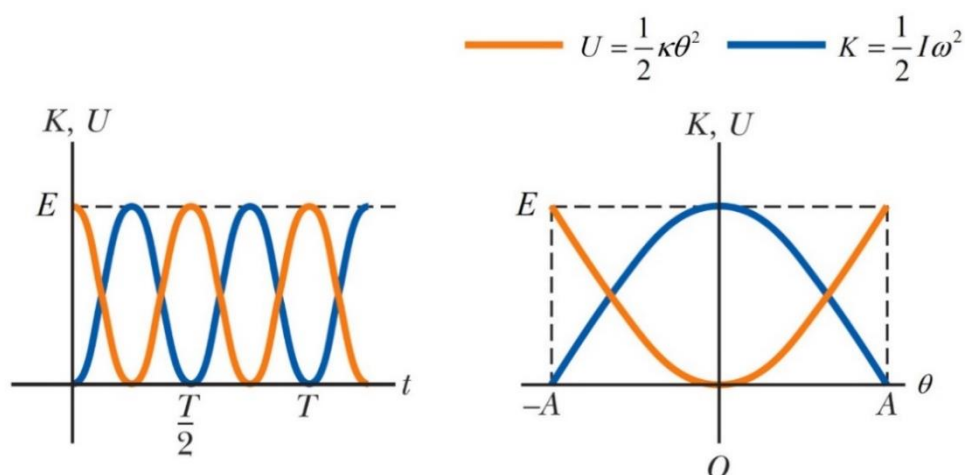
$$E = K + U = \frac{1}{2} I \omega^2 + \frac{1}{2} \kappa \theta^2 \quad (2.29)$$

$$E = \frac{1}{2} \kappa \theta_m^2 [\sin^2(\omega_0 t + \phi) + \cos^2(\omega_0 t + \phi)] \quad (2.30)$$

$$E = \frac{1}{2} \kappa \theta_m^2 = \text{ค่าคงตัว} \quad (2.31)$$

จากสมการ (2.31) จะเห็นว่า พลังงานกลรวมของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตมีค่าคงตัวและแปรผันตรงกับแอมพลิจูดกำลังสอง โดยพลังงานกลรวมมีค่าเท่ากับพลังงานศักย์สูงสุดของระบบที่สะสมในตัวแกว่งเมื่อ $\theta = \pm\theta_m$, $\omega = 0$ จึงไม่มีพลังงานจลน์ ส่วนที่ตำแหน่งสมดุล

พลังงานศักยมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจาก $\theta = 0$ และพลังงานกลรวมของระบบอยู่ในรูปพลังงานจลน์ สูงสุดเพียงอย่างเดียว ($\omega = \omega_m$) (ประธาน บุรณศิริ และ และคณะ, 2558)



(ก)

ภาพประกอบ 12 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์และพลังงานศักย์กับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต เมื่อ $\phi = 0$ (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์และพลังงานศักย์กับการกระจัดเชิงมุม θ ของตัวแกว่ง

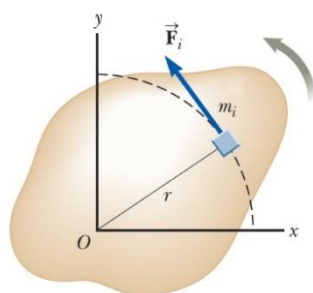
ที่มา : Serway และ Jewett (2014, p. 459)

จากภาพประกอบ 12 ณ เวลาใด ๆ ผลรวมของพลังงานจลน์ (กราฟเส้นสีน้ำเงิน) และพลังงานศักย์ (กราฟเส้นสีส้ม) มีค่าคงตัว เท่ากับพลังงานกลรวม (เส้นประสีดำ) ตามสมการ (2.31) เสมอ โดยกราฟ (ก) เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานต่าง ๆ กับเวลา ซึ่งพลังงานจลน์เป็นกราฟของฟังก์ชัน $\sin^2 \omega_0 t$ และพลังงานศักย์เป็นกราฟของฟังก์ชัน $\cos^2 \omega_0 t$ (ประธาน บุรณศิริ และ และคณะ, 2558) และกราฟ (ข) เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานต่าง ๆ กับการกระจัดเชิงมุม โดยโค้งพาราโบลาคว่ำและหงาย แทนพลังงานจลน์ (K) และพลังงานศักย์ (U) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า ขณะที่ตัวแกว่งบิตไปมาระหว่าง A และ -A มีการเปลี่ยนรูปพลังงานกลับไปมาระหว่างพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่สะสมอยู่ในตัวแกว่งอย่างต่อเนื่อง (ปิยพงษ์ สิทธิคง, 2547)

3. โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia)

3.1 การวิเคราะห์หาโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุแข็งเกร็งภายใต้ทอร์กสุทธิ

จากความสัมพันธ์ของพลศาสตร์สำหรับการหมุนของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงใด ๆ ความเร่งเชิงมุมของวัตถุที่กำลังหมุนรอบแกนคงที่จะแปรผันตรงกับทอร์กลัพธ์ที่กระทำรอบแกนหมุนนั้น โดยมีค่าคงที่การแปรผันเท่ากับโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุ (Serway และ Jewett, 2014)



ภาพประกอบ 13 วัตถุแข็งเกร็งหมุนรอบแกนหมุนที่ผ่านจุด O มีมวลย่อย m_i หมุนรอบแกนหมุนด้วยความเร่งเชิงมุมเท่ากัน

ที่มา : Serway และ Jewett (2014, p. 303)

พิจารณาภาพประกอบ 13 วัตถุแข็งเกร็งหนึ่งกำลังหมุนรอบแกนหมุน ภายใต้อิทธิพลของแรงภายนอกที่กระทำในแนวสัมผัสเส้นโค้ง F_i ประกอบด้วยมวลย่อย $m_1, m_2, \dots, m_i$ ที่หมุนรอบจุดหมุนเป็นวงกลม และมีระยะห่างจากจุดหมุน $r_1, r_2, \dots, r_i$ ตามลำดับ ทอร์กลัพธ์เนื่องจากแรงภายนอกที่กระทำต่อวัตถุหาได้จากผลรวมของทอร์กย่อยทั้งหมด กำหนดให้ทิศทวนเข็มนาฬิกามีค่าเป็นบวกและจากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน จะได้

$$\sum_i r_i F_i = \sum_i r_i m_i a_i$$

เมื่อแทน $a_i = \alpha r_i$ และความเร่งเชิงมุมของมวลย่อยมีค่าเท่ากัน จะได้ทอร์กลัพธ์เป็น

$$\sum_i \tau_i = \sum_i m_i r_i^2 \alpha = \left(\sum_i m_i r_i^2 \right) \alpha$$

หรือ

$$\sum \tau_{ext} = I\alpha \quad (2.32)$$

เมื่อ I ในสมการ (2.32) นิยามได้ว่าเป็นโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของวัตถุแข็งเกร็งรอบแกนหมุนนั้น โดยโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) เป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงความสามารถในการรักษาสภาพการหมุนของวัตถุหรือความเฉื่อยของการหมุน มีหน่วยเป็น $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ (Young และ Freedman, 2012)

$$I = \sum_i m_i r_i^2 \quad (2.33)$$

3.2 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงเรขาคณิตแบบต่าง ๆ

เมื่อวัตถุแข็งเกร็งประกอบด้วยอนุภาคที่รวมกันแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete particle) จะสามารถหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยได้จากสมการ (2.33) แต่ในกรณีที่อนุภาคกระจายอยู่ชิดกันมากจนถือได้ว่าเป็นเนื้อเดียวกัน การหาโมเมนต์ความเฉื่อยจะทำได้โดยใช้วิธีทางแคลคูลัส

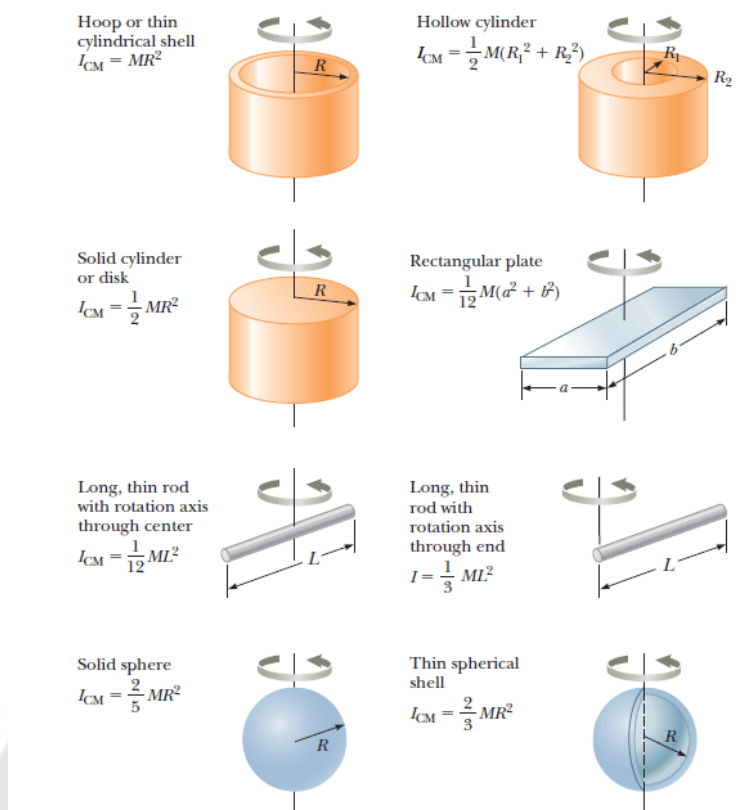
ให้ dm เป็นมวลขนาดเล็ก ๆ มีรัศมีจากแกนหมุนเท่ากับ r และ $dm = \rho dV$ เมื่อ dV เป็นปริมาตรเล็ก ๆ และความหนาแน่นของวัตถุเท่ากับ ρ ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุแข็งเกร็งหาได้จากการหาอินทิกรัลทั่วทั้งปริมาตรของวัตถุ ดังนี้

$$I = \lim_{m_i \rightarrow 0} \sum_i r_i^2 m_i = \int r^2 dm$$

หรือ

$$I = \int r^2 \rho dV \quad (2.34)$$

จากสมการ (2.33) และ (2.34) โมเมนต์ความเฉื่อยเป็นปริมาณที่ด้านการเปลี่ยนแปลงการหมุนของวัตถุ ซึ่งมีค่าขึ้นกับมวลและการกระจายตัวของมวลย่อยในเนื้อวัตถุรอบแกนหมุนหรือระยะห่างของมวลจากแกนหมุน กล่าวคือ โมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าขึ้นกับแกนหมุนด้วย เนื่องจากเมื่อแกนหมุนเปลี่ยนจะทำให้ระยะห่าง r เปลี่ยน สำหรับวัตถุแข็งเกร็งที่มีรูปทรงเรขาคณิตและมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ แกนสมมาตรของวัตถุซึ่งเป็นแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุอย่างน้อยหนึ่งแกนจะเป็นแกนหมุนของโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุนั้น ดังภาพประกอบ 14 (ประธาน บุรณศิริ และ และคณะ, 2558)



ภาพประกอบ 14 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงเรขาคณิตที่หมุนรอบแกนหนึ่ง ๆ

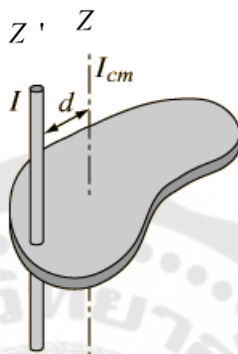
ที่มา: Serway และ Jewett (2014, p. 304)

3.3 ทฤษฎีแกนขนาน (Parallel-axis theorem)

กรณีที่แกนหมุนไม่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลแต่อยู่ในแนวขนานกับแกนซึ่งผ่านศูนย์กลางมวลของวัตถุ ดังภาพประกอบ 15 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุแข็งเกร็งจะคำนวณโดยใช้ทฤษฎีแกนขนาน ซึ่งพบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล Z ซึ่งขนานกับแกนหมุนใด ๆ Z' โดยที่แกนทั้งสองอยู่ห่างกันเป็นระยะ d จะได้โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนทั้งสองสัมพันธ์กันตามสมการ (Hyperphysics, 2018)

$$I = I_{CM} + Md^2 \quad (2.35)$$

เมื่อ	I	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน Z'
	I_{CM}	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน Z
	M	คือ มวลของวัตถุ
	d	คือ ระยะห่างระหว่างแกน Z และ Z'



ภาพประกอบ 15 ทฤษฎีแกนขนาน

ที่มา : Hyperphysics (2018)

3.4 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงเรขาคณิตที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ที่หมุนรอบแกนที่ผ่านศูนย์กลางมวล

1. โมเมนต์ความเฉื่อยในการหมุนของจานโลหะกลม (I_d) มวล m_d รัศมี R_d รอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลและตั้งฉากกับจานโลหะกลม เท่ากับ

$$I_d = \frac{1}{2} m_d R_d^2 \quad (2.36)$$

2. โมเมนต์ความเฉื่อยในการหมุนของแท่งโลหะ (I_w) มวล m_w รัศมี R_w รอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลและตั้งฉากกับฐาน เท่ากับ

$$I_w = \frac{1}{2} m_w R_w^2 \quad (2.37)$$

3. โมเมนต์ความเฉื่อยในการหมุนของสมาร์ทโฟน (I_s) มวล m_s มีความกว้างและความยาวเป็น w และ l ตามลำดับ รอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล เท่ากับ

$$I_{scm} = \frac{1}{12} m_s (w^2 + l^2)$$

และโมเมนต์ความเฉื่อยของสมาร์ทโฟนรอบแกนหมุนร่วม คำนวณจากทฤษฎีแกนขนาน (Parallel-axis theorem) เท่ากับ

$$I_s = I_{scm} + md^2$$

$$I_s = \frac{1}{12} m_s (w^2 + l^2) + m_s d^2 \quad (2.38)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างจากแกนการหมุนร่วมถึงจุดศูนย์กลางมวลของสมาร์ทโฟน เท่ากับ 0.079 ± 0.001 เมตร

4. โมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกโลหะตัน (I_c) มวล m_c รัศมี R_c รอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล เท่ากับ

$$I_{ccm} = \frac{1}{2} m_c R_c^2$$

และโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกโลหะตันรอบแกนหมุนร่วม คำนวณจากทฤษฎีแกนขนาน (Parallel-axis theorem) เท่ากับ

$$I_c = I_{ccm} + m_c r^2$$

$$I_c = \frac{1}{2} m_c R_c^2 + m_c r^2 \quad (2.39)$$

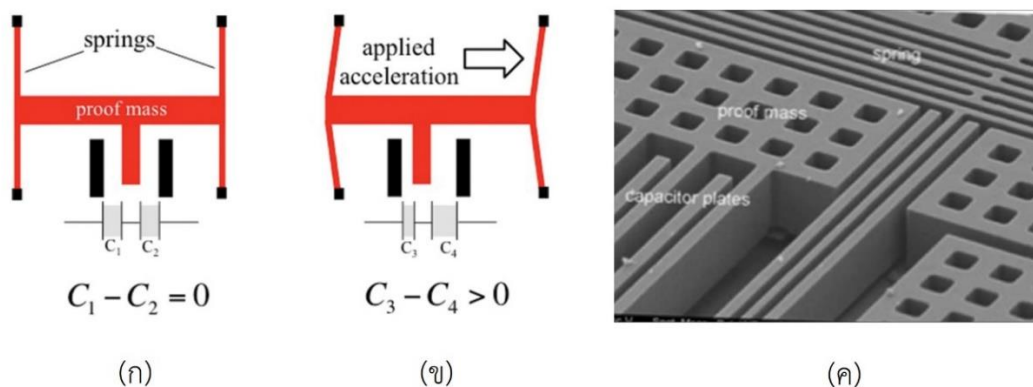
เมื่อ r คือ ระยะห่างจากแกนการหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวลของทรงกระบอกโลหะตัน

4. หลักการทำงานของเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน

ในปัจจุบันสมาร์ทโฟนหรือแท็บเล็ตกลายเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวันของทุกคน รวมถึงเด็ก นักเรียน นักศึกษาทุกระดับชั้น นอกเหนือจากที่เราทราบกันดีว่า การใช้สมาร์ทโฟนหรือแท็บเล็ตที่มากเกินไปเป็นปัญหาหนึ่งที่ส่งผลเชิงลบในด้านการเรียนของเด็กนั้น สมาร์ทโฟนหรือแท็บเล็ตยังสามารถทำให้เกิดประโยชน์ทางการศึกษาในการจัดการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ได้หลากหลายรูปแบบ โดยเฉพาะเพื่อใช้เซนเซอร์ที่บรรจุอยู่ในสมาร์ทโฟนหรือแท็บเล็ตเป็นเครื่องมือวัดในการทดลอง (Jochen Kuhn และ Vogt, 2013) เหตุผลหลักที่เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทศวรรษที่ผ่านมา คือ ความสะดวกและความพร้อมใช้งานของเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ในสมาร์ทโฟนเช่น เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง เซนเซอร์ไจโรสโคป เซนเซอร์ตรวจวัดตำแหน่ง และเซนเซอร์ตรวจวัดแสง เป็นต้น ร่วมกับแอปพลิเคชันเคทีดาวน์โหลดได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายและง่ายต่อการใช้งาน เพื่ออ่านค่าจากเซนเซอร์และแสดงข้อมูลการทดลองทางหน้าจอและสามารถส่งข้อมูลออกมาเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไปได้ อีกทั้งยังใช้ต้นทุนค่อนข้างต่ำ จึงเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับการวัดและการทดลองทั้งในห้องเรียนและนอกห้องเรียน (Braskén และ Pörn, 2017, July)

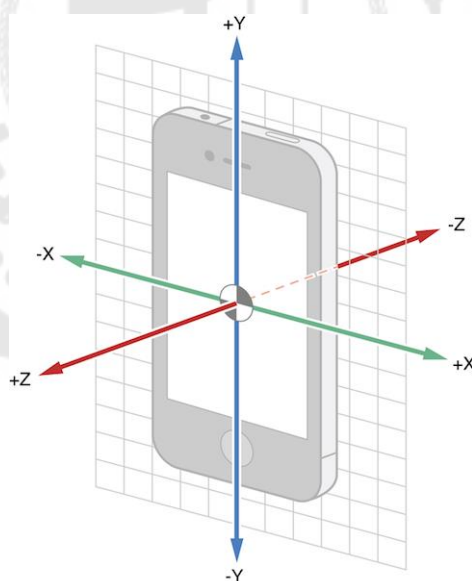
4.1 เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer)

เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง เป็นระบบระดับจุลภาคของกระบวนการประมวลผลเชิงกลและเชิงไฟฟ้า หรือเรียกว่า ระบบไฟฟ้าเชิงกลระดับจุลภาค (Micro-electro-mechanical Systems: MEMS) (ชาติ ทีชะ, 2560) โดยโมเดลของเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง ประกอบด้วย มวลทดสอบ (Proof mass) ที่ติดอยู่กับโครงของเซนเซอร์ด้วยสปริงที่มีความยืดหยุ่น ทำให้สามารถเคลื่อนไปมาได้ และเคลื่อนที่อยู่ระหว่างมวลอีก 2 อัน (แท่งสีดำ) ซึ่งยึดแน่นกับโครงของเซนเซอร์ไม่ให้เคลื่อนที่ โดยเชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุ 2 อัน ที่ทำหน้าที่ในการแปลงข้อมูลการเคลื่อนที่และทิศทางของสมาร์ทโฟนเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อให้ระบบประมวลผลต่อไป หลักการทำงานของเบื้องต้นของเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง คือ เมื่อไม่มีความเร่งกระทำต่อสมาร์ทโฟน มวลทดสอบอยู่นิ่งตรงกลางระหว่างแท่งสีดำ ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ C_1 เท่ากับ C_2 ดังภาพประกอบ 16 (ก) แต่เมื่อมีความเร่ง a กระทำในทิศทางไปทางขวา จะส่งผลให้มวลทดสอบเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามและระยะห่างระหว่างมวลทดสอบกับแท่งสีดำทั้ง 2 ไม่เท่ากัน ดังภาพประกอบ 16 (ข) โดยเคลื่อนที่มาใกล้แท่งสีดำด้านซ้ายมือ ทำให้ตัวเก็บประจุ C_3 มีประจุน้อยกว่า C_4 เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า แล้วระบบจะคำนวณเป็นค่ากระแสไฟฟ้าและแปลงมาเป็นค่าความเร่งที่เกิดขึ้นจริงอีกครั้ง (Vogt และ Kuhn, 2012, March; Countryman, 2014)



ภาพประกอบ 16 (ก) เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งขณะไม่มีแรง (ข) เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งขณะมีความเร่งกระทำ (ค) โครงสร้างของเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง

ที่มา: Countryman (2014, p. 558)



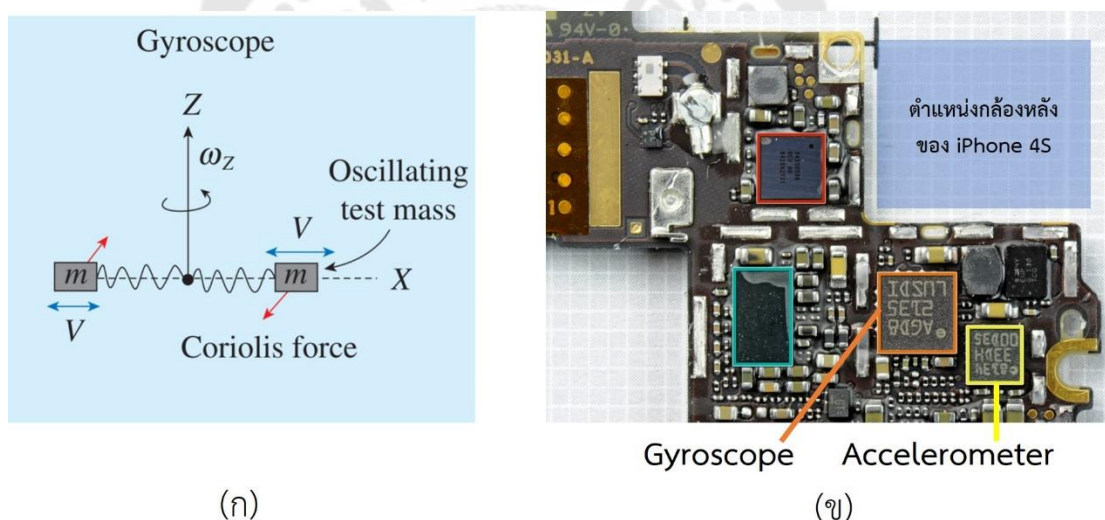
ภาพประกอบ 17 แกนอ้างอิงของเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งของสมาร์ทโฟน

ที่มา: Andreas Eichner. (2020). iOS Sensors & Core Motion. (Online)

เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งเป็นสำหรับตรวจจับลักษณะการเคลื่อนไหวของสมาร์ทโฟนเพื่อปรับทิศทางของหน้าจอ การปฏิเสธการจับสายโทรศัพท์เมื่อพลิกหน้าจอคว่ำลงกับพื้น หรือการเล่นเกมส์บนสมาร์ทโฟน เป็นต้น โดยเป็นการตรวจวัดค่าความเร่งเชิงเส้นทั้ง 3 แกน (3-Axis) จากเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง 3 ตัว แต่ละตัวอยู่ในแนวตั้งฉากซึ่งกันและกัน และวัดค่าความเร่ง a_x , a_y และ a_z จากแกน x , y และ z อย่างอิสระต่อกัน แสดงดังภาพประกอบ 17

4.2 เซนเซอร์ไจโรสโคป (Gyroscope Sensor)

เซนเซอร์ไจโรสโคป เป็นระบบไฟฟ้าเชิงกลระดับจุลภาค (Micro-electro-mechanical Systems: MEMS) เช่นเดียวกับเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง ใช้สำหรับตรวจวัดลักษณะการหมุนของสมาร์ทโฟน ซึ่งมีความถูกต้องและแม่นยำมากกว่าเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง (ชาติ ทีชะ, 2560) ดังภาพประกอบ 18(ข)

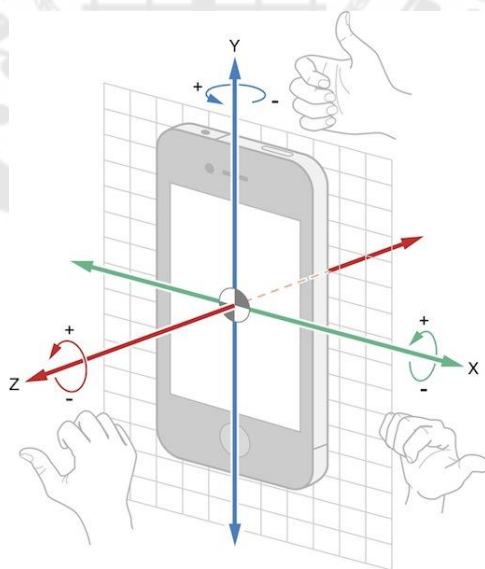


ภาพประกอบ 18 (ก) หลักการทำงานของเซนเซอร์ไจโรสโคป (ข) ตำแหน่งของเซนเซอร์ไจโรสโคป และเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งของสมาร์ทโฟน iPhone 4S

ที่มา: Braskén และ Pörn (2017, July); Galan (2011, October)

โดยโมเดลอย่างง่ายของเซนเซอร์ไจโรสโคป ประกอบด้วย มวลทดสอบ 2 อัน (Oscillating test mass) ซึ่งเชื่อมกันด้วยคานสปริงและตัวเก็บประจุ ดังภาพประกอบ 18(ก) หลักการทำงานเบื้องต้นอาศัยปรากฏการณ์โคริโอลิส (Coriolis Effect) เมื่อภายนอกของสมาร์ทโฟนมีการหมุนรอบแกนหนึ่ง ๆ ด้วยความเร็วเชิงมุมค่าหนึ่ง จะเกิดแรงโคริโอลิส F กับมวลทดสอบทั้ง 2 อันที่อยู่ตรงข้ามกัน การหมุนนี้จะทำให้ระยะของมวลทดสอบเปลี่ยนไปจากเดิมและเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับค่าความความเร็วเชิงมุม ตัวเก็บประจุจะทำการสร้างสัญญาณดิจิทัลเพื่อให้ระบบประมวลผลและแปลงค่าต่อไป (Braskén และ Pörn, 2017, July) คล้ายกับหลักการของเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง โดยเซนเซอร์ไจโรสโคปจะตรวจวัดค่าความเร็วเชิงมุม ในหน่วย องศาต่อวินาที หรือ เรเดียนต่อวินาที ทั้ง 3 แกน (3-Axis) เทียบกับแกนอ้างอิงของสมาร์ทโฟน ดังภาพประกอบ 19 โดยการหมุนรอบแกนมี 3 ลักษณะ และกำหนดทิศทางเป็น บวก (+) ตามกฎมือขวา โดยนิ้วโป้งชี้ไปทางแกน $+x$, $+y$ และ $+z$ (Eichner, 2020) ดังนี้

- 1) การหมุนแบบ Pitch คือ การหมุนรอบแกน x (เส้นสีเขียว) ของสมาร์ทโฟน
- 2) การหมุนแบบ Roll คือ การหมุนรอบแกน y (เส้นสีน้ำเงิน) ของสมาร์ทโฟน
- 3) การหมุนแบบ Yaw คือ การหมุนรอบแกน z (เส้นสีแดง) ของสมาร์ทโฟน

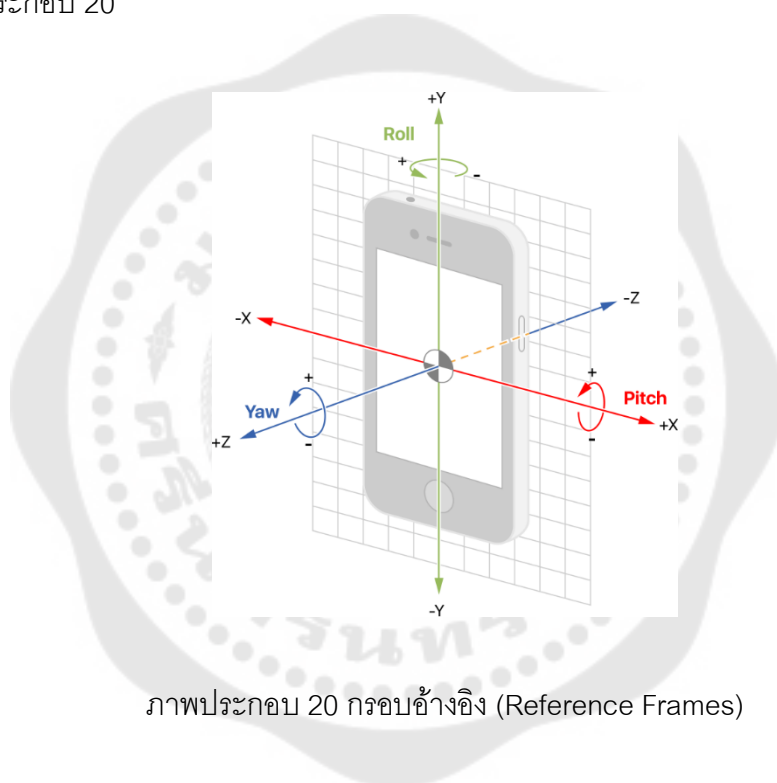


ภาพประกอบ 19 การหมุนรอบแกนอ้างอิงของเซนเซอร์ไจโรสโคป

ที่มา: Eichner (2020)

4.3 ระบบตรวจวัดตำแหน่ง (Device motion service)

การเคี้ยว การตะแคง ลักษณะต่าง ๆ หรือตำแหน่งของสมาร์ทโฟนในขณะหนึ่ง ๆ สามารถบันทึกได้ด้วยระบบตรวจวัดการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ (Device Motion Service) โดยการทำงานของระบบจะสัมพันธ์กับกรอบอ้างอิงเริ่มต้นของสมาร์ทโฟน ซึ่งมีลักษณะเป็นระบบพิกัดฉาก 3 มิติ โดยแกน $-Z$ ของกรอบอ้างอิงจะชี้ตามแรงโน้มถ่วงของโลก (พุ่งลงสู่จุดศูนย์กลางของโลก) เสมอ ในขณะที่ผู้ใช้สามารถกำหนดทิศทางของแกน x ได้ตามความเหมาะสมในการใช้งาน ในการวิจัยครั้งนี้ กำหนดให้แกนของสมาร์ทโฟน iPhone 4S ที่ผู้วิจัยใช้ในการทำการทดลอง เป็นดังภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 กรอบอ้างอิง (Reference Frames)

ที่มา: Apple developer (2020)

ระบบตรวจวัดการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์จะแสดงค่าลักษณะของสมาร์ทโฟนในรูปของตำแหน่งเชิงมุม แทนด้วย ค่า Pitch, Row และ Yaw เมื่อสมาร์ทโฟนมีการเคลื่อนที่รอบแกน x , y และ z ตามลำดับ ในหน่วยเรเดียน โดยทำการประมวลผลข้อมูลองค์ประกอบเวกเตอร์ทั้ง 3 แกนจากเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งและเซนเซอร์ไจโรสโคป ดังต่อไปนี้ เพื่อจะได้พิกัดตำแหน่ง (Pitch, Row, Yaw) ของสมาร์ทโฟนในระบบพิกัด (Eichner, 2020, ; Apple developer, 2020)

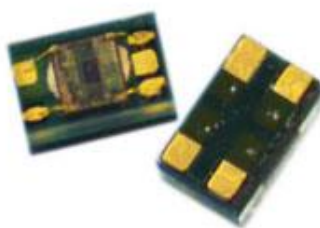
1. ลักษณะของสมาร์ทโฟน ขณะปัจจุบันที่อ้างอิงจากกรอบอ้างอิงเริ่มต้นที่ใช้ทั้ง

3 แกน

2. อัตราการหมุน รอบแกนทั้ง 3 แกนล่าสุด
3. เวกเตอร์แรงโน้มถ่วงของโลกที่ชี้ไปตามแรงโน้มถ่วงเมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิงปัจจุบัน
4. ค่าความเร่งของผู้ใช้ที่ไม่คิดแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำในทั้ง 3 แกนของกรอบอ้างอิง
5. เวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กเทียบกับกรอบอ้างอิงปัจจุบัน

4.4 เซนเซอร์ตรวจวัดแสง (Ambient light sensor)

เซนเซอร์ตรวจวัดแสง เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจจับแสงในสภาพแวดล้อมรอบตัวเรา โดยแสดงค่าที่วัดได้ในรูปค่าความส่องสว่าง (Illuminance) หรือเรียกอีกอย่างว่า ระดับความสว่าง (Lighting Illuminance level) ในหน่วย ลักซ์ (Lux, lx) ซึ่งเป็นการทำงานของโฟโตทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบมาให้ตอบสนองต่อสเปกตรัมในย่านเดียวกับที่ตามนุษย์มองเห็น กล่าวคือ สเปกตรัมของแสงธรรมชาติ (Visible light) และปฏิเสธสเปกตรัมในย่านอินฟราเรด เปรียบเสมือนเซนเซอร์เป็นตาของมนุษย์ โดยหลักการทำงานเบื้องต้นของโฟโตทรานซิสเตอร์ (Photo Transistor) คือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบบนผิวที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสมบนโฟโตไดโอด จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความส่องสว่างนี้ ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในตัวอุปกรณ์ โดยปริมาณกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์แปรผันตรงกับความส่องสว่างที่มาตกกระทบบนผิว ซึ่งจะทำให้ระบบรับรู้และประมวลผลต่อไป (ชิตชัย โพธิ์ประภา, 2558) โดยในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 ดังภาพประกอบ 21 ซึ่งเป็นรุ่น CM3323 Light sensor with I2C interface มีความละเอียดเท่ากับ 1.0 lx



ภาพประกอบ 21 เซนเซอร์ตรวจวัดแสง

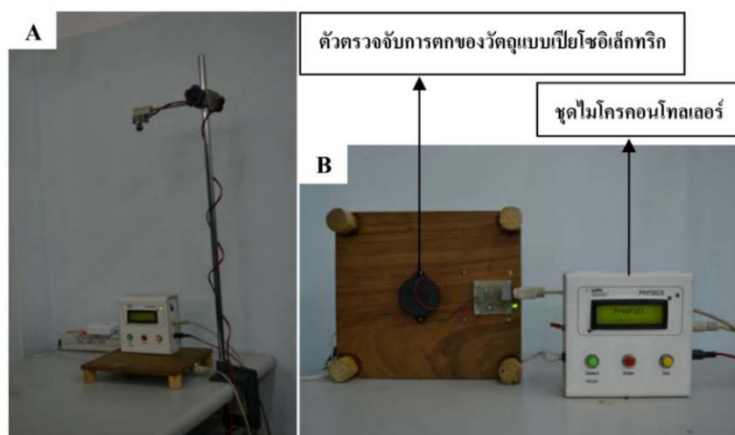
ที่มา: (Capella Microsystem inc, 2014)

5. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับชุดการทดลองฟิสิกส์

ในปัจจุบันนักฟิสิกส์ศึกษา อาจารย์ระดับมหาวิทยาลัยหรือคุณครูในโรงเรียนทั้งต่างประเทศและ ในประเทศไทย ได้มีการนำวัสดุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ และเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เข้ามามีบทบาทในการทดลองฟิสิกส์ทั้งในระดับมัธยมศึกษาและระดับมหาวิทยาลัยมากขึ้น โดยส่วนใหญ่อุปกรณ์เหล่านี้จะถูกนำมาใช้แทนเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์บางอย่าง เนื่องจากสามารถวัดและบันทึกข้อมูลการทดลองได้อย่างต่อเนื่อง บางชนิดทำการวัดและบันทึกด้วยตัวอุปกรณ์เอง ซึ่งลดการใช้ความรู้สึกหรือการตัดสินใจของผู้ทดลองในการกดบันทึกข้อมูล ทำให้ลดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง ข้อมูลที่ได้มีความละเอียดมากขึ้น และอยู่ในรูปของไฟล์สเปรดชีต (Spreadsheet) ซึ่งเป็นลักษณะข้อมูลที่มีการจัดเรียงในลักษณะตารางสี่เหลี่ยมที่ใช้ในการคำนวณเป็นหลัก ทำให้ง่ายและสะดวกต่อการนำไปวิเคราะห์ผลการทดลองมากขึ้นกว่าในอดีต อีกทั้งได้ผลการทดลองมีความถูกต้องและเที่ยงตรง นอกจากนี้บางอุปกรณ์ยังสามารถแสดงข้อมูลที่บันทึกในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางฟิสิกส์หนึ่ง ๆ กับเวลาหรือสามารถคำนวณค่าปริมาณต่าง ๆ แล้วแสดงออกมาเป็นตัวเลขได้แบบทันทีทันใด ซึ่งจะทำให้ผู้ทำการทดลองศึกษาเนื้อหาได้ละเอียดลึกซึ้งขึ้น เกิดความคิดรวบยอดได้ชัดเจนและเห็นเป็นรูปธรรมมากขึ้น โดยอุปกรณ์และวิธีการที่นำมาใช้มีหลากหลาย เช่น การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์คู่กับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ การใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ และการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน เป็นต้น

5.1 การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์คู่กับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์

ในปี พ.ศ. 2556 ดิเรก บุญธรรม และ คนอื่น ๆ (2556, มกราคม-มีนาคม, น.41-47) ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์การทดลองเรื่องการตกอย่างอิสระ ดังภาพประกอบ 22 โดยนำเทคนิคการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมวงจรมาใช้คู่กับตัวตรวจการตกของวัตถุแบบตรวจจับการสั่นสะเทือนด้วยแผ่นเปียโซอิเล็กทริก ซึ่งประยุกต์ใช้อิเล็กโตรแม็กเนติกคอยล์จากรีเลย์ที่จะสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อดูดวัตถุไว้ เมื่อตัดกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็กจะหายไปทำให้วัตถุตกลงมา โดยไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวรับรู้และเริ่มจับเวลา เมื่อวัตถุตกกระทบพื้น แผ่นเปียโซอิเล็กทริกจะส่งกระแสไฟฟ้ามาที่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อหยุดเวลาแล้วแสดงค่าเวลาที่วัตถุเคลื่อนที่ ทำให้สามารถวิเคราะห์การตกของวัตถุและหาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก g ได้ จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลา โดย $slope = \frac{1}{2}g$ ซึ่งพบว่า ค่า g ที่คำนวณได้มีค่าเฉลี่ย $9.27 \pm 0.20 \text{ m/s}^2$ และเปรียบเทียบกับค่าจริงที่วัดได้ ณ กรุงเทพมหานคร มีค่า 9.78297 m/s^2 มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.61%

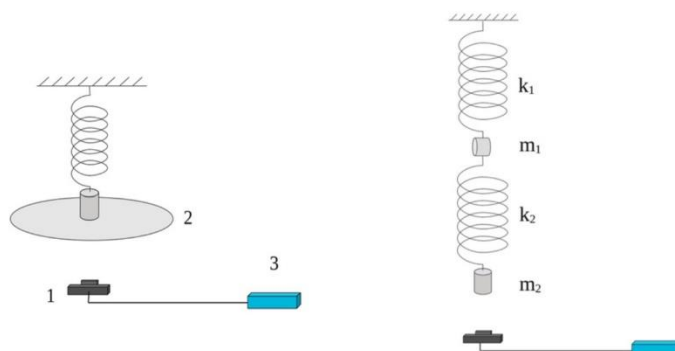


ภาพประกอบ 22 ชุดทดลองเรื่องการตกอย่างอิสระ (A) โครงสร้างทั้งหมดของอุปกรณ์การทดลอง (B) ไมโครคอนโทรลเลอร์และตัวตรวจจับการตกของวัตถุแบบเปียโซอิเล็กทริก

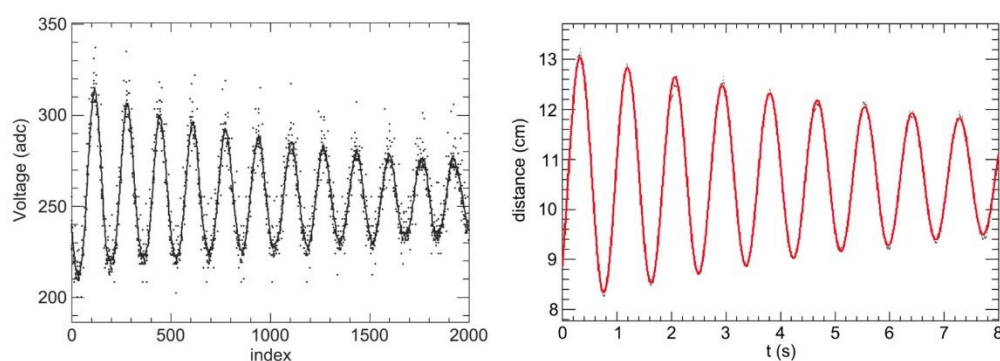
ที่มา: ดิเรก บุญธรรม และ คนอื่น ๆ (2556, มกราคม-มีนาคม, น.44)

ในการทำงานเดียวกับ Marinho และ Paulucci (2016, March, pp.1-13) พัฒนาชุดอุปกรณ์การทดลองเรื่องการแกว่งกวัดแบบหน่วงและเพนดูลัมแบบคู่ จากการเคลื่อนที่ของมวลติดปลายสปริง 1 ตัวและ 2 ตัวในแนวดิ่ง ดังภาพประกอบ 23(ก) เพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่และวัดระยะในฟังก์ชันเวลาของการแกว่งกวัดแบบต่าง ๆ โดยใช้บอร์ดอาδυโน ยูโนเป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูลและควบคุมระบบ เชื่อมต่ออยู่กับอินฟราเรดเซนเซอร์ที่เป็นตัวปล่อยคลื่นอินฟราเรด ความถี่ 850 เฮิร์ตซ์ ไปยังมวลที่ติดปลายสปริงเพื่อให้คลื่นไปตกกระทบมวลขณะที่กำลังแกว่งอยู่แล้วสะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ตัวรับแสดงในรูปความต่างศักย์แล้วจึงคาบิเบรตเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะกับเวลา ซึ่งเป็นการประยุกต์วิธีการหาตำแหน่งของวัตถุโดยใช้คลื่นโซนา ได้ตัวอย่างผลการทดลอง ดังภาพประกอบ 23(ข) พบว่าตำแหน่งของมวลติดปลายมีความใกล้เคียงกับกราฟคาบิเบรตและชุดการทดลองใช้งานได้ดีในช่วงระยะการเคลื่อนที่จากแผ่นสะท้อนถึงเซนเซอร์ประมาณ 4-30 cm ความคลาดเคลื่อนประมาณ 3% และเมื่อทดลองใช้กับนักศึกษาวิศวกรรมพบว่า การทดลองทำให้เห็นและเข้าใจปรากฏการณ์อย่างเป็นรูปธรรมและช่วยกระตุ้นความสนใจในการเรียนฟิสิกส์มากขึ้น แม้ว่าผลการทดลองที่ได้จะความถูกต้องแม่นยำไม่สูงมาก เนื่องจากรบกวนของแสงธรรมชาติ อากาศจากเครื่องปรับอากาศในห้องเรียน การวางตำแหน่งของเซนเซอร์กับมวลที่ไม่ตรงกันหรือการคำนวณคาบิเบรตจากช่วงเวลาที่สั้นเกินไป

(ก)



(ข)



ภาพประกอบ 23 (ก) การติดตั้งชุดการทดลองการแกว่งของมวลติดปลายสปริง 1 ตัวและ 2 ตัวในแนวดิ่ง โดยใช้บอร์ดอาδυโน ยูโนและอินฟราเรดเซนเซอร์ (ข) ข้อมูลดิบในรูปความต่างศักย์กับลำดับ (ซ้าย) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะกับเวลาของการออสซิลเลตแบบเดมปีของมวลติดปลายสปริง 1 ตัวที่แปลงจากกราฟซ้ายมือ (ขวา)

ที่มา : Marinho และ Paulucci (2016, March)

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์คู่กับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ จะเห็นว่า วิธีการนี้เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจให้หาค่าปริมาณทางฟิสิกส์จากการทดลองได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตาม ในการสร้างอุปกรณ์ยังมีความยากและซับซ้อน เช่น การเขียนโปรแกรมคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งต้องมีความรู้เกี่ยวกับภาษาซีและอิเล็กทรอนิกส์หรืออาจให้ช่างที่มีความชำนาญทำ ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ใช้คู่กันเป็นซอฟต์แวร์เฉพาะที่อาจทำให้ไม่คุ้มทุนและยากต่อการใช้งาน อุปกรณ์เครื่องมือมีขนาดใหญ่และมีหลายส่วนประกอบ รวมทั้งต้องควบคุมการรบกวนจากปัจจัยภายนอกที่อาจมีผลต่อข้อมูลการทดลอง

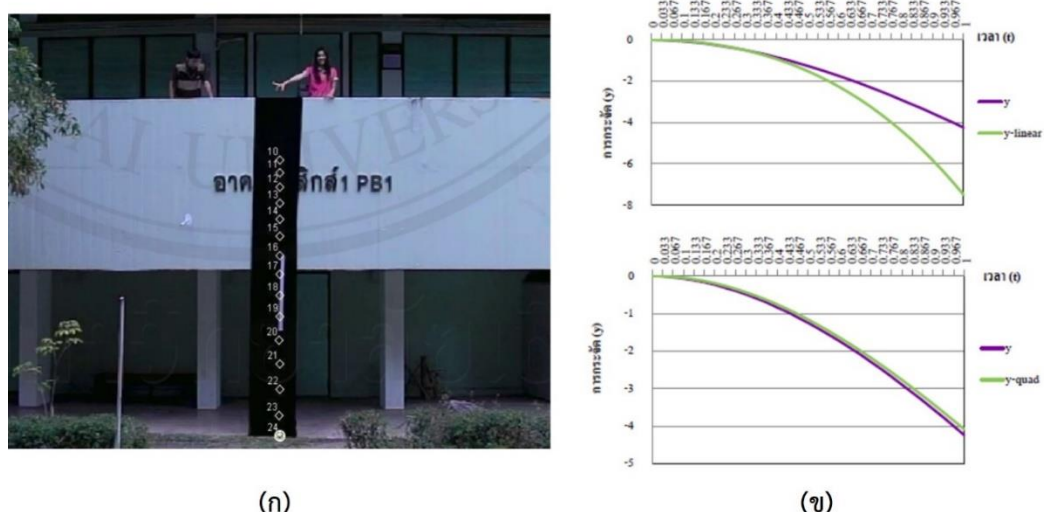
5.2 การใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโออัตราเร็วสูงร่วมกับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโออัตราเร็วสูงเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการเรียนการสอนฟิสิกส์มากขึ้น โดยเฉพาะการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับการเคลื่อนที่และการทดลองทางกลศาสตร์ นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์การกีฬาและชีววิทยาด้วย เทคนิคดังกล่าวมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ กล้องดิจิทัลที่มีฟังก์ชันบันทึกวิดีโออัตราเร็วสูง 30-1200 เฟรม/วินาที หรือสมาร์ทโฟน แท็บเล็ต สำหรับบันทึกวิดีโอการเคลื่อนที่ของวัตถุที่สนใจ และโปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอที่นักฟิสิกส์พัฒนาขึ้นโดยเฉพาะ เช่น VideoPoint, Logger Pro3, Coach6 และ Tracker ซึ่งนิยมใช้ในประเทศไทย ถือเป็นเทคโนโลยีถูกผสมระหว่างการใช้คอมพิวเตอร์เก็บข้อมูลและโปรแกรมสร้างแบบจำลองที่มีฟังก์ชันในการทำเครื่องหมายแสดงจุดตำแหน่งของวัตถุในแต่ละเฟรมของวิดีโอ จากนั้นผู้ใช้สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุโดยให้โปรแกรมแสดงผลในลักษณะตาราง กราฟ หรือสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเคลื่อนที่ต่าง ๆ เช่น ตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง เป็นต้น อีกทั้งยังมีฟังก์ชันการสร้างแบบจำลองจากทฤษฎีเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง หรือบางโปรแกรมมีฟังก์ชันการคำนวณหาปริมาณการเคลื่อนที่อื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น พลังงานศักย์ โมเมนตัมและอัตราเร็วเชิงมุม เป็นต้น และข้อดีของเทคนิคนี้เมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ได้แก่

1. สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุหลายชิ้น หรือการเคลื่อนที่ 2 มิติได้ในเวลาเดียวกัน เช่น การเคลื่อนที่เชิงมุมและแบบโปรเจกไทล์
2. เก็บข้อมูลของตำแหน่งวัตถุได้ในระยะไกลกว่าการใช้ตัวรับรู้ แต่มีข้อจำกัดเรื่องขนาดที่เล็กลง ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ตำแหน่ง
3. เก็บข้อมูลได้โดยไม่จำเป็นต้องมีสายต่อหรือตัวประมวลผล
4. โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอสามารถแสดงผลได้หลายแบบพร้อมกัน เช่น ตารางตาราง และตำแหน่งของวัตถุ (พรรัตน์ วัฒนกุลวิชัย และ จิราภรณ์ ปุณยวัจน์พรกุล, 2012)

ปี พ.ศ. 2554 สราวุธ พรหมราช (2554, บทคัดย่อ) ได้ศึกษาการกลิ้งแบบไม่ไถลของทรงกระบอกตันและกลวงลงจากพื้นเอียงโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอความเร็วสูงด้วยโปรแกรม Tracker พบว่า ทรงกระบอกทั้งสองกลิ้งโดยไม่ไถลเมื่อมุมของพื้นเอียงน้อยกว่ามุมวิกฤต ค่าจากทฤษฎีของมุมวิกฤตใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง และพลังงานกลรวมของทรงกระบอกมีค่าคงที่ในกรณีกลิ้งโดยไม่ไถล และเมื่อนำไปสร้างเป็นสื่อสาธิตการเคลื่อนที่แบบกลิ้งแล้วนำไปใช้สอน จะได้ว่า การสอนโดยใช้สื่อสาธิตประกอบการบรรยายมีประสิทธิภาพมากกว่าการสอนแบบบรรยายเพียงอย่างเดียว

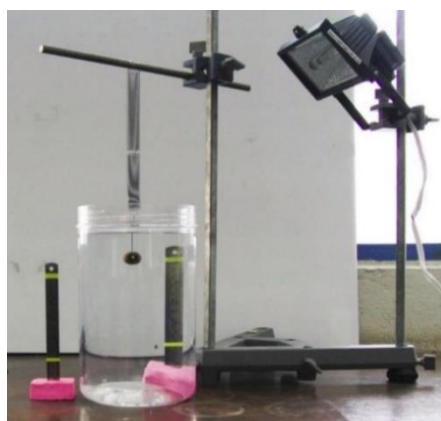
ทำนองเดียวกัน ในปี พ.ศ. 2555 จักรกฤษณ์ แก้วสุทธิ (2555, น.61) ที่ได้ใช้เทคนิคภาพถ่ายวิดีโอความเร็วสูงและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Tracker ศึกษาผลของแรงต้านอากาศจากการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของวัตถุ 4 ชนิด คือ ลูกกอล์ฟ ลูกปิงปอง ลูกขนไก่และลูกเทนนิสและผลของแรงต้านในของเหลวที่มีต่อการสั่นของมวลติดสปริง ดังภาพประกอบ 24



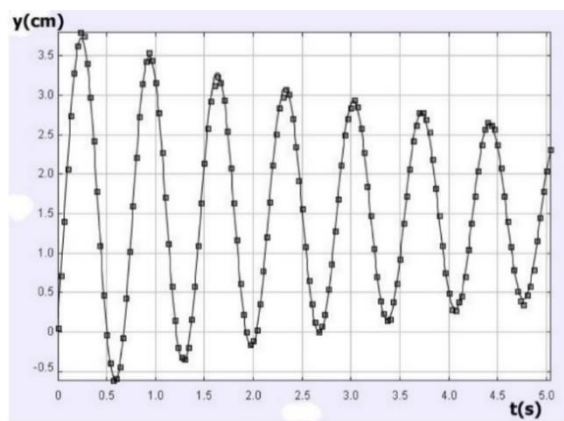
ภาพประกอบ 24 (ก) การวิเคราะห์ผลของแรงต้านอากาศจากการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของวัตถุด้วยโปรแกรม Tracker (ข) กราฟการกระจัดกับเวลาของการตกในแนวตั้งของลูกปิงปอง เปรียบเทียบกับแบบจำลองแบบ Linear drag (บน) และแบบ Quadratic drag (ล่าง)

ที่มา : จักรกฤษณ์ แก้วสุทธิ (2555, น. 61)

โดยผลการทดลองพบว่า กราฟการกระจัดกับเวลาและความเร็วกับเวลาของวัตถุที่ตกในแนวตั้งมีความสอดคล้องกับแบบจำลองแบบ Quadratic Drag มากกว่าแบบ Linear Drag และการทดลองเรื่องแรงต้านในของเหลว ดังภาพประกอบ 25 มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงถึง 63.41% ซึ่งอาจเกิดจากขนาดภาชนะ ความผิดพลาดจากการกำหนดจุดในโปรแกรม Tracker หรือจากการแกว่งของสปริงในแนวราบ เป็นต้น จากนั้นนำไปพัฒนาเป็นสื่อการสอนซึ่งทำให้ผู้เรียนมีความเข้าใจเพิ่มขึ้นและมีความพึงพอใจในการเรียนด้วยชุดการทดลองในระดับมาก



(ก)



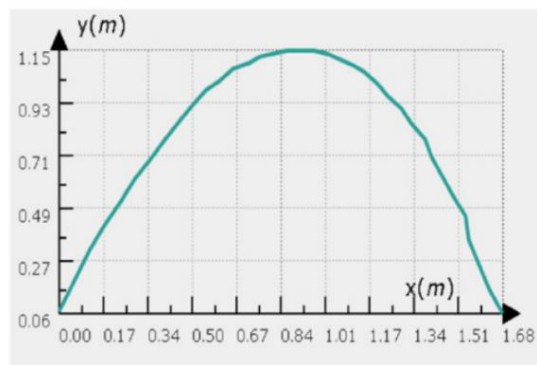
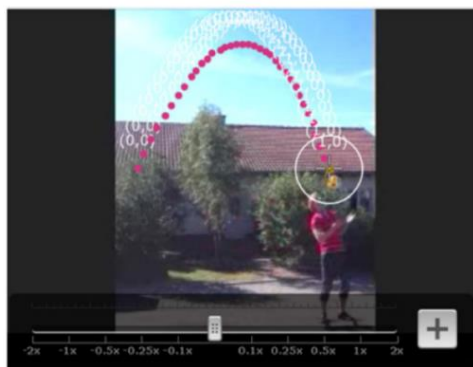
(ข)

ภาพประกอบ 25 (ก) ชุดการทดลองแรงต้านในของเหลว (ข) ตัวอย่างกราฟตำแหน่งกับเวลาของการสั่นของมวลทรงกลมในน้ำ

ที่มา : จักรกฤษณ์ แก้วสุทธิ (2555)

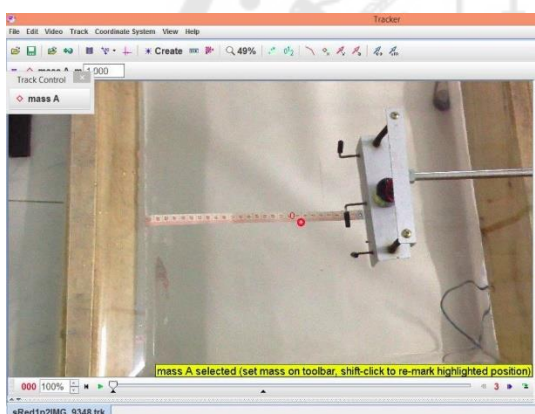
ปี พ.ศ. 2557 อ้นวาทะ ยี่ปกา, อิบรอเฮง จารง, และ อาปีดิน ดะแซสาเมาะ (2557, กันยายน-ธันวาคม, น.83) ได้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ โดยทำการยิงจรวดขวดน้ำที่มุม 45 องศา ด้วยความดันค่าต่าง ๆ บันทึกภาพการเคลื่อนที่ของจรวดด้วยกล้องวิดีโอ และวิเคราะห์การเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม Tracker ซึ่งผลการวิจัยมีความคลาดเคลื่อนของพิสัยการยิงระหว่างการวัดจริงและการวิเคราะห์ไม่เกิน 5%

และในปีเดียวกัน (Klein, Gröber, Kuhn, และ Müller, 2014, January, pp.1-5) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอและใช้ไอแพดกับแอปพลิเคชัน Sensor Tools เป็นอุปกรณ์บันทึกวิดีโอ ซึ่งทำการทดลองโดยให้ผู้ทำการทดลองคนหนึ่งยืนอยู่บนสเก็ทบอร์ดแล้วโยนลูกบอลขึ้นไปในแนวตั้งพร้อมกับให้สเก็ทบอร์ดเคลื่อนที่ไปในแนวระดับด้วยความเร็วคงตัว โดยให้ผู้ทำการทดลองอีกคนหนึ่งซึ่งยืนห่างจากจุดที่ทำการทดลองประมาณ 10 เมตร บันทึกวิดีโอด้วยไอแพดความถี่ 30 เฟรมต่อวินาที ดังภาพประกอบ 26 ซึ่งได้ค่า g จากเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอ เท่ากับ 9.78 m/s^2 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.3% เมื่อเปรียบเทียบกับค่า g จากทฤษฎีซึ่งเท่ากับ 9.81 m/s^2



ภาพประกอบ 26 การวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง เรื่อง การเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์

ที่มา: Klein และคนอื่น ๆ (2014, January, p.37)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 27 (ก) การวิเคราะห์อัตราเร็วของคลื่นน้ำในภาดคลื่นด้วยการเคลื่อนที่ของเม็ดโฟม

(ข) กราฟระยะกับเวลาของการเคลื่อนที่ของเม็ดโฟมสีน้ำเงิน ขนาด 6 mm

ที่มา: อัยชนะห์ วาเตะ (2558)

และในปี พ.ศ. 2558 อัยชนะห์ วาเตะ (2558, บทคัดย่อ) ได้ออกแบบการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราเร็วคลื่นในชุดทดลองคลื่นผิวน้ำในภาดคลื่น โดยศึกษาที่ระดับความลึก 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 cm โดยใช้สมการ $v = f\lambda$ เพื่อหาความสัมพันธ์ของคลื่นกลทาง

ทฤษฎีและหาความสัมพันธ์ของคลื่นกลทางปฏิบัติการ โดยวิเคราะห์จากภาพถ่ายวิดีโอร่วมกับโปรแกรม Tracker วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเม็ดโฟมสีและขนาดต่าง ๆ ที่หย่อนลงในชุดทดลองคลื่นผิวน้ำในถาดคลื่น ดังภาพประกอบ 27 สังเกตการเคลื่อนที่ซึ่งเคลื่อนที่ไปแบบเชิงเส้น วิเคราะห์ด้วยสมการเส้นตรงและสามารถหาอัตราเร็วคลื่นได้จากความชันของกราฟ ทั้งสองวิธีสามารถหาอัตราเร็วคลื่นในชุดทดลองคลื่นผิวน้ำในถาดคลื่นได้ จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5%

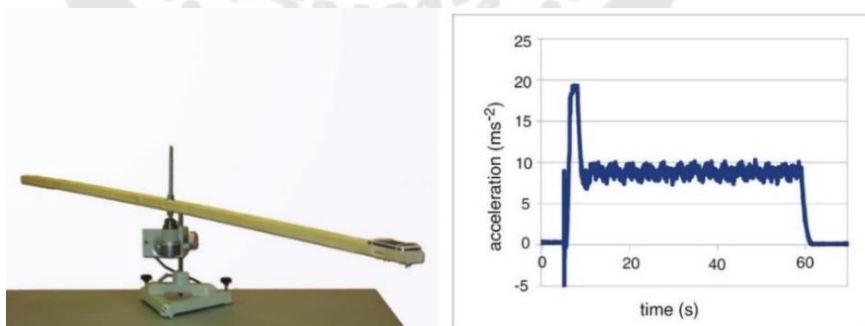
จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ จะเห็นได้ว่า เทคนิควิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนที่แบบต่าง ๆ ของวัตถุและประยุกต์ใช้กับการเรียนการสอนกลศาสตร์อย่างแพร่หลายทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ และเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์ผลออกมาได้อย่างละเอียด และมีประสิทธิภาพสูงวิธีหนึ่ง มีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากมากนัก ผู้ทำการทดลองสามารถสังเกตลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุได้อย่างชัดเจนด้วยวิดีโออัตราเร็วสูง ซึ่งแสดงผลแบบเฟรมต่อเฟรมที่มีความละเอียดมาก และสามารถกำหนดจุดที่ต้องการจะสังเกตหรือวิเคราะห์ได้อย่างอิสระ ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอความเร็วสูงร่วมกับโปรแกรม Tracker เป็นอีกวิธีหนึ่งในการหาความสัมพันธ์ทางฟิสิกส์ในการทำวิจัยครั้งนี้ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากวิธีอื่น ๆ ต่อไป

5.3 การใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนเพื่อเป็นเครื่องมือวัดและเก็บข้อมูล

อย่างไรก็ตาม ในศตวรรษนี้การพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับสมาร์ทโฟนและแท็บเล็ตให้มีความก้าวหน้าในการทำงานที่หลากหลายและตรงต่อความต้องการของผู้บริโภคมีมาอย่างต่อเนื่อง จึงปฏิเสธไม่ได้ว่าอุปกรณ์เหล่านี้เข้ามามีอิทธิพลต่อการดำเนินชีวิตของคนเพิ่มมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นเรื่องการติดต่อสื่อสาร การให้ความบันเทิง การทำงานและการเรียน เป็นต้น ด้วยอุปกรณ์ชนิดนี้มีเซนเซอร์ตรวจวัดค่าปริมาณต่าง ๆ อยู่หลายชนิด รวมทั้งปัจจุบันมีแอปพลิเคชันเกี่ยวกับการวัดปริมาณทางฟิสิกส์ทั้งแบบเสียและไม่เสียค่าใช้จ่ายถูกพัฒนาขึ้นมากมาย จึงทำให้สามารถวัด หรือแสดงข้อมูลได้อย่างละเอียด สามารถบันทึกข้อมูลจากหลายเซนเซอร์พร้อมกันได้ อีกทั้งยังเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สมาร์ทโฟนและแท็บเล็ตจึงเป็นตัวเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากในการนำมาใช้เป็นอุปกรณ์การทดลองฟิสิกส์ในการทำวิจัยเพื่อพัฒนาชุดการทดลองทั้งในระดับมัธยมศึกษาและระดับมหาวิทยาลัย ยกตัวอย่างเช่น

5.3.1 เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง (Accelerometer)

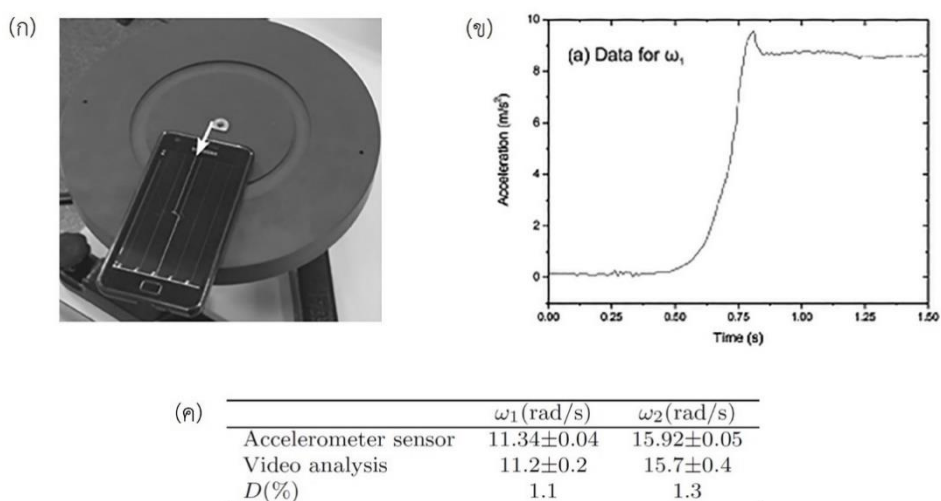
ในปี พ.ศ. 2556 Vogt; และ Kuhn (Vogt และ Kuhn, 2013, March, pp.182-183) ได้วิเคราะห์ความเร่งในแนวรัศมี (Radial acceleration) ด้วยเซนเซอร์ความเร่งของสมาร์ทโฟน ซึ่งทำงานร่วมกับแอปพลิเคชัน SPARKvue สำหรับระบบปฏิบัติการ IOS และแอปพลิเคชัน Accelogger สำหรับระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ โดยทำการติดไอโฟนให้อยู่ในแกนที่เป็นทิศของความเร่งเชิงรัศมีบริเวณปลายสุดของไม้ระแนง ความยาว 2 เมตร ที่ติดเข้ากับมอเตอร์หมุน ทำการวัดรัศมีการหมุนจากจุดหมุนไปถึงตำแหน่งของเซนเซอร์ความเร่งในไอโฟนได้ $r = 0.865$ m ดังภาพประกอบ 28(ก) ทำการทดลองโดยให้ไอโฟนวัดและบันทึกค่าความเร่ง ขณะเปิดสวิตช์มอเตอร์ให้หมุนไม้ระแนงด้วยอัตราเร็วคงตัว เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา ดังภาพประกอบ 28(ข) จะสามารถหาความเร่งเฉลี่ยในช่วงเวลา 12-59 s ได้เป็น 8.69 m/s^2 และเมื่อเทียบกับค่าความเร่งที่ได้จากการคำนวณ เมื่อวัดจุดหมุนได้จำนวนรอบ n เท่ากับ 20 รอบ ในเวลา 38.2 s จะได้ความเร่งจากการคำนวณเท่ากับ 9.36 m/s^2 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน 7.16% จากนั้นได้ทำการทดลองกับม้าหมุนในสนามเด็กเล่น โดยติดสมาร์ทโฟนในมีระยะ $r = 0.79$ m จากจุดหมุนบริเวณราวจับด้านนอกหรือบริเวณที่นั่งของม้าหมุนให้มีแกนชี้ในทิศของความเร่งในแนวรัศมี แล้วเริ่มหมุนม้าหมุนให้เคลื่อนที่เร็วที่สุดแล้วปล่อยให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วลดลงจนหยุด เมื่อพิจารณาหาความเร่งได้เท่ากับ 3.52 m/s^2 และหาความเร่งที่ได้จากการคำนวณ ได้ค่าเท่ากับ 3.73 m/s^2 เมื่อ $T = 2.89$ s ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 6%



ภาพประกอบ 28 (ก) ชุดการทดลองเพื่อศึกษาความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งของสมาร์ทโฟน (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลาจากการทดลอง

ที่มา : Vogt และ Kuhn (2013, March)

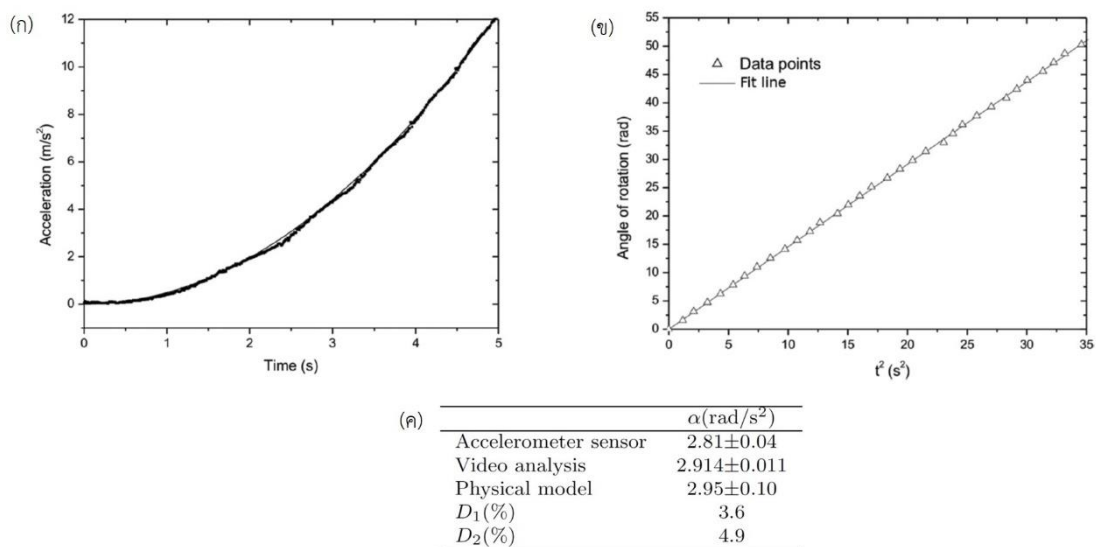
ปี พ.ศ. 2557 Castro-Palacio; และคนอื่น ๆ (J. C Castro-Palacio และ et al, 2014, June, pp.1-5) ได้ศึกษาเกี่ยวกับจลนศาสตร์ของการเคลื่อนที่แบบวงกลมสำหรับระดับมหาวิทยาลัย โดยใช้สมาร์ทโฟนรุ่นซัมซุงกาแล็กซี่ S2 ทำงานร่วมกับแอปพลิเคชัน Accelerometer Toy เพื่อหาค่าความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุม โดยการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมสม่ำเสมอ ทำโดยการติดสมาร์ทโฟนกับจานหมุนในแนวนอน ให้แกน y ของเซนเซอร์ความเร่งอยู่ในแนวรัศมีของการหมุน จะได้ว่า a_y คือความเร่งสู่ศูนย์กลาง มีรัศมีการหมุน r จากจุดหมุนถึงตำแหน่งของเซนเซอร์ความเร่งซึ่งอยู่บริเวณตรงกลางของสมาร์ทโฟนเป็น 0.082 ± 0.001 m และรัศมีของจานหมุน $R = 0.114 \pm 0.001$ m คำนวณหาค่าความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ความเร่งตามสมการ $\omega = \sqrt{\frac{a_y}{r}}$ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์วิดีโอความเร็วสูง ได้ผลการทดลอง ดังภาพประกอบ 29 และการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมที่มีความเร่งคงตัว จัดอุปกรณ์ในลักษณะเดิมแล้วเพิ่มรอกและมวลถ่วง $m_w = 200$ g เพื่อใช้ดึงให้จานหมุนด้วยความเร่งคงตัว นำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับเวลา เพื่อหาค่าความเร่งเชิงมุม ตามสมการ $a_y = \alpha^2 r t^2$ และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก 2 วิธี คือ การวิเคราะห์ด้วยวิดีโอความเร็วสูงตามสมการ $\phi(t) = \frac{\alpha}{2} t^2$ และคำนวณจากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันสำหรับการหมุน ตามสมการ $\alpha' = \frac{m_w g r}{m_w r^2 + I_T}$ ได้กราฟความสัมพันธ์และผลการคำนวณ ดังภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 29 (ก) ชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมอย่างสม่ำเสมอ

โดยใช้เซนเซอร์ความเร่ง (ข) กราฟความเร่งเชิงเส้นในแนวแกน y กับเวลา

(ค) ความเร็วเชิงมุมที่คำนวณได้จาก 2 วิธี



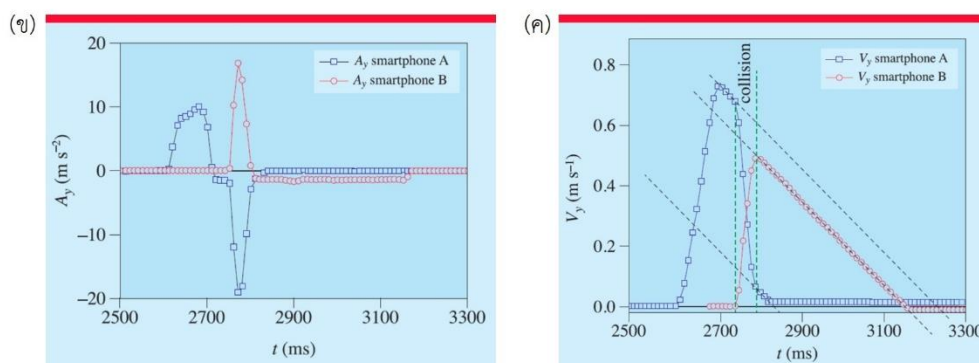
ภาพประกอบ 30 (ก) ชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมด้วยความเร่งเชิงมุมคงตัว

โดยใช้เซนเซอร์ความเร่ง (ข) กราฟความเร่งเชิงเส้นในแนวแกน y กับเวลา

(ค) ความเร่งเชิงมุมที่คำนวณได้จาก 3 วิธี

ที่มา: J. C Castro-Palacio และ et al (2014, June)

และในปี พ.ศ. 2559 V LB de Jesus และ D G G Sasaki (De Jesus และ Sasaki, 2016, September, pp.1-8) ได้ใช้เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งทำการทดลองเรื่องการชนและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมของวัตถุ โดยใช้สมาร์ทโฟนซึ่งสูงกาแล็กซี S4 2 เครื่องเป็นวัตถุที่ชนกันบนพื้นลื่น ติดฟองน้ำไว้ที่สมาร์ทโฟนเครื่องหนึ่งที่เคลื่อนที่เข้ามาชนกับสมาร์ทโฟนอีกครั้งที่วางอยู่นิ่ง ซึ่งทำการวัดและบันทึกผลการทดลองด้วย 2 แอปพลิเคชัน คือ Bubble level และ Acceleration Monitor ข้อมูลที่ได้จะเป็นความเร่งเชิงเส้นกับเวลาจึงต้องมีการจัดการข้อมูลให้ได้ค่าความเร็วของสมาร์ทโฟนกับเวลาทั้งขณะก่อนชน ขณะชนและหลังชน เพื่อนำไปวิเคราะห์โมเมนตัมต่อไป ดังภาพประกอบ 31 พบว่า โมเมนตัมก่อนชนมีค่า $0.088(1) \text{ kg}\cdot\text{ms}^{-1}$ และโมเมนตัมหลังชนมีค่า $0.073(2) \text{ kg}\cdot\text{ms}^{-1}$ ซึ่งโมเมนตัมก่อนชนไม่เท่ากับโมเมนตัมหลังชน แสดงว่าระบบโมเมนตัมเชิงเส้นนี้ไม่อนุรักษ์ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 20% แต่หากเพิ่มการลดของแรงเสียดทานจลน์ของสมาร์ทโฟนแต่ละตัว จะทำให้โมเมนตัมหลังชนเป็น $0.091(2) \text{ kg}\cdot\text{ms}^{-1}$ ซึ่งมีความใกล้เคียงกับโมเมนตัมก่อนชนมากกว่า โดยมีความคลาดเคลื่อน 3%

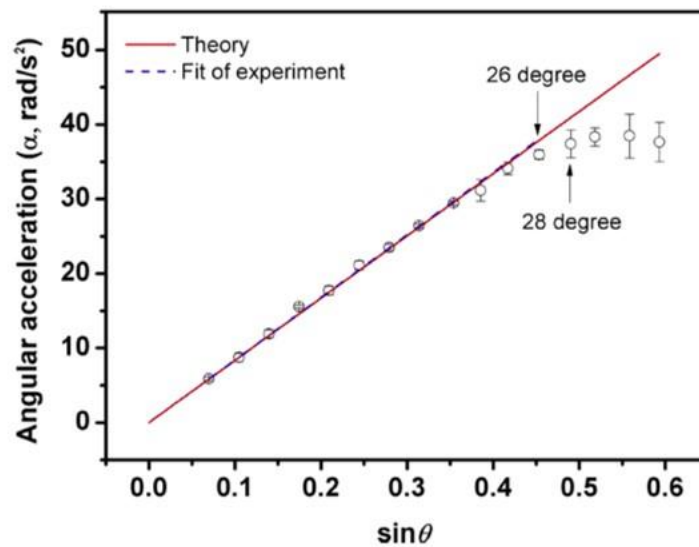


ภาพประกอบ 31 (ก) ชุดการทดลองเรื่องโมเมนตัมและการชน โดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง
(ข) กราฟความเร่งในแนวแกน y กับเวลา (ค) กราฟความเร็วกับเวลาของสมาร์ทโฟน 2 เครื่อง
ขณะชนกัน

ที่มา : De Jesus และ Sasaki (2016, September)

5.3.2 เซนเซอร์ไจโรสโคป (Gyroscope Sensor)

ปี พ.ศ. 2559 โชคชัย พุทธรักษา; และคนอื่น ๆ (Puttharugsa และ et al., 2016, September, p.055004) ได้ใช้เซนเซอร์ไจโรสโคปของสมาร์ทโฟน (ไอโฟน 4s) ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียง ร่วมกับแอปพลิเคชัน Sensorlog และ Cinometer (แอนดรอยด์) สำหรับวัดมุมของพื้นเอียง โดยใช้ท่อ PVC แทนวัตถุทรงกระบอกกลวง ติดสมาร์ทโฟนไว้กับแผ่นพลาสติกและติดเข้ากับท่อ PCV ทำการปล่อยวัตถุที่มุมต่าง ๆ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปสร้างกราฟและหาค่าความเร่งเชิงมุม อัตราเร็วเชิงมุม การกระจัดเชิงมุม มุมวิกฤต ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ ผลการทดลองพบว่า วัตถุทรงกระบอกกลวงจะเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่ไถลจนถึงมุม ๆ หนึ่ง ที่เรียกว่า มุมวิกฤต ซึ่งในการทดลองอยู่ที่ $\theta = 26 \pm 1^\circ$ ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตเท่ากับ 0.205 ± 0.011 และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์เป็น 0.178 ± 0.003 เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีมีความคลาดเคลื่อน 5% และ 3% ตามลำดับ และค่าปริมาณอื่น ๆ ที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี

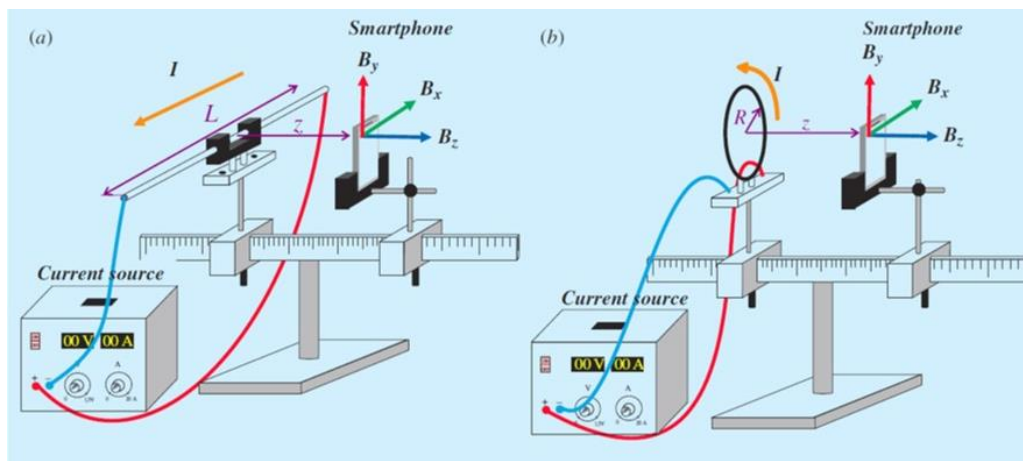


ภาพประกอบ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงมุมกับค่า $\sin \theta$

ที่มา : Puttharugsa และ et al. (2016, September)

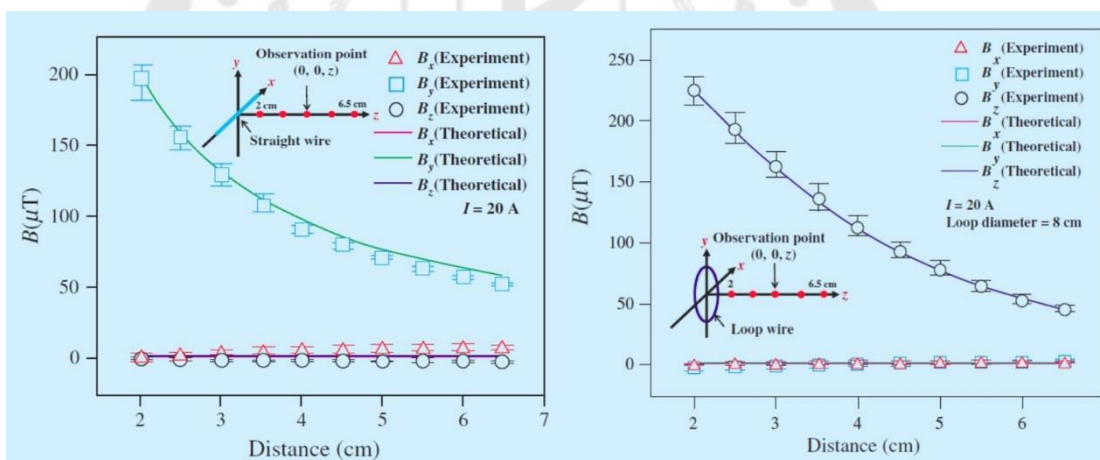
5.3.3 แมกนีโตมิเตอร์ (Magnetometer)

ในปี พ.ศ. 2560 Setiawan; และคนอื่น ๆ (Setiawan และคนอื่น ๆ, 2017, November, pp.2-7) ได้ใช้แมกนีโตมิเตอร์ของสมาร์ทโฟนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์คู่กับแอปพลิเคชัน Gauss meter ในการวัดค่าสนามแม่เหล็กทั้ง 3 ทิศทางที่เกิดจากลวดไฟฟ้า 2 แบบ คือ ลวดแบบตรงและลวดแบบห่อ ดังภาพประกอบ 33 จากการทดลองพบว่า ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยกฎบีโอดส์-ซาวาร์ต และลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะการวัดทั้งในแกน x และแกน z เป็นตามทฤษฎี เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า กรณีลวดแบบตรง B_y มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้า ในขณะที่ B_x และ B_z มีค่าคงที่เกือบเป็นศูนย์ และกรณีลวดแบบห่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร พบว่า กระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อ B_x และ B_y แต่มีผลทำให้ B_z เพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 34 และ 35



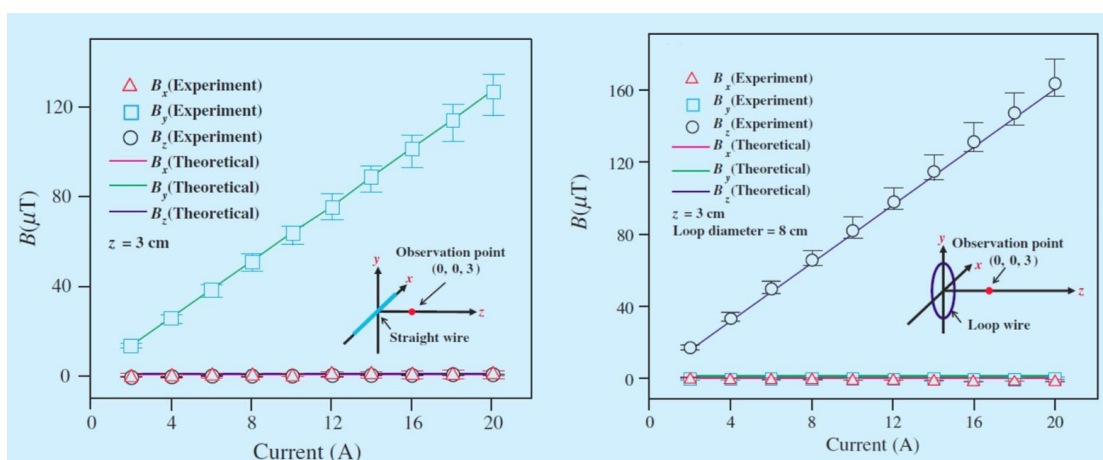
ภาพประกอบ 33 ชุดการทดลองเรื่องการวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากลวดไฟฟ้า

(ก) ลวดแบบตรง (ข) ลวดแบบห่วง



ภาพประกอบ 34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับระยะจากลวดถึงสมาร์ตโฟน (ซ้าย) ลวดแบบตรง (ขวา) ลวดแบบห่วง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร

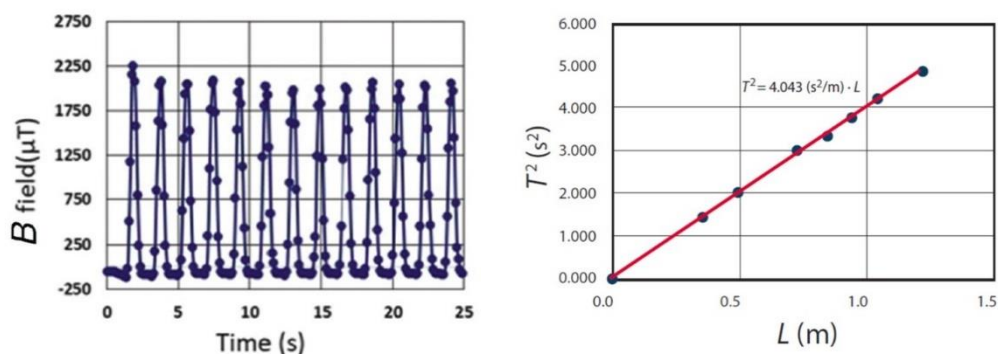
ที่มา : Setiawan และคนอื่น ๆ (2017, November)



ภาพประกอบ 35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า (ซ้าย) ลวดแบบตรง (ขวา) ลวดแบบห่วง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร

ที่มา : Setiawan และคนอื่น ๆ (2017, November)

และในปี พ.ศ. 2561 Unofre Pili และคณะ (Pili, Violanda, และ Ceniza, 2018, April, pp.258-259) ได้พัฒนาการทดลองเรื่องการวัดค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) โดยใช้แมกนีโทมิเตอร์ที่อยู่ในสมาร์ทโฟน ทำการทดลองโดยใช้ลูกตุ้มอย่างง่ายที่มีแม่เหล็กขนาดเล็กติดไว้ที่ด้านล่างของวัตถุที่นำมาแกว่ง แล้ววางสมาร์ทโฟนไว้กับพื้นใต้บริเวณที่ลูกตุ้มแกว่ง เพื่อวัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่เวลาใด ๆ ขณะวัตถุแกว่ง ดังภาพประกอบ 36 โดยใช้แอปพลิเคชัน Physics Toolbox Sensor Suites ซึ่งจะทำให้ได้ค่าคาบการแกว่ง จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างคาบยกกำลังสองกับความยาวของเส้นเชือกและหาความชันกราฟในโปรแกรม MS Excel เพื่อนำไปหาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกต่อไป โดยผลการทดลองพบว่า ได้ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ $9.8 \pm 0.1 \text{ m/s}^2$

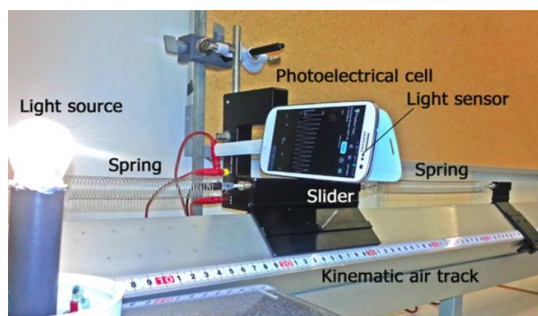


ภาพประกอบ 36 (ก) ชุดการทดลองการหาค่า g โดยใช้แมกนีโตเซนเซอร์บนสมาร์ทโฟน (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สั่นแม่เหล็กกับเวลา (ค) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคาบยกกำลังสองกับความยาวเชือก

ที่มา : Pili และคนอื่น ๆ (2018, April)

5.3.4 เซนเซอร์ตรวจวัดแสง (Ambient Light Sensor)

Sans; และคนอื่น ๆ (Sans, Manjón, Pereira, Gómez-Tejedor, และ Monsoriu, 2013, November, p.1349) ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนที่แบบคาบอย่างง่ายและแบบถูกหน่วงด้วยการประยุกต์ใช้แอปพลิเคชัน Physics Toolbox Light Sensor กับเซนเซอร์แสงของสมาร์ทโฟนซัมซุง กาแล็กซี่ S3 ซึ่งจะติดกับฐานที่ติดสปริง 2 ตัว ให้สามารถเคลื่อนที่แบบเพนดูลัมแบบสปริงคู่บนราง Air track โดยหันหน้าสมาร์ทโฟนเข้าหาแหล่งกำเนิดแสง (หลอดไฟ) ที่ติดอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของราง ดังภาพประกอบ 37 เมื่อทำการทดลองเซนเซอร์แสงจะวัดความส่องสว่างของหลอดไฟที่แปรผกผันกับระยะห่างยกกำลังสอง ทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลาซึ่งจะนำไปวิเคราะห์หาค่าความถี่ คาบของการเคลื่อนที่และค่าคงที่ของสปริงได้ โดยผลการวิจัยพบว่า ค่าความถี่และคาบของการเคลื่อนที่ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันมากกับค่าที่วัดได้จาก Photoelectric cell ของ Chronometer (Phywe) และค่าคงที่ของสปริงมีค่าใกล้เคียงกันน้อยกว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 6.6-16.76%



Mass (kg)	ω_0 phone (s ⁻¹)	T phone (s)	ω_0 Phywe (s ⁻¹)	T Phywe (s)	k phone (N/m)	k static method (N/m)
0.646(1)	3.2348(1)	1.9424(1)	3.242(1)	1.938(2)	3.380(7)	3.6(2)
0.506(1)	3.5442(1)	1.7728(1)	3.627(4)	1.732(2)	3.178(8)	
0.450(1)	3.8584(1)	1.6284(1)	3.897(5)	1.612(2)	3.350(9)	
0.310(1)	4.4092(1)	1.4250(1)	4.39(3)	1.431(2)	3.013(10)	

ภาพประกอบ 37 (ก) ชุดการทดลองการเคลื่อนที่แบบคาบ โดยใช้เซนเซอร์วัดแสงของสมาร์ทโฟน
(ข) ค่าความถี่เชิงมุม คาบและค่านิจของสปริง โดยใช้สมาร์ทโฟน เมื่อเพิ่มมวล เทียบกับวิธีอื่น ๆ

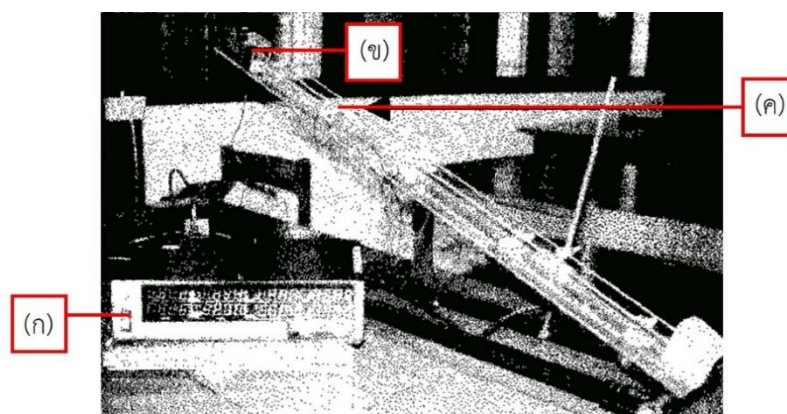
ที่มา : Sans และคนอื่น ๆ (2013, November)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้สมาร์ทโฟนเป็นอุปกรณ์ในชุดทดลองทางฟิสิกส์สรุปได้ว่า สมาร์ทโฟนและแท็บเล็ตทั้งระบบปฏิบัติการ iOS และแอนดรอยด์ มีเซนเซอร์หลากหลายชนิดที่สามารถวัดและเก็บข้อมูลในการทดลองฟิสิกส์ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือมากกว่าอุปกรณ์และเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ โดยทำงานร่วมกับแอปพลิเคชันที่ถูกพัฒนาขึ้นให้สามารถใช้ประโยชน์จากเซนเซอร์ต่าง ๆ ในอุปกรณ์ในเชิงฟิสิกส์ มีฟังก์ชันควบคุมการทำงานให้สามารถเก็บข้อมูลจากหลายเซนเซอร์พร้อมกันได้ สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการวัดและบันทึกข้อมูลระยะไกลได้ หน้าจอแสดงกราฟความสัมพันธ์ของข้อมูลทันทีทันใด และสามารถส่งไฟล์ข้อมูลออกจากอุปกรณ์ได้หลายช่องทางและนำไปวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมพื้นฐานในคอมพิวเตอร์อย่าง MS Excel ได้ อีกทั้งยังได้ชุดทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงในราคาถูกลง ทุกคนสามารถออกแบบและทำการทดลองได้หลายรูปแบบเนื่องจากไม่ต้องใช้อุปกรณ์เครื่องมือและวิธีการที่มีความซับซ้อนมากนัก ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมา ผู้วิจัยจึงเลือกใช้สมาร์ทโฟนเป็นอุปกรณ์วัดและบันทึกข้อมูลในการทำวิจัยครั้งนี้

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรง งานวิจัยในประเทศ

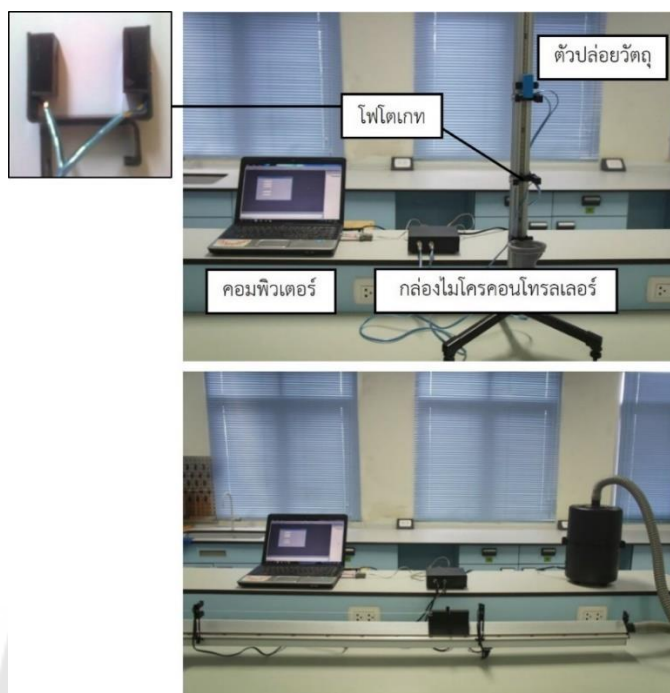
ประนอม หมอกกระโทก (2545) ได้พัฒนาชุดการทดลอง เรื่อง การเคลื่อนที่ในแนวตรง เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับทดลอง เรื่อง อัตราเร็ว ความเร็ว ความเร่ง การตกของวัตถุ ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกและความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา และใช้เป็นอุปกรณ์ประกอบการจัดการเรียนรู้วิชาฟิสิกส์ในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โดยชุดการทดลองมีส่วนประกอบ 3 ส่วน ดังภาพประกอบ 38 คือ 1) ชุดแกนรางเอียงปรับมุมได้ 0-90 องศา กับแนวระดับ ซึ่งฐานทำจากเหล็กกลวงและส่วนรางทำจากแผ่นพลาสติกใสมีความยาว 100 เซนติเมตร โดยทุก ๆ 20 เซนติเมตรติดไอโอดีนฟราเรดทั้ง 2 ด้านของราง 2) ชุดปล่อยวัตถุแบบแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการนำชุดขดลวดทองแดงที่เชื่อมต่อสายไฟเข้ากับแอล อี ดี (LED) และสวิตช์ต่อเข้ากับเพาเวอร์ อะแดปเตอร์ซึ่งใช้แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงวัตถุที่ใช้ในการทดลองเป็นแม่เหล็กกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm และ 3) ชุดเครื่องจับเวลาและความเร็ววัตถุ ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของชุดอุปกรณ์ไอโอดีนฟราเรดที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกคร่อมที่ขาบวกและลบของออปแอมป์เมื่อมีวัตถุเคลื่อนที่ผ่านทำให้ Output มีการเปลี่ยนแปลงกับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เขียนโปรแกรมคำสั่งสำหรับการนับเวลาและการคำนวณค่าความเร็วของวัตถุไว้ จากนั้นทดสอบการใช้งานและศึกษาประสิทธิภาพของชุดทดลอง ตามเกณฑ์ 80/80 และทำการศึกษาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาฟิสิกส์และเจตคติของนักเรียนที่มีต่อชุดทดลอง กลุ่มตัวอย่างเป็นนักเรียนโรงเรียนปราชญ์วิทยาคม อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา จำนวน 15 คน ผลการศึกษาพบว่า ชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงมีประสิทธิภาพ 81.73/80.43 ตามเกณฑ์ที่กำหนด นักเรียนมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเฉลี่ยหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .01 และเจตคติของนักเรียนที่มีต่อชุดทดลองหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .01



ภาพประกอบ 38 ชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรง (ก) ชุดเครื่องจับเวลาและความเร็วของวัตถุ (ข) ชุดปล่อยวัตถุแบบแม่เหล็กไฟฟ้า (ค) ชุดแกนวางเอียงปรับมุมได้ 0-90 องศา

ที่มา : ประพนอม หมอกกระโทก (2545)

เรวดี มาน้อย (2556) ได้พัฒนาชุดทดลองกลศาสตร์ซึ่งเป็นการพัฒนาในส่วนของชุดเครื่องจับเวลาการเคลื่อนที่ของวัตถุที่จะสามารถนำอุปกรณ์นี้ไปใช้ร่วมกับการทดลองได้หลากหลาย โดยชุดเครื่องจับเวลามีส่วนประกอบ 2 ส่วน ดังภาพประกอบ 39 คือ 1) กล้องไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งประกอบไปด้วย หม้อแปลงและแผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C2051 ที่เขียนคำสั่งให้เริ่มจับเวลาเมื่อมีวัตถุเคลื่อนที่ผ่านโฟโตเกตแล้วแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม Visual Basic และ 2) โฟโตเกต ทำหน้าที่ตรวจจับการเคลื่อนที่ผ่านของวัตถุ โดยมีวงจรตรวจจับแสงอินฟราเรด มีลักษณะเป็น 2 ขา คือ ขาด้านหนึ่งเป็นตัวส่งอีกขาหนึ่งเป็นตัวรับแสงอินฟราเรด ซึ่งได้สร้างเป็นชุดการทดลองพร้อมคู่มือการใช้เพื่อประกอบการจัดการเรียนรู้เรื่อง การตกของวัตถุอย่างอิสระและผลของมวลและแรงที่มีต่อความเร่งของระบบ ได้ทำการหาประสิทธิภาพทางการศึกษาของชุดทดลองกลศาสตร์ตามเกณฑ์ 80/80 และศึกษาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนและหลังการใช้ชุดทดลอง กลุ่มตัวอย่างในงานวิจัย ได้แก่ นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 แผนการเรียนวิทย์-คณิต โรงเรียนพัทลุง ปีการศึกษา 2556 จำนวน 30 คน ผลการวิจัยพบว่า ผลการทดสอบชุดทดลองกลศาสตร์เทียบกับค่า g ตามทฤษฎีมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 6.13 กล่าวคือ ชุดทดลองกลศาสตร์สามารถใช้ทดลองเพื่อจับเวลาที่ในการเคลื่อนที่ทั้งแนวตั้งและแนวราบได้ อีกทั้งผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญโดยภาพรวมมีคุณภาพอยู่ในระดับดีมาก มีประสิทธิภาพทางการศึกษา 80.33/81.11 ตามเกณฑ์ที่กำหนดและนักเรียนมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01



ภาพประกอบ 39 ชุดการทดลองการเคลื่อนที่แนวตรง โดยใช้โฟโตเกต (Photogate)

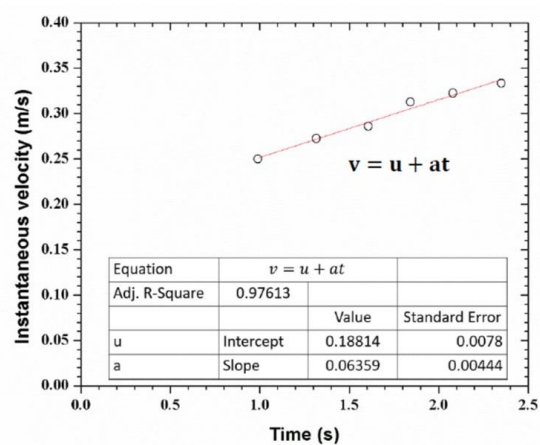
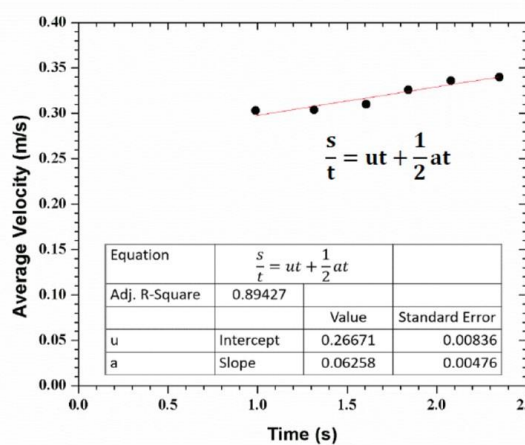
(ก) การตกอย่างอิสระ (ข) การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยระบบมวลถ่วง

ที่มา : เรวดี มาน้อย (2556)

วัชร ก่อแสน และ วิทยา มะโนธรรม (2560, บทคัดย่อ) ได้พัฒนาอุปกรณ์และเครื่องมือการทดลองทางฟิสิกส์เรื่องการเคลื่อนที่แนวตรง ที่มีความทันสมัย ราคาถูก โดยใช้บอร์ดอาร์ดุยโนในการควบคุมการทำงานรับ-ส่งข้อมูลของเซนเซอร์ผ่านโปรแกรม LabVIEW เซนเซอร์ที่ใช้คือ โฟโตเกต ซึ่งพัฒนาโดยใช้หลอดไดโอดเปล่งแสงกับตัวต้านทานเปลี่ยนค่าตามความส่องสว่าง เพื่อให้ในการวัดความส่องสว่างซึ่งแทนตำแหน่งที่เป็นฟังก์ชันของเวลา อีกทั้งวางลมซึ่งทำจากวงกบอะลูมิเนียมและเครื่องเป่าลม ดังภาพประกอบ 40 ซึ่งได้ทำการทดสอบชุดการทดลอง 2 ตอน โดยการหาความเร็วเฉลี่ยและความเร็วขณะใดขณะหนึ่ง จากนั้นนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาความเร็วต้นและความเร่งของการเคลื่อนที่จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา ดังภาพประกอบ 41 ด้วยสมการ $s = ut + \frac{1}{2}at^2$ และ $v = u + at$ ผลการวิจัยพบว่า ได้ค่าความเร็วต้นจากการทดลองทั้ง 2 ตอนเท่ากับ 0.2667 m/s กับ 0.1881 m/s และความเร่งมีค่าเท่ากับ 0.0626 m/s² กับ 0.0636 m/s² ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยความเร่งคงตัว



ภาพประกอบ 40 ชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แนวตรง โดยใช้โฟโตเกต (บน) และโปรแกรม แสดงผลการทดลองที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW (ล่าง)

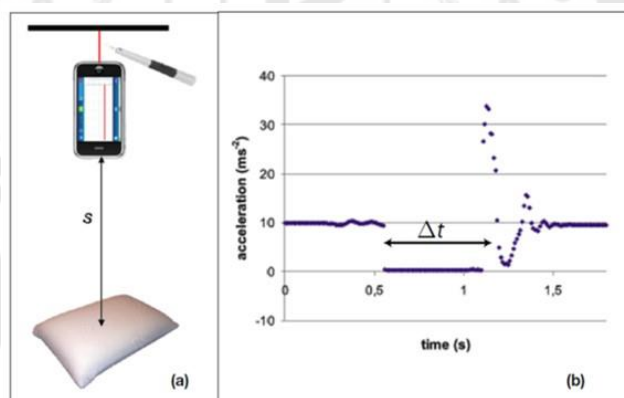


ภาพประกอบ 41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยกับเวลา (ซ้าย) และกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วขณะใดขณะหนึ่งกับเวลา (ขวา)

ที่มา : วัชร ก่องแสน และ วิทยา มะโนธรรม (2560)

งานวิจัยต่างประเทศ

Vogt; และ Kuhn (Vogt และ Kuhn, 2012, March) ได้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุที่ตกอย่างอิสระโดยใช้เซ็นเซอร์ความเร่งของสมาร์ทโฟน ซึ่งจะทำงานร่วมกับแอปพลิเคชัน SPARKvue สำหรับระบบปฏิบัติการ IOS และแอปพลิเคชัน Accelooger สำหรับระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ โดยให้สมาร์ทโฟนแทนวัตถุที่ใช้ในการทดลอง ดังภาพประกอบ 42(a) แขว่นสมาร์ทโฟนไว้ด้วยเชือก กดปุ่มเริ่มบันทึกให้แอปพลิเคชันวัดและบันทึกข้อมูลความเร่งของสมาร์ทโฟนขณะเคลื่อนที่ด้วยความถี่ 100 Hz เผลาเชือกให้ขาดเพื่อให้สมาร์ทโฟนตกลงอย่างอิสระโดยมีหมอนรองกันกระแทก จากนั้นส่งไฟล์ข้อมูลออกมาผ่านทางอีเมลแล้วทำไปวิเคราะห์ผลในโปรแกรม เช่น MS Excel ดังภาพประกอบ 42(b) เพื่อหาช่วงเวลาที่วัตถุใช้ในการเคลื่อนที่ Δt ซึ่งได้เท่ากับ 0.56 s และระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่เป็น 1.575 m เมื่อให้อัตราเร็วต้นเป็น 0 m/s จากสามารถคำนวณหาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก g ได้โดยคำนวณได้ค่า g เท่ากับ $10.0 \pm 0.2 \text{ m/s}^2$

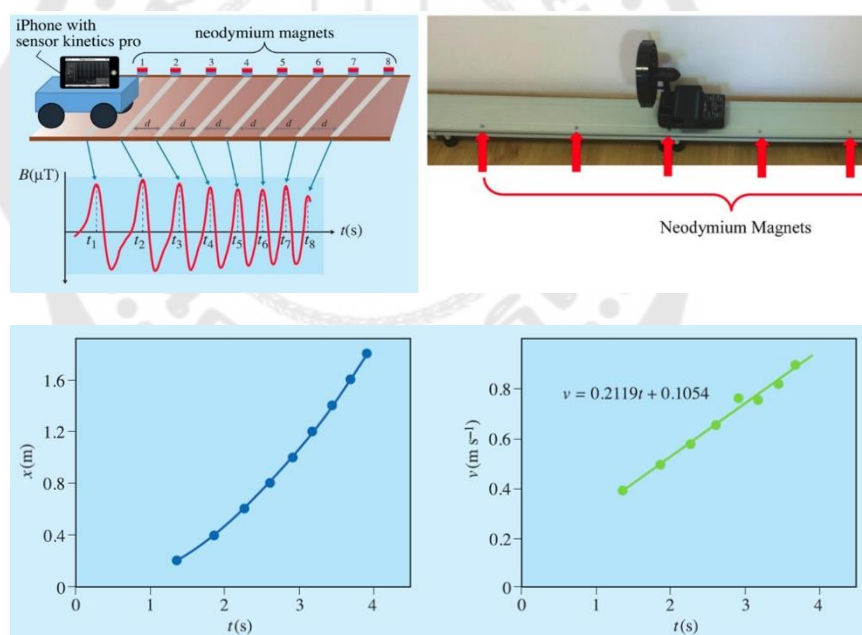


ภาพประกอบ 42 (a) การติดตั้งชุดการทดลองการตกอย่างอิสระด้วยสมาร์ทโฟน (b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลาในช่วงที่สมาร์ทโฟนตก ความเร่งมีค่าเท่ากับ 0 m/s²

ที่มา : Vogt; & Kuhn. (2012, March, pp. 182-183)

Temiz; และ Yavuz (Temiz และ Yavuz, 2016, January, pp.1-3) ได้เสนอวิธีการวัดปริมาณทางจลนศาสตร์ของวัตถุที่เคลื่อนที่ในแนวตรงโดยใช้แมกนีโตมิเตอร์ (Magnetometer) ของไอโฟน 5s ร่วมกับแอปพลิเคชัน Sensor Kinetic pro โดยทำการทดลอง 2 ตอน ได้แก่ ให้สมาร์ทโฟนเคลื่อนที่ติดไปกับรถทดลองติดพัดลม Pasco fan cart (ME-6977) ที่

เคลื่อนด้วยแรงคงตัว ผ่านแม่เหล็กนีโอไดเนียมขนาดเล็กที่ติดไว้เป็นช่วง ๆ ช่วงละ 20 เซนติเมตร เป็นระยะ 2 เมตรบนราง Pastrack ดังภาพประกอบ 43 ซึ่งแมกนีโตมิเตอร์จะตรวจวัดค่าสนามแม่เหล็กได้มากที่สุดเมื่อรถทดลองเคลื่อนที่เข้าใกล้แม่เหล็กที่ติดไว้มากที่สุดและจะลดลงเมื่อรถทดลองเคลื่อนที่ห่างออกไป จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดอีกครั้งเมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้แม่เหล็กที่ติดไว้ตัวถัดไป ทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับเวลา มีลักษณะคล้ายกราฟรูปคลื่น จากการทดลองจะได้ระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่เป็นช่วง ๆ จากตำแหน่งของแม่เหล็กนีโอไดเนียมที่ติดไว้บนรางและได้ช่วงเวลาที่วัตถุเคลื่อนที่ในระยะทางนั้น ๆ จากจุดยอดของลูกคลื่นหนึ่งถึงอีกลูกคลื่นหนึ่ง ดังนั้นจะสามารถคำนวณอัตราเร็วเฉลี่ยแต่ละช่วงการเคลื่อนที่และหาค่าความเร่งของวัตถุได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเฉลี่ยกับเวลา ได้ค่าความเร่งจากการใช้แมกนีโตมิเตอร์เท่ากับ 0.212 m/s^2 และค่าความเร่งเฉลี่ยจากการวัดด้วย Pasco motion sensor เท่ากับ 0.244 m/s^2



ภาพประกอบ 43 การทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงของวัตถุ (ซ้าย) การเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง (ขวา) การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว

ที่มา : Temiz และ Yavuz (2016, January)

Kapucu (2017, July) ได้เสนอวิธีการหาค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของรถของเล่นติดไฟฉายโดยใช้เซนเซอร์แสงของสมาร์ทโฟนที่ใช้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ร่วมกับแอปพลิเคชัน Androsensor ซึ่งทำการทดลอง 2 กรณี ได้แก่ 1) กรณีวัตถุที่เคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวและ 2) กรณีวัตถุเคลื่อนที่บนพื้นเอียง โดยในกรณี 1 หาค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของวัตถุจากอัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างรถบังคับวิทยุติดไฟฉายกับสมาร์ทโฟนและช่วงเวลาที่วัตถุเคลื่อนที่ได้ $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ของค่าความส่องสว่าง (Illuminance) กับระยะห่างจากจุดวัดแสง (สมาร์ทโฟน) ถึงแหล่งกำเนิดแสง (รถบังคับวิทยุติดไฟฉาย) โดยความส่องสว่างจะแปรผกผันกับระยะห่างยกกำลังสอง และค่าความเข้มส่องสว่าง (Luminous intensity) เป็นค่าคงตัว $E_v = \frac{I_v}{d^2}$



ภาพประกอบ 44 ชุดการทดลองสำหรับหาค่าอัตราเร็วเฉลี่ย โดยใช้เซนเซอร์วัดแสงของสมาร์ทโฟน

ที่มา : Kapucu (2017, July, pp.1-5)

ทำการตั้งสมาร์ทโฟนไว้ให้ตั้งฉากกับพื้นแล้วให้รถบังคับวิทยุติดไฟฉายวิ่งจากจุดเริ่มต้นเข้าหาสมาร์ทโฟนในแนวเส้นตรง ดังภาพประกอบ 44 เซนเซอร์แสงของสมาร์ทโฟนจะวัดและบันทึกผ่านแอปพลิเคชันในรูปของความส่องสว่างกับเวลา โดยวัดค่าทุก ๆ 0.500 วินาที ซึ่งทำให้ได้ช่วงเวลาในการเคลื่อนที่ จากนั้นนำค่าความส่องสว่างมาหาค่าระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่แล้วนำไปหาค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของวัตถุ จากการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง พบว่าได้อัตราเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.438 ± 0.010 , 0.432 ± 0.010 และ 0.435 ± 0.010 m/s ตามลำดับ เทียบกับค่าอัตราเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าด้วยวิธีโอความเร็วสูงเท่ากับ 0.427 ± 0.005 , 0.424 ± 0.005 และ 0.435 ± 0.005 m/s ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าอัตราเร็วเฉลี่ยที่ได้จากทั้ง 2 วิธีมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% และกรณีที่ 2 การเคลื่อนที่ของวัตถุบนพื้นเอียง ทำการทดลองโดยเปลี่ยนจากเขวอนวัตถุ

(แผ่นไม้ติดไฟฉาย) ไว้บนปลายสุดของพื้นเอียงและวางสมาร์ทโฟนที่ปลายของพื้นเอียง จัดให้วัตถุกับสมาร์ทโฟนห่างกันเป็นระยะ 1.55 ± 0.02 m ตัดเชือกที่ผูกวัตถุไว้เพื่อให้เคลื่อนที่ลงมา ดังภาพประกอบ 45 โดยเมื่อพิจารณาข้อมูลที่บันทึก 3 ครั้ง พบว่า ค่าตำแหน่งแรกที่แอปพลิเคชันวัดได้ไม่เท่ากัน กล่าวคือ เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นถึงตำแหน่งแรกที่แอปพลิเคชันทำการวัดไม่เท่ากัน เนื่องจากไม่สามารถปล่อยวัตถุที่เวลาเดียวกัน 3 ครั้ง ทำให้ต้องกำหนดเวลาเริ่มต้นใหม่เป็น t และเวลาถัดไปเป็น $t+0.500$, $t+1.000$,... ให้ความเร็วต้นมีค่าเป็น 0 m/s และระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่หาด้วยวิธีเดียวกับกรณีที่ 1 แทนค่าปริมาณในสมการการเคลื่อนที่แนวตรงด้วยความเร่งคงตัวจะสามารถหาช่วงเวลาเริ่มต้นและทำให้หาความเร่งของวัตถุทั้ง 3 ครั้งได้ ซึ่งเท่ากับ 0.646 ± 0.090 , 0.643 ± 0.060 และ 0.590 ± 0.059 m/s² ตามลำดับ เทียบกับความเร่งที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีโอเวอร์สแอมพลิจูด เท่ากับ 0.620 ± 0.008 m/s² ได้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5% จากนั้นนำค่าความเร่งที่หาได้ไปหาค่าอัตราเร็วปลายของวัตถุ ตามสมการ ได้เป็น 1.225 ± 0.171 , 1.257 ± 0.199 และ 1.175 ± 0.117 m/s ตามลำดับ เมื่อเทียบกับอัตราเร็วปลายที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีโอเวอร์สแอมพลิจูด ซึ่งเท่ากับ 1.176 ± 0.015 , 1.229 ± 0.016 และ 1.234 ± 0.016 m/s ตามลำดับ



ภาพประกอบ 45 ชุดการทดลองสำหรับหาค่าความเร่งและอัตราเร็วปลาย โดยใช้เซนเซอร์วัดแสง

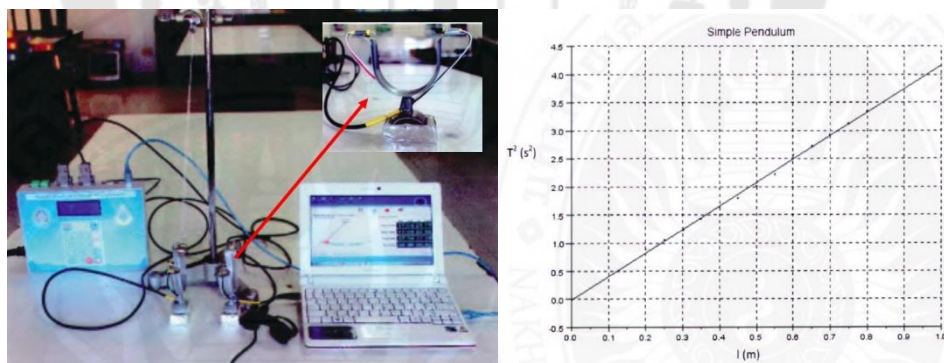
ที่มา : Kapucu (2017, July, pp.1-5)

6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก งานวิจัยในประเทศ

อนุวัฒน์ บุญธรรมโม (2546, น.20-46) ได้ออกแบบและสร้างชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบเพนดูลัมโดยใช้คอมพิวเตอร์เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นตัวควบคุมและเก็บข้อมูลในการวัดคาบและความเร็วของการเคลื่อนที่แบบเพนดูลัมอย่างง่าย ด้วยโปรแกรม Microsoft Visual Basic และ โปรแกรม Sbasic นอกจากนี้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณพื้นฐานต่าง ๆ แล้ว ได้มีการประยุกต์เครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อหาจุดศูนย์กลางมวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุด้วย ชุดทดลองจึงแบ่งเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 ประกอบด้วยชุดขาตั้งพร้อมแขนสำหรับแขวนลูกตุ้ม วงจรตรวจจับและแปลงสัญญาณโดยการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า LED พร้อมเลนส์รวมแสง ครึ่งวงกลม หลักการทำงานของเครื่องมือ คือ แสงจากหลอดไฟ LED จะส่องไปยัง LDR ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้สัญญาณการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า โดยติดตั้งอยู่ตำแหน่งต่ำสุดหรือตำแหน่งสมมูลของการแกว่งของเพนดูลัม เพื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่าน วัตถุจะบังแสงจาก LED ทำให้ความต้านทานของ LDR เปลี่ยน สัญญาณที่มีคาบตรงกับคาบของการแกว่งที่กำลังทดลองนี้จะถูกส่งไปยังวงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์เพื่อจัดเก็บข้อมูลและคำนวณคาบและความเร็วที่ตำแหน่งสมมูลต่อไป ผลการทดลองพบว่า ผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีกับผลจากการทดลองมีความสอดคล้องกัน เมื่อมุมเริ่มต้นมีขนาดน้อยกว่า 20° คาบการแกว่งจะมีลักษณะคงที่แต่เมื่อให้มุมเริ่มต้นมีค่ามากกว่า 20° คาบการแกว่งจะไม่คงที่และมีความถี่ขึ้นไปด้วยและแรงต้านอากาศไม่มีผลต่อคาบการแกว่งของวัตถุ แต่จะทำให้วัตถุมีการสูญเสียพลังงานจนโดยลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ประมาณ 0.4-0.5 การทดลองชุดที่ 2 เป็นการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรูปทรงเรขาคณิตต่าง ๆ โดยเปลี่ยนจากการแกว่งเพนดูลัมอย่างง่ายเป็นเพนดูลัมประกอบ ซึ่งประกอบด้วยคานโลหะที่ติดกับวัตถุและมีจุดหมุน 2 ตำแหน่ง ทำการแกว่งโดยให้มุมเริ่มต้นเท่ากับ 30° และหาคาบเฉลี่ยกรณีจุดหมุนอยู่ที่ตำแหน่ง 1 และ 2 แล้วจึงทำไปวิเคราะห์ต่อไป ผลการทดลองพบว่าผลการคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวล รัศมีไจเรชัน และโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุกับผลที่ได้จากการทดลองมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 5%

ธัญรส เหมจินดา (2555, น.30-65) ได้พัฒนาชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบลูกตุ้มอย่างง่าย โดยเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ รวมทั้งมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Scilab เพื่อเปรียบเทียบปริมาณทางฟิสิกส์ที่ได้จากทั้ง 2 วิธี โดยชุดการทดลองที่สร้างขึ้นประกอบด้วย ขาตั้งและแขนสำหรับแกว่งลูกตุ้ม ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ ชุดเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ชุดเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ ดังภาพประกอบ 46(ก) โดยหลักการทำงาน คือ

ชุดเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุซึ่งจะส่งสัญญาณย่านความถี่อินฟราเรดไปยังตัวรับ เมื่อมีวัตถุเคลื่อนที่ตัดผ่านสัญญาณอินฟราเรดจะทำให้วงจรเปิดและเมื่อผ่านอีกครั้งวงจรจะปิด สัญญาณจะถูกส่งไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะควบคุมให้แสดงผลแบบเรียลไทม์ และส่งข้อมูลต่อไปยังคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงผลอีกครั้งด้วยโปรแกรม Visual Basic ทำการวัดคาบการแกว่ง ในกรณีที่เปลี่ยนความยาวของเส้นเชือกและรูปร่างของวัตถุ โดยใช้มุมเริ่มต้นเป็น 5° และเพิ่มมุมขึ้นเรื่อย ๆ ผลการทดลองพบว่า มวลของวัตถุไม่มีผลต่อคาบการแกว่ง ที่มุมเริ่มต้นน้อย ๆ คาบการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่ายจะมีค่าไม่แตกต่างกันและคงที่ แต่เมื่อมุมมีขนาดใหญ่ขึ้น คาบการแกว่งจะเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อความยาวเชือกเพิ่มขึ้นจะทำให้คาบการแกว่งเพิ่มขึ้น โดยกราฟความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นกราฟเส้นโค้ง มีค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างคาบยกกำลังสองกับความยาวเชือกที่ได้จากการทดลองเป็น 4.158 ดังภาพประกอบ 46(ข) และความชันที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็น 4.039 มีค่าความคลาดเคลื่อนคิดเป็น 2.95% และเมื่อนำไปหาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก จะได้ค่าเป็น 9.495 และ 9.781 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันมีความคลาดเคลื่อน 2.92%



ภาพประกอบ 46 (ก) ชุดการทดลองเรื่องการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย โดยใช้เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นร่วมกับชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ โปรแกรม Visual Basic และ Scilab (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคาบยกกำลังสองกับความยาวเชือก เมื่อเพิ่มความยาวครั้งละ 0.05 เมตร

ที่มา : ธีรยุทธ เหมจินดา (2555)

สมพร บัวประทุม (2560, บทคัดย่อ) ได้พัฒนาชุดการทดลองเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายและฮาร์มอนิกแบบหมุน โดยใช้บอร์ดอาดุยโน้ เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของชุดทดลอง มีอุปกรณ์ปล่อยคลื่นอัลตราโซนิกไปตกกระทบที่วัตถุที่กำลังแกว่งเพื่อให้คลื่นอัลตราโซนิกประพาดตัวตามลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกของวัตถุแล้วสะท้อนกลับไปยังเซนเซอร์ตัวรับสัญญาณ และทำงานคู่กับคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรม Python ทำหน้าที่วิเคราะห์ผลและแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและความเร็วของวัตถุกับเวลาแบบทันทีทันใด ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ชุดการทดลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้สอนเรื่องการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำให้นักเรียนมีความเข้าใจเพิ่มขึ้นได้ถึง 38.54%

งานวิจัยต่างประเทศ

Vogt; และ Kuhn (Vogt และ Kuhn, 2012, October) ได้ทำการทดลองในทำนองเดียวกันกับการวิจัยของบริกเกิล (Briggle, 2013, May) ในปี ค.ศ. 2011 โดยการใช้เซนเซอร์วัดความเร่งบนไอพอดทัช ร่วมกับแอปพลิเคชัน SPARKvue ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบลูกตุ้มอย่างง่าย โดยให้ไอพอดทัชแทนวัตถุผูกติดกับเส้นเชือก 2 เส้นกับคาน ทำให้วัตถุแกว่งตามแนวดิ่ง จากการวิเคราะห์ผลการทดลองจากกราฟของทั้ง 2 การวิจัย พบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลามีลักษณะเป็นไปตามทฤษฎีและการทดลองของบริกเกิลได้ค่าการแกว่งเท่ากับ 1.66 ± 0.02 s และเปรียบเทียบกับค่าการแกว่งที่ได้จากการวัดด้วย PASCO scientific photogate timer ซึ่งเท่ากับ 1.67 s และการทดลองของ Vogt; และ Kuhn ได้ค่าจากการทดลองเท่ากับ 2.153 ± 0.002 s และได้ค่าการแกว่งจากการคำนวณเป็น 2.15 s ซึ่งใกล้เคียงกันมาก และในปีเดียวกัน Vogt; และ Kuhn (Vogt และ Kuhn. 2012, November) ยังได้วิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบสปริงเพนดูลัม โดยใช้ไอโฟนจำนวน 2 เครื่องแทนวัตถุ ทำการหาค่าคงที่ของสปริงที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งพบว่า ค่าคงที่ของสปริงที่ได้จากการทดลองมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กฎของฮุก เพียง 1.16% จากผลการวิจัยที่ได้ศึกษาทำให้พิสูจน์ได้ว่า เซนเซอร์วัดความเร่งของสมาร์ทโฟนมีประสิทธิภาพอย่างมากในการนำมาใช้เป็นอุปกรณ์วัดและบันทึกข้อมูลในการทดลองฟิสิกส์ให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง แม่นยำ

Castro-Palacio และ คณ (J. C. Castro-Palacio, Velázquez-Abad, Giménez, และ Monsoriu, 2013, May, pp.472-475) พัฒนาชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์มอนิกและการแกว่งกวัดแบบหมุน โดยทำการทดลองกับวัตถุติดสปริง 2 ตัวที่เคลื่อนที่บน Air track และติดสมาร์ทโฟนลงบนวัตถุนั้นเพื่อวัดและเก็บข้อมูลความเร่งในแนว

แกน y ด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งและแอปพลิเคชัน Accelerometer Monitor การทดลองแบ่งเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 ทำการทดลองการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์มอนิก โดยวัดความเร่งด้วยสมาร์ตโฟนของวัตถุเคลื่อนที่บน Air track ซึ่งจะไม่มีความเสียดทาน และใช้ Photometer เก็บข้อมูลอีกวิธีหนึ่งไปพร้อมกันทำการเปลี่ยนมวลของวัตถุไปเรื่อย ๆ จากนั้นนำผลไปวิเคราะห์เพื่อหาแอมพลิจูด ความถี่เชิงมุมและเฟสเริ่มต้น ผลการทดลองพบว่า คาบการแกว่งที่ได้จากการทดลองด้วยสมาร์ตโฟนมีความสอดคล้องกับคาบที่ได้จาก Photometer โดยมีความความเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.05-1.99% และได้ค่าคงที่ของสปริงที่ได้จากการทดลองเมื่อมวล $m = 500$ g เป็น 187.9 ± 0.6 N/m และจากการคำนวณเป็น 189 ± 7 N/m มีความคลาดเคลื่อนเป็น 0.58% ตอนที่ 2 เป็นการทดลองเรื่องการแกว่งกวัดแบบหน่วง โดยทำการทดลองเหมือนตอนที่ 1 แต่ปิด Air track เพื่อทำให้เกิดแรงเสียดทาน ผลการทดลองพบว่า ค่า Relaxation time ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากทฤษฎี มีค่าเท่ากับ 1.71 ± 0.02 s⁻¹ และ 1.70 ± 0.04 s⁻¹ ตามลำดับ มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.59%

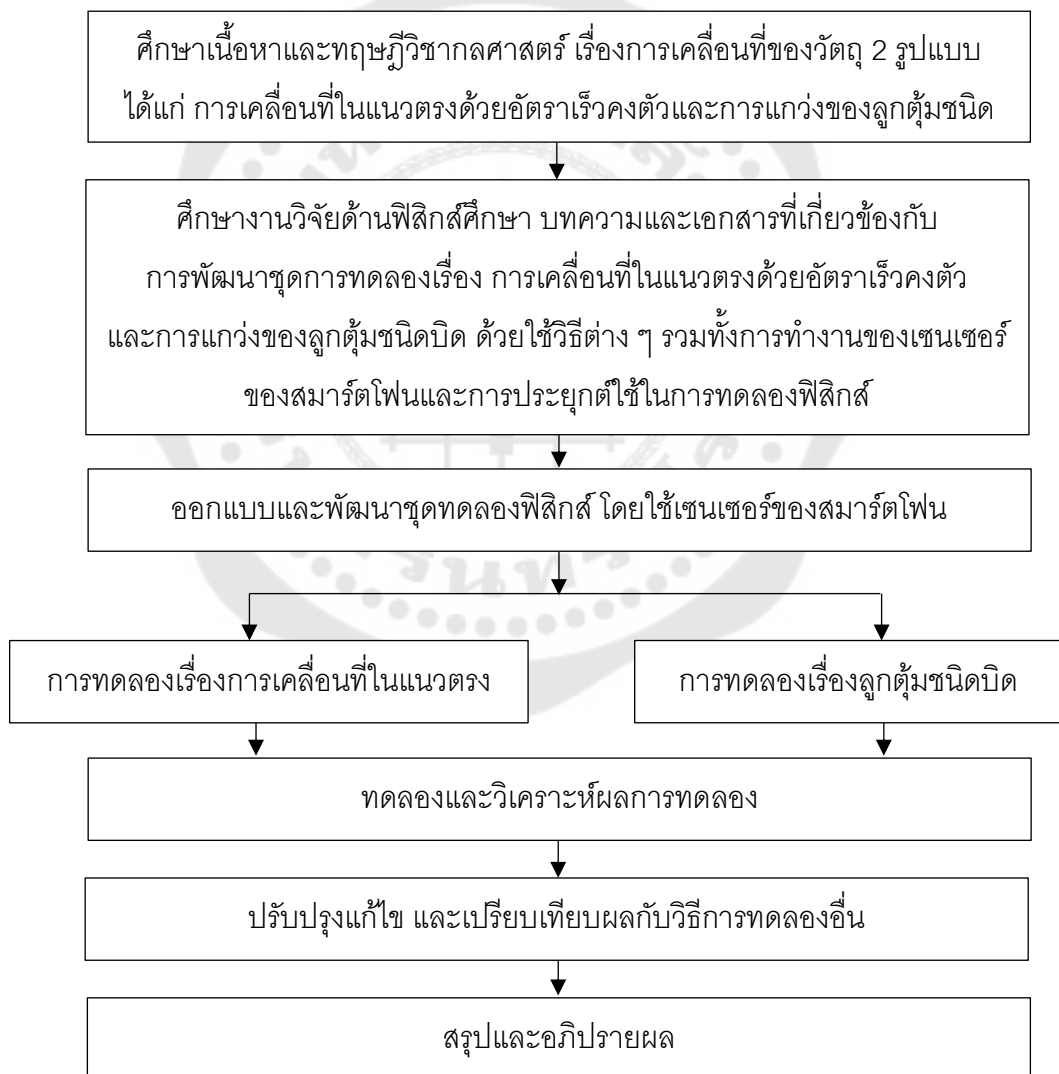
Yavuz; และ Temiz (Temiz และ Yavuz, 2016, January) ได้วิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายด้วยมวลติดปลายสปริงในแนวดิ่งและการเคลื่อนที่ของลูกตุ้มอย่างง่าย โดยประยุกต์ใช้แอปพลิเคชัน Sensor Kinematics และแมกนิโทมิเตอร์ของไอโฟนเพื่อตรวจจับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กนิโอดีเนียมที่ติดไว้กับวัตถุที่กำลังแกว่ง ซึ่งจะทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กกับเวลาในลักษณะของกราฟรูปไซน์ เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Eureka จะได้สมการของกราฟความสัมพันธ์ ค่าความถี่เชิงมุมซึ่งนำไปหาคาบการแกว่งของวัตถุออกมาได้ ผลการทดลองพบว่า ตอนที่ 1 การทดลองกับมวลติดสปริงในแนวดิ่ง เมื่อค่าคงที่ของสปริงมีค่าเพิ่มขึ้น คาบการแกว่งจะมีค่าลดลง ในกรณีที่ $k = 29.85$ จะได้คาบจากการทดลองเป็น 0.81 s และค่าจากทฤษฎีเป็น 0.82 s มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.22% และการทดลองตอนที่ 2 เรื่องการเคลื่อนที่แบบลูกตุ้มอย่างง่าย เมื่อความยาวเชือกเพิ่มขึ้น คาบการแกว่งจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ $l = 0.16$ m คาบการแกว่งที่ได้จากการทดลองแลการคำนวณมีค่าเท่ากัน คือ 0.80 s ที่ $l = 0.32$ m คาบการแกว่งที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.12 s และจากการคำนวณมีค่า 1.13 s มีความคลาดเคลื่อน 0.88% เห็นได้ว่าผลการทดลองทั้ง 2 ตอนใกล้เคียงกับทฤษฎีมาก แต่การทดลองนี้มีข้อจำกัดเล็กน้อย คือ ความถี่ในการแกว่งของวัตถุจะต้องน้อยกว่า 15-20 Hz

Pierratos และ Polatoglou (Pierratos และ Polatoglou, 2017, January, pp.1-5) ได้ศึกษาการอนุรักษ์พลังงานกลในการเคลื่อนที่แบบลูกตุ้มอย่างง่ายของตำแหน่ง 2 ตำแหน่ง โดยตำแหน่ง A อยู่สูงจากตำแหน่ง B ซึ่งเป็นตำแหน่งสมดุลเป็นระยะ H รวมทั้งหาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกจากการวิเคราะห์ด้วยกฎการอนุรักษ์พลังงานกล ซึ่งพบว่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่ตำแหน่ง B เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสูงเริ่มต้นที่ปล่อยวัตถุ H โดยใช้เซนเซอร์ความเร่งของสมาร์ทโฟนกับแอปพลิเคชัน Physics Toolbox Accelerometer วัดความเร่งสู่ศูนย์กลางของวัตถุซึ่งคือสมาร์ทโฟนที่จัดให้แกน Z เป็นแกนของความเร่งสู่ศูนย์กลางของระบบ และถูกแขวนไว้กับคานด้วยเชือก 2 เส้นความยาว 0.95 m และทำการแกว่งที่ความสูงเริ่มต้นต่างกันจาก 0.10, 0.20,..., 0.50 m จะได้กราฟความเร่งสู่ศูนย์กลางในฟังก์ชันของเวลา มีลักษณะเป็นกราฟรูปไซน์ที่มีการหน่วงเล็กน้อย เมื่อวิเคราะห์ผลแล้วพบว่า ที่ความสูง $h = 0.10, 0.20, \dots, 0.50$ m มีค่าความเร่งสู่ศูนย์กลางจากการทดลองเท่ากับ 2.26, 4.12, 6.57, 8.04 และ 10.10 ตามลำดับ และค่าความเร่งสู่ศูนย์กลางจากการคำนวณได้เป็น 2.07, 4.13, 6.20, 8.26 และ 10.33 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าข้อมูลมีความใกล้เคียงกันระดับหนึ่ง และเมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสู่ศูนย์กลางและเวลา จะได้ความชันกราฟเพื่อนำไปหาค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งได้ค่าประมาณ 9.32 m/s^2

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดการทดลองฟิสิกส์ในการศึกษาการเคลื่อนที่ในวิชากลศาสตร์ โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาชุดการทดลองเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของวัตถุใน 2 รูปแบบ ได้แก่ การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวและการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต ที่สามารถใช้อธิบายปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่นั้น ๆ ได้ โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังแผนภาพต่อไปนี้



ในการวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาชุดการทดลองฟิสิกส์ทั้งหมด 2 ชุดการทดลอง กำหนดให้

ชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว

ชุดการทดลองที่ 2: เรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิวด

โดยจะนำเสนอรายละเอียดขั้นตอนดำเนินการวิจัยของแต่ละชุดการทดลอง ตามลำดับดังหัวข้อต่อไปนี้

1. วัตถุประสงค์ของการทดลอง
2. การออกแบบและสร้างชุดการทดลอง โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน
3. แอปพลิเคชันที่ใช้ในการทดลอง
4. วิธีการทดลอง
5. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. การพัฒนาชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบและพัฒนาชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวของวัตถุ เพื่อหาปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ตำแหน่ง (Position) เวลา (Time) อัตราเร็ว (Speed) และอัตราเร่ง (Magnitude of Acceleration) ของวัตถุ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. เพื่อหาปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวของวัตถุ ได้แก่ ตำแหน่ง เวลา อัตราเร็วและอัตราเร่ง โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนเป็นเครื่องมือวัด
2. เพื่อศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ กับเวลาของการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวของวัตถุ
3. เพื่อศึกษาว่าระยะห่างของหลอดไฟ LED ที่ต่างกันมีผลต่อการหาปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวของวัตถุหรือไม่
4. เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนที่พัฒนาขึ้น กับการใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker

1.2 การออกแบบและสร้างชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วย อัตราเร็วคงตัวของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน

ผู้วิจัยได้นำหลักการของการใช้โฟโตเกตและเครื่องเคาะสัญญาณเวลามาประยุกต์ใช้กับการออกแบบและพัฒนาชุดการทดลองชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสง (Ambient Light sensor) ของสมาร์ทโฟนร่วมกับแอปพลิเคชันเกี่ยวกับการวัดปริมาณทางฟิสิกส์ เป็นเครื่องมือวัดและเก็บข้อมูลการทดลอง โดยชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่

1.2.1 ชุดรถทดลองและราง

1.2.2 ชุดแหล่งกำเนิดแสง

มีรายละเอียดการออกแบบและพัฒนาชุดการทดลองดังนี้

1.2.1 ชุดรถทดลองและราง

ผู้วิจัยใช้หัวจักรรถไฟของเล่นแบบใส่ถ่านที่ติดตั้งสมาร์ทโฟนบนตัวรถเป็นวัตถุที่ใช้ในชุดทดลอง โดยหัวจักรรถไฟของเล่นขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ทำให้ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไฟเป็นการเคลื่อนที่ที่มีอัตราเร็วคงตัว และสามารถปรับระดับความเร็วได้ 2 ระดับ กำหนดให้เรียกเป็น ระดับ 1 และระดับ 2 ตามลำดับ

1.2.1.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้าง

1) รถไฟของเล่นแบบใส่ถ่าน AA ระดับความเร็วได้	1	คัน
2) รางรถไฟของเล่นแบบตรง ความยาว 20 เซนติเมตร	10	อัน
3) รางรถไฟของเล่นแบบปล่อย-หยุด ความยาว 20 เซนติเมตร	2	อัน
4) สมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4	1	เครื่อง
5) สมาร์ทโฟน iPhone 4S	1	เครื่อง
6) ตัวยึดสมาร์ทโฟน ยี่ห้อ YUNTENG	2	อัน
7) แอปพลิเคชัน Phyphox เวอร์ชัน 1.1.5		
8) แอปพลิเคชัน ไฟฉาย เวอร์ชัน 3.26		
9) กาวสองหน้า		
10) ฝาขวดนมสีแดง		

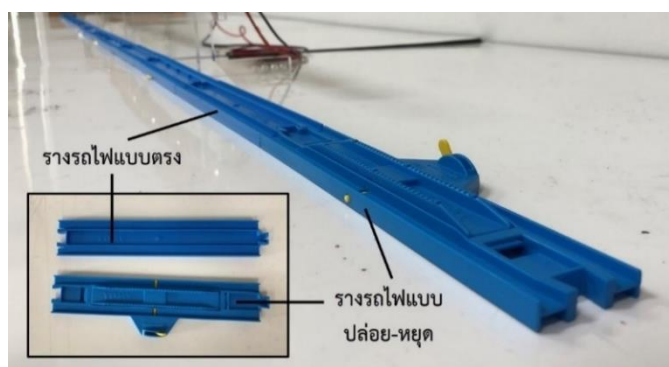
1.2.1.2 ขั้นตอนการสร้างชุดรถทดลอง

1. ติดฝาขูดนมสีแดงไว้ด้านหลังของสมาร์ทโฟน เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงของวัตถุในการวิเคราะห์วิถีโดยโปรแกรม Tracker ดังภาพประกอบ 48(ก)
2. ติดตัวยึดสมาร์ทโฟนลงบนรถไฟของเล่น ในลักษณะให้สมาร์ทโฟนขนานไปกับตัวรถไฟของเล่น ดังภาพประกอบ 48 จะได้รถทดลองที่เป็นวัตถุที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในชุดการทดลองที่พัฒนาขึ้น



ภาพประกอบ 48 ชุดรถทดลองที่พัฒนาขึ้นจากหัวรถไฟของเล่นแบบใส่ถ่านพร้อมติดตั้งสมาร์ทโฟน (ก) ภาพด้านหลัง (ข) ภาพด้านหน้า (ค) ภาพด้านข้าง

3. ต่อรางรถไฟของเล่นแบบตรง จำนวน 10 อัน แล้วจึงต่อรางแรกและรางสุดท้ายด้วยรางแบบปล่อย-หยุด รวมระยะความยาวของรางรถไฟประมาณ 2.4 เมตร ดังภาพประกอบ 49



ภาพประกอบ 49 รางสำหรับการทดลองการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว

1.2.2 ชุดแหล่งกำเนิดแสง

1.2.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้าง

1) แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC Power Supply) รุ่นHY3005D	1	เครื่อง
2) หลอดไฟ LED แบบกระเปาะใสสีขาว ขนาด 5 มิลลิเมตร	40	หลอด
3) ตัวต้านทานค่าคงที่ทนกำลังสูง (Ceramic Cement High Power Resistor) ขนาด 10 Ω 5 วัตต์	7	ตัว
4) แผงวงจรเปล่า	1	อัน
5) สายไฟกระแสตรงสีแดงและดำ	7	เมตร
6) สายทดสอบวงจรถัก 2 ทาง (Double Banana plug cable)	3	คู่
7) บานาน่า ปลั๊ก สีแดงและดำ (Banana Plug)	1	คู่
8) ขั้วตัวเมียสีแดงและดำ (Panel mount Banana plug)	2	คู่
9) กล่องพลาสติกใส่แผงวงจรไฟฟ้าสีดำ	1	กล่อง
10) ชุดบัดกรี	1	ชุด
11) ไม้เมตร	2	อัน
12) แผ่นอะคลิลิก	1	แผ่น
13) กาวดินน้ำมัน		
14) คัตเตอร์		
15) คีมตัดลวดและสายไฟ		

1.2.2.2 ขั้นตอนการสร้างชุดแหล่งกำเนิดแสง

ชุดแหล่งกำเนิดแสงของชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ส่วนย่อย ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC Power Supply), ชุดสายไฟหลอดไฟ LED และวงจรลดกระแสไฟฟ้า มีรายละเอียดการสร้างอุปกรณ์ ดังนี้

1.2.2.2.1 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC Power Supply)

1.2.2.2.2 ชุดสายไฟหลอดไฟ LED

สายไฟหลอดไฟ LED ที่พัฒนาขึ้นเป็นส่วนสำคัญของชุดการทดลอง โดยหลอดไฟ LED แต่ละหลอดที่เรียงกันบนสายไฟแทนตำแหน่งใด ๆ ของวัตถุ ซึ่งจะกำหนดให้คงที่ทำให้ทราบระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่จากจุดอ้างอิงซึ่งจะสัมพันธ์กับเวลาที่วัตถุใช้ในการเคลื่อนที่จากหลอดไฟ LED หลอดหนึ่งจนถึงหลอดไฟ LED หลอดถัด ๆ ไป โดยผู้วิจัยออกแบบให้สายไฟ

หลอดไฟ LED มีความยาว 2 เมตร และระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED (Δd) เท่ากับ 5 เซนติเมตร มีรายละเอียดดังนี้

1. กำหนดตำแหน่งบนสายไฟสีแดงและดำ ความยาวประมาณ 2.5 เมตร โดยให้แต่ละตำแหน่งกว้าง 0.5 เซนติเมตร และห่างกันทุก ๆ 5 เซนติเมตร ทั้งหมด 41 ตำแหน่ง เพื่อให้ได้ระยะทาง 2 เมตร โดยเว้นระยะปลายสายไฟทั้ง 2 ข้างไว้พอยาวประมาณ

2. ใช้คัตเตอร์เลาะเปลือกพลาสติกที่หุ้มสายไฟตรงตำแหน่งที่กำหนดไว้ ออกจนมีลักษณะเป็นปล้อง เพื่อเป็นตำแหน่งของหลอดไฟ LED

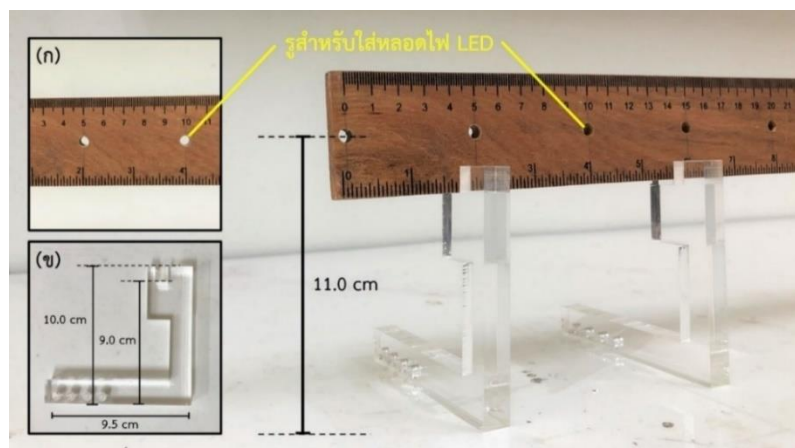
3. บัดกรีหลอดไฟ LED จำนวน 41 หลอดเข้ากับสายไฟสีแดงและดำซึ่งเป็นการต่อวงจรแบบขนาน ตรงตำแหน่งที่เลาะเปลือกพลาสติกที่หุ้มสายไฟออกแล้ว ตามภาพประกอบ 50(ก) จากนั้นตัดขาหลอดไฟ LED และเก็บปลายสายไฟข้างหนึ่งโดยเทปพันสายไฟ ปลายสายไฟอีกข้างหนึ่งต่อเข้ากับบานาน่าปลั๊กสีแดงและดำให้เรียบร้อย จะได้สายไฟหลอดไฟ LED ความยาว 2 เมตร ดังภาพประกอบ 50 (ข)



ภาพประกอบ 50 (ก) การบัดกรีหลอดไฟ LED เข้ากับสายไฟสีแดงและดำที่กำหนดตำแหน่งและเปลือกพลาสติกหุ้มออก (ข) สายไฟหลอด LED ความยาว 2 เมตร

4. นำไม้เมตร 2 อันมาเจาะรู ขนาด 0.5 เซนติเมตร ณ ตำแหน่ง 0, 5, 10, 15, ..., 100 เซนติเมตร จากนั้นต่อไม้เมตรทั้ง 2 อันเข้าด้วยกัน โดยตัดส่วนเกินของไม้เมตรออกด้วย จะได้รางไม้ยาว 2 เมตร สำหรับใส่สายไฟหลอดไฟ LED เพื่อกำหนดตำแหน่งของวัตถุขณะเคลื่อนที่ ดังภาพประกอบ 51(ก)

5. ตัดแผ่นอะคลิลิก ลักษณะดังภาพประกอบ 51(ข) จำนวน 4-5 อัน เพื่อใช้เป็นขาตั้งสำหรับวางรางไม้ที่ใส่สายไฟหลอดไฟ LED โดยวัดความสูงของขาตั้งให้ลำแสงจากหลอดไฟ LED อยู่พอดีกับตำแหน่งเซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนที่ติดอยู่บนรถไฟของเล่น

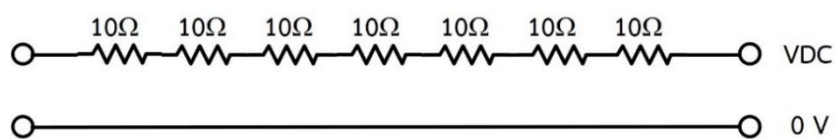


ภาพประกอบ 51 (ก) รางไม้เจาะรูสำหรับใส่สายไฟหลอดไฟ LED (ข) ขาตั้งรางไม้

1.2.2.2.3 วงจรลดกระแสไฟฟ้า

แสงจากหลอดไฟ LED แทนตำแหน่งของวัตถุขณะเคลื่อนที่ จึงเป็นส่วนสำคัญของชุดการทดลองที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น หากหลอดไฟ LED มีความสว่างเหมาะสม แสงที่ออกจากหลอดไฟจะมีลักษณะเป็นลำขนาดเล็กและมีความส่องสว่างต่างจากสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน ทำให้ผ่านเข้าเซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนได้อย่างแม่นยำขึ้น โดยปกติหลอดไฟ LED จะไม่สามารถปรับค่าความส่องสว่างได้และหากต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงโดยตรงจะทำให้เกิดความร้อนหรือหลอดไฟขาดได้ ผู้วิจัยจึงเพิ่มวงจรเข้ามาในชุดการทดลอง ซึ่งทำหน้าที่ลดกระแสไฟฟ้าที่ไหลจะเข้าหลอดไฟ LED ทำให้หลอดไฟไม่ขาด โดยสามารถปรับความต่างศักย์จากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง เพื่อเพิ่มลดความส่องสว่างของหลอดไฟ LED ตามความต้องการ มีรายละเอียดดังนี้

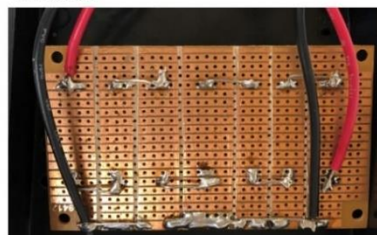
1. ต่อดiode โดยใช้ตัวต้านทาน ชนิดค่าคงที่ทนกำลังสูง ขนาด 10 โอห์ม 5 วัตต์ จำนวน 7 ตัว ต่ออนุกรมกัน ตามภาพประกอบ 52
2. บัดกรีสายไฟสีแดงและดำจากขา Input และขา Output ของแผงวงจรต่อเข้ากับขั้วตัวเมีย 2 คู่ และบรรจุแผงวงจรไฟฟ้าลงในกล่องพลาสติกให้เรียบร้อย จะได้วงจรลดกระแสไฟฟ้า พร้อมใช้งาน ดังภาพประกอบ 53



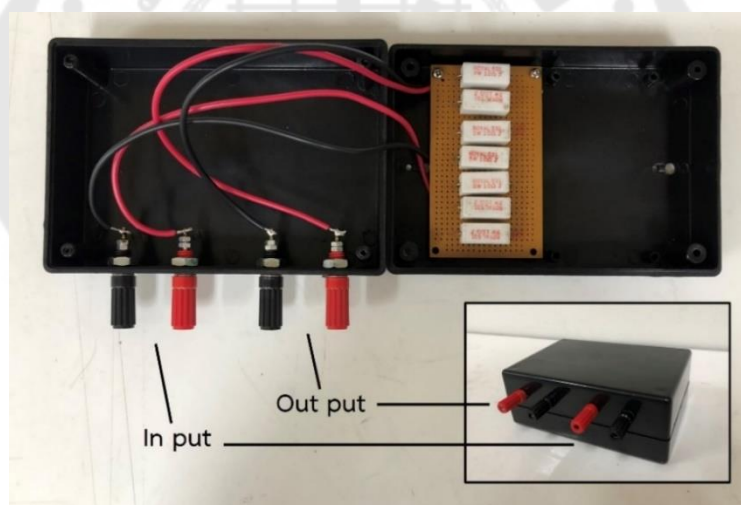
ด้านหน้า



ด้านหลัง



ภาพประกอบ 52 การต่อวงจรลดกระแสไฟฟ้า



ภาพประกอบ 53 วงจรลดกระแสไฟฟ้า

3. ต่ออุปกรณ์ชุดแหล่งกำเนิดแสง ทั้ง 3 ส่วน ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟ กระแสตรง (DC Power Supply), สายไฟหลอดไฟ LED และวงจรลดกระแสไฟฟ้า เข้าด้วยกัน ดังภาพประกอบ 54



ภาพประกอบ 54 ชุดแหล่งกำเนิดแสง

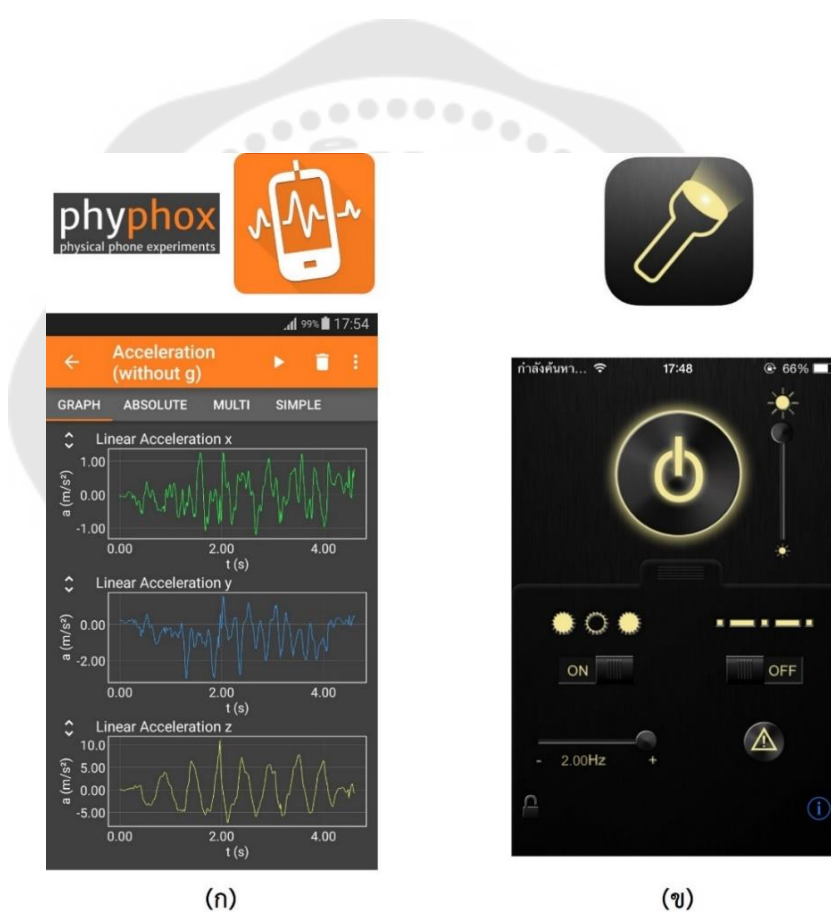
1.3 แอปพลิเคชันที่ใช้ในการทดลอง

1. แอปพลิเคชัน Phyphox เวอร์ชัน 1.1.5

แอปพลิเคชัน Phyphox ปัจจุบันเวอร์ชัน 1.1.5 พัฒนาขึ้นโดย คณะอาจารย์ที่ The 2nd Institute of Physics ณ มหาวิทยาลัย RWTH Aachen ประเทศเยอรมนี เมื่อปี ค.ศ. 2016 โดยมี Dr. Sebastain Staacks และ Prof. Christoph Stampfer เป็นผู้คิดค้นและพัฒนา Dominik Dorsel, Jonas Gessner และ Camilla Lummerzheim เป็นโปรแกรมเมอร์ เป็นแอปพลิเคชันที่มีความสามารถในการวัดและบันทึกค่าปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ได้ทั้ง 3 แกน x , แกน y และแกน z อย่างต่อเนื่องและหลากหลาย เช่น ความเร่งเชิงเส้น, อัตราเร็วเชิงมุม, ความเข้มสนามแม่เหล็ก, ความส่องสว่าง เป็นต้น รวมทั้งมีฟังก์ชันการทดลองทางฟิสิกส์อีกหลายหัวข้อ เช่น การทดลองเกี่ยวกับเสียงและกลศาสตร์ โดยใช้เซนเซอร์ที่บรรจุอยู่ในสมาร์ตโฟนทำงานพร้อมกัน เช่น Accelerometer, Magnetic field sensor, Gyroscope sensor, Ambient light sensor ฯลฯ และจะแสดงผลการวัดข้อมูลเป็นกราฟความสัมพันธ์หรือตัวเลขบนหน้าจอ ตามภาพประกอบ 55(ก) นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานฟังก์ชัน Remote control ซึ่งเป็นการควบคุมการทำงานของแอปพลิเคชันจากหลาย ๆ อุปกรณ์พร้อมกันได้ และส่งไฟล์ข้อมูลออกจากอุปกรณ์ได้ด้วยอีเมลและอีกหลายช่องทางเพื่อนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ต่อ สามารถดาวน์โหลดใช้งานได้ฟรี ทั้งในระบบปฏิบัติการ iOS ผ่าน App Store และแอนดรอยด์ ผ่าน Google Play

2. แอปพลิเคชัน ไฟฉาย เวอร์ชัน 3.28

แอปพลิเคชันไฟฉาย ปัจจุบันเวอร์ชัน 3.28 พัฒนาขึ้นโดย 7th Gear เมื่อปี ค.ศ. 2010 เป็นแอปพลิเคชันด้านเครื่องมืออำนวยความสะดวก โดยฉายไฟจากแฟลชด้านหลังของสมาร์ทโฟน สามารถฉายไฟฉายได้ทั้งแบบไฟนิ่ง กระพริบแบบปกติและกระพริบรหัสมอร์สได้ อีกทั้งยังสามารถปรับความถี่ในการกระพริบได้ตั้งแต่ 2.00-20.00 เฮิร์ตซ์ ลักษณะแอปพลิเคชัน แสดงดังภาพประกอบ 55(ข) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดมาใช้งานได้เฉพาะระบบปฏิบัติการ iOS 8.0 ขึ้นไป ผ่านทาง App Store สำหรับ iPhone, iPad และ iPod เท่านั้น

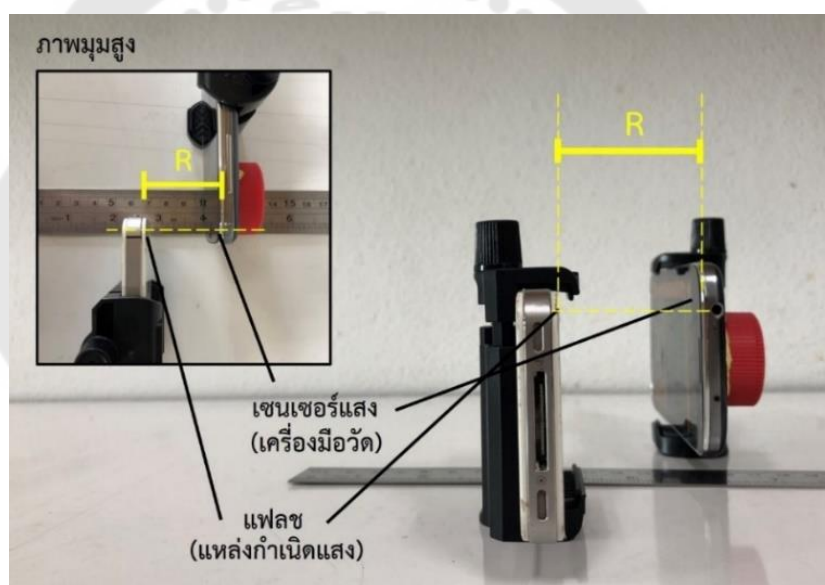


ภาพประกอบ 55 (ก) แอปพลิเคชัน Phyphox (ข) แอปพลิเคชันไฟฉาย

1.4 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การหาค่าความถี่ที่น้อยที่สุดที่เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟนสามารถวัดและแยกความส่องสว่างได้

1. ประกอบอุปกรณ์ดังภาพประกอบ 56 โดยติดตั้งให้ตำแหน่งแฟลชของสมาร์ทโฟน iPhone 4s กับตำแหน่งเซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 ตรงกัน และห่างกันเป็นระยะ 3 เซนติเมตร กำหนดให้สมาร์ทโฟน iPhone 4s เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้แอปพลิเคชัน ไฟฉาย เพื่อปล่อยไฟกระพริบที่สามารถปรับความถี่ของกระพริบได้ และให้เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 เป็นเครื่องมือวัดความส่องสว่าง (Illuminance) ผ่านแอปพลิเคชัน Phyphox

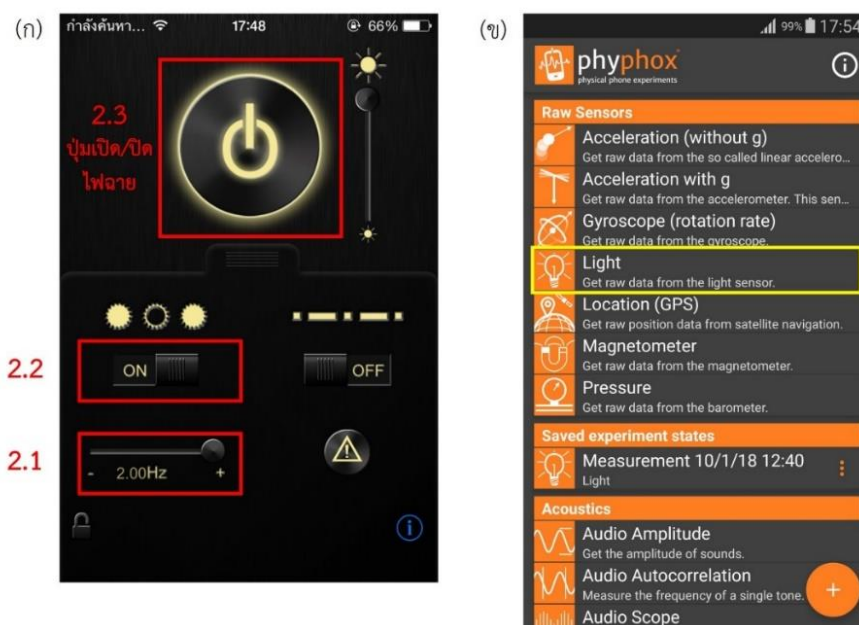


ภาพประกอบ 56 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง ตอนที่ 1 การหาค่าความถี่ที่มากที่สุดที่เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟนสามารถวัดและแยกความส่องสว่างได้

2. ตั้งค่าการทำงานของแอปพลิเคชันไฟฉาย ตามลำดับในภาพประกอบ 57(ก)

ดังนี้

- 2.1 ตั้งค่าความถี่ในการกระพริบไฟเป็น 2 เฮิร์ตซ์
- 2.2 เปิดฟังก์ชันการกระพริบ
- 2.3 ปุ่มเปิด/ปิดทำงานของไฟฉาย



ภาพประกอบ 57 (ก) แอปพลิเคชันไฟฉายบนสมาร์ทโฟน iPhone4S สำหรับทำไฟกระพริบ
(ข) แอปพลิเคชัน Phyphox บนสมาร์ทโฟน Samsung GalaxyS4 สำหรับเป็นเครื่องมือวัด

3. ตั้งค่าการทำงานของแอปพลิเคชัน Phyphox บนสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 โดยกดเลือกโหมดการวัด Raw sensors เป็น Light ดังภาพประกอบ 57(ข) จากนั้นกดปุ่มบันทึกข้อมูล ตามภาพประกอบ 58(ก)

4. กดปุ่มเปิดการทำงานไฟฉาย แล้วเปิดให้ไฟฉายกระพริบ จำนวน 20-30 ครั้ง แล้วกดปิดการทำงานไฟฉายที่ปุ่มเดิม

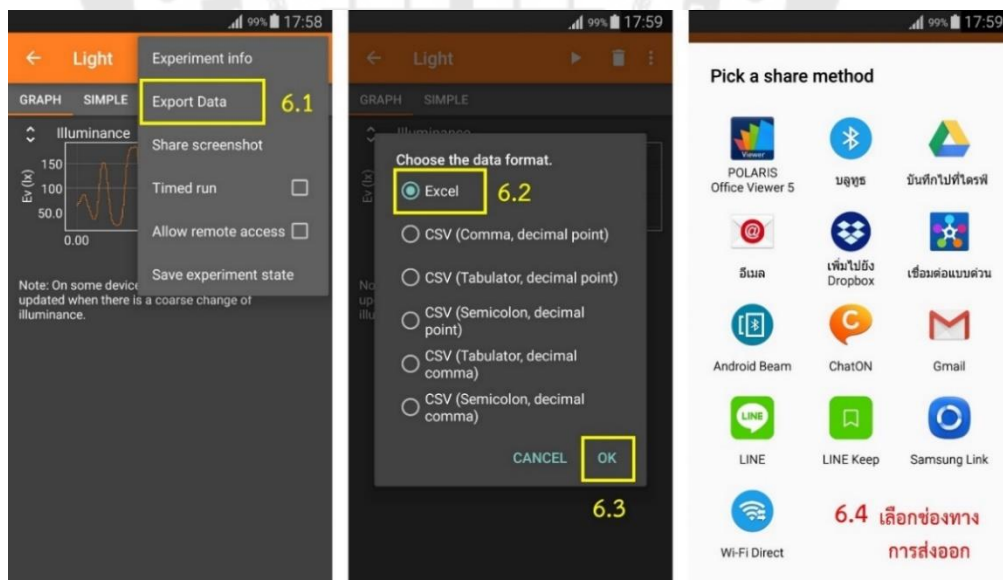
5. กดปุ่มหยุดการบันทึกข้อมูลในหน้าแสดงผลของแอปพลิเคชัน ตามภาพประกอบ 58(ข)

6. ส่งไฟล์ข้อมูลการทดลองออกจากสมาร์ทโฟนผ่านอีเมล โดยกดตามภาพประกอบ 59

7. เมื่อทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง แล้วเพิ่มความถี่ในการกระพริบขึ้นเป็น 5, 8, 9 และ 10 เฮิรตซ์ ตามลำดับ แล้วทำการทดลองตามข้อ 4-6



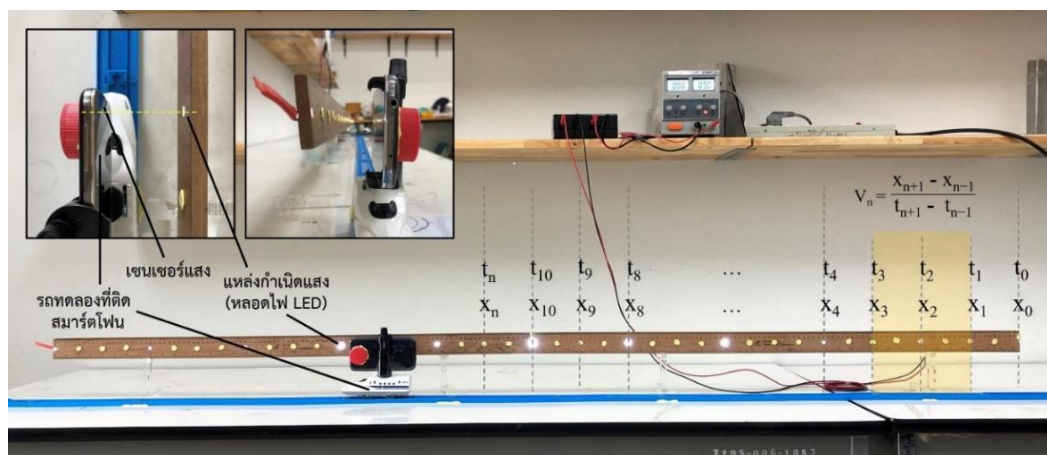
ภาพประกอบ 58 หน้าจอแสดงผลของแอปพลิเคชัน Phyphox (ก) ขณะยังไม่บันทึกผล
(ข) ขณะทำการบันทึกผล



ภาพประกอบ 59 การส่งไฟล์ข้อมูลการทดลองออกจากสมาร์ทโฟนในแอปพลิเคชัน Phyphox

ตอนที่ 2 การหาตำแหน่งและเวลาของรถทดลองที่เคลื่อนที่บนรางในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวเป็นระยะทาง 2 เมตร

1. ติดตั้งอุปกรณ์ชุดการทดลองที่พัฒนาขึ้นเข้าด้วยกัน ดังภาพประกอบ 60



ภาพประกอบ 60 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง ตอนที่ 2 การหาตำแหน่งและเวลาของรถทดลองที่เคลื่อนที่บนรางในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวเป็นระยะทาง 2 เมตร

2. ใช้กาวดินน้ำมันปิดหลอดไฟ LED ที่อยู่บนรางไม้ ให้ได้ระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED (Δd) เท่ากับ 10 เซนติเมตร และปรับค่าความต่างศักย์เป็น 9 โวลต์

3. ติดตั้งสมาร์ทโฟน iPhone 8plus สำหรับถ่ายวิดีโอการเคลื่อนที่ของรถทดลอง โดยจัดให้กล้องของสมาร์ทโฟนอยู่ระดับความสูงเดียวกับรถทดลอง ตัวสมาร์ทโฟนขนานกับแนวการเคลื่อนที่ของรถทดลอง ห่างจากชุดทดลองประมาณ 2.4 เมตร และวางกึ่งกลางให้สามารถถ่ายวิดีโอจากจุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้ายของการเคลื่อนที่ได้ทั้งหมด ดังภาพประกอบ 61

4. ตั้งค่าแอปพลิเคชัน Phyphox เลือกฟังก์ชัน Light

5. กดปุ่มบันทึกวิดีโอ และกดปุ่มเริ่มบันทึกข้อมูลการทดลองในแอปพลิเคชัน Phyphox แล้วปล่อยให้รถทดลองเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วระดับ 1 เป็นระยะทาง 2 เมตร

6. กดปุ่มหยุดบันทึกวิดีโอและข้อมูลการทดลอง โดยไม่ปิดสวิตช์ไฟของเล่น จากนั้นส่งไฟล์ข้อมูลออกจากสมาร์ทโฟน แล้วทำการทดลองซ้ำ จำนวน 5 ครั้ง

7. เปลี่ยนระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED (Δd) เป็น 15 และ 20 เซนติเมตร แล้วทำการทดลองตามข้อ 5-6

8. เปลี่ยนให้รถทดลองเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วระดับ 2 แล้วทำการทดลองตามข้อ 5-7



ภาพประกอบ 61 การติดตั้งอุปกรณ์การบันทึกวิดีโอ

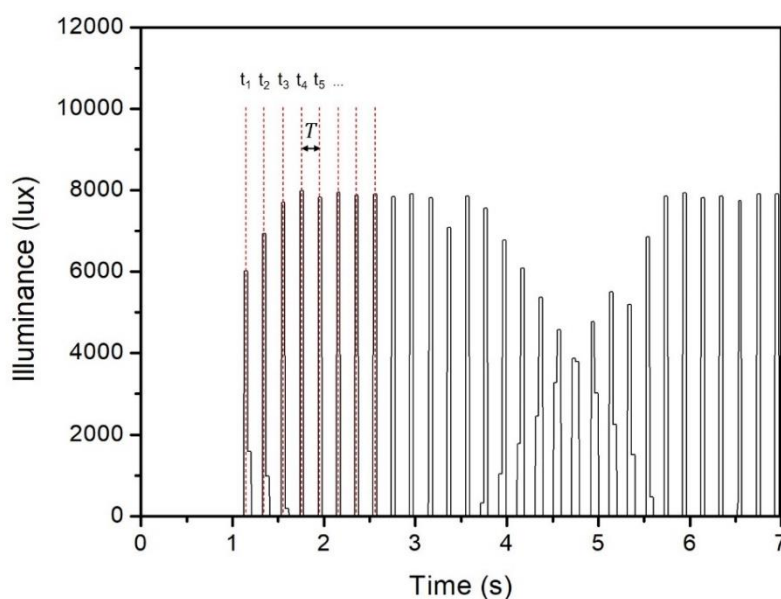
1.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 การหาค่าความถี่ที่มากที่สุดที่เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟนสามารถวัดและแยกความส่องสว่างได้

ไฟล์ข้อมูลการทดลองที่ได้จากการวัดไฟกระพริบที่มีความถี่ต่าง ๆ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 ผ่านแอปพลิเคชัน Phyphox เป็นไฟล์สกุล Microsoft Excel 97-2003 Worksheet (.xls) ซึ่งจะได้ค่าความส่องสว่าง (Illuminance) กับเวลานำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์จะได้ลักษณะกราฟ ดังภาพประกอบ 62 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลา มีลักษณะเป็นแท่ง เป็นช่วง ๆ เนื่องจากช่วงเวลาที่ไฟกระพริบเซนเซอร์ตรวจวัดแสงจะวัดความส่องสว่างของแสงที่ออกมาทำให้ได้ค่าความส่องสว่างสูงและแตกต่างจากช่วงที่ไฟเริ่มดับและหยุดกระพริบซึ่งจะได้ค่าน้อยกว่าและเกือบเป็นศูนย์ ตามลำดับ จึงมีบางช่วงเวลาที่ความส่องสว่างสูงมากสลับกับช่วงเวลาที่ความส่องสว่างได้น้อยมากอย่างชัดเจน จะได้ว่า การกระพริบไฟ 1 ครั้งแทนด้วยแท่ง 1 แท่งบนกราฟ เมื่อกระพริบ n ครั้ง จะมีจำนวน n แท่งบนกราฟ ฉะนั้น ช่วงเวลาที่ไฟฉายกระพริบครั้งหนึ่งไปถึงอีกครั้งหนึ่ง คือ คาบของการกระพริบ ซึ่งจะสัมพันธ์กับความถี่ที่ตั้งค่าในแอปพลิเคชันของสมาร์ทโฟน iPhone 4s ที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยหาคาบได้จากช่วงเวลาจากค่าความส่องสว่างสูงสุดของแท่งหนึ่งถึงแท่งที่อยู่ถัดไปทางขวานบนกราฟ

$$T_{(n+1)(n)} = t_{n+1} - t_n \quad (3.1)$$

เมื่อ n คือ ครั้งที่ไฟฉายกระพริบ



ภาพประกอบ 62 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลาที่วัดจากแอปพลิเคชัน Phyphox ในการทดลองชุดที่ 2 ตอนที่ 1

โดยการพิจารณาขีดจำกัดของเซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 ว่ายังสามารถแยกความต่างของแสงที่กระพริบได้นั้น ก็ต่อเมื่อคาบในการกระพริบแต่ละครั้ง จำนวน 20 ครั้งที่สามารถวัดได้จากข้อมูลการทดลอง มีค่าเท่ากับคาบในการกระพริบจริงจากสมาร์ทโฟน iPhone 4s ที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5%

ตอนที่ 2 การหาดำแหน่งและเวลาของวัตถุที่เคลื่อนที่บนรางในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวเป็นระยะทาง 2 เมตร

2.1 การหาอัตราเร็วเฉลี่ยของวัตถุจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลา

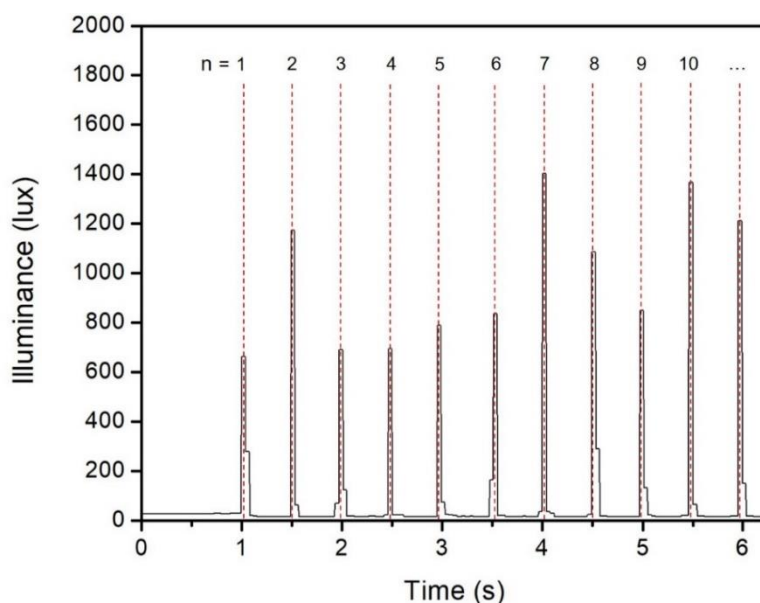
การหาอัตราเร็วเฉลี่ย (v_{avg}) ของรถไฟของเล่นแบบใส่ถ่านที่เคลื่อนที่บนรางตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวต่างกัน 2 ระดับ กำหนดให้เป็นระดับ 1 และ 2 โดยตำแหน่งของรถไฟของเล่นเคลื่อนที่ (x_n) ณ เวลา (t_n) ไต ๆ ถูกวัด บันทึกและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการ 2 รูปแบบพร้อมกัน ได้แก่

วิธีที่ 1 การวัดและบันทึกข้อมูลโดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟน Samsung S4 ที่ติดตั้งอยู่บนรถไฟของเล่นร่วมกับแอปพลิเคชัน Phyphox ซึ่งช่วงระยะที่รถไฟของเล่นเคลื่อนที่ที่ถูกกำหนดให้คงที่ด้วยตำแหน่งของหลอดไฟ LED มีระยะห่างระหว่างกัน (Δd) ทุก ๆ

10, 15 และ 20 เซนติเมตร คิดเป็นตำแหน่งของรถไฟของเล่นที่ผู้วิจัยทราบค่าตลอดระยะทางทั้งหมด 2.000 ± 0.001 เมตร เป็นจำนวน 21, 14 และ 11 ตำแหน่ง ตามลำดับ กำหนดให้หลอดไฟ LED หลอดที่ 1, 2, 3, ..., n เป็นตำแหน่ง x ที่ 0, 1, 2, 3, ..., $n-1$ ของวัตถุ และให้หลอดไฟ LED ที่ 1 เป็นตำแหน่งอ้างอิงของการเคลื่อนที่ จะได้ตำแหน่งที่รถไฟของเล่นเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, ..., n มีค่าระยะทางเท่ากับ $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ เมตร ตามลำดับ โดยเซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนเป็นเครื่องมือวัดและบันทึกค่าความส่องสว่าง (Illuminance) ของหลอดไฟ LED ณ เวลาใด ๆ ขณะที่รถไฟของเล่นเคลื่อนที่ผ่านหลอดไฟแต่ละหลอด ดังภาพประกอบ 60 ไฟล์ข้อมูลการทดลองที่ส่งออกจากแอปพลิเคชันผ่านอีเมลเป็นไฟล์สกุล Microsoft Excel 97-2003 Worksheet (.xls) ซึ่งจะได้ค่าความส่องสว่างกับเวลา

จากทฤษฎี ความส่องสว่างมีค่าแปรผกผันกับระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสง (หลอดไฟ LED) ถึงเครื่องมือวัด (เซนเซอร์ตรวจจับแสง) ยกกำลังสอง เมื่อสมาร์ทโฟนเคลื่อนที่มา ณ ตำแหน่งตั้งฉากกับหลอดไฟ LED ซึ่งเป็นระยะห่างที่สั้นที่สุด ทำให้ ณ ตำแหน่งนั้นมีความส่องสว่างสูงสุดและมีค่าลดลงเมื่อเคลื่อนที่ห่างออกไป ฉะนั้นกราฟบางช่วงเวลาจึงมีความส่องสว่างสูงมาก ผู้วิจัยกำหนดให้เรียกลักษณะกราฟขณะรถไฟของเล่นเคลื่อนที่ผ่านหลอดไฟ LED นี้ว่า แท่ง สลับกับบางช่วงเวลาที่มีความส่องสว่างมีค่าน้อยใกล้ ๆ ศูนย์ ซึ่งเป็นขณะที่รถไฟของเล่นเคลื่อนที่อยู่ระหว่างหลอดไฟ LED สมาร์ทโฟนจะวัดความส่องสว่างของสิ่งแวดล้อม (แสงธรรมชาติ) ทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลา ลักษณะดังภาพประกอบ 63 โดยเมื่อระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร จะมีจำนวนแท่งบนกราฟทั้งหมด 21, 14 และ 11 แท่ง ตามจำนวนหลอดไฟ ตามลำดับ

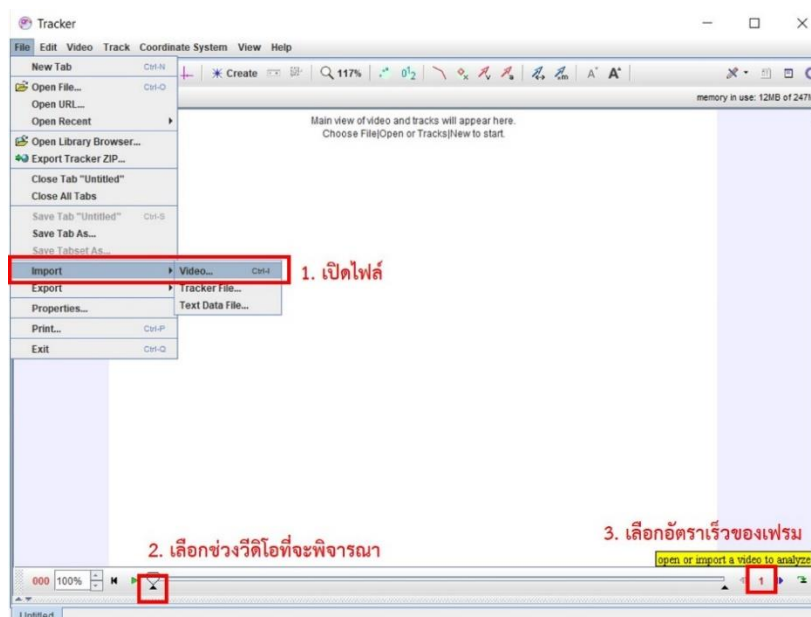
ตัวอย่างการวิเคราะห์กราฟ เมื่อระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED เป็น 10 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 63 เมื่อให้หลอดไฟ LED หลอดที่ 1 เป็นตำแหน่งอ้างอิงของการเคลื่อนที่ จะได้ว่าตำแหน่งที่ 2, 3, 4, ..., 21 มีค่าเท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, ..., 2.000 เมตร ตามลำดับ โดยหาเวลาที่รถไฟของเล่นเคลื่อนที่ผ่าน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ นี้ ได้จากเวลา ณ ความส่องสว่างสูงสุดของแต่ละแท่งบนกราฟซึ่งแทนตำแหน่งของวัตถุที่สัมพันธ์กับเวลาที่วัดได้ ณ ความส่องสว่างสูงสุดนั้น ๆ



ภาพประกอบ 63 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลาที่วัดได้ จากแอปพลิเคชัน Phyphox ในการทดลองชุดที่ 2 ตอนที่ 2

วิธีที่ 2 การใช้เทคนิคการวิเคราะห์วีดิโอของระลอกไฟของเล่นเคลื่อนที่ของวัตถุด้วยโปรแกรม Tracker ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยใช้สมาร์ทโฟน iPhone 8plus เป็นอุปกรณ์บันทึกวีดิโอ มีอัตราเฟรมเท่ากับ 30 fps วิธีนี้ช่วงเวลาที่รถไฟของเล่นเคลื่อนที่จากเฟรมหนึ่งถึงเฟรมที่อยู่ถัดไปจะคงที่ด้วยการกำหนดอัตราเฟรม (Frame rate) ของวีดิโอในโปรแกรม แล้วจึงวิเคราะห์หาตำแหน่งที่รถไฟของเล่นขยับจากเฟรมหนึ่งไปอีกเฟรมหนึ่งจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดปลาย โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์วีดิโอด้วยโปรแกรม Tracker ดังภาพประกอบ 64 และ 65 ดังนี้

1. เปิดวีดิโอที่ต้องการวิเคราะห์ในโปรแกรม โดยกดเมนู File > Import > Video ...
2. เลือกช่วงวีดิโอที่ต้องการ โดยลากปุ่ม ที่อยู่แถบด้านล่างเพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายที่ต้องการวิเคราะห์
3. กำหนดค่าอัตราเร็วของเฟรมว่าจะให้โปรแกรมพิจารณาทุก ๆ กี่เฟรม โดยกด Step size เปลี่ยนตัวเลขตรงมุมขวาล่างของโปรแกรม



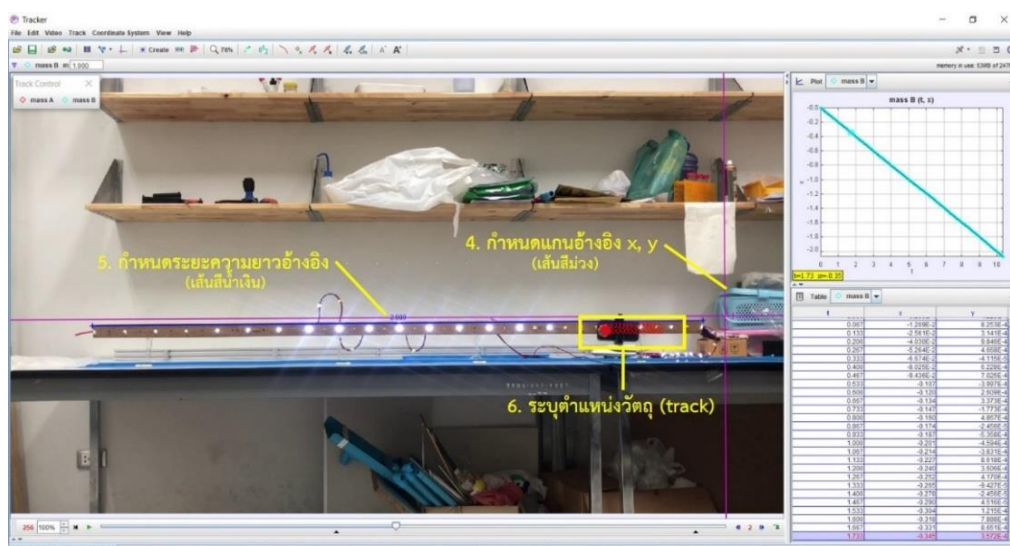
ภาพประกอบ 64 วิธีการวิเคราะห์วิดีโอการเคลื่อนที่ของวัตถุด้วยโปรแกรม Tracker 1

4. กำหนดแกนอ้างอิง x, y (เส้นสีม่วง) โดยกดเมนู Track > axes (สัญลักษณ์กากบาทสีม่วง) จากนั้นเลื่อนตำแหน่งแกน x, y ให้จุดกำเนิด (จุด origin) อยู่ ณ ตำแหน่งอ้างอิงของวัตถุ (วงกลมสีแดงที่ติดกับสมาร์ทโฟน) และปรับองศาแกน x ให้ขนานกับแนวการเคลื่อนที่ โดยคลิกที่เส้นสีม่วงด้านแกน $+x$

5. กำหนดระยะความยาวอ้างอิงหรือเส้นแคลิเบรทความยาว (เส้นสีน้ำเงิน) โดยกดปุ่ม  > New > Calibration stick จากนั้นลากเส้นสีน้ำเงินให้ขนานและยาวเท่ากับ ความยาวอ้างอิง และกำหนดค่าในหน่วยเมตร ในงานวิจัยนี้ให้ความยาวของไม้เมตร 2 อันเป็น ความยาวอ้างอิง เท่ากับ 2 เมตร

6. ทำการระบุตำแหน่งวัตถุ (track) โดยกดเมนู Track > New > Point mass จากนั้นระบุตำแหน่งของวัตถุในเฟรมที่ 1 โดยกด Shift ค้างไว้ตลอดการระบุตำแหน่ง ลูกศร จะเปลี่ยนเป็นสี่เหลี่ยม แล้วคลิกซ้าย ณ ตำแหน่งอ้างอิงของวัตถุ (วงกลมสีแดง)

7. จากนั้นโปรแกรมจะเปลี่ยนเฟรมให้อัตโนมัติตามอัตราที่ตั้งค่าไว้ใน ข้อ 3 เมื่อเปลี่ยนเป็นเฟรมที่ 2 วัตถุจะเปลี่ยนตำแหน่งไปด้วย แล้วกดระบุตำแหน่ง ณ ตำแหน่งวงกลมสีแดงที่เปลี่ยนไปตามไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดปลายของการเคลื่อนที่จะได้ตำแหน่งของรถไฟของเล่นขณะเคลื่อนที่ ณ เวลาใด ๆ



ภาพประกอบ 65 วิธีการวิเคราะห์วิถีการเคลื่อนที่ของวัตถุด้วยโปรแกรม Tracker 2

เมื่อได้ข้อมูลตำแหน่งและเวลาของรถไฟของเล่นขณะการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัวบนรางตรงจากทั้ง 2 วิธีการแล้ว จึงนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลา เพื่อวิเคราะห์หาอัตราเร็วเฉลี่ยของวัตถุจากการหาความชันกราฟ ตามสมการ (2.12) ซึ่งสอดคล้องกับสมการเชิงเส้นสองตัวแปร $y = mx + c$ จะได้ ความชันกราฟ (m) = อัตราเร็วเฉลี่ย (v_{avg})

2.2 การหาความเร่งของวัตถุจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา

ความเร่งของวัตถุหาได้จากการหาความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราเร็วขณะใดขณะหนึ่ง (v_n) จากข้อมูลตำแหน่งและเวลาของวัตถุ ทั้ง 2 วิธีการวัดในหัวข้อ 2.1 ตามสมการ

$$v_n = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{x_{n+1} - x_{n-1}}{t_{n+1} - t_{n-1}} \quad (3.2)$$

เมื่อ v_n คือ อัตราเร็วขณะใดขณะหนึ่ง ณ ตำแหน่งที่ n ของการเคลื่อนที่ของวัตถุ

จะได้ค่าอัตราเร็วขณะใดขณะหนึ่ง (v_n) ที่สัมพันธ์กับเวลา t_n ใด ๆ จากนั้นนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา แล้วหาอัตราเร่งเฉลี่ยของวัตถุจากความชันของกราฟ ตามสมการ (2.9)

2. การพัฒนาชุดการทดลองที่ 2: เรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต

ชุดการทดลองเรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตนี้ ออกแบบและพัฒนาเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกเชิงมุม (Angular simple harmonic motion) มีรายละเอียดดังนี้

2.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. เพื่อศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ความเร็วเชิงมุมกับเวลาและความเร่งเชิงมุมกับเวลา โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลาในการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตกับโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าคงตัวในการบิด โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน
3. เพื่อศึกษากฎอนุรักษ์พลังงานกลของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน

2.2 การออกแบบและพัฒนาชุดการทดลองเรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน

โดยทั่วไปการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตจะนำมาประยุกต์เป็นวิธีการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรูปร่างต่าง ๆ ในการทดลอง เรื่อง โมเมนต์ความเฉื่อย อ้างอิงจากคู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ ฟส180 ปฏิบัติการฟิสิกส์ทั่วไป ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีการศึกษา 2553 (ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2553) ขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ คือ การหาคาบการแกว่งโดยใช้นาฬิกาจับเวลา จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าปริมาณต่าง ๆ ต่อไป เพื่อให้สามารถศึกษาค่าปริมาณทางฟิสิกส์เกี่ยวกับเรื่องดังกล่าวในเชิงลึกและครบถ้วนยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงพัฒนาชุดการทดลอง โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนร่วมกับ แอปพลิเคชันเกี่ยวกับการวัดปริมาณทางฟิสิกส์เป็นเครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูลการทดลอง มีรายละเอียดการพัฒนาชุดการทดลอง ดังนี้

2.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) สมาร์ทโฟน iPhone 4S 1 เครื่อง มวล (m_s) 0.1412 ± 0.0001 กิโลกรัม และขนาด (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ หนา) เท่ากับ $0.0586 \times 0.1152 \times 0.0093 \pm 0.0001$ เมตร³
- 2) นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล

3) แท่งโลหะ 1 แท่ง มวล (m_w) 0.2124 ± 0.0001 กิโลกรัม มีรัศมี (R_w) 0.00208 ± 0.00001 เมตร และความยาว 1.000 ± 0.001 เมตร

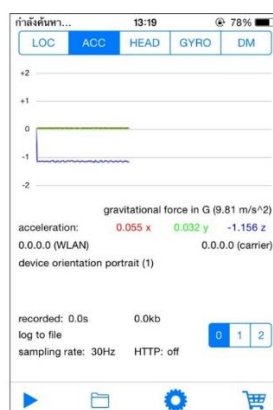
4) จานโลหะกลม 1 อัน มวล (m_d) 4.954 ± 0.001 กิโลกรัม รัศมี (R_d) 0.1268 ± 0.0001 เมตร และความหนา 0.010 ± 0.001 เมตร

5) ทรงกระบอกโลหะตัน 2 อัน มวล (m_c) 2.665 ± 0.001 กิโลกรัม รัศมี (R_c) 0.02860 ± 0.00001 เมตร และความสูง 0.1340 ± 0.00001 เมตร

6) กาว 2 หน้าบาง

2.3 แอปพลิเคชันที่ใช้ในการทดลอง

แอปพลิเคชัน Sensor Log เวอร์ชัน 1.7 (b1.7.8) ปัจจุบันเวอร์ชัน 3.6 พัฒนาขึ้นโดย Bernd Thomas เมื่อปี ค.ศ. 2014 สามารถดาวน์โหลด, kใช้งานได้เฉพาะระบบปฏิบัติการ iOS 13.4 และ watchOS 6.2 ขึ้นไป ผ่านทาง App Store สำหรับ iPhone, iPad, iPod touch และ Apple Watch เท่านั้น ซึ่งเป็นอีกหนึ่งแอปพลิเคชันที่สามารถวัดและบันทึกปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ได้ทั้ง 3 แกน ซึ่งแสดงผลการวัดข้อมูลเป็นกราฟความสัมพันธ์บนหน้าจอ ดังภาพประกอบ 66 และสามารถส่งไฟล์ข้อมูลออกจากสมาร์ตโฟนผ่านทางอีเมล เพื่อนำมาวิเคราะห์ต่อได้ โดยเซ็นเซอร์ที่บรรจุอยู่ในสมาร์ตโฟนสามารถทำงานพร้อมกันและวัดได้อย่างต่อเนื่อง เช่น ใช้เซ็นเซอร์ Accelerometer วัดค่าความเร่งเชิงเส้น ใช้เซ็นเซอร์ Magnetic field วัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ใช้เซ็นเซอร์ไจโรสโคปวัดอัตราเร็วเชิงมุม และที่มีเฉพาะในแอปพลิเคชันนี้คือ ระบบตรวจวัดตำแหน่ง (Device motion service) ที่ผู้วิจัยได้ใช้ในการวัดตำแหน่งเชิงมุมในงานวิจัยครั้งนี้ แต่จะไม่สามารถใช้วัดความส่องสว่างได้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ของแอปเปิล (Apple) ไม่ได้บรรจุเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงไว้ในตัวอุปกรณ์



ภาพประกอบ 66 แอปพลิเคชัน Sensor log

2.4 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การหาปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิวด

1. ประกอบชุดลูกตุ้มชนิดบิวดโดยยึดจานโลหะกลมและแท่งโลหะกับตัวยึดซึ่งเป็นผนังหรือโครงเหล็กที่ไม่เคลื่อนที่ ตามประกอบ 67(ก)

2. ติดสมาร์ทโฟนบนจานโลหะกลมด้วยกาว 2 หน้าบาง โดยวางสมาร์ทโฟนในแนวรัศมีของจานโลหะกลมและหันด้านปุ่มโฮมของสมาร์ทโฟนไว้ใกล้จุดศูนย์กลางการหมุน ตามภาพประกอบ 67(ข)

3. ตั้งค่าการบันทึกข้อมูลของแอปพลิเคชัน Sensorlog โดยกดที่ Configuration และตั้งค่าตามลำดับในภาพประกอบ 68 ดังนี้

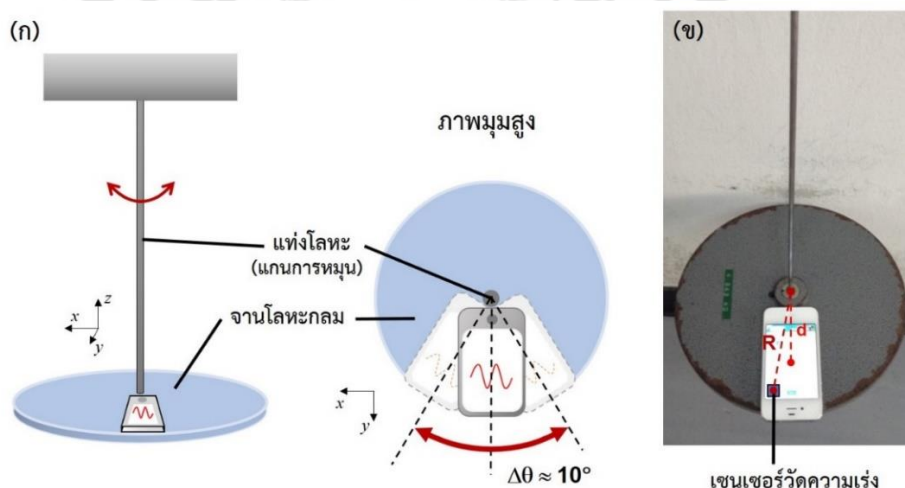
3.1 ปรับ Recording rate (ความถี่ในการบันทึกข้อมูล) เป็น 30 เฮิร์ตซ์

3.2 ใส่ที่อยู่อีเมล เพื่อส่งไฟล์ข้อมูลการทดลองจากสมาร์ทโฟนไปวิเคราะห์ผลต่อในคอมพิวเตอร์

3.3 เปิดการทำงานของระบบตรวจวัดตำแหน่ง หรือ ปุ่ม DM

3.4 เปิดการทำงานของเซนเซอร์ไจโรสโคป หรือ ปุ่ม GYRO

3.5 เปิดการทำงานของเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง หรือ ปุ่ม ACC



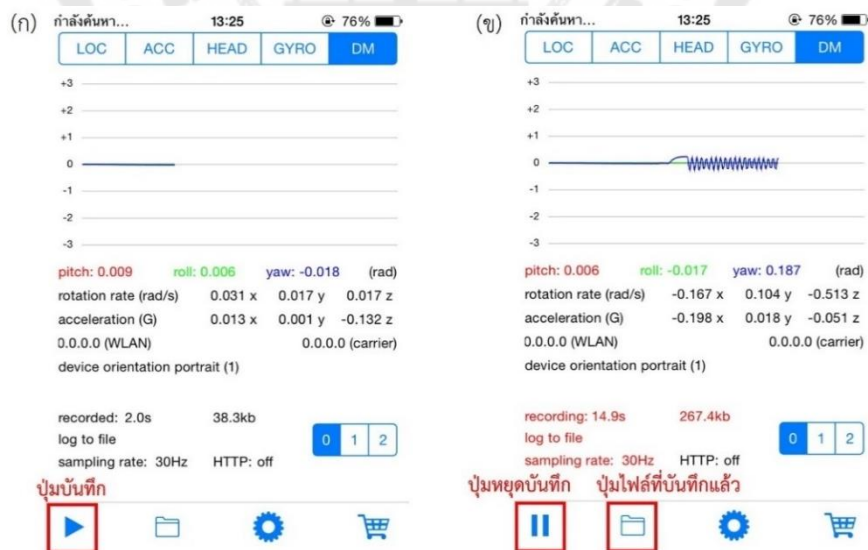
ภาพประกอบ 67 การทดลองตอนที่ 1 การหาปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับ

การแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิวด (ก) ชุดลูกตุ้มชนิดบิวดสำหรับการทดลองตอนที่ 1

(ข) ลักษณะสมาร์ทโฟน (iPhone4s) ที่ติดอยู่บนจานโลหะกลม



ภาพประกอบ 68 การตั้งค่าก่อนการบันทึกข้อมูลการทดลองในโหมด Configuration ของแอปพลิเคชัน Sensorlog



ภาพประกอบ 69 หน้าจอแสดงผลของแอปพลิเคชัน Sensorlog (ก) ขณะยังไม่บันทึกผล (ข) ขณะทำการบันทึกผล

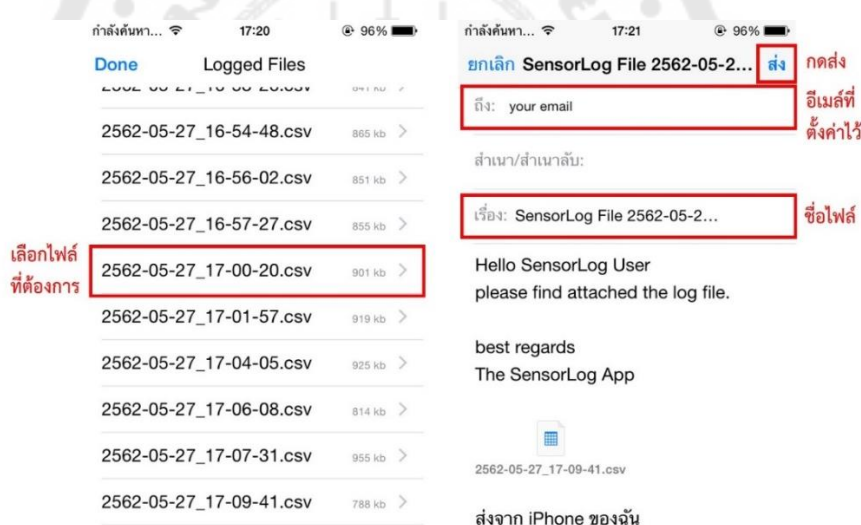
4. กดคำสั่งเริ่มบันทึกข้อมูลในหน้าแสดงผลของแอปพลิเคชัน ตามภาพประกอบ 69(ก) แล้วปิดจานโลหะกลม ประมาณ 10 ± 2 องศาจากตำแหน่งสมดุล ค้างไว้ 2-3 วินาทีแล้วปล่อยให้ลูกตุ้มชนิดบิตเคลื่อนที่กลับไปกลับมา จำนวน 30 รอบ

5. ใช้นาฬิกาจับเวลาจับเวลาการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต จำนวน 20-30 รอบ โดยเริ่มจับเวลาเมื่อลูกตุ้มชนิดบิตเคลื่อนที่กลับไปมาแล้ว 5-6 รอบ

6. เมื่อลูกตุ้มชนิดบิตเคลื่อนที่ครบ 30 รอบแล้ว กดคำสั่งหยุดการบันทึกข้อมูลในหน้าแสดงผลของแอปพลิเคชัน ตามภาพประกอบ 69(ข)

7. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 4-6 จนครบ 3 ครั้ง

8. ส่งไฟล์ข้อมูลการทดลองออกจากสมาร์ทโฟนเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการทดลองผ่านอีเมล โดยกดปุ่มไฟล์ที่บันทึกแล้ว จากนั้นเลือกไฟล์ที่ต้องการ ตั้งชื่อหัวเรื่องอีเมล แล้วกดส่งตามภาพประกอบ 70



ภาพประกอบ 70 การส่งไฟล์ข้อมูลการทดลองออกจากสมาร์ทโฟน iPhone4s ผ่านแอปพลิเคชัน Sensorlog

ตอนที่ 2 การหาค่าคงตัวในการบิตของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต

1. เพิ่มเติมต่อจากตอนที่ 1 เขียนสเกลทุก ๆ 0.005 ± 0.001 เมตร จากตำแหน่งจุดศูนย์กลางการหมุนไปจนถึงขอบของจานโลหะกลม ในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางทั้ง 2 ฝั่ง เพื่อเป็นตำแหน่งวางทรงกระบอกโลหะต้น ในการทดลองนี้เขียนสเกลอยู่ในช่วง $0.000 - 0.050$ เมตร

1. ตำแหน่งเชิงมุม (Angular position; θ) ได้จากระบบตรวจวัดตำแหน่งเชิงมุมในแนวแกน yaw ในหน่วย เรเดียน

2. ความเร็วเชิงมุม (Angular velocity; ω) ได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป ในแนวแกน z ในหน่วย เรเดียนต่อวินาที

3. ความเร่งเชิงมุม (Angular acceleration; α) ได้จากเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง ในแนวแกน x ซึ่งข้อมูลที่วัดได้เป็นค่าความเร่งเชิงเส้น (Acceleration; a) ของการเคลื่อนที่ ในหน่วย g (ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก) จึงต้องปรับข้อมูลให้เหมาะสมที่จะใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป โดยใช้สมการ

$$\alpha = \frac{a \times g}{R} = \frac{a \times 9.81}{0.109 \pm 0.001} \quad (3.3)$$

เมื่อ R คือ ระยะห่างจากตำแหน่งของเซนเซอร์ความเร่งถึงจุดศูนย์กลางการหมุน ตามภาพประกอบ 71 มีค่าเท่ากับ 0.109 ± 0.001 เมตร

โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองจะแบ่งเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่

2.5.1 การศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงมุมกับเวลา ความเร็วเชิงมุมกับเวลาและความเร่งเชิงมุมกับเวลา

2.5.2 การหาค่าคงตัวในการบิดของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด

2.5.3 การศึกษากฎอนุรักษ์พลังงานกลของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด

2.5.1 การศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงมุมกับเวลา ความเร็วเชิงมุมกับเวลาและความเร่งเชิงมุมกับเวลา

1. คำนวณหาคาบ (T_{w1}) ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดจากการใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล โดยใช้ข้อมูลเวลาครบ 20 รอบ ในข้อ 5 ของการทดลองชุดที่ 2 ตอนที่ 1

2. เลือกชุดข้อมูลการทดลอง ได้แก่ ตำแหน่งเชิงมุม ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเชิงมุมกับเวลา จากการวัดด้วยเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนในข้อ 4 ของการทดลองชุดที่ 2 ตอนที่ 1 ที่สอดคล้องกับแกนที่ลูกตุ้มแกว่งจริง จากนั้นเลือกข้อมูลของแต่ละค่าปริมาณ จำนวน 20 คาบจากข้อมูลทั้งหมด โดยเลือกใช้ข้อมูลหลังจากคาบที่ 5 เป็นต้นไปและต้องเป็นข้อมูล ณ จุดเวลาใด ๆ t_n เดียวกันทั้ง 3 ปริมาณ

3. นำข้อมูลการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงมุมกับเวลา ความเร็วเชิงมุมกับเวลาและความเร่งเชิงมุมกับเวลา จะได้กราฟรูปโคไซน์ และวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ ตามสมการ (2.16), (2.17) และ (2.18) เพื่อหาค่าคาบ (T_{s1}), ความถี่เชิงมุม (ω_0), การกระตุ้นเชิงมุมสูงสุด (θ_m), ความเร็วเชิงมุมสูงสุด (ω_m), ความเร่งเชิงมุมสูงสุด (α_m) และเฟสเริ่มต้น (ϕ_θ , ϕ_ω , ϕ_α) ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต

4. เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอลกับการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน

2.5.2 การหาค่าคงตัวในการบิตของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต

การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาค่าคงตัวในการบิต (K) ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตในงานวิจัยนี้ แบ่งเป็น 2 วิธีตามวิธีการทดลอง ดังนี้

2.5.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากวิธีการทดลอง ตอนที่ 1

1. คำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยรวมของชุดลูกตุ้มชนิดบิต ซึ่งประกอบด้วย จานโลหะกลม แท่งโลหะและสมาร์ทโฟนที่มีแกนหมุนร่วมกัน ตามภาพประกอบ 67(ข) โดยโมเมนต์ความเฉื่อยของแต่ละวัตถุหาได้จากสมการ (2.36), (2.37) และ (2.38) ตามลำดับ จะได้โมเมนต์ความเฉื่อยรวม (I_{Total1}) เท่ากับ

$$I_{Total1} = I_d + I_w + I_s = 0.0409 \pm 0.0001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.4)$$

2. คำนวณค่าคงตัวในการบิตโดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอล (κ_{w1}) จากคาบ (T_{w1}) ที่คำนวณได้จากการจับเวลาการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต โดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอล จำนวน 20 รอบในหัวข้อ 2.5.1 ข้อ 1 ตามสมการ (2.24) เมื่อ $I = I_{Total1}$

3. คำนวณค่าคงตัวในการบิตโดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน (κ_{s1}) โดยใช้คาบ (T_{s1}) ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงมุมกับเวลา ที่วัดด้วยเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน ในหัวข้อ 2.5.1 ข้อ 3 ตามสมการ (2.24) เมื่อ $I = I_{Total1}$

4. เปรียบเทียบค่าคงตัวในการบิตของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตที่ได้จากการใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอลกับการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน

2.5.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากวิธีการทดลอง ตอนที่ 2

ชุดลูกตุ้มชนิดปิดในการทดลอง ตอนที่ 2 ใช้ชุดอุปกรณ์เดิมจากการทดลองตอนที่ 1 และเพิ่มทรงกระบอกโลหะตัน 2 อัน ตามภาพประกอบ 71(ข) เมื่อวางทรงกระบอกโลหะตันทั้ง 2 อัน ห่างจากจุดหมุนมากขึ้น ระยะ r เพิ่มขึ้น ทำให้โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของชุดอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้คาบการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จากสมการ (2.24) พบว่า โมเมนต์ความเฉื่อยรวมมีค่าแปรผันตรงกับคาบยกกำลังสอง และสามารถหาค่าคงตัวในการปิดได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยรวมกับคาบยกกำลังสอง ซึ่งเป็นกราฟเส้นตรง ดังสมการ

$$\kappa = \frac{4\pi^2}{slope} \quad (3.5)$$

มีรายละเอียดการวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังนี้

1. คำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกโลหะตัน เมื่อโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกโลหะตัน (I_c) หาได้จากสมการ (2.39) เมื่อ r คือ ระยะห่างจากจุดหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวลของทรงกระบอกโลหะตันที่กำหนดค่าไว้ตามวิธีการทดลองชุดที่ 2 ตอนที่ 2 มีค่าตั้งแต่ 0.000-0.050 (± 0.001) เมตร
2. คำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยรวม (I_{Total2}) โดยเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกโลหะตัน 2 อัน ในสมการ (3.4) ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของชุดลูกตุ้มชนิดปิดในการทดลองตอนที่ 2 เท่ากับ

$$I_{Total2} = I_d + I_w + I_s + 2I_c$$

$$I_{Total2} = 0.0565 \pm 0.0004 - 0.0965 \pm 0.0007 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (3.6)$$

3. คำนวณคาบเฉลี่ย (T_{w2}) ที่คำนวณได้จากการจับเวลาการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิด เมื่อเพิ่มระยะห่างจากจุดศูนย์กลางการหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวลของทรงกระบอกโลหะตัน (r) ทั้ง 2 อัน ครั้งละ 0.005 เมตรจนถึง 0.05 เมตร โดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอล จำนวน 20 รอบ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

4. คำนวณค่าคาบเฉลี่ย (T_{s2}) จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อเพิ่มระยะห่างจากจุดศูนย์กลางการหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวลของทรงกระบอกโลหะตัน (r) ทั้ง 2 อัน ครั้งละ 0.005 เมตรจนถึง 0.05 เมตร ที่วัดด้วยเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน จำนวน 20 รอบ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

5. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างคาบยกกำลังสอง (T^2) กับโมเมนต์ความเฉื่อยรวม (I_{Total2}) ที่คำนวณได้ในข้อ 2

6. หาความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างคาบยกกำลังสอง (T^2) กับโมเมนต์ความเฉื่อยรวม (I_{Total2}) เพื่อคำนวณค่าคงตัวในการบิด โดยการใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล (κ_{w2}) และการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน (κ_{s2}) เป็นเครื่องมือวัด ตามสมการ (3.5)

7. เปรียบเทียบค่าคงตัวในการบิดของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดที่ได้จากการใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัลกับการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน และเปรียบเทียบผลการทดลองในหัวข้อ 2.5.2.1 และ 2.5.2.2

2.5.3 การศึกษาคุณสมบัติพลังงานกลในการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด

1. เลือกข้อมูลการความเร็วเชิงมุม (ω) และกระจัดเชิงมุม (θ) กับเวลาจากหัวข้อ 2.5.1 ข้อ 2 จำนวน 4 คาบ เพื่อคำนวณหาพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด ตามสมการ (2.25) และ (2.27) ตามลำดับ เมื่อ $I = I_{Total1}$ และ $\kappa = \kappa_{s1}$

2. คำนวณหาพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดตามสมการ (2.26) และ (2.28) ตามลำดับ โดยใช้ข้อมูลเวลา (t_n) จากข้อมูลที่เลือกมา 4 คาบในข้อ 1, ค่าคงตัวในการบิด (κ_{s1}) ที่คำนวณได้จากการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนในการทดลองตอนที่ 1, ความถี่เชิงมุม (ω_0) และขนาดการกระจัดเชิงมุมสูงสุด (θ_m) ของจากกราฟการกระจัดเชิงมุมกับเวลาแต่ละครั้งที่ทดลองซ้ำ

3. คำนวณหาพลังงานกลรวมของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดของข้อ 1 และ 2 ตามสมการ (2.29) และ (2.30) และเปรียบเทียบกับค่าคำนวณตามสมการ (2.31)

4. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์และพลังงานกลรวมของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดเทียบกับเวลาและเทียบกับการกระจัดเชิงมุม

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองที่ได้จากการทดลองฟิสิกส์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น เรื่อง การเคลื่อนที่ของวัตถุ 2 รูปแบบ ได้แก่ การเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวและการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิวด โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน ซึ่งได้นำเสนอผลการศึกษาทั้ง 2 เรื่อง ตามลำดับ ดังหัวข้อต่อไปนี้

1. ชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว

1.1 การหาช่วงเวลาที่สั้นที่สุดที่เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนสามารถวัดและแยกความต่างของความส่องสว่างจากแสงกระพริบได้

1.2 การหาอัตราเร็วเฉลี่ยของวัตถุที่เคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลา

1.3 การหาอัตราเร่งเฉลี่ยของวัตถุที่เคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา

2. ชุดการทดลองที่ 2: เรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิวด

2.1 การศึกษาปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิวด

2.1.1 การหาปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิวด โดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล

2.1.2 การหาปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิวด โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน

2.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคาบการแกว่งกับโมเมนต์ความเฉื่อยรวมและหาค่าคงตัวในการบิดของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิวด

2.3 การศึกษากฎอนุรักษ์พลังงานกลในการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิวด

1. ชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว

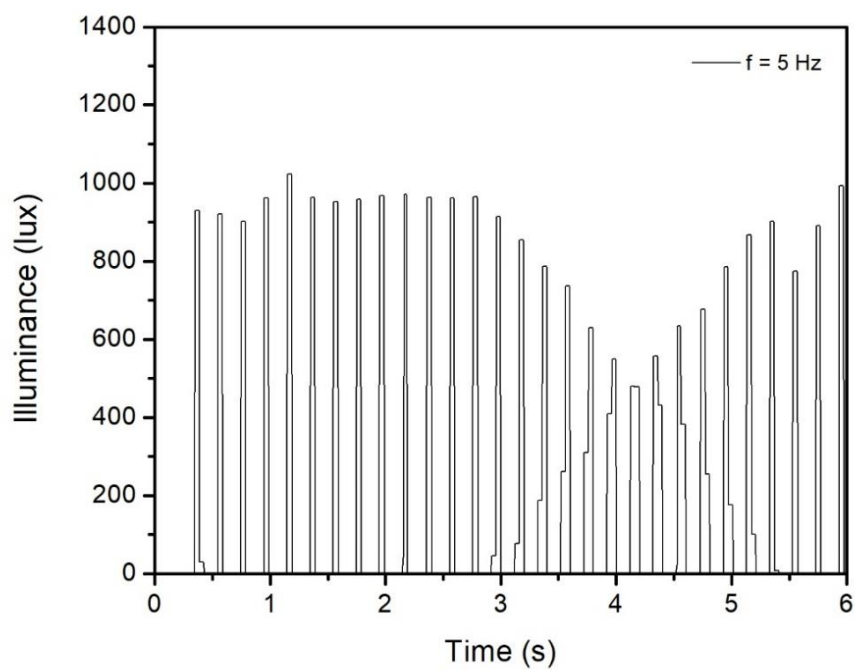
1.1 การหาช่วงเวลาที่สั้นที่สุดที่เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนสามารถวัดและแยกความต่างของความส่องสว่างจากแสงกระพริบได้

ผู้วิจัยทำการวัดความส่องสว่างของแสงกระพริบจากแฟลชของสมาร์ทโฟน iPhone 4S โดยเก็บข้อมูล เมื่อความถี่ในการกระพริบเป็น 2, 5, 8, 9 และ 10 เฮิร์ตซ์ ซึ่งคิดเป็นคาบในการกระพริบ ได้ดังตาราง 1

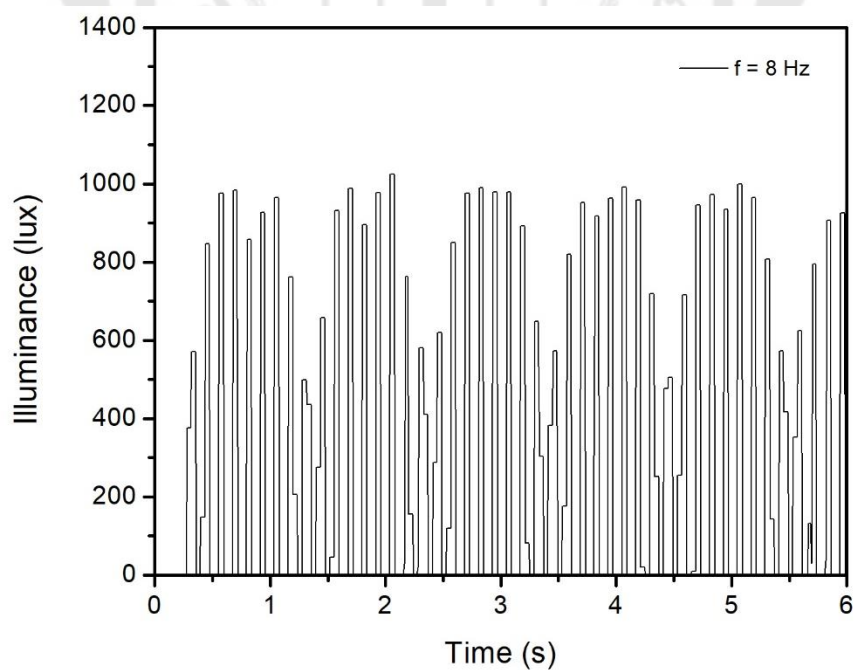
ตาราง 1 แสดงค่าความถี่และคาบในการกระพริบจากแฟลชของสมาร์ทโฟน

ความถี่ในการกระพริบของแฟลช (เฮิร์ตซ์)	คาบในการกระพริบของแฟลช (วินาที)
2.00 ± 0.01	0.500 ± 0.002
5.00 ± 0.01	0.200 ± 0.002
8.00 ± 0.01	0.125 ± 0.002
9.00 ± 0.01	0.111 ± 0.002
10.00 ± 0.01	0.100 ± 0.002

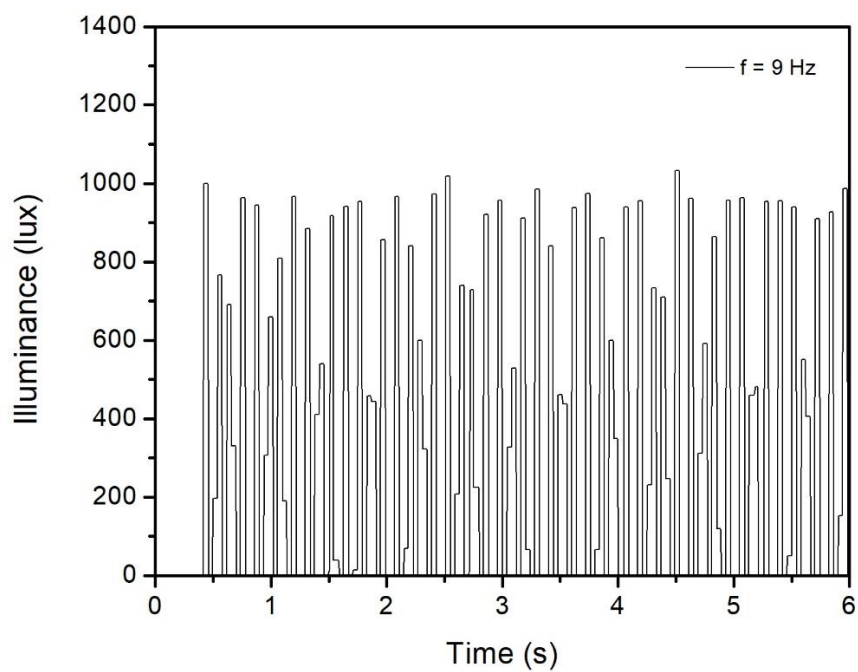
โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 เป็นเครื่องมือวัดความส่องสว่างจากการกระพริบของแฟลช จำนวน 21 รอบ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลาในลักษณะเป็นแท่งซึ่งแทนการกระพริบแต่ละครั้ง แสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลา เมื่อใช้ค่าคาบการกระพริบต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 72 ถึง 76 ซึ่งจะเห็นว่าตั้งแต่คาบในการกระพริบเท่ากับ 0.125 ± 0.002 วินาทีขึ้นไป ลักษณะของแท่งบนกราฟมีความไม่เป็นระเบียบและระยะห่างของแต่ละแท่งค่อนข้างไม่เท่ากัน โดยช่วงเวลาในการกระพริบของแฟลชจาก iPhone 4S (แหล่งกำเนิดแสง) แบบครั้งต่อครั้ง จำนวน 20 ช่วง ในทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ที่วัดได้จากเซนเซอร์ตรวจจับแสงของ Samsung Galaxy S4 (เครื่องมือวัด) คำนวณตามสมการ (3.1) จากเวลา ณ ความส่องสว่างสูงสุดของแต่ละแท่งบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลา ได้ผลการคำนวณดังภาคผนวก ก



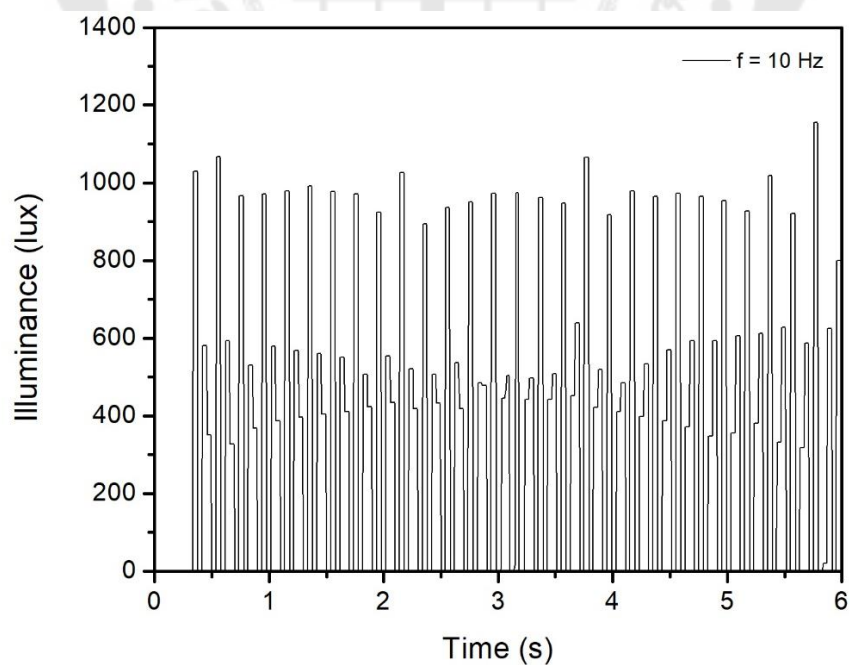
ภาพประกอบ 73 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลา
เมื่อคาบในการกระพริบเท่ากับ 0.200 ± 0.002 วินาที



ภาพประกอบ 74 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลา
เมื่อคาบในการกระพริบเท่ากับ 0.125 ± 0.002 วินาที



ภาพประกอบ 75 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลา
เมื่อคาบในการกระพริบเท่ากับ 0.111 ± 0.002 วินาที

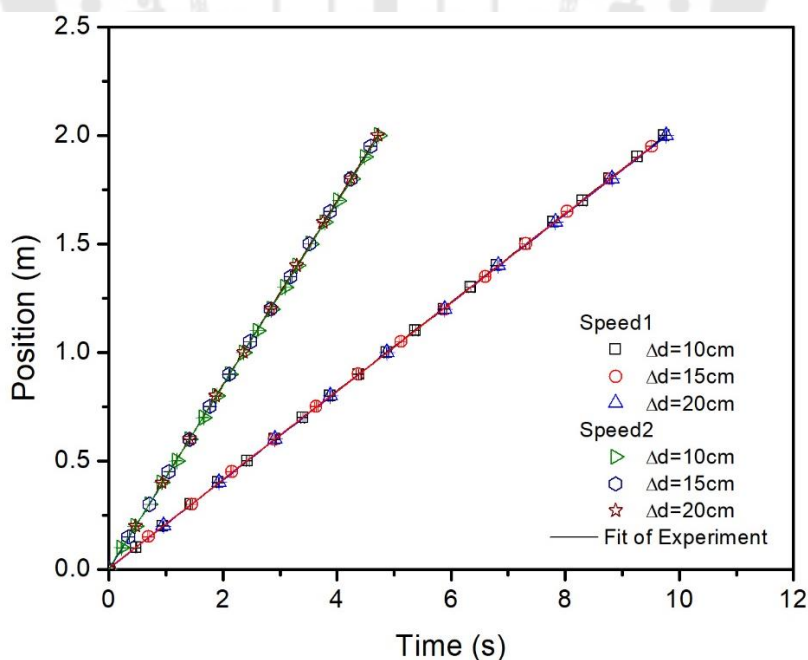


ภาพประกอบ 76 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับเวลา
เมื่อคาบในการกระพริบเท่ากับ 0.100 ± 0.002 วินาที

1.2 การหาอัตราเร็วเฉลี่ยของวัตถุที่เคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลา

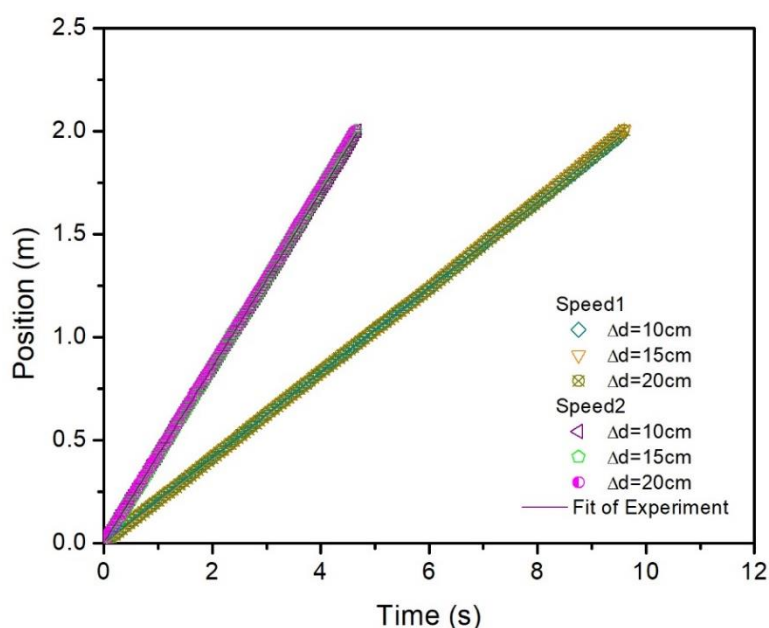
อัตราเร็วเฉลี่ย (v_{avg}) ของรถไฟของเล่นแบบไสล่ถ่านที่เคลื่อนที่บนรางตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวต่างกัน 2 ระดับ กำหนดให้เป็นระดับ 1 และระดับ 2 ตามลำดับ มีค่าเท่ากับความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง (Position) กับเวลา (Time) ซึ่งได้ข้อมูลการทดลองจากการทดลองตอนที่ 2 ของชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว โดยใช้วิธีการวัดและวิเคราะห์ 2 วิธีการเปรียบเทียบกัน ได้แก่ 1) การใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน และ 2) การใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker ได้ผลการศึกษาดังนี้

รถไฟของเล่นแบบไสล่ถ่านที่ติดตั้งสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 เคลื่อนที่บนรางตรงเป็นระยะทาง 2.000 ± 0.001 เมตร ด้วยอัตราเร็วคงตัวระดับ 1 และระดับ 2 ตามลำดับ ผ่านชุดแหล่งกำเนิดแสงที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นจากหลอดไฟ LED ซึ่งแทนตำแหน่งของรถไฟของเล่นเป็นช่วง ๆ โดยเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED (Δd) เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 2 ระดับ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน แสดงดังภาพประกอบ 77



ภาพประกอบ 77 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาที่รถไฟของเล่นเคลื่อนที่บนรางตรงด้วยอัตราเร็วระดับ 1 และระดับ 2 โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน

ขณะทำการทดลองโดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน ผู้วิจัยได้ทำการบันทึกวิดีโอการเคลื่อนที่ของรถไฟของเล่นไปพร้อม ๆ กันด้วย เมื่อนำวิดีโอมาวิเคราะห์การเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม Tracker จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาแสดงดังภาพประกอบต่อไปนี้



ภาพประกอบ 78 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาที่รถไฟของเล่นเคลื่อนที่บนรางตรง ด้วยอัตราเร็วระดับ 1 และระดับ 2 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker

จะเห็นว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาที่รถไฟของเล่นเคลื่อนที่บนรางตรงด้วยอัตราเร็วระดับ 1 และ 2 เมื่อเปลี่ยน Δd เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร ในการทดลองซ้ำระยะห่างละ 5 ครั้ง ด้วยวิธีการวัดและวิเคราะห์ผลการทดลองทั้ง 2 วิธีการ เป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งเส้นกราฟเรียงตัวในแนวเดียวกัน ข้อมูลบางคู่อันดับและเส้นแสดงความชันทับกันอย่างชัดเจน แสดงถึงความชันของแต่ละเส้นกราฟที่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอัตราเร็วเฉลี่ยของรถไฟของเล่นสามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลา ตามสมการ (2.8) ซึ่งสอดคล้องกับสมการเชิงเส้นสองตัวแปร $y = mx + c$ เมื่อความชันกราฟ (m) = อัตราเร็วเฉลี่ย (v_{avg}) ได้ค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของรถไฟของเล่นจากการใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนและการใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker เปรียบเทียบกัน แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 2 อัตราเร็วเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลา โดยการใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนเปรียบเทียบกับการใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker

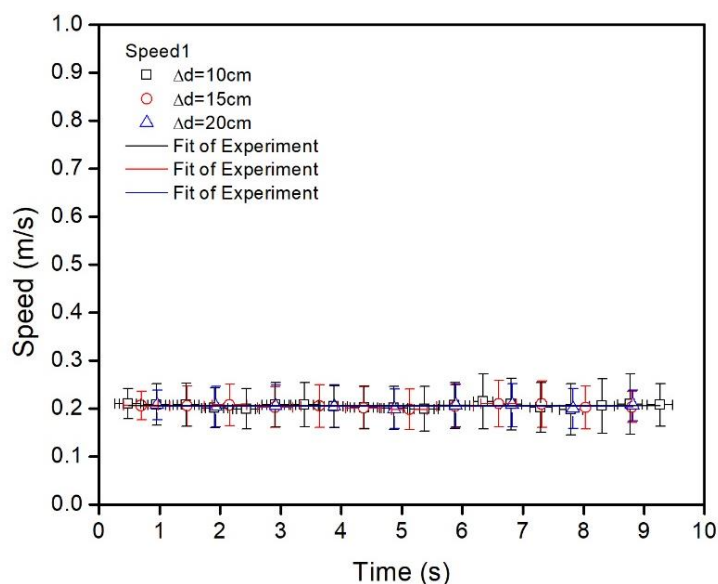
ระยะห่าง หลอดไฟ	อัตราเร็วเฉลี่ยของรถไฟของเล่น (เมตรต่อวินาที)			
	ระดับ 1		ระดับ 2	
LED (Δd) (เซนติเมตร)	เซนเซอร์ตรวจจับ แสงของสมาร์ทโฟน	โปรแกรม Tracker	เซนเซอร์ตรวจจับ แสงของสมาร์ทโฟน	โปรแกรม Tracker
10	0.205 ± 0.002	0.208 ± 0.002	0.422 ± 0.002	0.429 ± 0.001
15	0.204 ± 0.001	0.209 ± 0.002	0.425 ± 0.001	0.431 ± 0.002
20	0.204 ± 0.001	0.209 ± 0.002	0.424 ± 0.003	0.431 ± 0.002

ผลการศึกษาพบว่า อัตราเร็วเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่หาได้จากการใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED (Δd) เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญทั้งอัตราเร็วระดับ 1 และ 2 ในส่วนของการใช้เทคนิควิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker พบว่า อัตราเร็วเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้ง 2 ระดับเช่นกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วเฉลี่ยของรถไฟของเล่น ในแต่ละระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED (Δd) โดยใช้วิธีการวัดและวิเคราะห์ 2 วิธีการ พบว่า อัตราเร็วเฉลี่ยทั้งระดับ 1 และระดับ 2 มีค่าต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยจากเทคนิควิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker มีค่ามากกว่าอัตราเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน

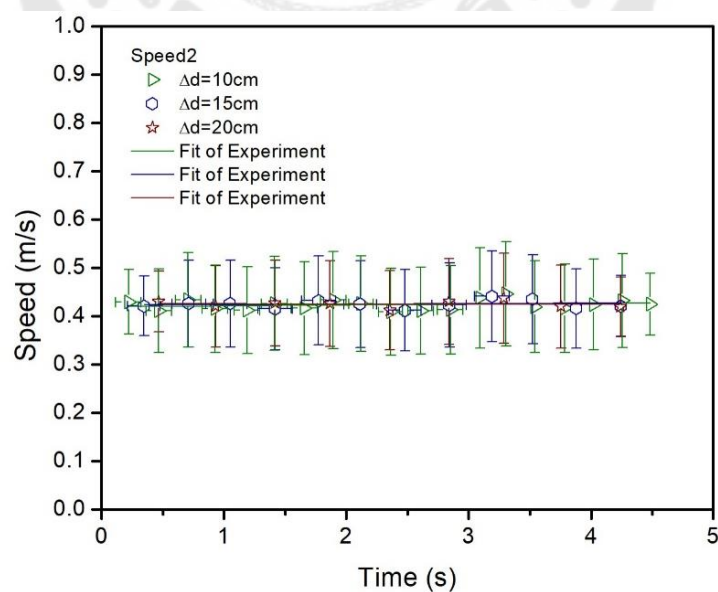
1.3 การหาอัตราเร่งเฉลี่ยของวัตถุที่เคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา

อัตราเร่งเฉลี่ยในงานวิจัยครั้งนี้ หาจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา ซึ่งอัตราเร็วในที่นี้ หมายถึง อัตราเร็วขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous speed; v_n) ณ เวลาใด ๆ ของการเคลื่อนที่ของรถไฟของเล่น โดยการคำนวณอัตราเร็วเฉลี่ยในช่วงเวลา สั้น ๆ ถือว่าเป็นอัตราเร็วขณะใดขณะหนึ่ง ณ จุดกึ่งกลางของช่วงเวลานั้น ๆ นั้น ตามสมการ (3.2) โดยใช้ข้อมูลตำแหน่งกับเวลาที่วิเคราะห์ได้ในหัวข้อ 1.2 แสดงดังภาคผนวก ข และได้อัตราเร็วขณะใดขณะหนึ่ง ณ เวลาใด ๆ จากวิธีการวัดโดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน ดังภาคผนวก ค

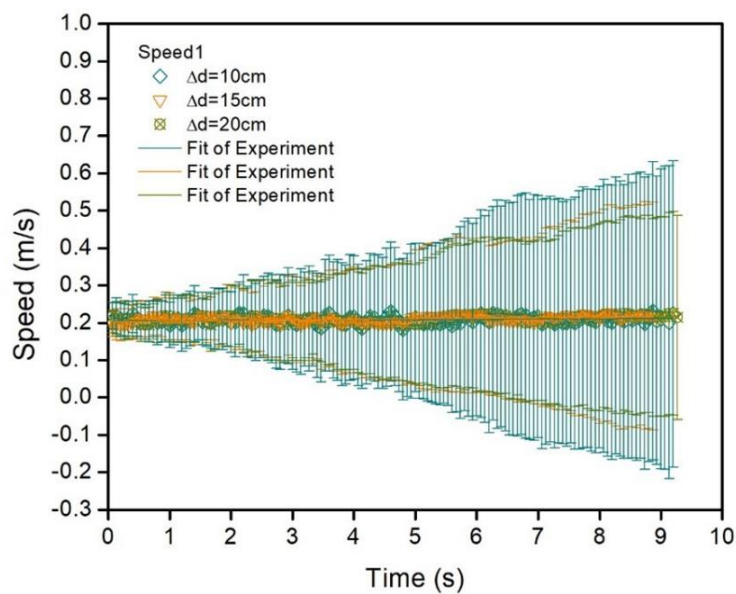
และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัวทั้ง 2 ระดับ เมื่อระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร แสดงดังภาพประกอบต่อไปนี้



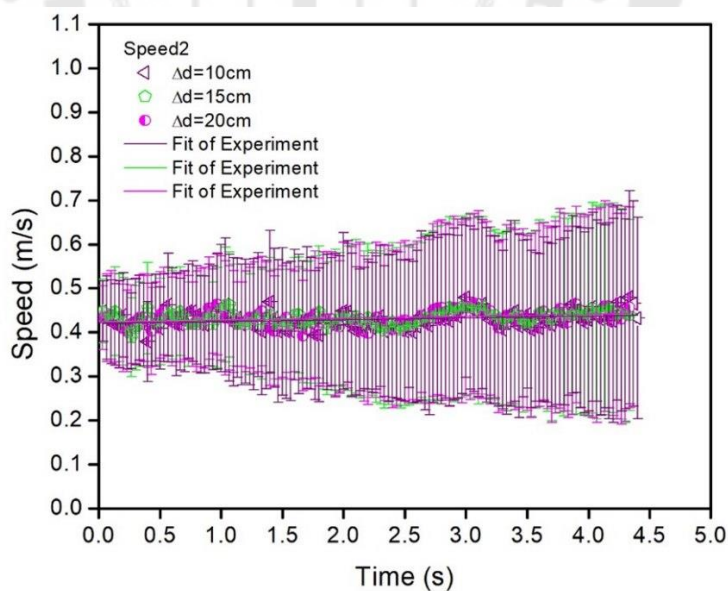
ภาพประกอบ 79 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่บนรางตรงด้วยอัตราเร็วระดับ 1 โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน



ภาพประกอบ 80 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่บนรางตรงด้วยอัตราเร็วระดับ 2 โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน



ภาพประกอบ 81 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่บนรางตรงด้วยอัตราเร็วระดับ 1 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker



ภาพประกอบ 82 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่บนรางตรงด้วยอัตราเร็วระดับ 2 โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker

จากภาพประกอบ 79 และ 80 จะเห็นว่า อัตราเร็วขณะใดขณะหนึ่งที่ได้จากข้อมูล ตำแหน่งกับเวลาของการเคลื่อนที่ของรถไฟของเล่นด้วยอัตราเร็วคงตัว ระดับ 1 และระดับ 2 โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED (Δd) เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร ทำให้ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาเป็นกราฟเส้นตรง 3 เส้นในแนวขนานแกน x ที่สอดคล้องกัน และความไม่แน่นอนของข้อมูล เมื่อ Δd เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร มีค่าใกล้เคียงกัน ในส่วนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาของรถไฟของเล่นที่ได้จากการใช้เทคนิคการวิเคราะห์หิดิโด้ด้วยโปรแกรม Tracker ตามภาพประกอบ 81 และ 82 เป็นกราฟเส้นตรง 3 เส้นทับกันในแนวขนานแกน x เช่นกัน โดยความไม่แน่นอนของข้อมูลมีค่ามากกว่าวิธีการวัดโดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนอย่างมาก และความไม่แน่นอนของอัตราเร็วขณะใดขณะหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

อัตราเร่งเฉลี่ยของรถไฟของเล่นสามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา จากภาพประกอบ 79 ถึง 82 ตามสมการ (2.9) ซึ่งสอดคล้องกับสมการเชิงเส้นสองตัวแปร $y = mx + c$ เมื่อความชันกราฟ (m) = อัตราเร่งเฉลี่ย (a_{avg}) โดยค่าอัตราเร่งเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัว ระดับ 1 และระดับ 2 จากการใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนและเทคนิคการวิเคราะห์หิดิโด้ด้วยโปรแกรม Tracker เปรียบเทียบกัน แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 3 อัตราเร่งเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา โดยการใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนเปรียบเทียบกับเทคนิคการวิเคราะห์หิดิโด้ด้วยโปรแกรม Tracker

ระยะห่าง หลอดไฟ	อัตราเร่งเฉลี่ยของรถไฟของเล่น (เมตรต่อวินาที ²)			
	ระดับ 1		ระดับ 2	
LED (Δd) (เซนติเมตร)	เซนเซอร์ตรวจจับ แสงของสมาร์ทโฟน	โปรแกรม Tracker	เซนเซอร์ตรวจจับ แสงของสมาร์ทโฟน	โปรแกรม Tracker
10	0.000 ± 0.009	0.000 ± 0.050	0.002 ± 0.032	-0.001 ± 0.127
15	0.000 ± 0.008	-0.001 ± 0.043	0.001 ± 0.033	-0.001 ± 0.108
20	0.000 ± 0.009	0.000 ± 0.039	0.000 ± 0.035	0.000 ± 0.117

จากตาราง 3 พบว่า อัตราเร่งเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัว ระดับ 1 และระดับ 2 ที่ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED (Δd) เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร โดยเปรียบเทียบในแต่ละวิธีการวัดและวิเคราะห์ข้อมูล มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าอัตราเร่งเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่ได้จากการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนกับเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker พบว่า อัตราเร่งเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัว ทั้งระดับ 1 และระดับ 2 จาก 2 วิธีการมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน และทุกกรณีมีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราเร่งของวัตถุ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัวตามทฤษฎี ซึ่งมีค่าเท่ากับ ศูนย์ เมตรต่อวินาที²

2. ชุดการทดลองที่ 2: เรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต

2.1 การศึกษาปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต

ปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต ซึ่งประกอบด้วยจานโลหะกลม แท่งโลหะและสมาร์ทโฟน iPhone 4s ถูกวัดและบันทึกผลการทดลองด้วยวิธีการ 2 วิธี ได้แก่ การวัดและบันทึกข้อมูลโดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัลและการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนที่ผู้วิจัยพัฒนาวิธีการขึ้น ได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

2.1.1 การหาปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต โดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล

ผู้วิจัยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล จับเวลาการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตครบ 20 รอบ พร้อม ๆ กับการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน โดยทดลองจำนวน 3 ครั้ง ได้ผลการทดลองแสดงดังตาราง 4 พบว่า ค่าเวลาเฉลี่ยที่ลูกตุ้มชนิดบิต ซึ่งประกอบด้วยจานโลหะกลม แท่งโลหะและสมาร์ทโฟน iPhone4s แกว่งกลับไปกลับมาครบ 20 รอบ มีค่าเท่ากับ 0.87155 ± 0.00449 วินาที และนำไปคำนวณค่าความถี่เชิงมุม ได้เท่ากับ 7.2092 ± 0.0371 เรเดียนต่อวินาที

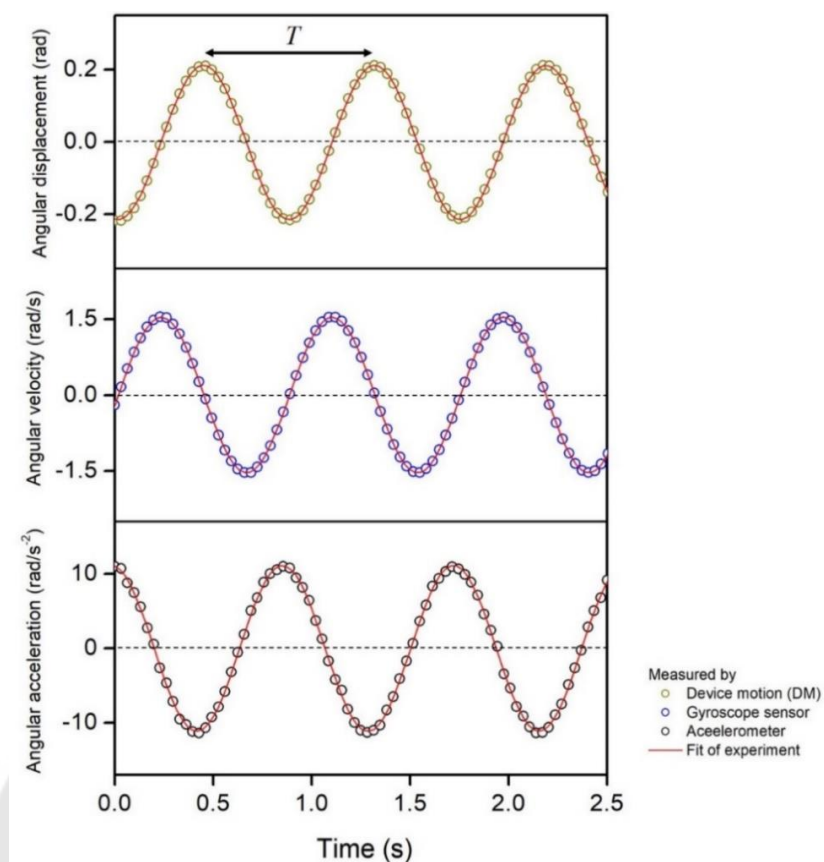
ตาราง 4 เวลาที่ลูกตุ้มชนิดบิดแกว่งครบ 20 รอบ โดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอล

เวลาครบ 20 รอบ (วินาที)				คาบ (วินาที)	ความถี่เชิงมุม (เรเดียนต่อ วินาที)
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย		
17.369	17.316	17.608	17.431	0.87155	7.2092
± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.090	± 0.00449	± 0.0371

2.1.2 การหาปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน

ค่าการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมเทียบกับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดที่บิดไปเป็นมุมน้อย ๆ ประมาณ 10 ± 2 องศาแล้วปล่อย ตามวิธีการทดลองตอนที่ 1 จะใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน iPhone 4s จำนวน 3 ชนิดพร้อมกันในการวัดและบันทึกผลการทดลองอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 20 คาบและทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นเลือกและจัดการข้อมูลการทดลอง แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลา เพื่อวิเคราะห์กราฟและคำนวณหาค่าคาบ (T), ความถี่เชิงมุม (ω_0), ระยะทางเชิงมุมสูงสุด (θ_m), ความเร็วเชิงมุมสูงสุด (ω_m), ความเร่งเชิงมุมสูงสุด (α_m) และเฟสเริ่มต้น ($\phi_\theta, \phi_\omega, \phi_\alpha$) ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด ได้ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 83 ถึง 85 และตาราง 5 ถึง 7 ตามลำดับ และผลการวิเคราะห์เป็นดังนี้

จากภาพประกอบ 83, 84 และ 85 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดที่ได้จากการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน 3 ชนิดทำงานพร้อมกัน โดยกราฟที่ 1 (บน) เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา วัดและบันทึกผลด้วยระบบตรวจวัดตำแหน่ง (DM) ในแนวแกน yaw ในส่วนของกราฟที่ 2 (กลาง) เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับเวลา วัดและบันทึกผลด้วยเซนเซอร์ไจโรสโคป ในแนวแกน z และกราฟที่ 3 (ล่าง) เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงมุมกับเวลา วัดและบันทึกผลด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง ในแนวแกน x และแสดงผลการวิเคราะห์กราฟ ดังตาราง 5, 6 และ 7 ตามลำดับ หากนำข้อมูลการทดลองจากการทดลองทั้ง 3 ครั้ง มาเขียนรวมกันจะได้กราฟความสัมพันธ์ ตามภาพประกอบ 86

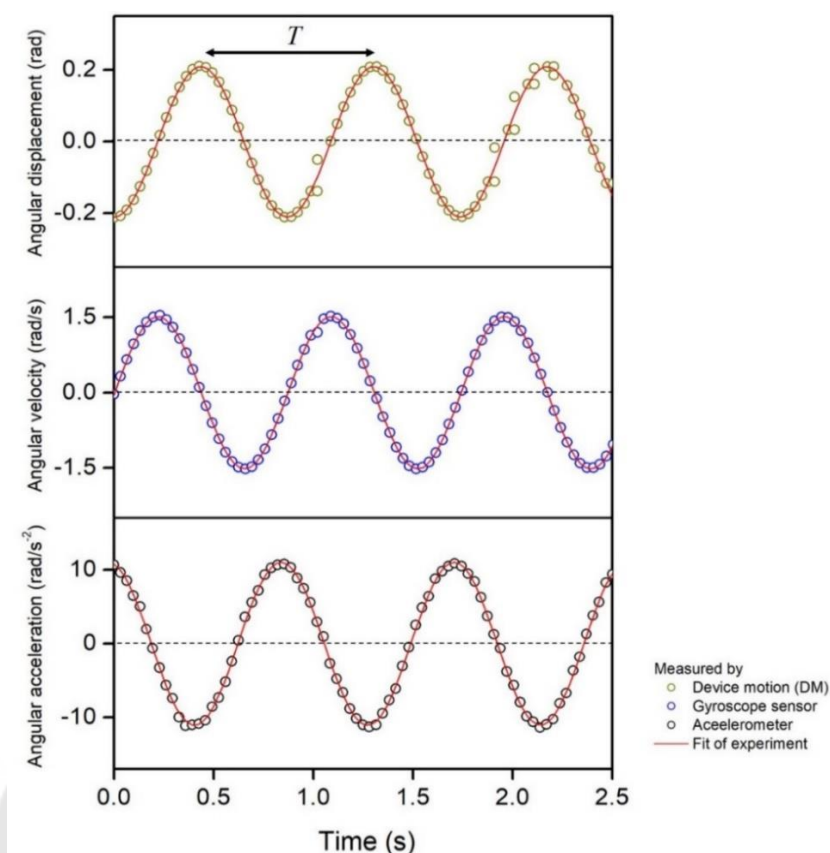


ภาพประกอบ 83 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลา ของแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต ในการทดลองครั้งที่ 1 จำนวน 1 คาบ

ตาราง 5 ปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานเกี่ยวกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตในการทดลองครั้งที่ 1

ปริมาณทางฟิสิกส์	กราฟการกระจัดเชิงมุม - เวลา	กราฟความเร็วเชิงมุม - เวลา	กราฟความเร่งเชิงมุม - เวลา
T (s)	0.86858 ± 0.00010	0.86858 ± 0.00003	0.86855 ± 0.00005
ω_0 (rad/s)	7.2338 ± 0.0008	7.2339 ± 0.0003	7.2341 ± 0.0003
θ_m (rad)	0.21240 ± 0.00084 *	-	-
ω_m (rad/s)	1.5365 ± 0.0061	1.5328 ± 0.0020 *	-
α_m (rad/s ²)	11.114 ± 0.044	-	11.119 ± 0.021 *
ϕ (degree)	267.29 ± 0.43	178.38 ± 0.14	73.30 ± 0.22

หมายเหตุ * หมายถึง ค่าแอมพลิจูด (A) ของกราฟแต่ละกราฟ

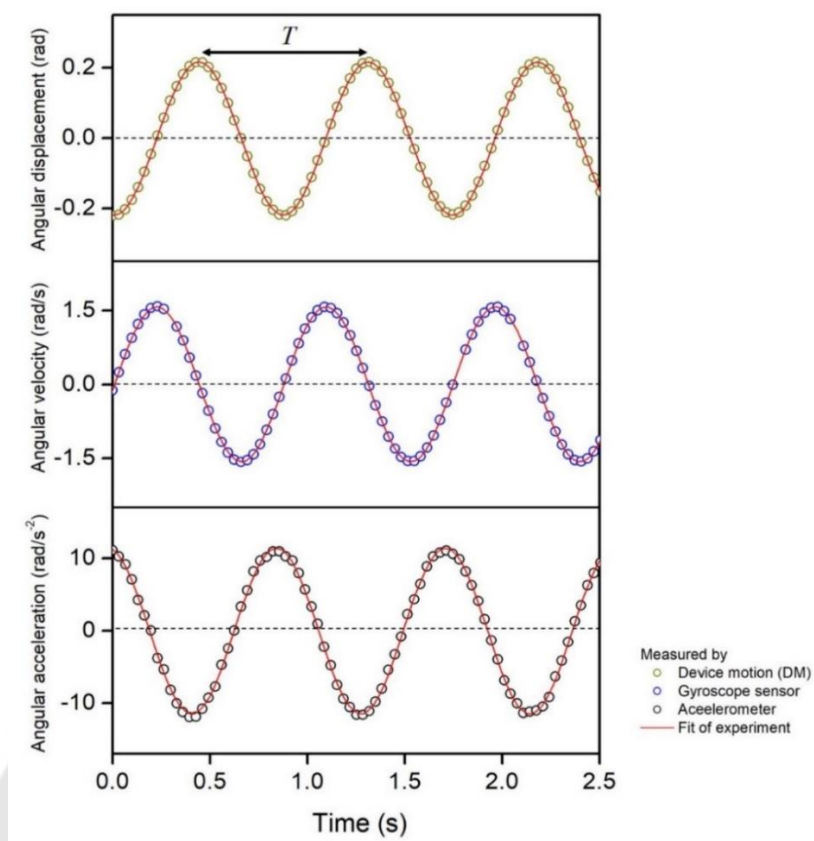


ภาพประกอบ 84 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุม กับเวลา ของแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต ในการทดลองครั้งที่ 2 จำนวน 1 คาบ

ตาราง 6 ปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานเกี่ยวกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตในการทดลองครั้งที่ 2

ปริมาณทาง ฟิสิกส์	กราฟการกระจัดเชิงมุม - เวลา	กราฟความเร็วเชิงมุม - เวลา	กราฟความเร่งเชิงมุม - เวลา
T (s)	0.86861 ± 0.00004	0.86863 ± 0.00002	0.86863 ± 0.00004
ω_0 (rad/s)	7.2336 ± 0.0003	7.2335 ± 0.0002	7.2334 ± 0.0003
θ_m (rad)	0.21045 ± 0.00036 *	-	-
ω_m (rad/s)	1.5223 ± 0.0026	1.5174 ± 0.0019 *	-
α_m (rad/s ²)	11.012 ± 0.019	-	11.028 ± 0.022 *
ϕ (degree)	92.45 ± 0.19	3.22 ± 0.14	-98.26 ± 0.23

หมายเหตุ * หมายถึง ค่าแอมพลิจูด (A) ของกราฟแต่ละกราฟ

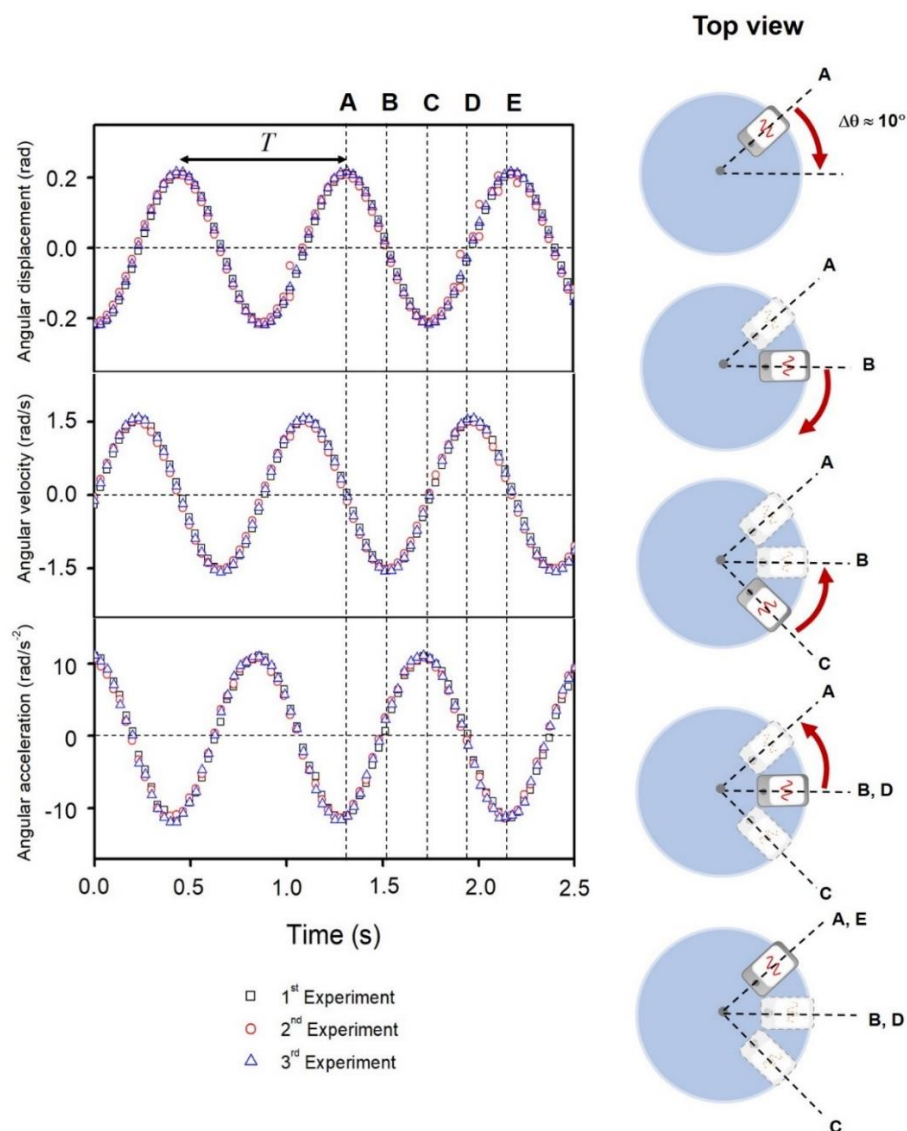


ภาพประกอบ 85 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลา ของแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด ในการทดลองครั้งที่ 3 จำนวน 1 คาบ

ตาราง 7 ปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานเกี่ยวกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดในการทดลองครั้งที่ 3

ปริมาณทางฟิสิกส์	กราฟการกระจัดเชิงมุม - เวลา	กราฟความเร็วเชิงมุม - เวลา	กราฟความเร่งเชิงมุม - เวลา
T (s)	0.86862 ± 0.00004	0.86863 ± 0.00004	0.86864 ± 0.00004
ω_0 (rad/s)	7.2336 ± 0.0003	7.2335 ± 0.0003	7.2334 ± 0.0003
θ_m (rad)	0.21688 ± 0.00041 *	-	-
ω_m (rad/s)	1.5688 ± 0.0030	1.5662 ± 0.0020 *	-
α_m (rad/s ²)	11.348 ± 0.022	-	11.360 ± 0.023 *
ϕ (degree)	264.18 ± 0.21	175.08 ± 0.14	70.63 ± 0.23

หมายเหตุ * หมายถึง ค่าแอมพลิจูด (A) ของกราฟแต่ละกราฟ



ภาพประกอบ 86 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดเป็นเวลา 1 คาบ จำนวน 3 ครั้ง

ภาพประกอบ 86 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของสมาร์ทโฟนที่แกว่งไปพร้อมกับลูกตุ้มชนิดบิด กับค่าการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมที่จัดการข้อมูลแล้วเทียบกับเวลาจากตำแหน่ง A ถึง E จำนวน 1 คาบ ของการทดลอง 3 ครั้ง ซึ่งพบว่ากราฟความสัมพันธ์ทั้ง 3 ปริมาณเชิงมุมกับเวลาเป็นกราฟรูปไซน์ (Sinusoidal) ลักษณะกราฟทั้ง 3 ครั้งมีความใกล้เคียงกัน โดยความเร็วเชิงมุมมีเฟสหน้าหน้าการกระจัดเชิงมุม $\pi/2$ เรเดียน และความเร่งเชิงมุมมีเฟสหน้าหน้าการกระจัดเชิงมุมอยู่ π เรเดียน และตำแหน่งของสมาร์ทโฟนกับค่า

การกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุม ณ ตำแหน่งนั้น ๆ มีความสอดคล้องกัน เมื่อพิจารณาตำแหน่งปลายของการแกว่ง ณ ตำแหน่ง A และ E ที่แกว่งไปทางขวาจากตำแหน่งสมดุลเป็นค่าบวก (+) และตำแหน่ง C ที่แกว่งไปทางซ้ายจากตำแหน่งสมดุลให้เป็นค่าลบ (-) จะได้ว่าขนาดของการกระจัดเชิงมุม ณ ตำแหน่งดังกล่าวมีค่าสูงสุด (θ_m) ความเร็วเชิงมุมมีค่าเป็นศูนย์และความเร่งเชิงมุมมีค่าสูงสุด (α_m) เช่นกัน แต่มีทิศตรงข้ามกับทิศของการกระจัดเชิงมุม ในทางกลับกัน ขนาดของการกระจัดเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมมีค่าเป็นศูนย์และความเร็วเชิงมุมมีค่าสูงสุด (ω_m) ณ ตำแหน่ง B และ D ซึ่งเป็นตำแหน่งสมดุลของการแกว่ง

เมื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิโด ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟการทดลองจำนวน 3 ครั้ง ได้แก่ คาบ (T), ความถี่เชิงมุม (ω_0), ระยะทางเชิงมุมสูงสุด (θ_m), ความเร็วเชิงมุมสูงสุด (ω_m), ความเร่งเชิงมุมสูงสุด (α_m) และเฟสเริ่มต้น ($\phi_0, \phi_\omega, \phi_\alpha$) ได้ผลการเปรียบเทียบแสดงดังนี้

ค่าคาบและความถี่เชิงมุมของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิโด โดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัลและเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนเป็นเครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูล จำนวน 3 ครั้ง ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งจะได้ค่าคาบการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิโด 3 ค่าที่มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมากจากเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน 3 ชนิดที่ทำงานพร้อมกัน ได้แก่ เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง, เซนเซอร์ไจโรสโคปและระบบตรวจวัดตำแหน่ง (DM) และเมื่อพิจารณาค่าคาบจากการวัดของแต่ละเซนเซอร์จำนวน 3 ครั้ง พบว่า มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน แสดงดังตาราง 8 โดยค่าเฉลี่ยรวมของคาบการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิโดโดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัลและเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน เท่ากับ 0.87155 ± 0.00449 วินาที และ 0.86861 ± 0.00002 วินาที ตามลำดับ จากนั้นคำนวณความถี่เชิงมุม จากสมการ (2.23) ได้ค่าความถี่เชิงมุมของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิโดโดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัลเท่ากับ 7.2092 ± 0.0371 เรเดียนต่อวินาที และค่าความถี่เชิงมุมของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิโดโดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนเท่ากับ 7.2336 ± 0.0001 เรเดียนต่อวินาที และผู้วิจัยจะใช้ค่าคาบการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิโดทั้ง 2 ค่าที่ได้กล่าวข้างต้นในการคำนวณผลการทดลอง ในหัวข้อ 2.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลาในการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิโดกับโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าคงตัวในการบิดต่อไป

ตาราง 8 แสดงค่าและความถี่เชิงมุมของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิด จำนวน 3 ครั้ง โดยให้นำค่าการจับเวลาแบบดิจิทัลและเซนเซอร์ของสมาร์ตโฟน

วิธีการวัดและบันทึกข้อมูล						
ครั้งที่	นาฬิกาจับเวลา แบบดิจิทัล	เซนเซอร์ของสมาร์ตโฟน				
		กราฟการกระจัด	กราฟความเร็ว	กราฟความเร่ง	ค่าเฉลี่ยคาบ (วินาที)	ความถี่เชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)
		เชิงมุม - เวลา	เชิงมุม - เวลา	เชิงมุม - เวลา		
1	0.86845 ± 0.00005	0.86858 ± 0.00010	0.86858 ± 0.00003	0.86855 ± 0.00005	0.86857 ± 0.00004	7.2339 ± 0.00003
2	0.86580 ± 0.00005	0.86861 ± 0.00004	0.86863 ± 0.00002	0.86863 ± 0.00004	0.86862 ± 0.00002	7.2334 ± 0.00002
3	0.88040 ± 0.00005	0.86862 ± 0.00004	0.86863 ± 0.00004	0.86864 ± 0.00004	0.86863 ± 0.00002	7.2335 ± 0.00002
ค่าเฉลี่ยคาบ (วินาที)	0.87155 ± 0.00449	0.86860 ± 0.00004	0.86861 ± 0.00002	0.86861 ± 0.00003	0.86861 ± 0.00002	-
ความถี่เชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที)	7.2092 ± 0.00371	7.2337 ± 0.00003	7.2336 ± 0.00001	7.2336 ± 0.00002	7.2336 ± 0.00001	-

ตาราง 9 แสดงค่าการกระจัดเชิงมุมสูงสุด ความเร็วเชิงมุมสูงสุด และความเร่งเชิงมุมสูงสุดที่ได้จากการวัดความสั่นพ้องของปริมาณเชิงมุมกับเวลา จำนวน 3 ครั้ง

ปริมาณทางฟิสิกส์	ครั้งที่	กราฟการกระจัดเชิงมุม - เวลา	กราฟความเร็วเชิงมุม - เวลา	กราฟความเร่งเชิงมุม - เวลา
ω_0 (rad/s)	1	7.2339 ± 0.0008	-	-
	2	7.2336 ± 0.0003	-	-
	3	7.2335 ± 0.0003	-	-
	ค่าเฉลี่ย	7.2337 ± 0.0003	-	-
θ_m (rad)	1	$0.21240 \pm 0.00084^*$	-	-
	2	$0.21045 \pm 0.00036^*$	-	-
	3	$0.21688 \pm 0.00041^*$	-	-
	ค่าเฉลี่ย	0.21324 ± 0.00033	-	-
ω_m (rad/s)	1	1.5365 ± 0.0061	$1.5328 \pm 0.0020^*$	-
	2	1.5223 ± 0.0026	$1.5174 \pm 0.0019^*$	-
	3	1.5688 ± 0.0030	$1.5662 \pm 0.0020^*$	-
	ค่าเฉลี่ย	1.5425 ± 0.0024	1.5388 ± 0.0011	-
α_m (rad/s ²)	1	11.114 ± 0.044	-	$11.119 \pm 0.021^*$
	2	11.012 ± 0.019	-	$11.028 \pm 0.022^*$
	3	11.348 ± 0.022	-	$11.360 \pm 0.023^*$
	ค่าเฉลี่ย	11.158 ± 0.018	-	11.169 ± 0.013

หมายเหตุ * หมายถึง ค่าแอมพลิจูด (A) ของกราฟ

ตาราง 10 แสดงค่าเฟสเริ่มต้นและความต่างเฟสของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นและความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลา

ครั้งที่	กราฟ	เฟสเริ่มต้น (องศา)	ความต่างเฟส		%Error
			การทดลอง (องศา)	ทฤษฎี (องศา)	
1	กราฟการกระตุ้น - เวลา	267.29 ± 0.43	88.91 ± 0.45	90 *	0.30
	กราฟความเร็วเชิงมุม - เวลา	178.38 ± 0.14	105.08 ± 0.26	90 **	4.19
	กราฟความเร่งเชิงมุม - เวลา	73.30 ± 0.22	193.99 ± 0.48	180 ***	3.89
2	กราฟการกระตุ้น - เวลา	265.40 ± 0.19	89.23 ± 0.24	90 *	0.21
	กราฟความเร็วเชิงมุม - เวลา	176.17 ± 0.14	101.48 ± 0.27	90 **	3.19
	กราฟความเร่งเชิงมุม - เวลา	74.69 ± 0.23	190.71 ± 0.30	180 ***	2.97
3	กราฟการกระตุ้น - เวลา	264.18 ± 0.21	89.10 ± 0.25	90 *	0.25
	กราฟความเร็วเชิงมุม - เวลา	175.08 ± 0.14	104.45 ± 0.27	90 **	4.01
	กราฟความเร่งเชิงมุม - เวลา	70.63 ± 0.23	193.55 ± 0.43	180 ***	3.76

หมายเหตุ * หมายถึง ความต่างเฟสของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้น - เวลา กับความเร็วเชิงมุม - เวลา

** หมายถึง ความต่างเฟสของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม - เวลา กับความเร็วเชิงมุม - เวลา

*** หมายถึง ความต่างเฟสของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้น - เวลา กับความเร่งเชิงมุม - เวลา

จากการศึกษาทฤษฎีและสมการ (2.16), (2.17) และ (2.18) จะได้ว่าแอมพลิจูดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเชิงมุมกับเวลา คือค่าการกระจัดเชิงมุมสูงสุด ความเร็วเชิงมุมสูงสุด และความเร่งเชิงมุมสูงสุด ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองโดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ตโฟน 3 ชนิดเป็นเครื่องมือวัดและบันทึกผล จำนวน 3 ครั้ง ได้ค่าแอมพลิจูดของแต่ละกราฟ ดังตาราง 9 พบว่าค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลาหรือค่าการกระจัดเชิงมุมสูงสุด (θ_m) เท่ากับ 0.21324 ± 0.00033 เรเดียน ส่วนค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับเวลาหรือค่าความเร็วเชิงมุมสูงสุด (ω_m) เท่ากับ 1.5388 ± 0.0011 เรเดียนต่อวินาที และค่าเฉลี่ยแอมพลิจูดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงมุมกับเวลาหรือค่าความเร่งเชิงมุมสูงสุด (α_m) เท่ากับ 11.169 ± 0.013 เรเดียนต่อวินาทียกกำลังสอง นอกจากนี้ค่าความเร็วเชิงมุมสูงสุดและความเร่งเชิงมุมสูงสุดยังหาได้จากสมการ (2.19) และ (2.20) โดยคำนวณจากค่าความถี่เชิงมุมและค่าการกระจัดเชิงมุมสูงสุด (θ_m) ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา แสดงดังตาราง 9 เช่นกัน ได้ค่าเฉลี่ยความเร็วเชิงมุมสูงสุดจากการคำนวณเท่ากับ 1.5425 ± 0.0024 เรเดียนต่อวินาที และค่าเฉลี่ยความเร่งเชิงมุมสูงสุดเท่ากับ 11.158 ± 0.018 เรเดียนต่อวินาทียกกำลังสอง เมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมสูงสุดเฉลี่ยและความเร่งเชิงมุมสูงสุดเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์แอมพลิจูดจากกราฟความสัมพันธ์กับการคำนวณ พบว่า ค่าที่ได้จากทั้ง 2 วิธีใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตาราง 10 แสดงค่าเฟสเริ่มต้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเชิงมุมกับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต จำนวน 3 ครั้ง และความต่างเฟสของกราฟความสัมพันธ์ทั้ง 3 กราฟ จากทฤษฎี จะได้ว่า กราฟความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงมุมกับเวลามีเฟสหน้าหน้ากราฟความสัมพันธ์ของการกระจัดเชิงมุมกับเวลา $\pi/2$ เรเดียนหรือ 90 องศา ส่วนกราฟความสัมพันธ์ของความเร่งเชิงมุมกับเวลามีเฟสหน้าหน้ากราฟความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงมุมกับเวลาอยู่ $\pi/2$ เรเดียนหรือ 90 องศาเช่นกัน และกราฟความสัมพันธ์ของความเร่งเชิงมุมกับเวลามีเฟสหน้าหน้ากราฟความสัมพันธ์ของการกระจัดเชิงมุมกับเวลาอยู่ π เรเดียนหรือ 180 องศา โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี พบว่า ความต่างเฟสของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม - เวลา กับความเร็วเชิงมุม - เวลา ในการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง มีค่าสอดคล้องกันและใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากที่สุด มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่ถึง 1% รองลงมาคือ ความต่างเฟสของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

การกระจัดเชิงมุม - เวลากับความเร่งเชิงมุม - เวลา มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากค่าเชิงทฤษฎี 3% โดยประมาณ และความต่างเฟสของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม - เวลากับความเร่งเชิงมุม - เวลา มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีมากที่สุด คือประมาณ 4% แต่โดยภาพรวมแล้วถือได้ว่า ความต่างเฟสที่ได้จากการทดลองมีค่าต่างจากความต่างเฟสเชิงทฤษฎีไม่เกิน 5%

2.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคาบการแกว่งกับโมเมนต์ความเฉื่อยรวมและค่าคงตัวในการบิดของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด

จากทฤษฎี จะได้ว่า ค่าคงตัวในการบิด (K) ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดมีค่าขึ้นอยู่กับคาบการแกว่งและโมเมนต์ความเฉื่อยรวมของระบบลูกตุ้มชนิดบิด ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าคงตัวในการบิด 2 วิธีเปรียบเทียบกัน ตามวิธีการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งลูกตุ้มชนิดบิดประกอบด้วยจานโลหะกลม แท่งโลหะและสมาร์ทโฟน iPhone 4s ที่แกว่งรอบจุดหมุนเดียวกัน ได้โมเมนต์ความเฉื่อยรวม (I_{Total1}) เป็นค่าคงตัว 1 ค่า และวิธีการทดลองตอนที่ 2 ผู้วิจัยเพิ่มทรงกระบอกโลหะตัน 2 อันในระบบลูกตุ้มเดิมจากการทดลองตอนที่ 1 แล้วทำการทดลองโดยปรับตำแหน่งการวางทรงกระบอกทั้ง 2 อันให้ห่างจากจุดหมุนรวมมากขึ้น ครึ่งละ 5 มิลลิเมตร ทำให้โมเมนต์ความเฉื่อยรวม (I_{Total2}) มีค่าเพิ่มขึ้น และมีผลต่อคาบการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดด้วย โดยได้ผลการวิจัยดังนี้

ตาราง 11 ค่าคงตัวในการบิดที่คำนวณได้จากการทดลอง ตอนที่ 1

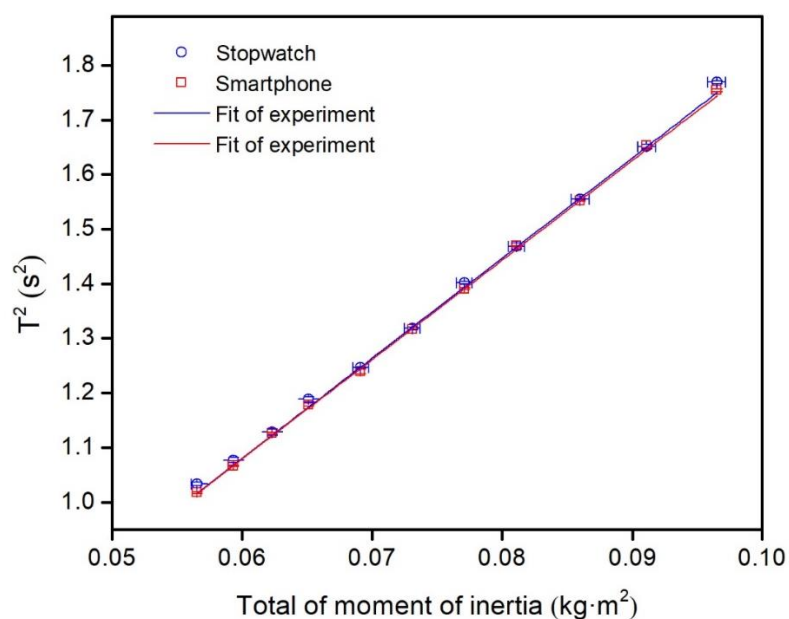
เครื่องมือวัดและเก็บข้อมูล	T (s)	K ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$)
นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล	0.87155 ± 0.00449	2.13 ± 0.02
เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน	0.86861 ± 0.00002	2.14 ± 0.01

ในการทดลองตอนที่ 1 ผู้วิจัยหาค่าเฉลี่ยคาบการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตจากการใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอลและเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนเป็นเครื่องมือวัด ได้ผลการทดลองดังหัวข้อ 2.1 จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าคงตัวในการบิด ตามสมการ (2.24) ได้ค่าเท่ากับ $2.13 \pm 0.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$ และ $2.14 \pm 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$ ตามลำดับ แสดงดังตาราง 11 เมื่อค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรวมของลูกตุ้มชนิดบิตในการทดลองตอนที่ 1 (I_{Total1}) เท่ากับ $0.0409 \pm 0.0001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ซึ่งจะเห็นว่า ค่าคงตัวในการบิดที่คำนวณจากทั้ง 2 วิธีการวัด มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ

ในส่วนของการทดลองตอนที่ 2 จากที่กล่าวไว้ข้างต้น ผู้วิจัยได้หาคาบการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต จำนวน 3 ครั้งในแต่ละครั้งที่เปลี่ยนตำแหน่งการวางทรงกระบอกโลหะต้นทั้ง 2 อันบนจานโลหะกลม ระยะห่างจากแกนหมุนร่วมถึงขอบของทรงกระบอกโลหะต้น (r) ตั้งแต่ 0.050 – 0.100 เมตร ทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรวมของลูกตุ้มชนิดบิตในการทดลองตอนที่ 2 (I_{Total2}) มีค่าระหว่าง $0.0565 \pm 0.0004 - 0.0965 \pm 0.0007 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ และได้ค่าคาบเฉลี่ยจากการใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอลและเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน โดยเลือกใช้ค่าจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา แสดงดังตาราง 12 ซึ่งจะได้ว่า คาบการแกว่งและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรวมของระบบลูกตุ้มชนิดบิตมีความสัมพันธ์กัน ตามสมการ (2.24) เมื่อ K เป็นค่าคงตัวในการบิด กล่าวคือ หากเพิ่มระยะห่างจากจุดศูนย์กลางมวลของทรงกระบอกโลหะต้นถึงแกนการหมุน (r) อย่างเท่า ๆ กันทั้ง 2 ข้าง จะทำให้โมเมนต์ความเฉื่อยรวมของระบบลูกตุ้มมีค่าเพิ่มขึ้นและมีผลทำให้คาบการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างคาบยกกำลังสองกับโมเมนต์ความเฉื่อยรวม จะมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง นั่นคือ คาบยกกำลังสองเป็นสัดส่วนโดยตรงกับโมเมนต์ความเฉื่อยรวมของระบบ ตามภาพประกอบ 87 และจะได้ว่า ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างคาบยกกำลังสองกับโมเมนต์ความเฉื่อยรวม โดยการใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอล (เส้นสีน้ำเงิน) มีค่า $18.342 \pm 0.191 \text{ s}^2 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ และเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน (เส้นสีแดง) เท่ากับ $18.221 \pm 0.092 \text{ s}^2 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ ซึ่งสามารถหาค่าคงตัวในการบิดได้จากความชันกราฟ โดยเปรียบเทียบสมการเชิงเส้น 2 ตัวแปร $y = mx + c$ กับสมการ (3.5) ได้ค่าเท่ากับ $2.15 \pm 0.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$ และ $2.17 \pm 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$ ตามลำดับ จะเห็นว่า ค่าคงตัวในการบิดที่คำนวณจากทั้ง 2 วิธีการวัด มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังตาราง 13

ตาราง 12 ค่าเฉลี่ยคาบการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตของการทดลองตอนที่ 2 โดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัลและเซนเซอร์ของสมาร์ตโฟน เมื่อระยะห่างจากแกนหมุนร่วมถึงจุดศูนย์กลางมวลของทรงกระบอกโลหะต้น 2 อัน ตั้งแต่ 0.050-0.100 เมตร

r (± 0.001 m)	I_{Total2} (kg·m ²)	T (s)		T^2 (s ²)	
		นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล	เซนเซอร์ของสมาร์ตโฟน	นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิทัล	เซนเซอร์ของสมาร์ตโฟน
0.050	0.0565 $\pm$ 0.0004	1.016 $\pm$ 0.002	1.00861 $\pm$ 0.00087	1.033 $\pm$ 0.003	1.01729 $\pm$ 0.00176
0.055	0.0593 $\pm$ 0.0004	1.038 $\pm$ 0.003	1.03256 $\pm$ 0.00050	1.077 $\pm$ 0.005	1.06618 $\pm$ 0.00104
0.060	0.0623 $\pm$ 0.0004	1.062 $\pm$ 0.003	1.06110 $\pm$ 0.00084	1.128 $\pm$ 0.001	1.12593 $\pm$ 0.00178
0.065	0.0651 $\pm$ 0.0004	1.090 $\pm$ 0.002	1.08555 $\pm$ 0.00134	1.188 $\pm$ 0.005	1.17842 $\pm$ 0.00290
0.070	0.0691 $\pm$ 0.0006	1.116 $\pm$ 0.000	1.11317 $\pm$ 0.00169	1.246 $\pm$ 0.001	1.23915 $\pm$ 0.00377
0.075	0.0731 $\pm$ 0.0006	1.148 $\pm$ 0.002	1.14725 $\pm$ 0.00030	1.318 $\pm$ 0.003	1.31618 $\pm$ 0.00070
0.080	0.0771 $\pm$ 0.0006	1.184 $\pm$ 0.001	1.17931 $\pm$ 0.00058	1.402 $\pm$ 0.002	1.39077 $\pm$ 0.00136
0.085	0.0811 $\pm$ 0.0006	1.212 $\pm$ 0.003	1.21189 $\pm$ 0.00050	1.469 $\pm$ 0.006	1.46868 $\pm$ 0.00121
0.090	0.0860 $\pm$ 0.0007	1.247 $\pm$ 0.000	1.24562 $\pm$ 0.00021	1.555 $\pm$ 0.001	1.55157 $\pm$ 0.00062
0.095	0.0911 $\pm$ 0.0007	1.285 $\pm$ 0.002	1.28556 $\pm$ 0.00114	1.651 $\pm$ 0.004	1.65266 $\pm$ 0.00294
0.100	0.0965 $\pm$ 0.0007	1.330 $\pm$ 0.001	1.32460 $\pm$ 0.00100	1.769 $\pm$ 0.001	1.75457 $\pm$ 0.00266



ภาพประกอบ 87 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคาบยกกำลังสองกับโมเมนต์ความเฉื่อยรวมของการทดลองตอนที่ 2 โดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอลและเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน

ตาราง 13 ค่าคงตัวในการบิดที่คำนวณได้จากการทดลอง ตอนที่ 2

เครื่องมือวัดและเก็บข้อมูล	Slope	K
	$s^2 (kg \cdot m^2)^{-1}$	$(kg \cdot m^2 / s^2)$
นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอล	18.342 ± 0.191	2.15 ± 0.02
เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน	18.221 ± 0.092	2.17 ± 0.01

ตาราง 14 สรุปค่าคงตัวในการบิดของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด

เครื่องมือวัดและเก็บข้อมูล	ค่าคงตัวในการบิด ($kg \cdot m^2 / s^2$)		% Error
	การทดลองตอนที่ 1	การทดลองตอนที่ 2	
นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอล	2.13 ± 0.02	2.15 ± 0.02	0.93
เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน	2.14 ± 0.01	2.17 ± 0.01	1.39

จากตาราง 14 แสดงค่าคงตัวในการบิดของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดจากวิธีการทดลอง 2 วิธี โดยใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอลและเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนเป็นเครื่องมือวัดและเก็บข้อมูล พบว่า ค่าคงตัวในการบิดที่คำนวณได้จากการใช้เครื่องมือวัดและเก็บข้อมูลที่แตกต่างกันในแต่ละการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลในการทดลองตอนที่ 2 มีค่ามากกว่าตอนที่ 1 และเมื่อเปรียบเทียบตามเครื่องมือวัดและเก็บข้อมูลที่ใช้ จะเห็นว่า ค่าคงตัวในการบิดจากการใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอลในการทดลองตอนที่ 1 และตอนที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ รวมทั้งค่าจากการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนด้วยเช่นกัน โดยทั้งหมดมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ไม่เกิน 1.5% และผู้วิจัยเลือกใช้ค่าคงตัวในการบิด $2.14 \pm 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$ ที่ได้จากการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน ในการทดลองตอนที่ 1 เพื่อคำนวณผลการทดลองหัวข้อ 2.3 การศึกษาอนุรักษพลังงานกลในการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดต่อไป

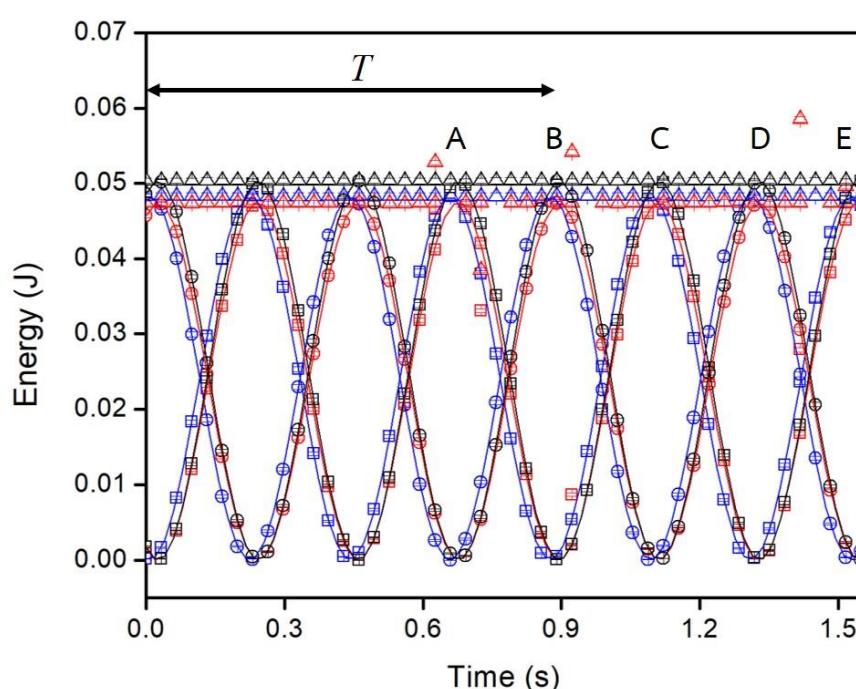
2.3 การศึกษาอนุรักษพลังงานกลในการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิด

จากการทดลองตอนที่ 1 ข้อมูลการกระจัดเชิงมุมกับเวลาและความเร็วเชิงมุมกับเวลาของการเคลื่อนที่ในการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ที่ได้จากเซนเซอร์ตรวจวัดตำแหน่งและเซนเซอร์ไจโรสโคป ตามลำดับ สามารถนำมาหาค่าพลังงานจลน์ (K) พลังงานศักย์ (U) และพลังงานกล (E) เพื่อศึกษาอนุรักษพลังงานกลในการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดได้ ซึ่งผู้วิจัยคำนวณหาพลังงานกลของระบบจาก 3 วิธีเปรียบเทียบกัน ได้ผลการศึกษาดังนี้

การคำนวณพลังงานกล จากสมการ (2.31) เมื่อ $K = 2.14 \pm 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$ และ θ_m คือขนาดการกระจัดเชิงมุมสูงสุด ในตาราง 9 ได้ค่าแต่ละครั้งเท่ากับ 0.04827 ± 0.00044 จูล, 0.04739 ± 0.00027 จูล และ 0.05033 ± 0.00031 จูล ตามลำดับ แสดงดังตาราง 15 วิธีการคำนวณ 1^* โดยผู้วิจัยใช้ค่าเหล่านี้เป็นพลังงานกลอ้างอิงแทนด้วยเส้นประสีเหลืองบนกราฟและค่าพลังงานต่าง ๆ ของแต่ละตำแหน่งในการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดของการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แสดงดังภาพประกอบ 89, 90 และ 91 ตามลำดับ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ และพลังงานกลกับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิดครบ 2 คาบ ของการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แสดงดังภาพประกอบ 88 โดยข้อมูลครั้งที่ 1-3 แทนด้วยสีน้ำเงิน สีแดงและสีดำ ตามลำดับ พบว่า กราฟพลังงานจลน์ (รูปสี่เหลี่ยม) อยู่ในรูปฟังก์ชัน $\sin^2 \omega_0 t$ ตามสมการ (2.26) และกราฟของพลังงานศักย์ (รูปวงกลม) อยู่ในรูปฟังก์ชัน $\cos^2 \omega_0 t$ ตามสมการ (2.28) เมื่อ ω_0 และ θ_m คือ ความถี่เชิงมุมจากกราฟการกระจัดเชิงมุมกับเวลาและขนาดการกระจัดเชิงมุมสูงสุดของแต่ละครั้งที่ทดลองซ้ำ ดังตาราง 9 และ t คือ

เวลา ณ ตำแหน่งการแกว่งใด ๆ พลังงานจลน์และพลังงานศักย์จะเปลี่ยนรูปพลังงานซึ่งกันและกัน ในแต่ละตำแหน่งของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต และพลังงานกลของระบบ (รูปสามเหลี่ยม) ตามสมการ (2.30) มีค่าค่อนข้างคงตัวตามกฎอนุรักษ์พลังงานกล ยกเว้นในการทดลองครั้งที่ 2 (สามเหลี่ยมสีแดง) ที่มีพลังงานกลบางค่าโดดไปจากค่าที่ควรจะเป็น โดยค่าพลังงานกลเฉลี่ยเท่ากับ 0.04832 ± 0.00008 จูล, 0.04740 ± 0.00013 จูล และ 0.05027 ± 0.00021 จูล ตามลำดับ แสดงดังตาราง 15 วิธีการคำนวณ 2**



ภาพประกอบ 88 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ และพลังงานกล ที่คำนวณจากสมการ (2.28) กับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตครบ 2 คาบ

ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ และพลังงานกลกับการกระจัดเชิงมุมของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตครบ 4 คาบ เป็นไปตามภาพประกอบ 89(C), 90(C) และ 91(C) พลังงานจลน์ได้จากการนำความเร็วเชิงมุมแต่ละตำแหน่ง คำนวณตามสมการ (2.25) เมื่อ $I_{Total1} = 0.0409 \pm 0.0001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ จะเห็นว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์กับการกระจัดเชิงมุม (สี่เหลี่ยมสีน้ำเงิน) มีลักษณะเป็นกราฟพาราโบลาคว่ำ ส่วนพลังงานศักย์หาจากการกระจัดเชิงมุม ตามสมการ (2.27) เมื่อ $K = 2.14 \pm 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$ โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์กับการกระจัดเชิงมุมเป็นกราฟพาราโบลาหงาย (วงกลมสีแดง)

จากกฎอนุรักษ์พลังงานกล ผลรวมของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ ตามสมการ (2.29) มีค่าเท่ากับพลังงานกลของระบบของแต่ละตำแหน่ง (สามเหลี่ยมสีดำ) ซึ่งลักษณะค่อนข้างเรียงเป็นเส้นตรงที่เอียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแกน x โดยพลังงานกล เมื่อ θ มีค่าเป็นลบหรือด้านที่ถูกตุ้มแกว่งไปทางซ้ายจากตำแหน่งสมดุลมีการกระจายมากกว่าแกว่งไปทางขวา (θ เป็นบวก) และเมื่อนำค่าพลังงานที่คำนวณได้นี้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เทียบกับเวลา จำนวน 2 คาบ จะได้ดังภาพประกอบ 89(B), 90(B) และ 91(B) ซึ่งลักษณะกราฟคล้ายกับภาพประกอบ 88 แต่จะเห็นว่าพลังงานกลในแต่ละตำแหน่งของการแกว่งมีค่าค่อนข้างไม่คงตัว โดยภาพรวมลักษณะเส้นกราฟเป็นคลื่นขึ้นลง เรียงตัวเกาะกลุ่มอยู่ใกล้ค่าพลังงานกลอ้างอิง (เส้นประสีเหลือง) และมีค่าพลังงานกลเฉลี่ยแต่ละครั้งเท่ากับ 0.04843 ± 0.00024 จูล, 0.04702 ± 0.00017 จูล และ 0.05026 ± 0.00024 จูล ตามลำดับ แสดงดังตาราง 15 วิธีการคำนวณ 3***

จากตาราง 15 พบว่า พลังงานกลของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต โดยใช้การคำนวณ 3 วิธีเปรียบเทียบกัน มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพลังงานกลเฉลี่ยแต่ละครั้งเท่ากับ 0.04834 ± 0.00017 จูล, 0.04727 ± 0.00011 จูล และ 0.05029 ± 0.00015 จูล ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า พลังงานกลเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำ 3 ครั้งมีค่าต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ พลังงานต่าง ๆ จากทั้ง 2 กราฟมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของสมาร์ทโฟนที่แกว่งไปพร้อมกับระบบลูกตุ้มชนิดบิต แสดงดังภาพประกอบ 89(A), 90(A) และ 91(A) เมื่อสมาร์ทโฟนเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งปลายของการแกว่ง หรือจุดวกกลับทั้ง 2 ด้าน (ตำแหน่ง A, C และ E) จะมีการกระจัดเชิงมุมสูงสุดและหยุดชั่วขณะ นั่นคือ $\theta = \pm\theta_m$, $\omega = 0$ ทำให้ตำแหน่งนี้พลังงานกลรวมอยู่ในรูปพลังงานศักย์สูงสุดอย่างเดียว และจะมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ เมื่อสมาร์ทโฟนเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งสมดุลของการแกว่ง เนื่องจากไม่มีการบิดของแท่งโลหะชั่วขณะ ขณะเดียวกันพลังงานจลน์จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด $\theta = 0$, $\omega = \omega_m$ ดังนั้น พลังงาน ณ ตำแหน่งสมดุล (ตำแหน่ง B และ D) จะอยู่ในรูปของพลังงานจลน์อย่างเดียว มีค่าเท่ากับ $E = \frac{1}{2}k\theta_m^2 =$ ค่าคงตัว ตามสมการ (2.31) ซึ่งเท่ากับทุกขณะที่ลูกตุ้มชนิดบิตเคลื่อนที่ด้วย

ตาราง 15 สรุปค่าพลังงานกลรวมของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิด

วิธีการคำนวณ	พลังงานกลรวม (จูล)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1 *	0.04827 ± 0.00044	0.04739 ± 0.00027	0.05033 ± 0.00031	0.04866 ± 0.00020
2 **	0.04832 ± 0.00008	0.04740 ± 0.00013	0.05027 ± 0.00021	0.04866 ± 0.00009
3 ***	0.04843 ± 0.00024	0.04702 ± 0.00017	0.05026 ± 0.00024	0.04857 ± 0.00013

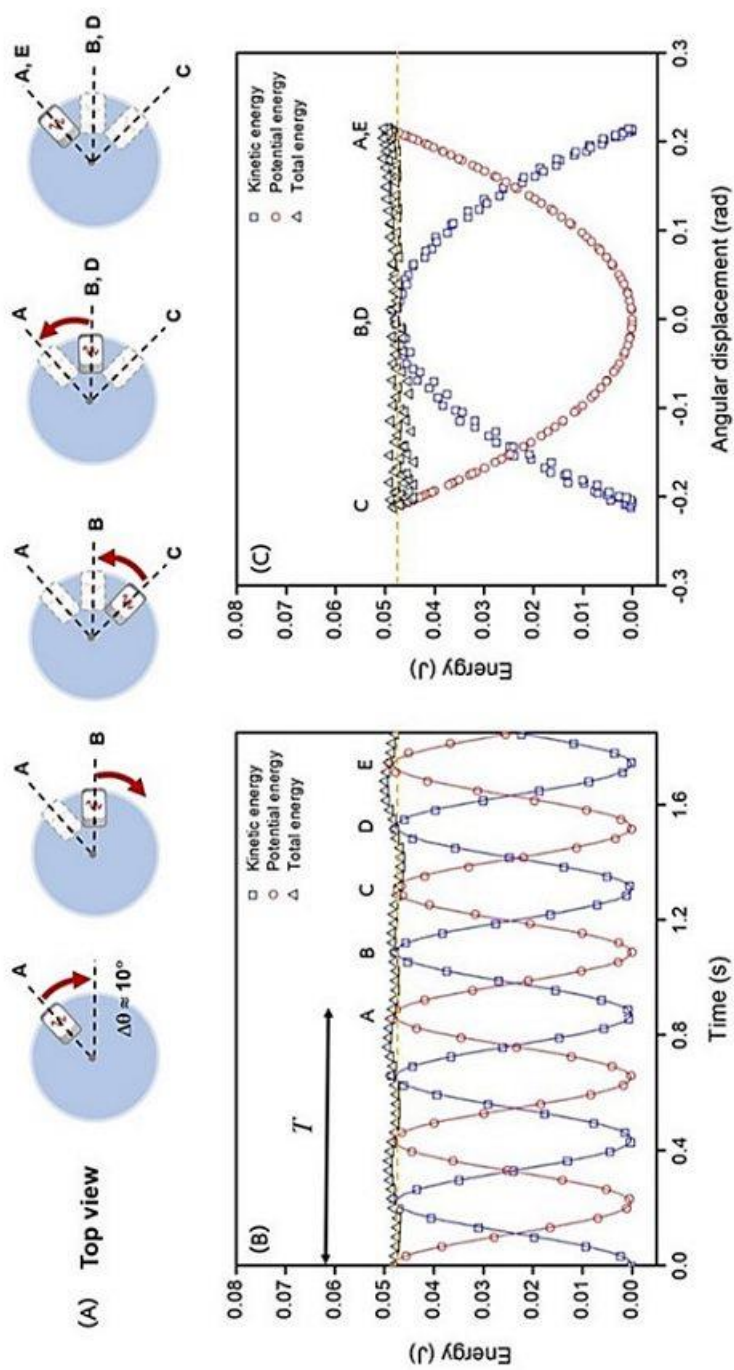
หมายเหตุ

* หมายถึง $E = \frac{1}{2} \kappa \theta_m^2$

** หมายถึง $E = \frac{1}{2} \kappa \theta_m^2 [\sin^2 \omega_0 t + \cos^2 \omega_0 t]$

*** หมายถึง $E = \frac{1}{2} I \omega^2 + \frac{1}{2} \kappa \theta^2$

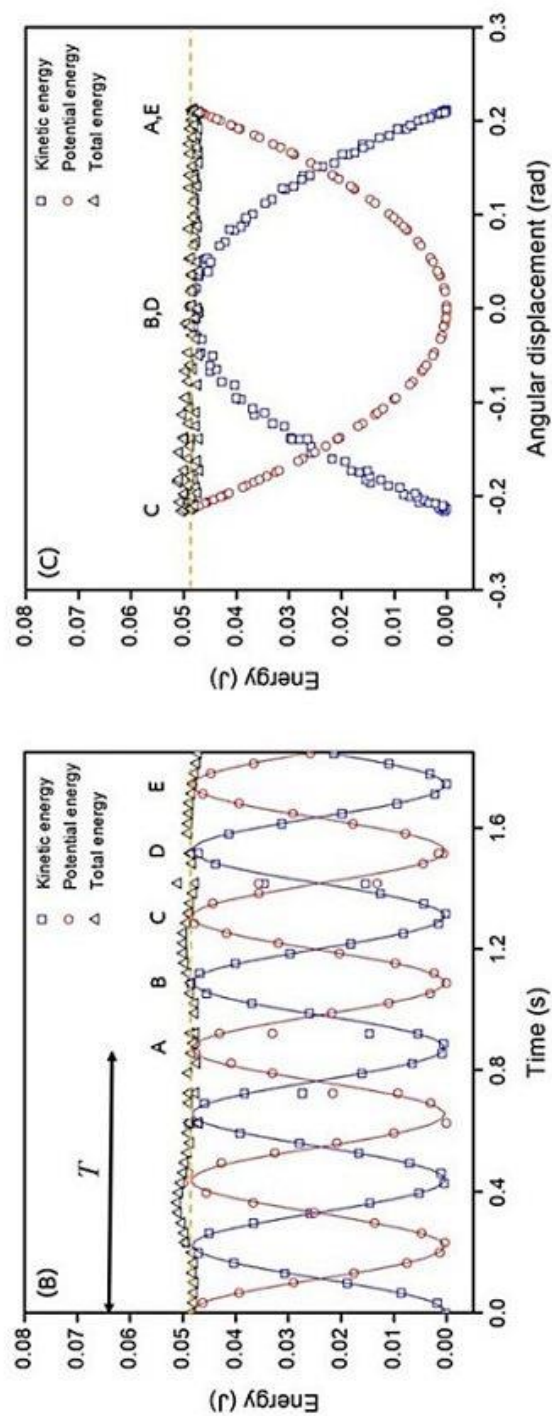
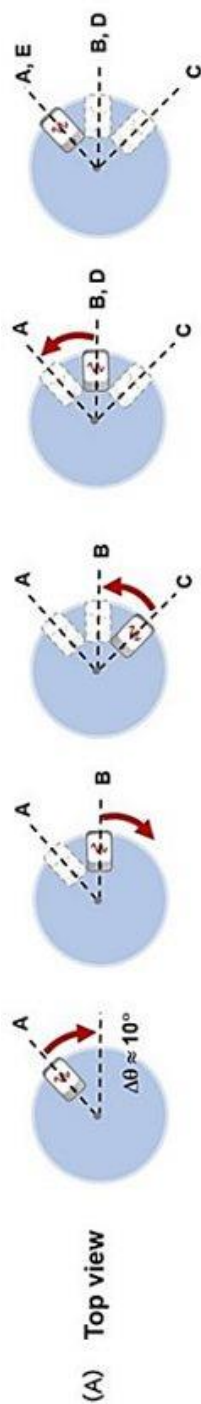




ภาพประกอบ 89 พลังงานชนิดต่าง ๆ ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิดในการทดลองครั้งที่ 1 (A) ตำแหน่ง A ถึง E ของสมการโฟโตนิกแกว่งพร้อมลูกตุ้มชนิดปิด

ครบ 1 รอบ (B) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์และพลังงานกลของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิดกับเวลา

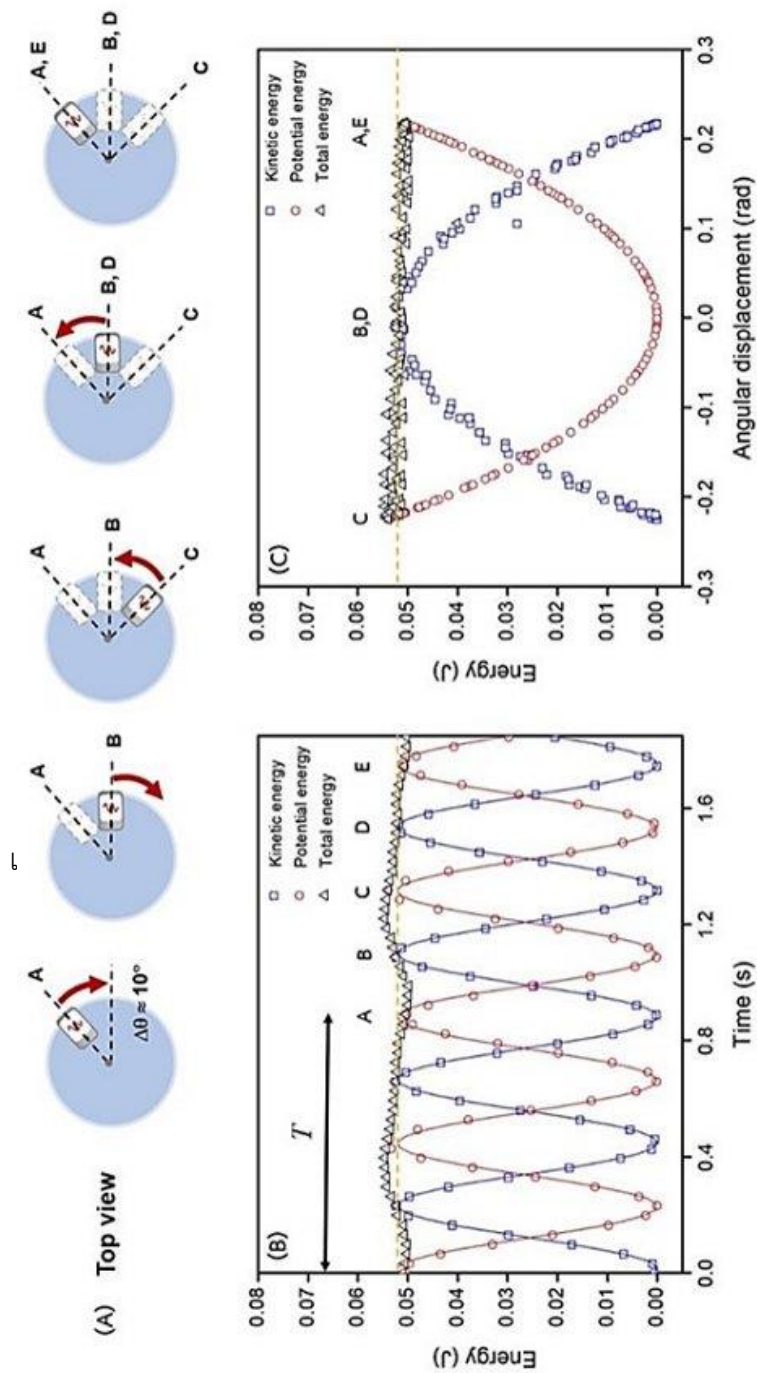
(C) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์และพลังงานกลของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิดกับการกระจัดเชิงมุม



ภาพประกอบ 90 พลังงานชนิดต่าง ๆ ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิดในการทดลองครั้งที่ 2 (A) ตำแหน่ง A ถึง E ของสมการไดโอฟอนที่แกว่งพร้อมลูกตุ้มชนิดปิด

ครบ 1 รอบ (B) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์และพลังงานกลของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิดกับเวลา

(C) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์และพลังงานกลของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิดกับการกระจัดเชิงมุม



ภาพประกอบ 91 พลังงานชนิดต่าง ๆ ของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิดในการทดลองครั้งที่ 3 (A) ตำแหน่ง A ถึง E ของสมการโหนดที่แกว่งของลูกตุ้มชนิดปิด
ครบ 1 รอบ (B) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์และพลังงานการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิดกับเวลา
(C) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ พลังงานศักย์และพลังงานการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิดกับการกระจัดเชิงมุม

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากบทที่ 4 ผลการศึกษา เป็นผลการทดลองจากชุดการทดลองฟิสิกส์ โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุในวิชาฟิสิกส์ จำนวน 2 รูปแบบ ได้แก่ ชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว เพื่อศึกษากราฟขีดจำกัดของเครื่องมือวัดและชุดการทดลองที่ 2: เรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิวด์ ซึ่งสามารถสรุปและอภิปรายผลได้ดังนี้

สรุป

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุ 2 รูปแบบ โดยได้ออกแบบและพัฒนาชุดการทดลองฟิสิกส์ที่ใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนเป็นเครื่องมือในการวัดปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ แทนเครื่องมือวิทยาศาสตร์บางอย่างในวิธีการทดลองแบบดั้งเดิม (Traditional method) แบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง ได้แก่

1. ชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว

จุดประสงค์ของชุดการทดลอง คือ เพื่อศึกษาปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ตำแหน่ง ระยะทาง อัตราเร็ว และอัตราเร่งของวัตถุจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและอัตราเร็วกับเวลา โดยชุดการทดลองประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก 2 ส่วน คือ 1) ชุดรถทดลองและราง ซึ่งผู้วิจัยใช้รถไฟของเล่นแบบไสล่ถ่านเคลื่อนที่บนรางตรง ความยาว 2.4 เมตร โดยรถไฟของเล่นปรับระดับอัตราเร็วได้ระดับ 1 และระดับ 2 พร้อมติดตั้งสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 บนตัวรถ เพื่อใช้งานเซนเซอร์ตรวจจับแสงเป็นเครื่องมือวัดและบันทึกค่าความส่องสว่างกับเวลาผ่านแอปพลิเคชัน Phyphox เป็นวัตถุของระบบ และ 2) ชุดแหล่งกำเนิดแสง ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง วงจรลดกระแสไฟฟ้า และชุดสายไฟหลอดไฟ LED สีขาว ความยาว 2.000 ± 0.005 เมตร ให้ระยะห่างระหว่างหลอด LED เท่ากับ 5.0 ± 0.1 เซนติเมตร พร้อมชุดขาตั้งที่ออกแบบมาให้ลำแสงจากหลอดไฟ LED กับตำแหน่งเซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนที่ติดตั้งบนรถไฟของเล่นอยู่ระดับความสูงเดียวกันพอดี โดยผู้วิจัยใช้แสงจากหลอดไฟ LED เป็นสิ่งแทนการบอกตำแหน่งใด ๆ ของวัตถุขณะเคลื่อนที่ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่านหลอดไฟ LED แต่ละหลอด ณ ตำแหน่งที่ลำแสงตกกระทบเซนเซอร์ตรวจจับแสงในแนวตั้งฉาก จะทำให้วัดได้ค่าความส่องสว่างสูงสุด ณ เวลานั้น ซึ่งเวลานี้จะสอดคล้องกับตำแหน่งของหลอดไฟ LED ด้วย ทำให้ได้ข้อมูลเวลาที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของวัตถุขณะเคลื่อนที่ แล้วจึงนำไปศึกษาและวิเคราะห์ผลต่อไป

แล้วเปรียบเทียบผลการทดลองกับการใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอสูงด้วยโปรแกรม Tracker ซึ่งทำการบันทึกวิดีโอไปพร้อม ๆ กัน นอกจากนี้ในเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อหาขีดจำกัดของเซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 ในลักษณะการใช้งานดังในการทดลองดังกล่าวนี้ โดยทำการวัดความส่องสว่างของแสงไฟกระพริบจากแอปพลิเคชันไฟฉายของสมาร์ทโฟน iPhone 4S เมื่อความถี่ในการกระพริบเป็น 2,5,8,9 และ 10 เฮิร์ตซ์ด้วย

จากการทดลองตอนที่ 1 ของชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว เพื่อหาค่าช่วงเวลาที่สั้นที่สุดที่เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนสามารถวัดและแยกความส่องสว่างจากแสงกระพริบได้ พบว่า เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 เริ่มวัดแสงกระพริบแล้วได้ค่าความถี่ในการกระพริบไม่ตรงกับค่าความถี่ของแหล่งกำเนิดแสง เมื่อความถี่ในการกระพริบเท่ากับ 8.00 ± 0.01 เฮิร์ตซ์ หรือ 0.125 ± 0.002 วินาที โดยคำนวณแล้วได้ช่วงเวลาในการกระพริบครั้งต่อครั้งเป็น 0.120 วินาทีเป็นส่วนใหญ่ เมื่อเพิ่มความถี่ในการกระพริบเป็น 9.00 ± 0.01 และ 10.00 ± 0.01 เฮิร์ตซ์ หรือ 0.111 ± 0.002 และ 0.100 ± 0.002 วินาที ตามลำดับ ก็พบว่า ช่วงเวลาในการกระพริบครั้งต่อครั้งที่คำนวณได้มี 2 ค่าเท่านั้น คือค่า 0.800 วินาทีสลับกับ ค่า 0.120 วินาทีเป็นช่วง ๆ ซึ่งไม่ตรงกับค่าจากแหล่งกำเนิดแสง และช่วงเวลาในการกระพริบที่สั้นที่สุดที่เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 สามารถวัดและแยกแสงกระพริบได้ เท่ากับ 0.120 วินาที หรือ 8.333 เฮิร์ตซ์ ดังนั้น ขีดจำกัดด้านเครื่องมือวัดสำหรับชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวของวัตถุ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 คือสามารถใช้งานได้กับวัตถุที่เปลี่ยนตำแหน่งจากตำแหน่งหนึ่งถึงตำแหน่งที่อยู่ถัดไปใช้เวลาไม่เกิน 0.120 วินาที

จากการทดลองตอนที่ 2 ของชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว เพื่อศึกษาปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ตำแหน่ง เวลา อัตราเร็วและอัตราเร่ง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา โดยได้ทำการทดลองเพื่อหาตำแหน่งกับเวลาของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัวระดับ 1 และระดับ 2 เป็นระยะทาง 2.000 ± 0.005 เมตร โดยเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร พบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วระดับ 1 และระดับ 2 เมื่อระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร เป็นกราฟเส้นตรงเรียงตัวซ้อนทับกัน เส้นกราฟของอัตราเร็วระดับ 1 มีความชันน้อยกว่าเส้นกราฟของอัตราเร็วระดับ 2 โดยความชันของกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราเร็วเฉลี่ยของรถไฟของเล่น ขณะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วระดับ 1 มีค่าเท่ากับ 0.205 ± 0.002 , 0.204 ± 0.001

และ 0.204 ± 0.001 เมตรต่อวินาที และอัตราเร็วระดับ 2 เท่ากับ 0.422 ± 0.002 , 0.425 ± 0.001 , 0.424 ± 0.003 เมตรต่อวินาที เมื่อระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ กล่าวคือ การเปลี่ยนระยะห่างของหลอดไฟให้เพิ่มขึ้นในระยะทางเท่าเดิม คือการลดจำนวนจุดข้อมูลที่วัดได้จากการทดลอง โดยที่ระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร มีจุดข้อมูลเท่ากับ 21, 14 และ 11 จุดข้อมูล ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า อัตราเร็วเฉลี่ยของรถไฟของเล่นจากการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED มีค่าใกล้เคียงกัน อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งอัตราเร็วระดับ 1 และระดับ 2 อาจกล่าวได้ว่า ระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากชุดการทดลองที่ 1 ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น ดังนั้น ตำแหน่งของหลอดไฟ LED ในชุดการทดลองสามารถออกแบบให้อยู่ห่างกันเป็นระยะใด ๆ ที่เหมาะสม โดยอย่างน้อยที่สุดต้องเป็นระยะที่ทำให้วัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัวหนึ่ง ๆ เปลี่ยนตำแหน่งจากหลอดไฟ LED หลอดหนึ่งถึงหลอดถัดไป โดยใช้เวลาไม่เกินขีดจำกัดของเครื่องมือวัด และเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนกับการใช้เทคนิคการวิเคราะห์วีดิโอด้วยโปรแกรม Tracker พบว่า ค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของรถไฟของเล่น ด้วยอัตราเร็วระดับ 1 และ 2 มีค่าต่างกันเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลจากการใช้เทคนิคการวิเคราะห์วีดิโอด้วยโปรแกรม Tracker มีค่ามากกว่าการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน ทั้ง 2 ระดับอัตราเร็ว และยังพบอีกว่า อัตราเร็วเฉลี่ยจากการใช้เทคนิคการวิเคราะห์วีดิโอด้วยโปรแกรม Tracker เมื่อระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร ของอัตราเร็วระดับ 1 และระดับ 2 ก็มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน กล่าวคือ การใช้เทคนิคการวิเคราะห์วีดิโอด้วยโปรแกรม Tracker เป็นอีกวิธีการวัดรูปแบบหนึ่งที่มีความเที่ยงตรง (precision) ในการวัด

จากการศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาของการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัวระดับ 1 และระดับ 2 ของรถไฟของเล่น พบว่า ลักษณะกราฟเป็นกราฟเส้นตรง 3 เส้นทับกัน และขนานแกน x ทุกกรณี โดยอัตราเร็วเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัวทั้ง 2 ระดับ เมื่อระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED เป็น 10, 15 และ 20 เซนติเมตร จากความชันของกราฟของแต่ละวิธีการวัดเปรียบเทียบกัน มีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าความไม่แน่นอนของค่าอัตราเร็วขณะใดขณะหนึ่งที่สามารถคำนวณได้จากข้อมูลตำแหน่งและเวลา ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วีดิโอด้วยโปรแกรม Tracker มีค่ามากกว่าวิธีการวัดโดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟนอย่างชัดเจน อีกทั้งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อัตราเร็วเฉลี่ยที่ได้ยังมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ในทุกกรณีซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลเชิงทฤษฎี กรณีวัตถุเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัว โดยอัตราเร็วของวัตถุจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมตรต่อวินาที²

2. ชุดการทดลองที่ 2: เรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต

ชุดการทดลองมีอุปกรณ์หลัก 2 อย่าง ได้แก่ สมาร์ทโฟน iPhone 4s พร้อมแอปพลิเคชัน Sensorlog โดยใช้งานเซนเซอร์ 3 ชนิดเพื่อวัดปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง คือ 1) เซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งเชิงเส้น (Accelerometer) ใช้วัดความเร่งเชิงเส้นแล้วจึงแปลงค่าเป็นความเร่งเชิงมุมของการแกว่งกวัด 2) เซนเซอร์ไจโรสโคป (Gyroscope sensor) ใช้วัดความเร็วเชิงมุม และ 3) ระบบตรวจวัดตำแหน่งเชิงมุม (Device motion service) ใช้วัดตำแหน่งเชิงมุมของการแกว่งกวัดเทียบกับเวลา ซึ่งจะติดสมาร์ทโฟนไว้บนชุดลูกตุ้มชนิดบิตที่ประกอบด้วย จานโลหะกลมที่ติดอยู่กับแท่งโลหะยาว และทรงกระบอกตัน 2 อันจะเพิ่มเข้ามาในการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งผู้วิจัยได้ประยุกต์และต่อยอดมาจากวิธีการทดลอง เรื่องการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุ ในคู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ PY180 ปฏิบัติการฟิสิกส์ทั่วไป ของภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อให้ได้ชุดการทดลองที่ใช้ศึกษาได้หลากหลายเนื้อหาและครอบคลุมมากขึ้น เนื่องจากวิธีการทดลองแบบดั้งเดิม (Traditional method) นี้จะใช้นาฬิกาจับเวลาแบบดิจิตอลเป็นเครื่องมือวัด เพื่อหาคาบ ความถี่เชิงมุมและค่าคงตัวในการบิด ไม่สามารถหาค่าปริมาณเชิงมุมต่าง ๆ รวมถึงแอมพลิจูดและความต่างเฟสของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตได้ ผู้วิจัยจึงนำเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนซึ่งมีความสามารถในการวัดปริมาณเหล่านี้มาใช้ในการพัฒนาชุดการทดลองที่ 2 นี้ขึ้น โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ตอน ซึ่งมีความต่อเนื่องและสัมพันธ์กัน โดยตอนที่ 1 เป็นการศึกษาศึกษาปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้อง จากนั้นตอนที่ 2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลาในการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตกับโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าคงตัวในการบิด และตอนที่ 3 เป็นการนำข้อมูลการทดลองจากตอนที่ 1 และ 2 มาคำนวณเพื่อศึกษากฎอนุรักษ์พลังงานกลของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบผลการทดลองกับวิธีการทดลองแบบดั้งเดิม ตามคู่มือปฏิบัติการที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จับเวลาการแกว่งกวัดของชุดลูกตุ้มชนิดบิตไปพร้อม ๆ กับการทดลองโดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน แล้วนำมาวิเคราะห์ผลต่อไป

จากการทดลองตอนที่ 1 ของชุดการทดลองที่ 2: เรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต ศึกษาปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต ได้แก่ คาบ ความถี่เชิงมุม แอมพลิจูด การกระจัดเชิงมุม ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุมและความต่างเฟส กับวิธีการทดลองแบบดั้งเดิม พบว่า คาบเฉลี่ยและความถี่เชิงมุมที่ได้จากการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนเทียบการใช้นาฬิกาจับเวลา มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ และคาบและความถี่เชิงมุมที่ได้จากเซนเซอร์ 3 ชนิดเปรียบเทียบกัน ได้ค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน โดยค่าการกระจัดเชิงมุมสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 0.21324 ± 0.00033 เรเดียน หรือเท่ากับ 12.218 ± 0.019 องศา

ซึ่งมากกว่าค่ามุมที่ปิดลูกตุ้มครั้งแรกเล็กน้อย อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของผู้วิจัยขณะทำการทดลอง ในส่วนของค่าความเร็วเชิงมุมสูงสุดและค่าความเร่งเชิงมุมสูงสุดสามารถหาได้จาก 2 วิธีเปรียบเทียบกัน คือ 1) ค่าแอมพลิจูดของกราฟความเร็วเชิงมุมกับเวลาและความเร่งเชิงมุมซึ่งได้จากการวัดของเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง ตามลำดับ และ 2) คำนวณจากค่าความถี่เชิงมุมและการกระจัดเชิงมุมสูงสุดที่วัดได้จากเซนเซอร์ตรวจวัดตำแหน่ง ซึ่งได้ค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาค่าความต่างเฟสของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชิงมุมทั้ง 3 ค่ากับเวลา พบว่า ค่าเฟสเริ่มต้นที่วัดได้จากเซนเซอร์ตรวจวัดตำแหน่งกับเซนเซอร์ไจโรสโคปคำนวณได้ค่าความต่างเฟสใกล้เคียงกับค่าเชิงทฤษฎีมากที่สุด มีค่าเปอเซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่ถึง 1% รองลงมาคือ ค่าเฟสเริ่มต้นที่วัดได้จากเซนเซอร์ตรวจวัดตำแหน่งกับเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง โดยมีค่าเปอเซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีประมาณ 3% และค่าเฟสเริ่มต้นที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปกับเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่ง ทำให้ได้ค่าเปอเซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากที่สุด ประมาณ 4% ซึ่งจะเห็นว่า การหาความต่างเฟสจากค่าเฟสเริ่มต้นที่วัดด้วยเซนเซอร์อื่นกับเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งเชิงเส้นทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากขึ้น

จากการทดลองตอนที่ 2 ของชุดการทดลองที่ 2: เรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิด ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลาในการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิดกับโมเมนต์ความเฉื่อยและหาค่าคงตัวในการบิด ด้วยการใส่เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนและนาฬิกาจับเวลาเป็นเครื่องมือวัด โดยเพิ่มทรงกระบอกตัน 2 อันในระบบลูกตุ้มของการทดลองตอนที่ 1 แล้วทำการทดลองเพื่อหาคาบการบิด เมื่อเพิ่มระยะห่างจากทรงกระบอกตันทั้ง 2 อันถึงแกนหมุน รวมทั้งเปรียบเทียบกับค่าคงตัวในการบิดที่คำนวณได้จากข้อมูลการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งมีวิธีการทดลองต่างกัน พบว่า ค่าคาบยกกำลังสองเป็นสัดส่วนโดยตรงกับโมเมนต์ความเฉื่อยรวมของระบบ ทำให้กราฟความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง และความชันของกราฟมีค่าเท่ากับค่าคงตัวในการบิด ซึ่งจากแต่ละวิธีการทดลอง ได้ค่าคงตัวในการบิดจาก 2 วิธีการวัดที่ใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 กับ 2 จะได้ว่า มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

จากการทดลองตอนที่ 3 ของชุดการทดลองที่ 2: เรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิด ศึกษากฎอนุรักษ์พลังงานกลของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดปิด โดยคำนวณพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ และพลังงานกล จาก 3 สมการซึ่งแทนค่าข้อมูลการทดลองจากการทดลองตอนที่ 1 และ 2 ต่างกัน พบว่า พลังงานกลของระบบจากการคำนวณด้วยข้อมูลการทดลองที่ต่างกัน 3 วิธี มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันมากในแต่ละครั้งของการทดลอง กล่าวคือ ข้อมูลการทดลองที่วัดและคำนวณได้จากการทดลองตอนที่ 1 และ 2 เป็นข้อมูลที่ถูกต้องและสอดคล้องกัน อีกทั้งลักษณะกราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานชนิดต่าง ๆ กับเวลาและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานชนิดต่าง ๆ กับการกระจัดเชิงมุม ยังสัมพันธ์กับตำแหน่งของสมาร์ตโฟนขณะแกว่งตามทฤษฎี และเมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณทั้ง 3 ครั้ง จะเห็นว่า ได้ค่าพลังงานกลรวมมีค่าต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นความคลาดเคลื่อนจากการบิดลูกตุ้มครั้งแรกเพื่อทำให้เกิดการแกว่งแต่ละครั้งไม่เท่ากันของผู้วิจัย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าพลังงานกลในแต่ละตำแหน่งที่ถูกตุ้มชนิดบิดแกว่งมีค่าค่อนข้างไม่คงที่ อาจเนื่องจากการทดลองจริง ระบบมีการสูญเสียพลังงานบางส่วน เช่น ในรูปของแรงเสียดทานบริเวณข้อต่อระหว่างจานโลหะ แท่งโลหะ และแกนยึด เป็นต้น

อภิปรายผล

จากผลการวิจัยของชุดการทดลองที่ 1 ในการหาค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของรถไฟ จะพบว่า ค่าอัตราเร็วเฉลี่ยระดับ 1 และ 2 ที่ได้จากการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ตโฟนกับการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ห้วงวิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าที่ได้จากการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ห้วงวิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker มีค่ามากกว่าและมีแนวโน้มไปทางเดียวกันทุกกรณี ซึ่งมีเพียงกรณีอัตราเร็วระดับ 1 เมื่อระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED เท่ากับ 10 เซนติเมตร ที่ได้ค่าจากทั้ง 2 วิธีใกล้เคียงกัน แต่ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละวิธี โดยเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหลอดไฟ LED เป็นระยะต่าง ๆ ก็พบว่า ค่าอัตราเร็วเฉลี่ยที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ แต่ละวิธีการวัดที่ผู้วิจัยใช้ค่อนข้างมีความแน่นอนในการวัด ทางผู้วิจัยมีความเห็นว่าการคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ห้วงวิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker โดยเกิดจากการจัดองค์ประกอบในการบันทึกวิดีโอไม่เหมาะสม คือ สมาร์ตโฟน iPhone 8plus ที่ใช้บันทึกวิดีโอมีอัตราเร็วเฟรมไม่ละเอียดพอ โดยมีอัตราภาพต่อเวลาเท่ากับ 30 ภาพต่อวินาที ทำให้การบันทึกลักษณะการเคลื่อนที่หรือตำแหน่งของวัตถุที่จะได้จากแต่ละเฟรมหายากเกินไป และการติดตั้งสมาร์ตโฟนและขาตั้งในระยะห่างที่ไม่เหมาะสม ไม่อยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้น และไม่อยู่ในแนวขนานกับแนวการเคลื่อนที่ของวัตถุจึงทำให้มุมกล้องในการบันทึกตำแหน่งและลักษณะของวัตถุเพี้ยนไป รวมทั้งผู้วิจัยกำหนดให้วัตถุเคลื่อนที่เป็นระยะทางที่ยาวเกินไปทำให้ต้องบันทึกวิดีโอในมุมกว้าง แม้จะจัดตั้งให้สมาร์ตโฟนที่ใช้บันทึกอยู่กึ่งกลางและระนาบเดียวกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ แต่เนื่องจากข้อจำกัดด้านความกว้างของเลนส์ จึงอาจทำให้ ณ ช่วงเริ่มต้นและช่วงท้ายของการเคลื่อนที่ ตำแหน่งและลักษณะของวัตถุผิดเพี้ยนไปจากความจริงได้เช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับบทความวิชาการของพรรัตน์ วัฒนกลสิวิชัย และ จิราภรณ์ ปุณยวัจน์พรกุล (2012) ที่กล่าวว่า ความคลาดเคลื่อนส่วนมากมีสาเหตุจากมุมกล้อง จึงควรตั้งกล้องให้ระนาบของหน้ากล้องขนาน

กับระนาบการเคลื่อนที่ในสองมิติของวัตถุและหน้ากล้องควรจัดให้อยู่กึ่งกลางของระนาบการเคลื่อนที่ และการบิดเบี้ยวของเลนส์กล้อง (Lens distortion) ซึ่งอาจทำให้ภาพที่บันทึกได้ในกรณีที่วัตถุเคลื่อนที่ใกล้ขอบวิดีโอหรือบันทึกในมุมกว้างเกินไป มีการยืดออกของภาพมากกว่าปกติเล็กน้อย ทำให้ตำแหน่งของวัตถุผิดเพี้ยนไป

นอกจากนี้ในการศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาของวัตถุ ซึ่งพบได้จากวิธีการวัดโดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน ข้อมูลเวลาที่ได้มีค่าความไม่แน่นอนในการวัดเยอะมาก ผู้วิจัยให้ความเห็นว่า เกิดจากความไม่แน่นอนแบบสุ่ม เนื่องจากการปล่อยรถไฟของเล่นให้เคลื่อนที่ในแต่ละครั้งอาจไม่เหมือนกัน ทำให้ช่วงเวลาเริ่มต้นที่วัตถุเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน เวลาที่วัตถุเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งใด ๆ ในแต่ละครั้งคลาดเคลื่อน และผู้วิจัยทำการทดลองซ้ำเป็นจำนวนน้อยเกินไป ในทางกลับกัน อัตราเร็วขณะใดขณะหนึ่งของวัตถุ ณ เวลาใด ๆ ที่คำนวณจากตำแหน่งและเวลาจากการใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker มีค่าความไม่แน่นอนค่อนข้างเยอะมาก โดยมีค่ามากขึ้น เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยผู้วิจัยให้ความเห็นว่า เนื่องจากเทคนิคนี้จะวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากเฟรมภาพ ซึ่งแต่ละเฟรมห่างกันเป็นช่วงเวลาเท่ากันจึงมีค่าความไม่แน่นอนของเวลาน้อยกว่า จึงเป็นผลมาจากค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลตำแหน่งของวัตถุเป็นหลัก โดยอาจเกิดจากฝาขูดนมสีแดงที่ผู้วิจัยใช้เป็นสัญลักษณ์ในการระบุตำแหน่งของวัตถุมีขนาดใหญ่เกินไป ทำให้ผู้วิจัยเลืกระบุตำแหน่งของสัญลักษณ์ที่ไม่ตรงตำแหน่งเดิม ตำแหน่งของวัตถุจึงคลาดเคลื่อนไปเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป ความไม่แน่นอนของตำแหน่งจึงมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้ในการวิเคราะห์วิดีโอแต่ละครั้งจะต้องทำการตั้งค่าแกนและความยาวอ้างอิงใหม่ รวมทั้งการเลือกเฟรมเริ่มต้นและเฟรมสุดท้ายของการเคลื่อนที่ของแต่ละวิดีโออาจไม่เหมือนกัน แม้ว่า Frame rate ของวิดีโอจะเท่ากัน ทำให้ช่วงเวลาแต่ละเฟรมเท่ากัน แต่เฟรมภาพที่วิเคราะห์ ณ เวลาเริ่มต้นอาจไม่ใช่เฟรมเดียวกัน กล่าวคือ ไม่สามารถกำหนดตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเป็นค่าคงตัวได้ จึงเป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ความไม่แน่นอนของอัตราเร็วขณะใดขณะหนึ่งที่คำนวณได้มีค่าเยอะมาก ซึ่งสอดคล้องกับที่พรรัตน์ วัฒนกสิวิชัย และ จิราภรณ์ ปุณยวัจน์พรกุล (2012) ได้อธิบายไว้ว่า ความคลาดเคลื่อนหลักของการใช้เทคนิคดังกล่าวเป็นผลมาจากการกำหนดจุดระบุตำแหน่งของวัตถุที่คลาดเคลื่อน ซึ่งก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนสะสม (Accumulated error) หากกำหนดตำแหน่งวัตถุคลาดเคลื่อน การนำค่าตำแหน่งไปคำนวณต่อเพื่อหาค่าความเร็วและค่าความเร่งจะมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น ตามลำดับ

จากผลการวิจัยของชุดการทดลองที่ 2 พบว่า การหาความต่างเฟสจากค่าเฟสเริ่มต้นที่วัดด้วยระบบตรวจวัดตำแหน่งและเซนเซอร์ไจโรสโคป กับเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งเชิงเส้น มีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลเชิงทฤษฎี 4% โดยประมาณ ผู้วิจัยมีความเห็นว่า ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเกิดจากตำแหน่งของเซนเซอร์ทั้ง 3 ชนิดที่บรรจุอยู่ในสมาร์ทโฟน โดยเฉพาะตำแหน่งของเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งเชิงเส้นเป็นปัจจัยหลัก ผู้วิจัยติดสมาร์ทโฟนลงบนลูกตุ้มชนิดปิดขณะอยู่ในแนวรัศมี ให้แนวแกนสมมาตรด้านยาวของสมาร์ทโฟนอยู่ในแนวเดียวกับแกน y หรือแนวเส้นสมมูลของระบบลูกตุ้ม เมื่อพิจารณาตำแหน่งของเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งเชิงเส้นติดตั้งอยู่ข้างกันบริเวณด้านล่างของกล้องหลังของสมาร์ทโฟน iPhone 4s (Galan, 2011, October) กล่าวคือ ตำแหน่งของเซนเซอร์ทั้งสองไม่ได้อยู่ในแนวเส้นสมมูลของระบบ โดยเมื่อเทียบกับเส้นสมมูล พบว่า แนวแกน y ของเซนเซอร์ไจโรสโคปอยู่ใกล้เส้นสมมูลมากกว่าเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งเชิงเส้น และพิจารณาขณะระบบลูกตุ้มหยุดนิ่ง จะได้ว่า ตำแหน่งของเซนเซอร์ไจโรสโคปทำมุมกับเส้นสมมูล เป็นมุมน้อยกว่าตำแหน่งของเซนเซอร์ตรวจวัดความเร่งเชิงเส้น จึงอาจเป็นเหตุในค่าเฟสเริ่มต้นของความเร่งเชิงมุมมีค่าผิดเพี้ยนไป

จากผลการวิจัยของชุดการทดลองที่ 1: เรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่า ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและอัตราเร็วกับเวลา ค่าอัตราเร็วเฉลี่ยมีค่าคงตัวและอัตราเร่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ สอดคล้องกับลักษณะของรถไฟของเล่นแบบไสล่ถ่านซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ที่ผู้วิจัยเลือกใช้และข้อมูลเชิงทฤษฎี อีกทั้งใกล้เคียงกับผลการวิจัยจากวิธีการวัดอีกรูปแบบหนึ่ง แสดงให้เห็นว่า การใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟนเป็นเครื่องมือวัดสามารถใช้งานได้ดี มีความเที่ยงตรงในการวัดค่อนข้างสูง และรูปแบบของชุดการทดลองที่ 1 ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น โดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟน สามารถใช้ทำการทดลองเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ เกี่ยวกับเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรงด้วยอัตราเร็วคงตัวของวัตถุได้อย่างถูกต้อง มีประสิทธิภาพ ภายใต้ข้อจำกัดขอเครื่องมือวัดที่ได้ศึกษาไว้ข้างต้น และเป็นแนวทางการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใกล้ตัวมาประยุกต์ใช้ทำการทดลองแบบใหม่ได้อีกรูปแบบหนึ่ง โดยผลการวิจัยเป็นไปในแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ Ea Chaya Septia Mahen และคณะ (Mahen, Susanti, Nuryadin, และ Nuryantini, 2018) ซึ่งใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟน Vivo และแอปพลิเคชัน Physics toolbox ในการหาอัตราเร็วเฉลี่ยของรถทดลองและยังกล่าวอีกว่า เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนร่วมกับแอปพลิเคชันที่เหมาะสม เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูกและง่ายต่อการใช้ในการนำมาหาค่าอัตราเร็วของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ รวมทั้งงานวิจัยของ Nuryantini, Sawitri, และ Nuryadin (2018) ที่ใช้เซนเซอร์วัดความเข้มสนามแม่เหล็กของ

สมาร์ทโฟนร่วมกันแอปพลิเคชัน Physics toolbox Suite แทนการใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแสง และให้ข้อสรุปว่า จากผลการทดลองการหาค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของวัตถุซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี แสดงให้เห็นว่า สมาร์ทโฟนมีความแม่นยำในการวัดที่เพียงพอ มีประสิทธิภาพและเป็นเครื่องมือในชีวิตประจำวันที่น่ามาใช้ในการวัดปริมาณทางฟิสิกส์ได้

และจากผลการวิจัยของชุดการทดลองที่ 2: เรื่องการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิต ที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่า ปริมาณทางฟิสิกส์พื้นฐานเทียบกับเวลาของการแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตที่ได้จากการวัดด้วยเซนเซอร์ 3 ชนิดพร้อม ๆ กัน และผลการคำนวณที่ได้จากการนำข้อมูลการทดลองเหล่านี้ไปวิเคราะห์ผลต่อ ไม่ว่าจะเป็นการหาค่าคงตัวในการบิดและพลังงานต่าง ๆ ของระบบซึ่งเชื่อมโยงกันทั้งหมด มีความถูกต้องและสอดคล้องกับทฤษฎี กล่าวคือ เซนเซอร์ทั้ง 3 ชนิดของสมาร์ทโฟนที่ผู้วิจัยใช้ในชุดการทดลองนี้สามารถวัดปริมาณเชิงมุมได้ค่อนข้างมีประสิทธิภาพและทำงานพร้อมกันได้ดี อีกทั้งผลการวิจัยบางส่วนยังใกล้เคียงกับวิธีการทดลองแบบดั้งเดิม และยิ่งไปกว่านั้น รูปแบบของชุดการทดลองที่ 2 ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น โดยใช้ประโยชน์จากเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนสามารถนำมาใช้ศึกษาและวิเคราะห์การแกว่งของลูกตุ้มชนิดบิตหรือการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก อย่างง่ายได้ชัดเจนเป็นรูปธรรมจากกราฟความสัมพันธ์ และครอบคลุมหลายเนื้อหามากยิ่งขึ้นได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ahmet Yavuz และ Temiz (2016) ที่ทำการทดลองเรื่องการแกว่งกวัดของสปริงและการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลเพนดูลัม โดยใช้เซนเซอร์วัดความเข้มสนามแม่เหล็กร่วมกับแอปพลิเคชัน Sensor Kinetics และแม่เหล็กนีโอไดเนียม ซึ่งผลการทดลองใกล้เคียงกับค่าเชิงทฤษฎีและยังให้ความเห็นว่า การใช้เทคนิคดังกล่าวในการทดลองมีประสิทธิภาพ สามารถใช้เพียงสมาร์ทโฟนเป็นเครื่องมือวัดและมีอุปกรณ์เสริมเล็กน้อยวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์มอนิกในรูปแบบต่าง ๆ ได้ อีกทั้งยังลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากผู้ทำการทดลอง ขณะสังเกตการแกว่งของวัตถุ และเทคนิคนี้จะช่วยให้ผู้เรียนสามารถนึกภาพและเชื่อมโยงเส้นทางการเคลื่อนที่ของวัตถุกับสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันของการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์มอนิกได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ Pierratos และ Polatoglou (2017, January) ซึ่งใช้สมาร์ทโฟนในการศึกษาการกวนรบกวนพลังงานกลในการเคลื่อนที่แบบเพนดูลัม ก็ได้ให้ความเห็นไปในทางเดียวกันว่า ในปัจจุบันสมาร์ทโฟนเป็นส่วนหนึ่งของการใช้ชีวิตประจำวันของทุกคน ซึ่งมีความคุ้นเคย สะดวก ใช้งานง่าย และมีความสามารถในการวัดปริมาณทางฟิสิกส์ได้หลากหลายจากเซนเซอร์ที่บรรจุในอุปกรณ์จึงอาจใช้แทนเครื่องมือบางอย่างที่มีราคาสูงได้ ดังนั้น การใช้สมาร์ทโฟนเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ต่าง ๆ จึงทำให้ผู้เรียนจดจ่อกับการทดลองนั้น ๆ ได้ดีกว่าการใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสนใจและแรงจูงใจในการเรียนวิชาฟิสิกส์ของผู้เรียนได้

นอกจากนี้ผู้เรียนสามารถทำการทดลองได้ด้วยตนเอง และทำการทดลองที่บ้านหรือสถานที่ต่าง ๆ จากอุปกรณ์ใกล้ตัว ด้วยวิธีนี้นักเรียนจะได้เรียนรู้จากวิธีการสอนที่เน้นผู้เรียนเป็นสำคัญผ่านการทดลองและโครงการสำรวจโดยตัวนักเรียนเอง

ข้อเสนอแนะ

1. จากวิธีดำเนินการวิจัยจะเห็นว่า ผู้วิจัยทำการทดลองซ้ำจำนวนน้อยเกินไป ทำให้ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มมีค่ามาก ดังนั้น ผู้ทดลองจึงควรทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 10 ครั้ง เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนประเภทนี้ให้น้อยลง

2. สมาร์ทโฟนแต่ละระบบปฏิบัติการ แต่ละยี่ห้อ จะใช้เซนเซอร์ต่าง ๆ ต่างรุ่นกัน รวมทั้งตำแหน่งของเซนเซอร์ที่บรรจุในอุปกรณ์ก็มีความแตกต่างกันเช่นกัน ดังนั้นควรศึกษาค่า Resolution และตำแหน่งของเซนเซอร์ก่อนการนำไปใช้เป็นเครื่องมือวัดในการทดลองเชิงฟิสิกส์เสมอ และควรเลือกใช้แอปพลิเคชันที่เหมาะสม เพื่อจะได้ประยุกต์ใช้เซนเซอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

3. ควรเลือกใช้อุปกรณ์การทดลองที่ทราบค่าปริมาณทางฟิสิกส์อย่างชัดเจน เช่น อัตราเร็ว และค่าคงตัวในการบิดของวัตถุนั้น ๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองในการตรวจสอบความถูกต้องของการวัดได้

4. ชุดการทดลองที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นเป็นลักษณะการเคลื่อนที่รูปแบบพื้นฐานของวัตถุ ซึ่งสามารถนำหลักการในการใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนเป็นอุปกรณ์วัดปริมาณทางฟิสิกส์นี้ไปประยุกต์และต่อยอด โดยอาจใช้เซนเซอร์ชนิดอื่นในรูปแบบการทดลองต่าง ๆ ได้อีกหลากหลายรูปแบบ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ใน 1 มิติที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น การเคลื่อนที่แนวตรงด้วยความเร่งคงตัว หรือการเคลื่อนที่ใน 2 มิติอื่น ๆ รวมทั้งการแกว่งกวัดรูปแบบอื่น ๆ ได้

บรรณานุกรม

- Apple developer. (2020). Understanding Reference Frames and Device Attitude. Retrieved from https://developer.apple.com/documentation/coremotion/getting_processed_device-motion_data/understanding_reference_frames_and_device_attitude
- Braskén, M., และ Pörn, R. (2017, July). Studying rotational dynamics with a smartphone accelerometer versus gyroscope. *Physics Education*, 52(4), 045024.
- Briggle, J. (2013, May). Analysis of pendulum period with an iPod touch/iPhone. *Physics Education*, 48(3), 285.
- Capella Microsystem inc. (2014). CM3323 Color Sensor with I2C Interface. Retrieved from http://www.capellamicro.com.tw/EN/product_c.php?id=64
- Castro-Palacio, J. C., และ et al. (2014, June). Using a smartphone acceleration sensor to study uniform and uniformly accelerated circular motions. 36(2), 1-5.
- Castro-Palacio, J. C., Velázquez-Abad, L., Giménez, F., และ Monsoriu, J. A. (2013, May). A quantitative analysis of coupled oscillations using mobile accelerometer sensors. *European Journal of Physics*, 34(3), 737.
- Countryman, C. L. (2014). Familiarizing students with the basics of a smartphone's internal sensors. *The Physics Teacher*, 52(9), 557-559.
- De Jesus, V. L. B., และ Sasaki, D. G. G. (2016, September). Modelling of a collision between two smartphones. *Physics Education*, 51(5), 055006.
- Eichner, A. (2020). iOS Sensors & Core Motion. Retrieved from https://ase.in.tum.de/lehrstuhl_1/teaching/tutorials/505-sgd-ws13-tutorial-core-motion
- Galan, W. (2011, October). iPhone 4S Teardown. Retrieved from <https://www.ifixit.com/Teardown/iPhone+4S+Teardown/6610#>
- Hyperphysics. (2018). Parallel Axis Theorem. Retrieved from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/parax.html>
- Kapucu, S. (2017, July). Finding the average speed of a light-emitting toy car with a

- smartphone light sensor. *Physics Education*, 52(4), 045001.
- Klein, P., Gröber, S., Kuhn, J., และ Müller, A. (2014, January). Video analysis of projectile motion using tablet computers as experimental tools. *Physics Education*, 49(1), 37.
- Kuhn, J., และ Vogt, P. (2012, November). Analyzing spring pendulum phenomena with a smart-phone acceleration sensor. *The Physics Teacher*, 50(8), 504-505.
- Kuhn, J., และ Vogt, P. (2013). Smartphones as experimental tools: Different methods to determine the gravitational acceleration in classroom physics by using everyday devices. *European Journal of Physics Education*, 4(1), 16-27.
- Mahen, E. C. S., Susanti, S., Nuryadin, B. W., และ Nuryantini, A. Y. (2018). *Preliminary study of simple methods to get the average speed using a smartphone's light sensor*. Paper presented at the MATEC Web of Conferences.
- Marinho, F., และ Paulucci, L. (2016, March). Kinematic measurements using an infrared sensor. *European Journal of Physics*, 37(2), 025003.
- Ng, T. W., และ Ang, K. (2005). The optical mouse for harmonic oscillator experimentation. *American Journal of Physics*, 73(8), 793-795.
- Nuryantini, A. Y., Sawitri, A., และ Nuryadin, B. W. (2018). Constant speed motion analysis using a smartphone magnetometer. *Physics Education*, 53(6), 065021.
- Pierratos, T., และ Polatoglou, H. M. (2017, January). Study of the conservation of mechanical energy in the motion of a pendulum using a smartphone. *Physics Education*, 53(1), 015021.
- Pili, U., Violanda, R., และ Ceniza, C. (2018, April). Measurement of g using a magnetic pendulum and a smartphone magnetometer. *The Physics Teacher*, 56(4), 258-259.
- Poonyawatpornkul, J., และ Wattanakasiwich, P. (2013). High-speed video analysis of damped harmonic motion. *Physics Education*, 48(6), 782.
- Pörn, R., และ Braskén, M. (2016, November). Interactive modeling activities in the classroom rotational motion and smartphone gyroscopes. *Physics Education*, 51(6), 065021.
- Puttharugsa, C., และ et al. (2016, September). Investigation of the rolling motion of a hollow cylinder using a smartphone. *European Journal of Physics*, 37(5), 055004.

- Sans, J. A., Manjón, F. J., Pereira, A. L. J., Gómez-Tejedor, J. A., and Monsoriu, J. A. (2013, November). Oscillations studied with the smartphone ambient light sensor. *European Journal of Physics*, 34(6), 1349.
- Sari, U. (2019). Using the Arduino for the experimental determination of a friction coefficient by movement on an inclined plane. *Physics Education*, 54(3), 035010.
- Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* (9th). USA, Boston: Brooks/Cole.
- Setiawan, B., Septianto, R. D., Suhendra, D., and Iskandar, F. (2017, November). Measurement of 3-axis magnetic fields induced by current wires using a smartphone in magnetostatics experiments. *Physics Education*, 52(6), 065011.
- Temiz, B. K., and Yavuz, A. (2016, January). Magnetogate: using an iPhone magnetometer for measuring kinematic variables. *Physics Education*, 51(1), 015004.
- Tomarken, S. L., Simons, D. R., Helms, R. W., Johns, W. E., Schriver, K. E., and Webster, M. S. (2012). Motion tracking in undergraduate physics laboratories with the Wii remote. *American Journal of Physics*, 80(4), 351-354.
- Vogt, P., and Kuhn, J. (2012, March). Analyzing free fall with a smartphone acceleration sensor. *The Physics Teacher*, 50(3), 182-183.
- Vogt, P., and Kuhn, J. (2012, October). Analyzing simple pendulum phenomena with a smartphone acceleration sensor. *The Physics Teacher*, 50(7), 439-440.
- Vogt, P., and Kuhn, J. (2013, March). Analyzing radial acceleration with a smartphone acceleration sensor. *The Physics Teacher*, 51(3), 182-183.
- Vogt, P., and Kuhn, J. (2014, February). Analyzing collision processes with the smartphone acceleration sensor. *The Physics Teacher*, 52(2), 118-119.
- Vogt, P., Kuhn, J., and Müller, S. (2011, September). Experiments using cell phones in physics classroom education: The computer-aided g determination. *The Physics Teacher*, 49(6), 383-384.
- Yavuz, A. (2015, May). Measuring the speed of sound in air using smartphone applications. *Physics Education*, 50(3), 281.
- Yavuz, A., and Temiz, B. K. (2016). Analysing harmonic motions with an iPhone's

- magnetometer. *Physics Education*, 51(3), 035006.
- Yavuz, A., และ Temiz, B. K. (2016, January). Detecting interferences with iOS applications to measure speed of sound. *Physics Education*, 51(1), 015009.
- Young, H. D., และ Freedman, R. A. (2012). *Sears and Zemansky's university physics: with modern physics* (13th). San Francisco, CA: Pearson.
- เวรดี มาน้อย. (2556). การพัฒนาชุดการทดลองกลศาสตร์สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ของโรงเรียนพัทลุง. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา, สงขลา. (วิทยานิพนธ์ ค.ม. (วิทยาศาสตร์ศึกษา)).
- จักรกฤษณ์ แก้วสุทธิ. (2555). การพัฒนาชุดทดลองเกี่ยวกับแรงดันที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอ. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่. (วิทยานิพนธ์ วท.ม. (การสอนฟิสิกส์)).
- จิตรา สอนพงษ์. (2558). การพัฒนาความเข้าใจแนวคิด เรื่อง การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย โดยใช้กิจกรรมการเรียนรู้ที่เน้นการลงมือปฏิบัติจริง (*Hands-on activities*). มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี. (วิทยานิพนธ์ วท.ม. (วิทยาศาสตร์ศึกษา)).
- ชาติ ทีมะ. (2560). การประยุกต์ใช้เซนเซอร์บนสมาร์ทโฟนในการจัดการเรียนการสอนฟิสิกส์ กลศาสตร์. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ครั้งที่ 12 เรื่อง "ผลงานวิจัยและนวัตกรรมสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน" (น. 2386-2395). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- ชิตชัย โพธิ์ประภา. (2558). โฟโตไดโอด (Photo Diode). สืบค้นจาก <http://phchitchai.wbvschool.net/page/9>
- ดิเรก บุญธรรม, และ คนอื่น ๆ. (2556, มกราคม-มีนาคม). การพัฒนาอุปกรณ์ใช้ในห้องปฏิบัติการ เพื่อติดตามการตกอิสระของวัตถุโดยอาศัยอุปกรณ์เปียโซอิเล็กทริก. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 21(1), 41-47.
- ธัญญะ โพธิ์รัง. (2550). การสร้างชุดทดลองวิชากลศาสตร์ สำหรับนักเรียนนายร้อยชั้นปีที่ 1 โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, ม.ป.ท. (วิทยานิพนธ์ ศษ.ม. (หลักสูตรและการสอน)).
- ธัญรส เหมจินดา. (2555). การทดลองการเคลื่อนที่แบบลูกตุ้มอย่างง่ายโดยการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช, นครศรีธรรมราช. (วิทยานิพนธ์ วท.ม. (วิทยาศาสตร์ศึกษา)).

- ประธาน บุรณศิริ, และ และคณะ. (2558). ฟิสิกส์ 1-Physics for scientists and engineers (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: เซนเกจ เลิ닝 อินโด-ไชน่า.
- ประนอม หมอกกระโทก. (2545). การพัฒนาชุดทดลองเรื่องการเคลื่อนที่ในแนวตรง ในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ. (ปริญญานิพนธ์ กศ.ม. (วิทยาศาสตร์ศึกษา)).
- ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2547). ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา 1 กลศาสตร์. กรุงเทพฯ: เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า.
- พงษ์ศักดิ์ ชินนาบุญ. (2556). ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 1 เล่ม 1 (พิมพ์ครั้งที่ 6). กรุงเทพฯ: วิทยพัฒน์.
- พรทิพย์ ศิริภัทราชัย. (2556, เมษายน-มิถุนายน). STEM Education กับการพัฒนาทักษะในศตวรรษที่ 21. วารสารนักบริหาร, 33(2), 49-56.
- พรรัตน์ วัฒนกลสิวิชัย, และ จิราภรณ์ ปุณยวัจน์พรกุล. (2012). การวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงในกลศาสตร์ (High-speed Video Analysis in Mechanics). วารสารวิทยาศาสตร์ ม ศว (Srinakharinwirot Science Journal), 28(2).
- พัชฎา เชื้อสิงห์. (2552). การพัฒนาบทเรียนบนเครือข่ายคอมพิวเตอร์เรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลม วิชาฟิสิกส์ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4. มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร, มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร. (วิทยานิพนธ์ ค.ม. (หลักสูตรและการสอน)).
- ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2555). ฟิสิกส์ 1 (พิมพ์ครั้งที่ 17). กรุงเทพฯ: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาฯ.
- ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. (2553). คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ ฟส180 ปฏิบัติการฟิสิกส์ทั่วไป กรุงเทพฯ: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มศว.
- วัชร ก่องแสน, และ วิทยา มะโนธรรม. (2560). การบูรณาการกับการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ด้วยวิธีสะเต็มศึกษาเรื่อง การเคลื่อนที่ในแนวตรง.
- วุฒิพล รัตนพร. (2553). การสอนแบบสืบเสาะหาความรู้ร่วมกับอุปกรณ์การทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายเพื่อเพิ่มผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี. (วิทยานิพนธ์ วท.ม. (วิทยาศาสตร์ศึกษา)).
- สมพงษ์ ใจดี. (2550). ฟิสิกส์กลศาสตร์ 1 (พิมพ์ครั้งที่ 7). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมพร บัวประทุม. (2560). An Experimental Set Using a Low-Cost Microcontroller and Opened-Programing Language to study Harmonic Motion สุวัฒน์ เบญจพลพิทักษ์

The 3rd International Conference on Innovation in Education Abstracts (55).

นครปฐม: สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล.

สรายุทธ พรหมราช. (2554). การพัฒนาการสาธิตสำหรับการสอนการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง. บัณฑิต

วิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่. (วิทยานิพนธ์ วท.ม. (การสอนฟิสิกส์)).

อนุวัฒน์ บุญธรรมโม. (2546). การศึกษาและการประยุกต์ใช้งานการเคลื่อนที่แบบเพนดูลัม. บัณฑิต

วิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา. (วิทยานิพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์)).

อันวา หะยีปากา, อีบรอเฮง จารง, และ อาบีดิน ดะแซสาเมาะ. (2557, กันยายน-ธันวาคม). วิเคราะห์

การเคลื่อนที่ของวัตถุแบบโปรเจกไทล์. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์, 6(3),

83-91.

อัยชะห์ วาเตะ. (2558). การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นกลทางทฤษฎีและปฏิบัติการโดยใช้

ชุดทดลองคลื่นผิวน้ำในถาดคลื่นร่วมกับการวิเคราะห์จากภาพวิดีโอโดยใช้โปรแกรม

Tracker. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี. (วิทยานิพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์ศึกษา)).





ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ช่วงเวลาการกระพริบครั้งต่อครั้งของแฟลชที่เซ็นเซอร์ตรวจวัดแสง
ของสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 วัดได้

ผลการวิเคราะห์ช่วงเวลากการกระพริบครั้งต่อครั้งของแฟลช เมื่อความถี่ในการกระพริบของแฟลชเป็น 2, 5, 8, 9 และ 10 เฮิร์ตซ์ จำนวน 20 ช่วง ที่เซนเซอร์ตรวจจับแสงของสมาร์ทโฟน Samsung Galaxy S4 วัดได้ โดยทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ตาราง 1 แสดงช่วงเวลากการกระพริบครั้งต่อครั้ง จำนวน 20 ช่วง เมื่อคาบในการกระพริบเท่ากับ 0.500 ± 0.002 วินาที (2.00 ± 0.01 เฮิร์ตซ์)

ช่วงที่	ช่วงเวลากการกระพริบ (วินาที)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0.501	0.500	0.500
2	0.501	0.521	0.500
3	0.500	0.500	0.500
4	0.500	0.501	0.500
5	0.500	0.500	0.500
6	0.500	0.500	0.500
7	0.500	0.500	0.500
8	0.500	0.500	0.500
9	0.500	0.501	0.500
10	0.500	0.500	0.500
11	0.500	0.500	0.500
12	0.540	0.500	0.500
13	0.500	0.480	0.500
14	0.500	0.500	0.500
15	0.500	0.501	0.501
16	0.500	0.520	0.500
17	0.500	0.500	0.500
18	0.500	0.500	0.501
19	0.500	0.480	0.500
20	0.540	0.500	0.500

ตาราง 2 แสดงช่วงเวลาการกระพริบครั้งต่อครั้ง จำนวน 20 ช่วง เมื่อคาบในการกระพริบเท่ากับ 0.200 ± 0.002 วินาที (5.00 ± 0.01 เฮิร์ตซ์)

ช่วงที่	ช่วงเวลาการกระพริบ (วินาที)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0.200	0.200	0.200
2	0.200	0.200	0.200
3	0.200	0.200	0.200
4	0.200	0.200	0.200
5	0.200	0.200	0.200
6	0.205	0.200	0.200
7	0.205	0.200	0.200
8	0.200	0.210	0.200
9	0.200	0.200	0.205
10	0.200	0.200	0.205
11	0.160	0.200	0.200
12	0.200	0.200	0.200
13	0.200	0.200	0.200
14	0.230	0.200	0.200
15	0.200	0.200	0.200
16	0.200	0.211	0.200
17	0.200	0.200	0.200
18	0.200	0.200	0.200
19	0.200	0.200	0.200
20	0.200	0.200	0.200

ตาราง 3 แสดงช่วงเวลาการกระพริบครั้งต่อครั้ง จำนวน 20 ช่วง เมื่อคาบในการกระพริบเท่ากับ 0.125 ± 0.002 วินาที (8.00 ± 0.01 เฮิร์ตซ์)

ช่วงที่	ช่วงเวลาการกระพริบ (วินาที)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0.120	0.125	0.160
2	0.120	0.125	0.125
3	0.120	0.120	0.125
4	0.120	0.120	0.120
5	0.120	0.160	0.120
6	0.120	0.120	0.120
7	0.120	0.120	0.120
8	0.120	0.120	0.120
9	0.160	0.120	0.120
10	0.120	0.120	0.160
11	0.120	0.120	0.120
12	0.120	0.120	0.120
13	0.120	0.120	0.120
14	0.120	0.160	0.120
15	0.125	0.120	0.120
16	0.125	0.120	0.120
17	0.160	0.120	0.120
18	0.120	0.120	0.120
19	0.120	0.120	0.160
20	0.120	0.120	0.120

ตาราง 4 แสดงช่วงเวลาการกระพริบครั้งต่อครั้ง จำนวน 20 ช่วง เมื่อคาบในการกระพริบเท่ากับ 0.111 ± 0.002 วินาที (9.00 ± 0.01 เฮิร์ตซ์)

ช่วงที่	ช่วงเวลาการกระพริบ (วินาที)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0.081	0.120	0.080
2	0.120	0.080	0.120
3	0.120	0.120	0.120
4	0.120	0.120	0.120
5	0.080	0.120	0.080
6	0.120	0.080	0.120
7	0.120	0.120	0.120
8	0.125	0.120	0.120
9	0.085	0.120	0.085
10	0.120	0.085	0.125
11	0.120	0.125	0.120
12	0.120	0.120	0.080
13	0.080	0.080	0.120
14	0.120	0.120	0.120
15	0.120	0.120	0.120
16	0.080	0.120	0.080
17	0.120	0.080	0.120
18	0.120	0.120	0.120
19	0.120	0.120	0.120
20	0.080	0.120	0.085

ตาราง 5 แสดงช่วงเวลาการกระพริบครั้งต่อครั้ง จำนวน 20 ช่วง เมื่อคาบในการกระพริบเท่ากับ 0.100 ± 0.002 วินาที (10.00 ± 0.01 เฮิร์ตซ์)

ช่วงที่	ช่วงเวลาการกระพริบ (วินาที)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0.080	0.080	0.080
2	0.120	0.120	0.120
3	0.080	0.080	0.080
4	0.120	0.120	0.120
5	0.080	0.080	0.080
6	0.120	0.120	0.120
7	0.080	0.080	0.080
8	0.120	0.120	0.120
9	0.080	0.080	0.080
10	0.120	0.120	0.120
11	0.080	0.080	0.080
12	0.120	0.120	0.120
13	0.080	0.080	0.080
14	0.120	0.120	0.120
15	0.080	0.080	0.080
16	0.120	0.120	0.120
17	0.080	0.080	0.080
18	0.120	0.120	0.120
19	0.080	0.080	0.080
20	0.120	0.125	0.120



ภาคผนวก ข

- ข้อมูลตำแหน่งกับเวลา โดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟนของรถไฟของเล่น
ที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วระดับ 1 และระดับ 2 ในชุดการทดลองที่ 1 ตอนที่ 2

ตาราง 6 แสดงตำแหน่งเฉลี่ยและเวลาเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว ระดับ 1 จากการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน

ตำแหน่ง ที่	$\Delta d = 10 \text{ cm}$		$\Delta d = 15 \text{ cm}$		$\Delta d = 20 \text{ cm}$	
	$x \text{ (m)}$	$t \text{ (s)}$	$x \text{ (m)}$	$t \text{ (s)}$	$x \text{ (m)}$	$t \text{ (s)}$
	(± 0.001)		(± 0.001)		(± 0.001)	
1	0.000	0.000 $\pm$ 0.000	0.000	0.000 $\pm$ 0.000	0.000	0.000 $\pm$ 0.000
2	0.100	0.476 $\pm$ 0.010	0.150	0.695 $\pm$ 0.009	0.200	0.954 $\pm$ 0.010
3	0.200	0.951 $\pm$ 0.009	0.300	1.455 $\pm$ 0.014	0.400	1.930 $\pm$ 0.017
4	0.300	1.439 $\pm$ 0.012	0.450	2.156 $\pm$ 0.017	0.600	2.915 $\pm$ 0.022
5	0.400	1.912 $\pm$ 0.010	0.600	2.907 $\pm$ 0.024	0.800	3.882 $\pm$ 0.025
6	0.500	2.434 $\pm$ 0.022	0.750	3.638 $\pm$ 0.024	1.000	4.875 $\pm$ 0.032
7	0.600	2.915 $\pm$ 0.024	0.900	4.371 $\pm$ 0.032	1.200	5.890 $\pm$ 0.038
8	0.700	3.397 $\pm$ 0.029	1.050	5.127 $\pm$ 0.039	1.400	6.821 $\pm$ 0.044
9	0.800	3.878 $\pm$ 0.029	1.200	5.882 $\pm$ 0.040	1.600	7.826 $\pm$ 0.045
10	0.900	4.376 $\pm$ 0.030	1.350	6.600 $\pm$ 0.046	1.800	8.817 $\pm$ 0.051
11	1.000	4.869 $\pm$ 0.030	1.500	7.309 $\pm$ 0.051	2.000	9.768 $\pm$ 0.056
12	1.100	5.371 $\pm$ 0.033	1.650	8.036 $\pm$ 0.052		
13	1.200	5.872 $\pm$ 0.050	1.800	8.796 $\pm$ 0.059		
14	1.300	6.344 $\pm$ 0.043	1.950	9.513 $\pm$ 0.061		
15	1.400	6.805 $\pm$ 0.050				
16	1.500	7.299 $\pm$ 0.052				
17	1.600	7.796 $\pm$ 0.055				
18	1.700	8.310 $\pm$ 0.064				
19	1.800	8.771 $\pm$ 0.066				
20	1.900	9.265 $\pm$ 0.068				
21	2.000	9.738 $\pm$ 0.069				

ตาราง 7 แสดงตำแหน่งเฉลี่ยและเวลาเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว ระดับ 2 จากการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน

ตำแหน่ง ที่	$\Delta d = 10 \text{ cm}$		$\Delta d = 15 \text{ cm}$		$\Delta d = 20 \text{ cm}$	
	$x \text{ (m)}$	$t \text{ (s)}$	$x \text{ (m)}$	$t \text{ (s)}$	$x \text{ (m)}$	$t \text{ (s)}$
	(± 0.001)		(± 0.001)		(± 0.001)	
1	0.000	0.000 $\pm$ 0.000	0.000	0.000 $\pm$ 0.000	0.000	0.000 $\pm$ 0.000
2	0.100	0.220 $\pm$ 0.009	0.150	0.346 $\pm$ 0.011	0.200	0.464 $\pm$ 0.011
3	0.200	0.466 $\pm$ 0.010	0.300	0.713 $\pm$ 0.009	0.400	0.931 $\pm$ 0.000
4	0.300	0.707 $\pm$ 0.010	0.450	1.051 $\pm$ 0.000	0.600	1.417 $\pm$ 0.002
5	0.400	0.927 $\pm$ 0.014	0.600	1.417 $\pm$ 0.002	0.800	1.868 $\pm$ 0.009
6	0.500	1.189 $\pm$ 0.015	0.750	1.774 $\pm$ 0.008	1.000	2.356 $\pm$ 0.009
7	0.600	1.413 $\pm$ 0.015	0.900	2.112 $\pm$ 0.008	1.200	2.839 $\pm$ 0.009
8	0.700	1.658 $\pm$ 0.014	1.050	2.480 $\pm$ 0.010	1.400	3.287 $\pm$ 0.009
9	0.800	1.894 $\pm$ 0.020	1.200	2.841 $\pm$ 0.008	1.600	3.754 $\pm$ 0.015
10	0.900	2.120 $\pm$ 0.015	1.350	3.189 $\pm$ 0.009	1.800	4.240 $\pm$ 0.016
11	1.000	2.364 $\pm$ 0.014	1.500	3.521 $\pm$ 0.002	2.000	4.708 $\pm$ 0.021
12	1.100	2.609 $\pm$ 0.016	1.650	3.878 $\pm$ 0.009		
13	1.200	2.851 $\pm$ 0.015	1.800	4.242 $\pm$ 0.007		
14	1.300	3.093 $\pm$ 0.016	1.950	4.590 $\pm$ 0.010		
15	1.400	3.307 $\pm$ 0.021				
16	1.500	3.541 $\pm$ 0.015				
17	1.600	3.784 $\pm$ 0.016				
18	1.700	4.022 $\pm$ 0.013				
19	1.800	4.256 $\pm$ 0.008				
20	1.900	4.485 $\pm$ 0.009				
21	2.000	4.727 $\pm$ 0.016				

ภาคผนวก ค

- ข้อมูลอัตราเร็วกับเวลา โดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดแสงของสมาร์ทโฟนของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วระดับ 1 และระดับ 2 ในชุดการทดลองที่ 1 ตอนที่ 3

ตาราง 8 แสดงอัตราเร็วเฉลี่ยและเวลาเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว ระดับ 1 จากการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน

ตำแหน่ง ที่	$\Delta d = 10 \text{ cm}$		$\Delta d = 15 \text{ cm}$		$\Delta d = 20 \text{ cm}$	
	$v \text{ (m/s)}$	$t \text{ (s)}$	$v \text{ (m/s)}$	$t \text{ (s)}$	$v \text{ (m/s)}$	$t \text{ (s)}$
1						
2	0.210±0.032	0.476±0.139	0.206±0.030	0.695±0.214	0.207±0.031	0.954±0.282
3	0.208±0.043	0.951±0.144	0.205±0.042	1.455±0.213	0.204±0.042	1.930±0.288
4	0.208±0.045	1.439±0.141	0.207±0.043	2.156±0.214	0.205±0.043	2.915±0.284
5	0.201±0.042	1.912±0.150	0.202±0.042	2.907±0.218	0.204±0.043	3.882±0.288
6	0.199±0.042	2.434±0.156	0.205±0.044	3.638±0.217	0.199±0.041	4.875±0.297
7	0.208±0.046	2.915±0.147	0.201±0.043	4.371±0.226	0.206±0.044	5.890±0.291
8	0.208±0.046	3.397±0.149	0.198±0.042	5.127±0.231	0.207±0.045	6.821±0.294
9	0.204±0.045	3.878±0.154	0.204±0.045	5.882±0.227	0.200±0.042	7.826±0.300
10	0.202±0.045	4.376±0.163	0.210±0.048	6.600±0.225	0.206±0.032	8.817±0.297
11	0.201±0.045	4.869±0.181	0.209±0.048	7.309±0.229		
12	0.199±0.047	5.371±0.162	0.202±0.045	8.036±0.236		
13	0.206±0.048	5.872±0.176	0.203±0.033	8.796±0.248		
14	0.214±0.057	6.344±0.185				
15	0.209±0.054	6.805±0.192				
16	0.202±0.052	7.299±0.206				
17	0.198±0.053	7.796±0.210				
18	0.205±0.057	8.310±0.318				
19	0.209±0.063	8.771±0.305				
20	0.207±0.044	9.265±0.316				
21						

ตาราง 9 แสดงอัตราเร็วเฉลี่ยและเวลาเฉลี่ยของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว ระดับ 2 จากการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง โดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน

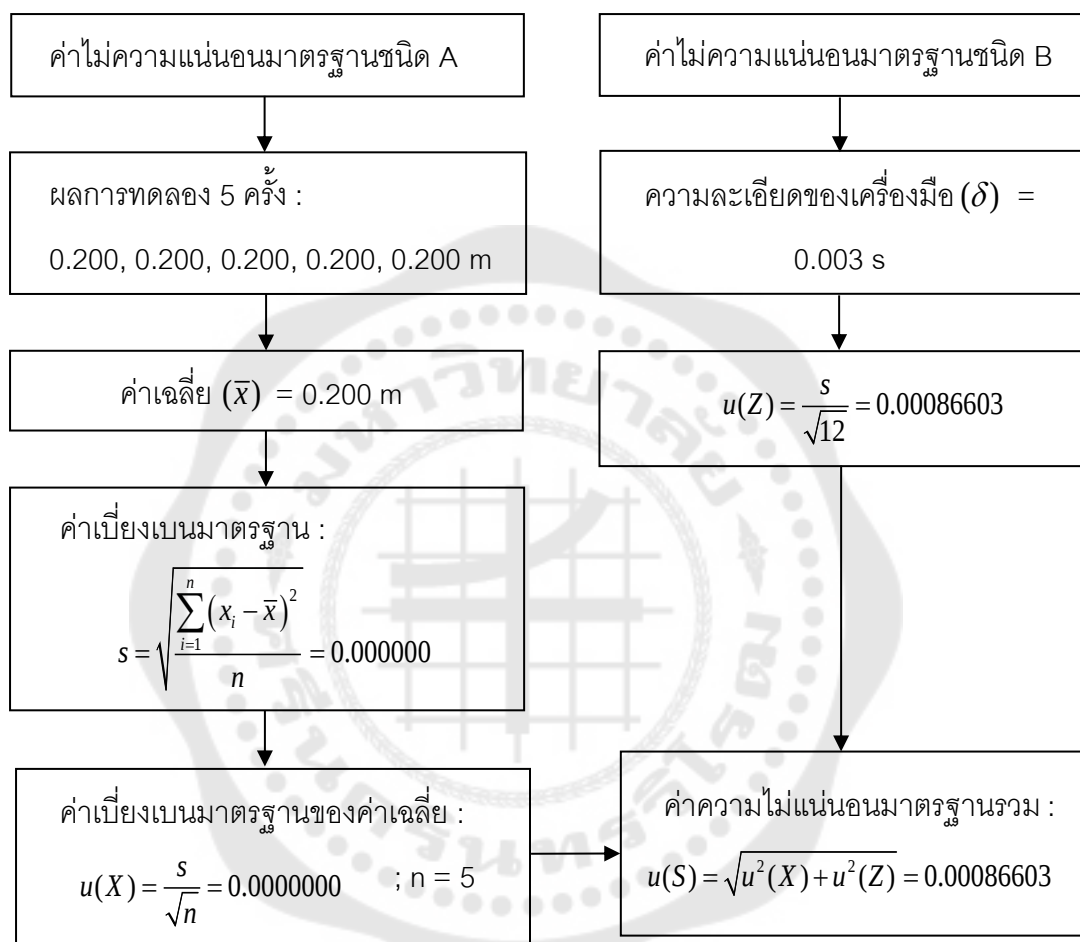
ตำแหน่ง ที่	$\Delta d = 10 \text{ cm}$		$\Delta d = 15 \text{ cm}$		$\Delta d = 20 \text{ cm}$	
	$v \text{ (m/s)}$	$t \text{ (s)}$	$v \text{ (m/s)}$	$t \text{ (s)}$	$v \text{ (m/s)}$	$t \text{ (s)}$
1						
2	0.429±0.067	0.220±0.072	0.421±0.062	0.346±0.106	0.430±0.063	0.464±0.134
3	0.411±0.087	0.466±0.073	0.426±0.090	0.713±0.105	0.420±0.084	0.931±0.138
4	0.434±0.098	0.707±0.073	0.426±0.090	1.051±0.104	0.427±0.089	1.417±0.138
5	0.415±0.091	0.927±0.075	0.415±0.085	1.417±0.104	0.426±0.089	1.868±0.139
6	0.412±0.090	1.189±0.076	0.432±0.092	1.774±0.105	0.412±0.082	2.356±0.139
7	0.426±0.097	1.413±0.076	0.425±0.090	2.112±0.106	0.430±0.089	2.839±0.133
8	0.416±0.096	1.658±0.075	0.412±0.084	2.480±0.106	0.437±0.093	3.287±0.133
9	0.433±0.100	1.894±0.080	0.423±0.087	2.841±0.105	0.420±0.086	3.754±0.141
10	0.426±0.099	2.120±0.076	0.441±0.094	3.189±0.100	0.419±0.062	4.240±0.141
11	0.409±0.090	2.364±0.076	0.435±0.092	3.521±0.098		
12	0.411±0.090	2.609±0.076	0.416±0.082	3.878±0.105		
13	0.413±0.092	2.851±0.076	0.421±0.063	4.242±0.105		
14	0.438±0.104	3.093±0.077				
15	0.446±0.108	3.307±0.079				
16	0.419±0.095	3.541±0.076				
17	0.416±0.092	3.784±0.076				
18	0.424±0.094	4.022±0.074				
19	0.432±0.097	4.256±0.070				
20	0.425±0.064	4.485±0.072				
21						



ภาคผนวก ง

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลการทดลอง

แผนภาพแสดงตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลตำแหน่งและเวลาของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัว จากการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง เพื่อนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลา



ค่าองศาอิสระ :

$$v_{\text{eff}}(S) = \frac{u^4(S)}{\frac{u^4(X)}{v_X} + \frac{u^4(Z)}{v_Z}} = \inf$$

เมื่อ v_X คือ Number of DOF ของ v_X เท่ากับ 4

v_Z คือ Number of DOF ของ v_Z เท่ากับ ∞

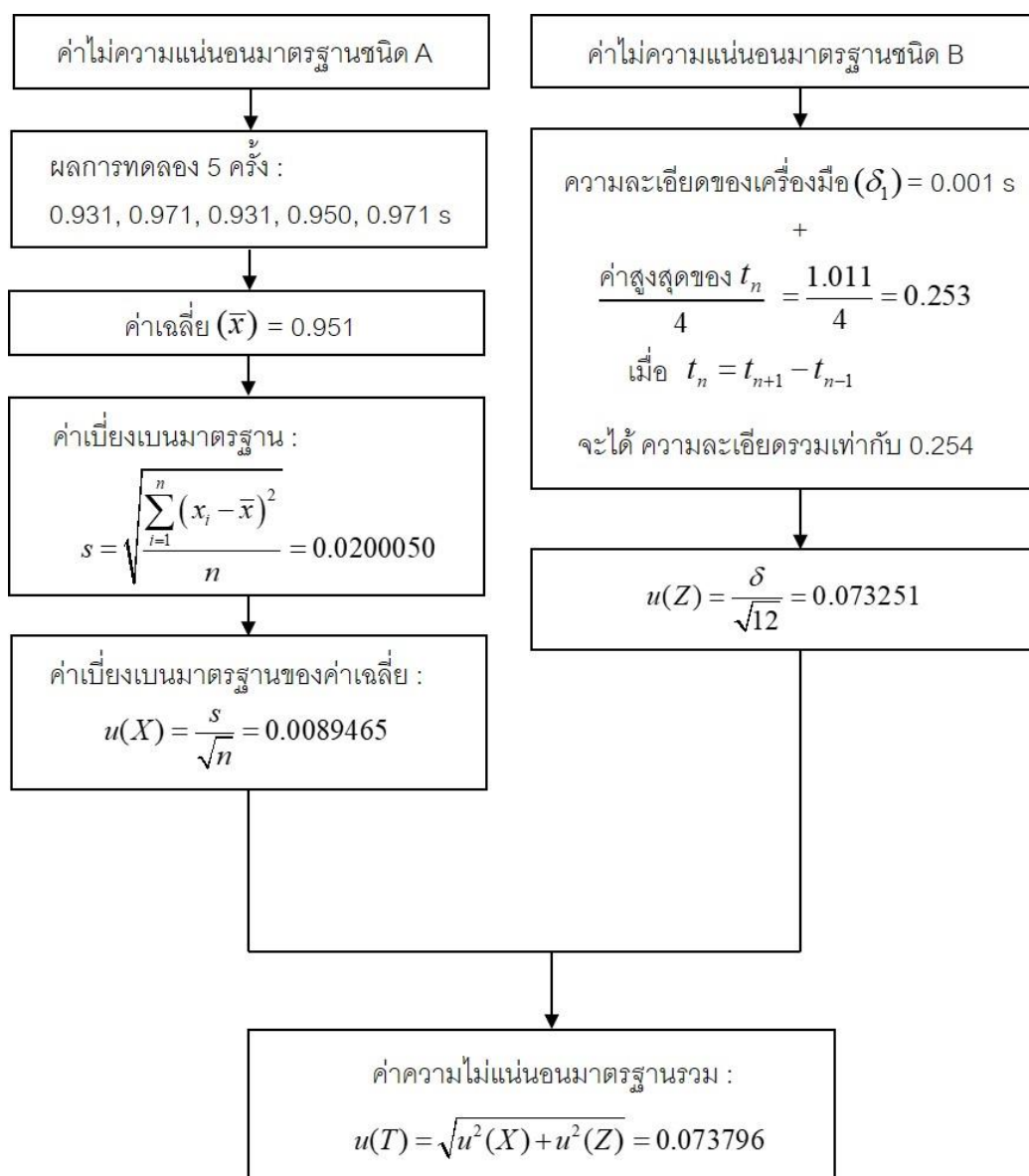
ปัดเศษทศนิยมลง จะได้ $v_{\text{eff}}(S) = \infty$

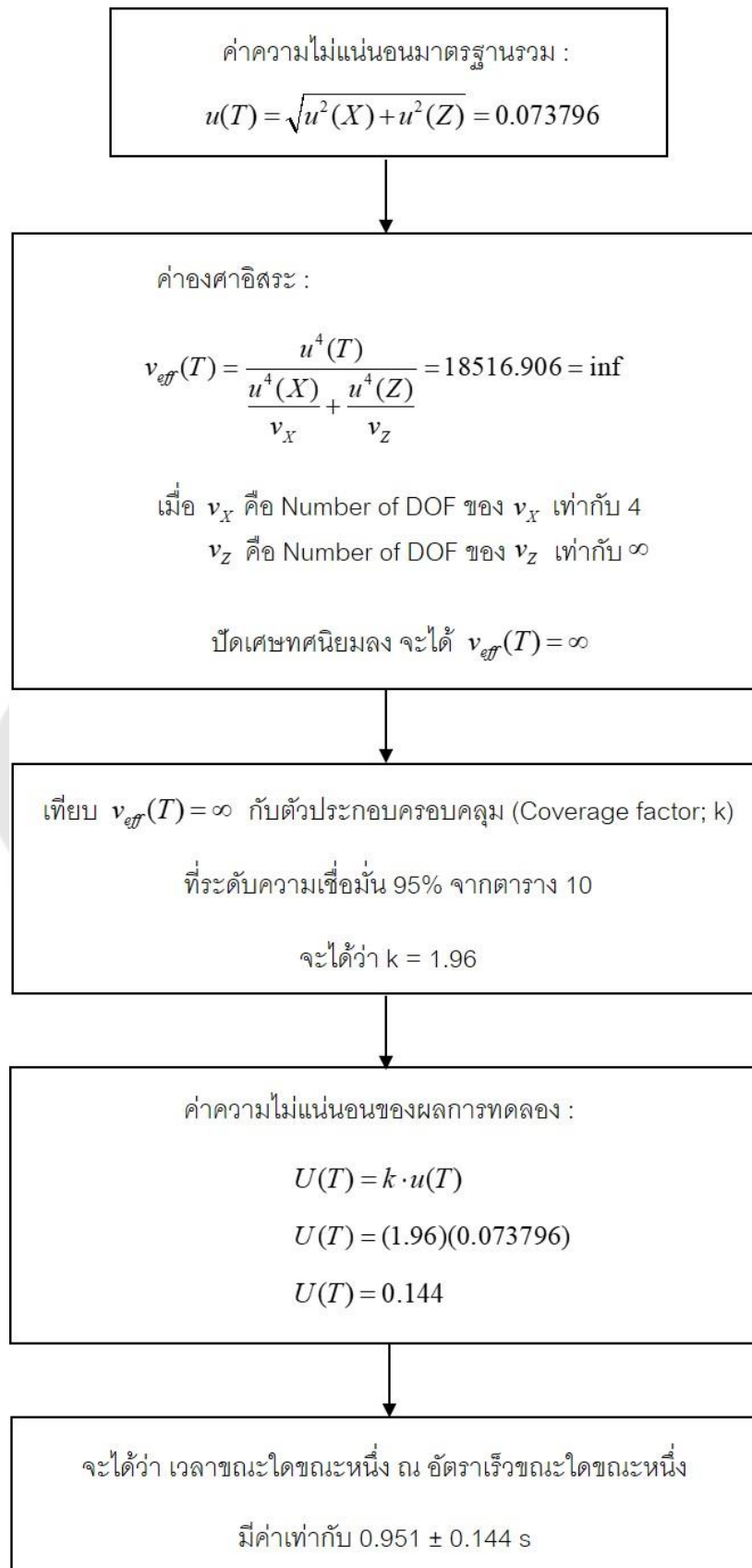
จะได้ว่า ตำแหน่งเฉลี่ยของรถไฟของเล่น

มีค่าเท่ากับ 0.200 ± 0.001 m

และค่า $v_{\text{eff}}(S) = \infty$

แผนภาพแสดงตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเวลาขณะใดขณะหนึ่งของรถไฟของเล่นที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัว จากการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง เพื่อนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเฉลี่ยกับเวลา





ตาราง 10 ตัวประกอบครอบคลุม (k) 95% ซึ่งเป็นฟังก์ชันขององศาอิสระ (v) (Kirkup, L. 2006)

องศาอิสระ, v	ตัวประกอบครอบคลุม, k
2	4.30
3	3.18
4	2.78
5	2.57
6	2.45
7	2.36
8	2.31
9	2.26
10	2.23
11	2.20
12	2.18
13	2.16
14	2.14
15	2.13
16	2.12
17	2.11
18	2.10
19	2.09
20	2.09
25	2.06
30	2.04
40	2.02
50	2.01
100	1.98
Infinite	1.96



ภาคผนวก จ
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

Analyzing a torsion pendulum using a smartphone's sensors: mechanical energy conservation approach

Witchayaporn Namchanthra¹, Supitch Khemmani¹,
Surawut Wicharn¹, Suwan Plaipichit¹, Chinnawut Pipatpanukul²
and Chokechai Puttharugsa¹

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Srinakharinwirot University,

114 Sukhumvit23, Wattana, Bangkok 10110, Thailand

² Office of Education, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi 20131, Thailand

E-mail: chokchai@g.swu.ac.th



Abstract

This paper describes the use of a smartphone's sensors to investigate the motion of a torsion pendulum to demonstrate energy conservation. The smartphone was placed on and attached to a metal disk hanging by a wire. The oscillation of the disk was measured using the smartphone's sensors to simultaneously record angular position, angular speed and angular acceleration. These experimental data were processed to demonstrate mechanical energy conservation during oscillation. We expect that this smartphone-based experiment will be useful for physics teachers and can make students better understand an oscillating disk's relationship with energy conservation.

1. Introduction

Torsion pendulum motion is a fundamental topic taught in physics classrooms and laboratories at the undergraduate level. Typically, torsion pendulum experiments involve the measurement of a pendulum's period; the moment of inertia in the pendulum's motion is varied to determine the torsional constant. Besides the torsion pendulum set, the only equipment used in the experiment is a stopwatch for time measurement. Although the setup is very simple, the experimental data from time measurement can be used to calculate only the torsional constant. In order to acquire various other parameters, we used a smartphone to

measure and record parameters of torsion pendulum motion.

Today, smartphones play an important role in teaching physics. This is because there are many applications that support learning and there are many embedded sensors for conducting physics experiments. Generally, the sensors in a smartphone consist of an acceleration sensor, a gyroscope sensor, a magnetic sensor, a barometer sensor, a GPS receiver and a microphone (the exact embedded sensors depend on the smartphone's brand). The sensors can be used to read and record experimental data through appropriated applications (apps), such as SensorLog, Sensor Kinetics,

the Physics Toolbox Sensor Suite, phyphox, etc. Thus, equipment that is expensive or unavailable at a school or university could be substituted by a smartphone. Moreover, students are very familiar with smartphones, which are easy to use, handy and accessible. Therefore, using smartphones to study physics phenomena makes it easier to concentrate on the experiment rather than on the measuring device. Previous research has shown the use of a smartphone's sensors to conduct physics experiments in mechanics, acoustics, light (diffraction or interference), electromagnetism and radiation [1–4]. Regarding pendulum experiments, Briggie used an Apple iPod touch/iPhone as the pendulum bob to measure the pendulum period using the acceleration sensor in the y axis to study oscillation [5]. Pili and Virolanda also measured the period of a simple pendulum to determine gravitational acceleration using a smartphone's ambient light sensor. The sensor can act as a motion timer for measuring a pendulum's period [6]. Cartro-Palacio and colleagues analyzed coupled oscillation using accelerometer sensors in the symmetric and asymmetric normal modes [7]. Interestingly, the results indicate that a smartphone's acceleration sensors are very familiar to students and represent valuable measurement tools for introductory physics courses. Pierratos and Polatoglou showed the use of smartphones for students to study a simple pendulum's conservation of mechanical energy [8]. They used an acceleration sensor to measure the centripetal acceleration on mass and, from that, deduced the maximum velocity. The maximum velocity can be calculated as kinetic energy, which relates to the conservation of mechanical energy. In addition, a magnetic sensor was used to record experimental data from a simple/spring pendulum for determining gravitational acceleration [9, 10]. As can be seen, most papers report the use of a smartphone's sensors to record the motion of a simple pendulum (smartphone acting as a pendulum bob) for measuring important parameters such as the acceleration of gravity. As described above, smartphones are powerful and useful instruments for logging experimental data in physics experiments.

In this paper, we present the use of smartphones to analyze a torsion pendulum. The

smartphone's sensors were used to simultaneously measure angular displacement, angular velocity and linear acceleration. The recorded data were then analyzed to determine the magnitudes of angular displacement, angular velocity and angular acceleration of the motion of oscillation. Moreover, we show the conservation of mechanical energy and the relationship between kinetic energy and potential energy in the motion. We expect that the experiment will be useful for physics instructors to teach in physics laboratories.

2. Theoretical background

Consider a metal disk suspended by a rod wire attached to the top of a fixed support. A smartphone is placed and attached on the metal disk, as shown in figure 1 (this is sometimes called the disk). The disk is twisted through a small angle θ and then released. It oscillates about the wire's axis. The twisted wire exerts on the disk a restoring torque (τ) that is proportional to the angular position. We can use

$$\tau = -\kappa\theta, \quad (1)$$

where κ is called the torsion constant of the support wire. Applying Newton's second law for rotational motion gives

$$\sum \tau = I\alpha \rightarrow -\kappa\theta = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{\kappa}{I}\theta = 0 \quad (3)$$

where α is angular acceleration and I is the total moment of inertia. This equation (equation (3)) is the equation of motion for a simple harmonic oscillator. With initial conditions at $t = 0$ s $\rightarrow \theta(0) = \theta_m$, the solution can be written as

$$\theta(t) = \theta_m \cos \omega_0 t, \quad (4)$$

where θ_m is the amplitude of the oscillator and $\omega_0 = \sqrt{\kappa/I}$. We can find angular velocity (ω) and angular acceleration (α) by taking the first and second derivatives of $\theta(t)$ with respect to t , thereby giving

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = -\omega_m \sin \omega_0 t, \quad \text{and} \quad (5)$$

Analyzing a torsion pendulum using a smartphone's sensors

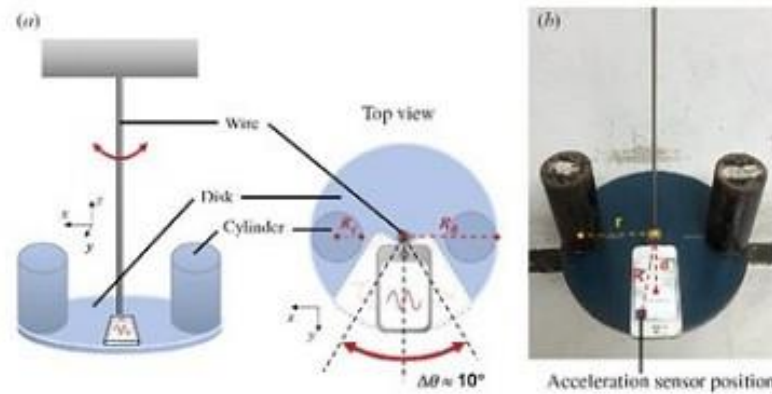


Figure 1. A schematic of a torsion pendulum with a smartphone attached to the metal disk (A). A digital image of the torsion pendulum and smartphone (B).

$$\alpha(t) = \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = -\alpha_m \cos \omega_0 t, \quad \text{respectively.} \quad (6)$$

Where $\omega_m = \theta_m \omega_0$ and $\alpha_m = \theta_m \omega_0^2$ are the maximum angular frequency and the maximum angular acceleration, respectively. The value of $\sqrt{\kappa/I}$ is the angular frequency of the oscillator and thus the period of its motions is $T = 2\pi\sqrt{I/\kappa}$. The value of κ can be determined from the period of motion, which is

$$\kappa = \frac{4\pi^2 I}{T^2}. \quad (7)$$

The total of mechanical energy (E) for this oscillator consists of kinetic energy (K) and potential energy (U), that is

$$E = K + U, \quad (8)$$

where

$$K = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{2} \kappa \theta_m^2 \sin^2 \omega_0 t, \quad \text{and} \quad (9)$$

$$U = \frac{1}{2} \kappa \theta^2 = \frac{1}{2} \kappa \theta_m^2 \cos^2 \omega_0 t, \quad (10)$$

$$E = K + U = \frac{1}{2} \kappa \theta_m^2 [\sin^2 \omega_0 t + \cos^2 \omega_0 t].$$

From the identity, we see that the quantity in the square bracket is a unity. Therefore, this equation reduces to

$$E = \frac{1}{2} \kappa \theta_m^2. \quad (11)$$

Thus, the total mechanical energy of the disk oscillator is a constant of the motion and is proportional to the square of the amplitude.

3. Experimental setup

Our experimental setup of the torsion pendulum consisted of a metal disk with a mass of $m_d = 4.954 \pm 0.001$ kg, a diameter of 0.254 ± 0.001 m and a thickness of 0.010 ± 0.001 m. It was hung by a fixed-end stainless steel (it mass $m_w = 0.2124 \pm 0.0001$ kg) wire with a diameter of 0.00415 ± 0.00002 m and a length of 1.000 ± 0.001 m. The metal cylinder had a mass (m_c) of 2.665 ± 0.001 kg with a diameter of 0.057 ± 0.001 m and a height of 0.134 ± 0.001 m. A smartphone (iPhone 4s) with mass $m_s = 0.141$ kg and dimensions of $w \times l \times h = 0.0586 \times 0.1152 \times 0.0093$ m³ was used to record experimental data. The smartphone was placed on and attached tightly to the metal disk using double-sided tape. The distance from the center of the disk to the iPhone 4s' center was $d = 0.079 \pm 0.001$ m, as seen in figure 1(B). The SensorLog application (version 1.7) was installed on the iOS system of the smartphone (iPhone4s) to record the experimental data. This application was set to record the rotation rate and acceleration

using the device motion sensor. The data were recorded at a rate of 30 points per second or 30 Hz and then sent to the user via e-mail for analysis. In the experiment, the metal disk was twisted with a small angle of $\sim 10^\circ$ around the wires' axis and the SensorLog app was launched to start the data acquisition. The data of angular position were obtained from the device motion, which reports the orientation of the device/smartphone in radian units. This information on device motion was processed from raw accelerometer and gyroscope data to remove bias from other factors, such as gravity. The data of angular speed and acceleration were obtained from the gyroscope and acceleration sensors. The raw data of acceleration in the x axis were processed to obtain angular acceleration. To determine the torsion constant using a smartphone, we measured the period of the torsion pendulum with and without the metal cylinder on the metal disk. Two metal cylinders were equally placed and adjusted each 0.005 m from the wire's axis. The total moment of inertia can be calculated using the parallel axis theorem for adding the metal cylinder on the disk as shown in equations (A.1)–(A.5) in appendix. From equation (7), if we plot the relationship between T^2 and I , the torsion constant or κ can be determined by the slope of the graph, which is $4\pi^2/\kappa$.

To determine the torsion constant using another method, the metal disk without the smartphone was twisted and then released. The period of disk motion was measured using a stopwatch. We used equation (7) to determine the value of κ .

4. Results and discussion

Figure 2 shows examples of the processed data recorded from the smartphone's sensors for the metal disk oscillator. The disk was twisted about 10° and then released. The experimental data were simultaneously recorded using the smartphone's sensors. The angular position was obtained from the device motion sensor. This sensor measures the rotational motion in the smartphone's z axis in radian units. The angular velocity was recorded by the gyroscope sensor, which also measured and read the smartphone's z axis. The angular acceleration was obtained from the acceleration sensor in the smartphone's

x axis. To obtain angular acceleration, the recorded data must be processed by dividing by the radius of motion ($R = 0.107 \pm 0.001$ m), which is measured from the position of acceleration sensor to the center of motion [11]. All experimental data must be processed to offset for the disk oscillating about the equilibrium position. Figure 2 shows the obtained data (processed data) for the position of the smartphone for one period of oscillation from the A position to the E position. Notice that the phase of angular position differs from the phase of the angular velocity by $\pi/2$ rad, or 90° . That is, when the angular position is maximum (A position) or a minimum (C position), the angular velocity is zero. Likewise, when the angular position is zero, the angular velocity is maximum. Furthermore, notice that the phase of the angular acceleration differs from the phase of angular position by π rad, or 180° . For example, when the angular position is maximum (A position), the angular acceleration has a maximum magnitude in the opposite direction. Moreover, the experimental data were fitted using equations (4)–(6) to obtain parameters such as maximum angular displacement, maximum angular velocity, maximum angular acceleration and angular frequency. The values were 0.2106 ± 0.0004 rad, 1.5166 ± 0.0012 rad s^{-1} , 10.078 ± 0.044 rad s^{-2} and 7.2345 ± 0.0001 rad s^{-1} for the maximum angular displacement, the maximum angular velocity, the maximum angular acceleration and angular frequency, respectively. The torsional constant value can also be obtained using equation (7). The average period, shown in figure 2(left), was 0.86855 ± 0.00005 s, yielding $\kappa = 2.14 \pm 0.01$ kg $\cdot$ m 2 s^{-2} . The torsional constant obtained using the stopwatch was $\kappa = 2.11 \pm 0.02$ kg $\cdot$ m 2 s^{-2} . The error or uncertainty from using the different methods was $1.42\% \pm 0.02\%$. These results suggest that we can use a smartphone's sensor with the SensorLog app to simultaneously record angular displacement, angular velocity and angular acceleration. This can make students better understand the phase difference in oscillating motion.

Figure 3 Shows the plot of T^2 and the total moment of inertia (I) at different positions of the two metal cylinders on the disk. In the experiment, two cylinders were placed on the disk at equal distances from the center. The total moment of

Analyzing a torsion pendulum using a smartphone's sensors

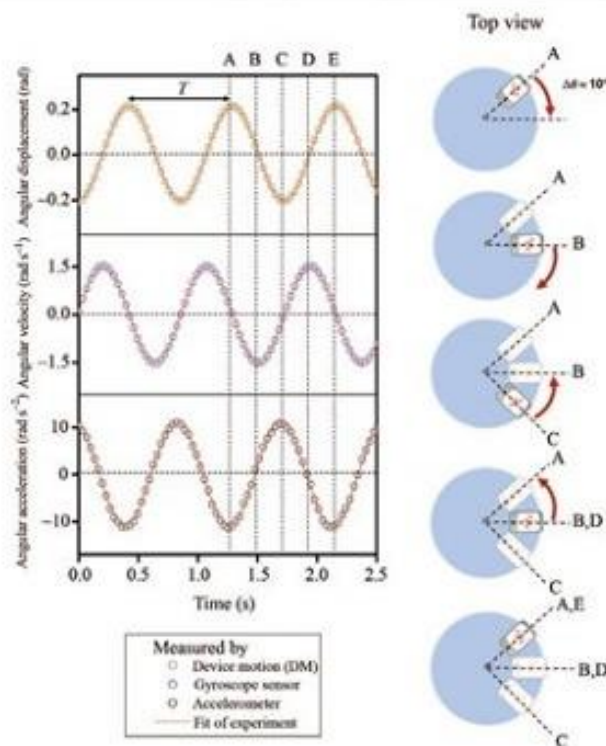


Figure 2. Shows the plots of angular displacement, angular velocity and angular acceleration from top to bottom (left) that were obtained using various sensors of a smartphone. The schematic of the torsion pendulum (right) shows the positions of the smartphone on the disk that correspond to the plots on the left-hand side.

inertia was calculated using the parallel axis theorem. The period of the pendulum was measured using a smartphone and the plot of angular position—time. Another method to obtain the pendulum period, a stopwatch, was also used. When the positions of two metal cylinders placed on the disk were far away from the twisting axis (center), the total moment of inertia increased, yielding a higher period of the pendulum. The slopes of the graphs obtained from the smartphone and stopwatch were $18.08 \pm 0.10 \text{ s}^2 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ and $18.31 \pm 0.22 \text{ s}^2 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)^{-1}$, respectively, which equal $4\pi^2/\kappa$. Thus, the torsional constants κ obtained from the smartphone and stopwatch were $2.18 \pm 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \text{ s}^{-2}$ and $2.15 \pm 0.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \text{ s}^{-2}$. These values obtained from the smartphone and stopwatch correspond to the values mentioned above. Moreover,

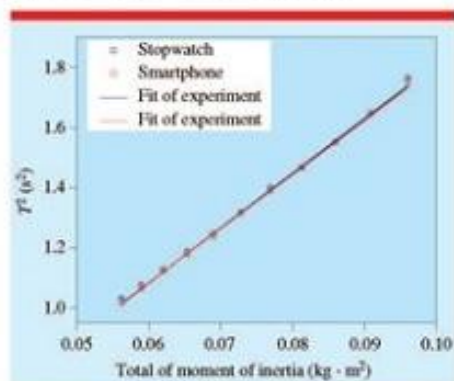


Figure 3. Shows the plots between T^2 and I measured by a smartphone and a stopwatch.

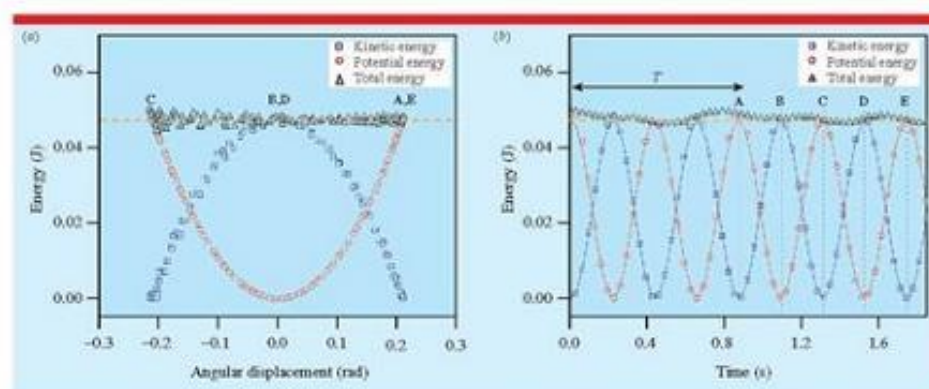


Figure 4. (A) Kinetic energy, potential energy and total mechanical energy versus angular position for the disk oscillator. (B) Kinetic energy, potential energy and total mechanical energy versus time for the disk oscillator.

the experiment make the student more understand the moment of inertia relate to the pendulum's period and using axis parallel theorem to calculate the total of moment of inertia.

The advantage of the smartphone is that it can simultaneously record both angular position and angular speed. Thus, we can plot the kinetic and potential energies as a function of angular position using equations (9) and (10), respectively. Figure 4(A) shows the plot of kinetic energy, potential energy and total mechanical energy for the disk oscillator. We selected the information of disk oscillator for four periods which was in the range of 3.4940 ± 0.0009 s. The kinetic energy was processed from experimental data of angular speed, as seen in equation (9), and plotted as a function of angular position. The potential energy was processed from the experimental data of angular position, as seen in equation (10), and plotted as a function of angular position. At all times, the sum of kinetic and potential energies (the black triangle) is a constant equal to the total energy of the system, which averaged about 0.04736 ± 0.00010 J. The calculation of total energy from equation (11) was 0.04746 ± 0.00029 J, which agrees with the experiment. The variation of kinetic and potential energy at any angular position, as seen in the schematic of figure 2, which corresponds to the A–E positions in figure 4. Energy is continuously being transformed between potential energy stored in the twisted wire and the kinetic energy

of the disk. The total mechanical energy is again equal to the maximum potential energy stored in the twisted wire when $\theta = \pm\theta_m$ (at the A, E and C position) because $\omega = 0$ at these points and there is no kinetic energy. At the equilibrium position (at the B and D position), where $U = 0$ because $\theta = 0$, the total energy is all in the form of kinetic energy. Figure 4(B) shows the plot of the kinetic, potential and total energies versus time for the disk oscillator moving in two periods. The kinetic energy was processed from experimental data of angular speed obtained from gyroscope sensor and plotted as a function of $\sin^2\omega_0 t$ (see equation (9)). The potential energy was also processed from experimental data of angular position obtained from device motion sensor (see equation (10)), and plotted as a function of $\cos^2\omega_0 t$. At all time, energy is continuously being transformed between potential energy (red circle) and kinetic energy (blue square) as seen in figure 4(B). The sum of the kinetic and potential energies is again a constant equal to the total energy of the system or $\frac{1}{2}k\theta_m^2$ (black triangle), which was about 0.04790 ± 0.00013 J. At $t = 0.89$ s (at A position), the potential energy has the maximum value (potential energy stored in the twisted wire) because of $\omega = 0$. There is no kinetic energy at the A, C and E position. At $t = 1.12$ s (at B position or at the equilibrium position), the kinetic energy has the maximum value due to the energy transformation from potential energy to kinetic energy. The potential energy becomes zero at the

Analyzing a torsion pendulum using a smartphone's sensors

equilibrium position (B and D position). At the intersection between potential and kinetic energies, the both energies have the same value. Thus, we can use a smartphone to record experimental data simultaneously from a torsion pendulum for analyzing oscillation. In addition, we believe that the processing of data from the torsion pendulum experiment to approach mechanical energy will help students assimilate and better understand the relationship between kinetic energy, potential energy and the total mechanical energy.

5. Conclusions

We have demonstrated the use of a smartphone's sensors to measure angular position, angular speed and angular acceleration for analyzing a torsion pendulum. The torsion constant obtained from measuring the period of a pendulum in the plot of angular displacement-time corresponds to that obtained from using a stopwatch. We expect that the use of a smartphone to demonstrate a torsion pendulum experiment for mechanical energy will be useful for physics teachers. Moreover, this experiment can make students visualize phase differences (among angular of displacement, speed and acceleration) and better understand the relationship between kinetic energy, potential energy and total mechanical energy.

Acknowledgments

WN gratefully acknowledges financial support from the Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology.

Appendix

The total of moment of inertial (I) can be calculated from the following equation;

$$I = I_d + I_w + I_s + I_c, \quad (\text{A.1})$$

where I_d , I_w , I_s and I_c are the moment of inertia of metal disk, wire, smartphone and metal cylinder, respectively. The metal disk and the wire rotate about the axis, passing through their center of mass, which give

$$I_d = \frac{1}{2} m_d R_d^2, \quad \text{and} \quad (\text{A.2})$$

$$I_w = \frac{1}{2} m_w R_w^2, \quad (\text{A.3})$$

where R_d and R_w are the radius of metal disk and wire, respectively. For the smartphone and metal cylinder, we use the parallel-axis theorem for calculating the moments of inertia as seen in the equations (A.4) and (A.5),

$$I_s = I_{\text{cm}} + m_s d^2, \quad \text{and} \quad (\text{A.4})$$

$$I_c = I_{\text{cm}} + m_c r^2, \quad (\text{A.5})$$

where $I_{\text{cm}} = \frac{1}{12} m_s (w^2 + l^2)$ and $I_{\text{cm}} = \frac{1}{2} m_c R_c^2$ are the moment of inertia of the smartphone and the cylinder which rotate about the axis passing through their center of mass. Where w and l are the width and length of smartphone, while R_c is the radius of metal cylinder. The distance d and r are measured from the rotating axis to their center of mass. Thus, the total moment of inertia for the system is $0.0409 \pm 0.0001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ about the wire's axis. Note that the moments of inertia of the metal disk, smartphone and wire are $0.0398 \pm 0.0001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $0.001072 \pm 0.000001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ and $0.00000458 \pm 0.000000004 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, respectively. For adding two cylinder in the system, the total moment of inertial for the system is in range of $0.05627 \pm 0.00014 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ to $0.09608 \pm 0.00015 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, depending on the distance of r . Notice that the moment of inertia of wire can be neglected.

Received 17 June 2019, in final form 11 July 2019

Accepted for publication 1 August 2019

<https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab37a3>

References

- [1] Nuryantini A Y, Sawitri A and Nuryadin B W 2018 Constant speed motion analysis using a smartphone magnetometer *Phys. Educ.* **53** 065021
- [2] Gómez-Tejedor J A, Castro-Palacio J C and Monsoriu J A 2014 The acoustic Doppler effect applied to the study of linear motions *Eur. J. Phys.* **35** 025006
- [3] Arribas E, Escobar I, Suarez C P, Najera A and Beléndez A 2015 Measurement of the magnetic field of small magnets with a smartphone: a very economical laboratory practice for introductory physics courses *Eur. J. Phys.* **36** 065002

W Namchanthra *et al*

- [4] Gröber S, Molz S and Kuhn J 2014 Using smartphones and tablet PCs for β^- -spectroscopy in an educational experimental setup *Eur. J. Phys.* **35** 065001
- [5] Briggles J 2013 Analysis of pendulum period with an iPod touch/iPhone *Phys. Educ.* **48** 285
- [6] Pili U and Violanda R 2018 A simple pendulum-based measurement of g with a smartphone light sensor *Phys. Educ.* **53** 043001
- [7] Castro-Palacio J C, Velazquez-Abad L, Gimenez F and Monsoriu J A 2013 A quantitative analysis of coupled oscillations using mobile accelerometer sensors *Eur. J. Phys.* **34** 737
- [8] Pierratos T and Polistoglou H M 2018 Study of the conservation of mechanical energy in the motion of a pendulum using a smartphone *Phys. Educ.* **53** 015021
- [9] Pili U, Violanda R and Ceriza C 2018 Measurement of g using a magnetic pendulum and a smartphone magnetometer *Phys. Teach.* **56** 358
- [10] Pili U and Violanda R 2019 Measuring a spring constant with a smartphone magnetic field sensor *Phys. Teach.* **57** 198
- [11] Larnder C I and Larade B 2019 On the determination of accelerometer positions within host devices *Am. J. Phys.* **87** 130



Witchayaporn Namchanthra has a bachelor's degree in physics education. She is currently studying on a master's degree in physics at Srinakharinwirot university. Her interests are utilizing a smartphone-based experimental set-up to develop more interesting, practical high school physics laboratory and also easy to carry out in classroom.



Supitch Khemmani is a lecturer in physics at the Srinakharinwirot University (Bangkok, Thailand). His research interests are theoretical physics and physics education.



Surawut Wicharn received his BSc degree with honors, MSc degree, and PhD degree in applied physics from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand, in 2007, 2010, and 2014 respectively. He is currently an instructor at the Department of Physics of Srinakharinwirot University, Bangkok, Thailand. His research areas include the theoretical and computational study on photonic structure and optical metamaterials, optimal design of the wireless energy harvesting system, and physics education.



Suwan Plapichit received his B.S., M.S. and Ph.D. degrees in applied physics from the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang in 2008, 2010, and 2014, respectively. He is currently an instructor at Department of Physics of Srinakharinwirot University, Bangkok, Thailand. His research interests include nonlinear optics, photorefractive effect, digital holography, and physics education.



Chinnawut Pipatpankul studied materials science and engineering and received his Ph.D. from Mahidol University, Thailand, working with Asst. Prof. Dr. Toemsak Srikitra at Center of Nanoscience and Nanotechnology, Mahidol University on surface functionalization materials for biosensors application, specifically self-assembled silane monolayers. After a postdoctoral stay at the Chemistry and Physics of Interfaces research laboratories in Freiburg, Germany, where he studied photoactive polymer layers for the improvement of surface functionalization of materials, he returned to Thailand and in 2016 started to work at the Burapha University. He is also interested in biomedical physics research applied for biomedical laboratory.



Chokechai Pottharugsa gained a PhD in Physics at the Mahidol University (Bangkok, Thailand). He is a lecturer in physics at the Srinakharinwirot University (Bangkok, Thailand). His research fields involve nanomaterial and nanotechnology. He is also interested in physics education research for applying a smartphone in physics laboratory.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล วิชาพร นามจันทร์
วัน เดือน ปี เกิด 30 ธันวาคม 2535
สถานที่เกิด อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร
วุฒิการศึกษา พ.ศ. 2553
 มัธยมศึกษาปีที่ 6
 จาก โรงเรียนจุฬารัตนราชวิทยาลัย มุกดาหาร
 พ.ศ. 2558
 การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น สาขาวิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์
 จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
 พ.ศ. 2562
 การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น สาขาฟิสิกส์
 จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

