

การพัฒนาชุดทดลองทางฟิสิกส์: การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงโดยใช้เซนเซอร์ของ
สมาร์ทโฟน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
เมษายน 2561

การพัฒนาชุดทดลองทางฟิสิกส์: การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงโดยใช้เซนเซอร์ของ
สมาร์ทโฟน



ปริญญานิพนธ์
ของ
ภัทร วัฒนโยธิน

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

เมษายน 2561

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การพัฒนาชุดทดลองทางฟิสิกส์: การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงโดยใช้เซนเซอร์ของ
สมาร์ทโฟน



บทคัดย่อ
ของ
ภัทร วัฒนโยธิน

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
เมษายน 2561

ภัทร วัฒนโยธิน. (2561). การพัฒนาชุดทดลองทางฟิสิกส์: การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงโดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน. ปรินญาณพนธ์ กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. อาจารย์ที่ปรึกษาปรินญาณพนธ์: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โชคชัย พุทธิรักษา, ดร.สุพิชญ์ แวมมณี.

งานวิจัยนี้ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดการทดลองสำหรับการสอนการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยใช้สมาร์ทโฟนเป็นสื่อการสอน เพื่อส่งเสริมให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจความเข้าใจถึงแนวคิดของการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง ผู้วิจัยศึกษาทฤษฎีการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียงและทำการทดลองใช้สมาร์ทโฟนติดกับทรงกระบอกกลวง สำหรับการบันทึกข้อมูลการทดลองผ่านเครื่องรับรู้แมกนีโทมิเตอร์ และไจโรสโคป ผลการทดลองพบว่าที่มุมเอียงที่น้อยกว่าหรือเท่ากับมุมวิกฤตขนาดของความเร่งเชิงมุมจะแปรผันตรงกับมุมของพื้นเอียง และทรงกระบอกจะกลิ้งแบบไม่มีการไถล แต่เมื่อมุมของพื้นเอียงมีค่ามากกว่ามุมวิกฤต ทรงกระบอกจะกลิ้งแบบมีการไถล ผู้วิจัยได้นำชุดการทดลองนี้ไปใช้ในการจัดการเรียนรู้โดยมีกลุ่มเป้าหมายคือนิสิตปีที่ 1 ระดับปริญญาตรี ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2560 จำนวน 38 คน รวบรวมข้อมูลโดยแบ่งกลุ่มผู้เรียนเป็นสองกลุ่มใช้การจัดการเรียนรู้โดยใช้ชุดการทดลองกับกลุ่มทดลองจำนวน 23 คน และใช้การบรรยายกับกลุ่มควบคุมจำนวน 15 คน แล้ววัดผลการประเมินผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นด้วยวิธี Normalized gain โดยใช้แบบทดสอบก่อนเรียนหลังเรียนแบบปรนัยจำนวน 5 ข้อ ผลการวิจัยพบการจัดการเรียนรู้โดยใช้ชุดการทดลองให้ผลที่ดีกว่าการบรรยาย กลุ่มทดลองมีค่า Normalized gain รายข้อ 0.67, 0.94, 0.29, 0.57 และ 0.62 ตามลำดับ ขณะที่กลุ่มควบคุมมีผลความก้าวหน้าทางการเรียนรายข้อ 0.50, 0.27, 0.34, 0.00 และ 0.49 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าผู้เรียนยังขาดความเข้าใจในเรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง มุมวิกฤต และแรงเสียดทาน

DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL PHYSICS MEDIA: THE ROLLING MOTION OF
HOLLOW CYLINDER MEASURED USING A SMARTPHONE SENSOR



Presented in Fulfillment of the Requirement for the
Master of Education Degree in Physics
at Srinakharinwirot University
April 2018

Phatrara Wattanayotin. (2018). *Development of Experimental Physics Media: the Rolling Motion of Hollow Cylinder Measured using a Smartphone Sensor*. Master thesis, M.Ed. (Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst. Prof. Dr. Chokchai Puttharugsa, Dr. Supitch Khemmani.

The purpose of this study was to develop an experimental media for teaching the measurement of the rolling motion measured using the sensors of a smartphone's sensors. The objective is to increase student understanding about the concept of rolling motion. The theory of the rolling motion of a hollow cylinder on an inclined plane was studied. To give the experiment an aspect of media, a smartphone was attached to one end of a hollow cylinder to record experimental data via a magnetometer and a gyroscope sensor. The hollow cylinder was released on an inclined plane at various inclined angles. The results showed that the hollow cylinder was rolling without slipping on the inclined plane and the angular acceleration was proportional to the inclined angle which was less or equal to the critical angle. While the inclined angle was greater than the critical angle, the hollow cylinder was rolling with slipping on the inclined plane. Moreover, the experimental media of rolling motion was used for classroom teaching. The target group consisted of thirty eight undergraduate physics majors at Srinakharinwirot University. The students were separated into two groups. First, the treatment group which consisted of twenty three students were treated by experimental leaning. Another control group consisted of fifteen students was taught by the lecture method. The pre-test and post-test survey contained five multiple choice questions which were utilized to identify the effectiveness of the coursework. The results were analyzed using a single test item normalized gain method revealed that learning management using experimental learning can be more effective then lectures. The treatment group has normalized gains of 0.67, 0.94, 0.29, 0.57 and 0.62 respectively. For the control group, normalized gain was shown at 0.50, 0.27, 0.34, 0.00 and 0.49 respectively. In addition, the misunderstanding of students displayed around the topic of rolling motion, critical angle and friction force.

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาให้คำปรึกษาและแนวทางการทำวิจัยจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โชคชัย พุทธรักษา อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์และอาจารย์ ดร.สุพิชญ์ แฉมมณี อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการศึกษาค้นคว้าตลอดจนให้คำแนะนำและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณทุกท่านด้วยความเคารพอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.สุรวุฒิ วิจารณ์ นายชาติ ครองศักดิ์ศิริ และนายพลวัฒน์ ดำรงกิจภากร ที่ให้ความกรุณาเป็นผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยตลอดจนให้คำแนะนำและแก้ไขเครื่องมือในการวิจัยจนสามารถนำไปใช้ในการเก็บข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ได้

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์ และอาจารย์ ดร.วัชร λεύวเรียน ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบปากเปล่า พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะที่มีคุณค่าทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ตลอดจนแนะนำแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จอย่างสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่กรุณาให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ภัทร วัฒนโยธิน

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การพัฒนาชุดทดลองทางฟิสิกส์: การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงโดยใช้เซนเซอร์ของ
สมาร์ทโฟน
ของ
ภัทร วัฒนโยธิน

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์จันทรชัย เอกบุญญาสกุล)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โชคชัย พุทธรักษา) (อาจารย์ ดร. วัชร เลี้ยวเรียน)

.....ที่ปรึกษาร่วม กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุพิชญ์ แหมมณี) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โชคชัย พุทธรักษา)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุพิชญ์ แหมมณี)

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
ขอบเขตการวิจัย.....	2
ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุแข็งเกร็ง.....	5
การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล.....	5
การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลบนพื้นเอียงของทรงกระบอก.....	6
มุมวิกฤตของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลบนพื้นเอียง.....	8
ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต.....	9
เครื่องมือรับรู้.....	10
เครื่องมือรับรู้ภาพ.....	10
มาตรฐานความเร่ง.....	10
แมกนีโทมิเตอร์.....	11
ไจโรสโคป.....	12
การทบทวนวรรณกรรม.....	15
งานวิจัยด้านการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง.....	15
งานวิจัยด้านฟิสิกส์ศึกษา.....	20
งานวิจัยที่ใช้สมาร์ทโฟนเป็นสื่อการสอน.....	20
การประเมินผลการเรียนรู้โดยการใช้ผลการทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน.....	28
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น งานวิจัย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....	29
สร้างการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียง.....	29
วัสดุและอุปกรณ์.....	29
การกลิ้งบนพื้นเอียงของชุดการทดลอง.....	30
โปรแกรมประยุกต์ที่ใช้ในการทดลอง.....	32

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 (ต่อ)	
วิธีการทดลอง.....	34
ผลการทดลอง.....	37
สรุปผลการทดลอง.....	41
4 ผลการวิจัย.....	42
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	42
วิธีการดำเนินการรวบรวมข้อมูล.....	42
ผลการทดสอบด้วยแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน และวิเคราะห์การทำ	
แบบทดสอบของผู้เรียน.....	44
ผลการทดสอบด้วยแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 1.....	45
ผลการทดสอบด้วยแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 2.....	47
ผลการทดสอบด้วยแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 3.....	49
ผลการทดสอบด้วยแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 4.....	51
ผลการทดสอบด้วยแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 5.....	53
สรุปผลการสอนโดยใช้ชุดการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกบน	
พื้นเอียง.....	55
5 สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ.....	57
ข้อเสนอแนะ.....	58
บรรณานุกรม.....	60
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก รายนามผู้เชี่ยวชาญ.....	64
ภาคผนวก ข ผลการหาคุณภาพเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	66
ภาคผนวก ค เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยหลังการปรับปรุง.....	71
ภาคผนวก ง บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	94
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	104

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงผลการวิเคราะห์หาขนาดของความเร่งเชิงมุมของการเคลื่อนที่ของ ทรงกระบอกเอียงที่มุมเอียงตั้งแต่ 3 ± 1 ถึง 41 ± 1 องศา.....	39
2 แสดงการให้เหตุผลในการตอบแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 1.....	46
3 แสดงการให้เหตุผลในการตอบแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 2.....	48
4 แสดงการให้เหตุผลในการตอบแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 3.....	50
5 แสดงการให้เหตุผลในการตอบแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 4.....	52
6 แสดงการให้เหตุผลในการตอบแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 5.....	54
7 แสดงการให้เหตุผลในการตอบแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 2.....	56



บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 (A) วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน, (B) วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ (C) และวัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่ไม่มีการไถล.....	5
2 เงื่อนไขของการกลิ้งโดยไม่มีการไถล.....	6
3 การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกบนพื้นเอียงที่ตำแหน่งต่าง ๆ.....	8
4 วัตถุเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล.....	9
5 วัตถุเคลื่อนที่แบบไถลโดยไม่มีการหมุน.....	9
6 การออกแบบและแผนผังของมาตรการความเร่ง.....	11
7 การวางตัวในแต่ละแกนของมาตรการความเร่งของสมาร์ทโฟน iPhone 4s.....	11
8 ปรัชญาการณีสอลล์.....	12
9 การวางตัวของแกนบันทึกค่าของแมกนีโทมิเตอร์.....	12
10 การวัดค่าแมกเนติกเฮดดิ้งแองเกิลของแมกนีโทมิเตอร์.....	13
11 โครงสร้างของใจโรสโคป.....	14
12 แสดงแผนผังการทำงานของเครื่องรับรู้ใจโรสโคป.....	15
13 ทรงกระบอกกลวงกลิ้งบนพื้นราบโดยมีแรงกระทำ F ตามแนวนอน และแรงเสียดทาน f ในระบบ.....	16
14 ทรงกระบอกกลวงกลิ้งบนพื้นราบโดยมีแรงกระทำ F กระทำที่มุม θ และ แรงเสียดทาน f ในระบบ.....	17
15 (A) ทรงกลมขณะเคลื่อนที่อยู่บนพื้นเอียงโดยพิจารณาในเชิงพลังงาน (B) ช่องว่างระหว่างรางรูปตัวยูพิจารณาขณะที่วัตถุเคลื่อนที่บนราง.....	19
16 (A) กราฟระหว่างตำแหน่งวัตถุและเวลาที่ได้รับการทดลอง (B) กราฟระหว่างความเร่งและช่องว่างระหว่างรางรูปตัวยู โดยมีกราฟของผลจาก การทดลองและกราฟของผลจากการคำนวณ.....	19
17 (A) การติดตั้งชุดการทดลองการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย (B) กราฟระหว่างความเร่งและเวลาจากผลการทดลอง.....	21
18 สัญญาณเสียงของเสียงจากข้อต่อกระดูก.....	22
19 (A) การติดตั้งชุดการทดลองการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) แผนผังการติดตั้งชุดการทดลองการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	23
20 ผลการทดลองการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	24
21 การติดตั้งชุดการทดลองเรื่องโมเมนตัมเชิงมุม.....	25

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
22 (A) ผลการทดลองเรื่องโมเมนตัมเชิงมุม (B) กราฟระหว่างความเร็วเชิงมุมและเวลา เมื่อวางมวลที่ 10 เซนติเมตรจากจุดศูนย์กลาง.....	25
23 (A) แผนผังการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง (B) ภาพแสดงแกนที่มีการกลิ้งของอุปกรณ์บันทึกค่า.....	27
24 กราฟผลการทดลองที่มุมเอียง 6 องศา และ 18 องศา.....	27
25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความเร่งเชิงมุมและมุมเอียง.....	28
26 วัสดุและอุปกรณ์.....	30
27 ทรงกระบอกกลวงติดกับแผ่นดิสก์พลาสติกบาง และสมาร์ตโฟน.....	31
28 (A) สัญลักษณ์ของโปรแกรมประยุกต์ Sensorlog (B) การแสดงผลของ โปรแกรมประยุกต์ Sensor log ระหว่างบันทึกข้อมูลด้วยแมกนีโทมิเตอร์.....	33
29 สัญลักษณ์ของโปรแกรมประยุกต์ Angle Pro (B) และ (C) การแสดงผลของโปรแกรมประยุกต์ Angle Pro.....	33
30 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต.....	34
31 การตั้งค่าในโหมด Configuration.....	35
32 การทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวง.....	35
33 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมประยุกต์ Sensorlog (A) ขณะยังไม่มี การบันทึกผล (B) ขณะทำการบันทึกผล.....	36
34 (A) กราฟของข้อมูลที่บันทึกโดยแมกนีโทมิเตอร์ที่มุมเอียง 5 ± 1 องศา (B) กราฟของข้อมูลที่ถูกรับแต่งเพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่บนพื้นเอียง (C) กราฟของข้อมูลที่ถูกรับแต่งจากแมกนีโทมิเตอร์ (D) กราฟของข้อมูลจาก ไจโรสโคป.....	38
35 ข้อมูลจากแมกนีโทมิเตอร์ (A) กราฟฟังก์ชันของมุมกับเวลา (B) กราฟฟังก์ชันของมุมกับเวลา ²	38
36 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความเร่งเชิงมุมและมุมเอียง.....	40
37 พลังงานกลชนิดต่างๆในการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลที่มุมเอียง 5 ± 1 องศา.....	41
38 ผู้เรียนกลุ่มทดลองขณะทำการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง.....	43
39 ผู้เรียนกลุ่มควบคุมขณะบรรยายเรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง.....	43
40 แผนภาพแสดงการเก็บข้อมูลการวิจัย.....	44

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุแข็งเกร็งเป็นหัวข้อหนึ่งที่มีความสำคัญในเรื่องกลศาสตร์ ซึ่งมีการจัดการเรียนการสอนในระดับอุดมศึกษาและมัธยมศึกษา นอกจากนี้ยังเป็นพื้นฐานสำคัญที่ใช้เพื่อต่อยอดในการอธิบายการเคลื่อนที่ของระบบที่มีความซับซ้อนขึ้นเช่น การเคลื่อนที่ของวัตถุอสมมาตร (Alexa; et al. 2017: 1-9) งานวิจัยที่ศึกษาการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุแข็งเกร็งมีทั้งในเชิงทฤษฎีและการทดลองเช่น บทบาทของแรงเสียดทานที่มีต่อการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุบนพื้นราบ (Pinto; & Fiolhais. 2001: 250-254) การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุทรงกลมในรางรูปตัวยู (Niculescu. 2006: 157-159) และการเคลื่อนที่แบบไถลและการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุชนิดต่างๆบนพื้นเอียง (Aghamohammadi; & Aghamohammadi. 2011: 1049-1057) งานวิจัยเหล่านี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุชนิดต่างๆ ทั้งบนพื้นราบและบนพื้นเอียง เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจมากขึ้นเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

ปัจจุบันเทคโนโลยีมีการพัฒนาขึ้นทำให้มีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายชนิดมาใช้ในการจัดการเรียนการสอนฟิสิกส์ในชั้นเรียน เช่น กล้องวิดีโอความเร็วสูง กล้องเว็บแคม เม้าส์ เป็นต้น โดยที่อุปกรณ์เหล่านี้สามารถเก็บข้อมูลต่างทางฟิสิกส์ เช่น ความเร็ว ความเร่ง ความเข้มเสียง เป็นต้น ถึงแม้ว่าอุปกรณ์ดังที่กล่าวมาจะสามารถตรวจวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุได้ แต่ก็มีข้อจำกัดในการนำมาเป็นสื่อการเรียนรู้ที่ต้องอาศัยการตั้งค่าและการปรับแต่งข้อมูลจึงจะใช้ในการบันทึกข้อมูลการเคลื่อนที่ของวัตถุได้ ทำให้มีการนำสมาร์ทโฟน (Smartphone) ซึ่งสามารถใช้งานได้สะดวกกว่ามาจัดการเรียนการสอนฟิสิกส์เนื่องจากมีเซนเซอร์ (Sensor) หลายชนิดบรรจุภายในตัวอุปกรณ์ซึ่งสามารถบันทึกปริมาณทางฟิสิกส์ได้อย่างแม่นยำ โดยใช้งานร่วมกับโปรแกรมประยุกต์ (Application) เซนเซอร์ที่นำมาใช้ ได้แก่ มาตรความเร่ง (Accelerometer) ระบบรับเสียง (Sound Storage System) แมกนีโตมิเตอร์ (Magnetometer) และไจโรสโคป (Gyroscope) ผู้วิจัยเห็นว่าสมาร์ทโฟนสามารถช่วยให้ผู้เรียนศึกษาการทดลองทางฟิสิกส์ด้วยตนเองได้สะดวกมากขึ้น จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในชุดการทดลองเพื่อจัดการเรียนการสอนการเคลื่อนที่แบบกลิ้งในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์

จากงานวิจัยของสรายุทธ พรหมราช ได้ศึกษาความเข้าใจของผู้เรียนเกี่ยวกับเรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง พบว่าผู้เรียนส่วนใหญ่มีความเข้าใจที่ไม่ถูกต้องในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบกลิ้งได้แก่ โมเมนต์ความเฉื่อย บทบาทของแรงเสียดทาน งานในระบบ และความเร่งของจุดศูนย์กลางมวล (สรายุทธ พรหมราช. 2554) ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความตั้งใจจะทำการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียงโดยใช้สมาร์ทโฟนเป็นอุปกรณ์สำคัญในการดำเนินการทดลองเพราะเป็นอุปกรณ์ที่ผู้เรียนใช้ในชีวิตประจำวัน สามารถใช้

งานได้ง่าย สะดวก และมีความแม่นยำสูง ทำให้ผู้เรียนได้ทำศึกษาปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบกลิ้งได้โดยการทดลองและวิเคราะห์ด้วยตนเอง ซึ่งจะทำให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจในแนวคิดของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งมากขึ้น จึงสร้างชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียงโดยใช้ความสามารถของเซนเซอร์แมกนีโตมิเตอร์และไจโรสโคปเพื่อเป็นสื่อการเรียนรู้ แล้วจึงศึกษาผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นของผู้เรียนด้วยวิธี Normalized gain หลังจากได้รับการจัดการเรียนการสอนจากชุดการทดลองเปรียบเทียบกับการสอนแบบบรรยาย เพื่อให้ทราบความสามารถของเครื่องมือต่อไป

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียง
2. เพื่อสร้างชุดการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียงโดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน
3. เพื่อวัดผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นของผู้เรียนด้วยวิธี Normalized gain เรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียงของผู้เรียนหลังจากได้รับการจัดการเรียนการสอนจากชุดการทดลอง โดยเปรียบเทียบกับจัดการเรียนการสอนด้วยการบรรยาย

ขอบเขตการวิจัย

ศึกษาการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียง ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียงโดยใช้โดยใช้เซนเซอร์แมกนีโตมิเตอร์และไจโรสโคป พัฒนาชุดการทดลองและเครื่องมือเพื่อใช้ในการสอนการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยอาศัยเซนเซอร์ไจโรสโคปเป็นสื่อการเรียนการสอน ศึกษาผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นของผู้เรียนด้วยวิธี Normalized gain โดยเปรียบเทียบการจัดการเรียนการสอนโดยใช้ชุดการทดลองกับการจัดการเรียนการสอนแบบบรรยาย

ประชากรที่ใช้ในการวิจัย

นิสิตปีที่ 1 ระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิตและการศึกษาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2560

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

นิสิตปีที่ 1 ระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิตและการศึกษาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2560 ที่ลงทะเบียนวิชาฟิสิกส์ 183 ปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 และวิชาฟิสิกส์ 185 ปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐาน 1 จำนวน 38

คน โดยเลือกด้วยวิธีเจาะจง (Purposive Sampling) โดยแบ่งเป็นสองกลุ่มคือกลุ่มทดลอง A1-A23 จำนวน 23 คน ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้ชุดการทดลอง และกลุ่มควบคุม B1-B15 จำนวน 15 คน ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้การบรรยาย

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. **การเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (Rolling Motion)** หมายถึง การเคลื่อนที่โดยวัตถุมีการเคลื่อนที่แบบหมุนและการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่พร้อมกัน แบ่งได้เป็นสองชนิดโดยพิจารณาที่จุดที่วัตถุสัมผัสกับพื้น แบบที่ 1 คือการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล แรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนและการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่หักล้างกันทั้งหมด ทำให้อัตราเร็วที่จุดที่วัตถุสัมผัสกับพื้นเป็นศูนย์ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบคือแรงเสียดทานสถิต และแบบที่ 2 คือการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถล แรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่มีมากกว่าแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุน ทำให้อัตราเร็วที่จุดที่วัตถุสัมผัสกับพื้นไม่เป็นศูนย์เกิดการไถลขึ้น แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบคือแรงเสียดทานจลน์

2. **มุมวิกฤต (Critical angle) ของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลบนพื้นเอียง** หมายถึง มุมเอียงของพื้นเอียงที่มีค่าสูงสุดที่สามารถปล่อยวัตถุให้เคลื่อนที่ไปตามพื้นเอียงแล้วเกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล ถ้าปล่อยวัตถุที่มุมเอียงที่มีค่าสูงกว่ามุมวิกฤตนี้วัตถุจะเกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถล

3. **ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)** หมายถึง ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อนำตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปเข้าอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก ประจุพาหะคืออิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เบนไปจากทิศทางเดิมเนื่องจากแรงลอเรนซ์ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้ามีความต่างศักย์ขึ้นในตัวนำ

4. **แมกเนติกเฮดดิ้งแองเกิล (Magnetic heading angle: ψ)** หมายถึง วัดมุมตามเข็มนาฬิการะหว่างแกน X ของแมกนีโตมิเตอร์และเวกเตอร์ที่ชี้ไปยังทิศเหนือของสนามแม่เหล็กโลกที่อยู่บนระนาบแนวนอนเดียวกัน

5. **แรงคอริโอลิส (Coriolis force)** หมายถึง แรงเสมือนซึ่งเกิดจากการที่ผู้สังเกตอยู่บนกรอบอ้างอิงที่หมุนอยู่ มีทิศตั้งฉากกับแรงกระทำจริงเสมอ จำเป็นต้องนำมาคำนวณในระบบจึงจะหาผลลัพธ์ที่ถูกต้องได้

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ศึกษาการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียง
2. ได้สร้างชุดการทดลองและเครื่องมือเพื่อใช้ในการสอนการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียง

3. ได้ทราบผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นของผู้เรียนด้วยวิธี Normalized gain จากการจัดการเรียนการสอนโดยใช้ชุดการทดลองและเปรียบเทียบผลกับการสอนแบบบรรยาย และได้ทราบความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนที่ของผู้เรียน



บทที่ 2

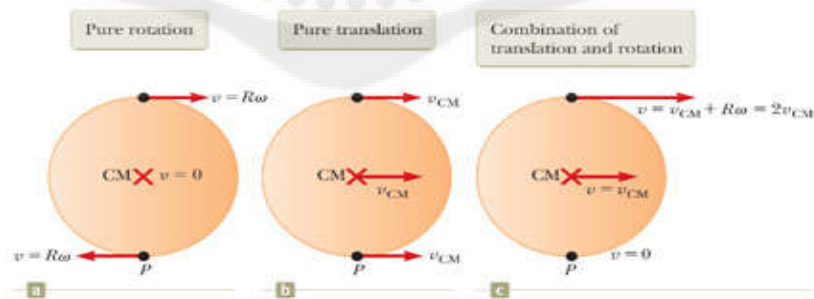
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุแข็งเกร็ง

1.1 การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล

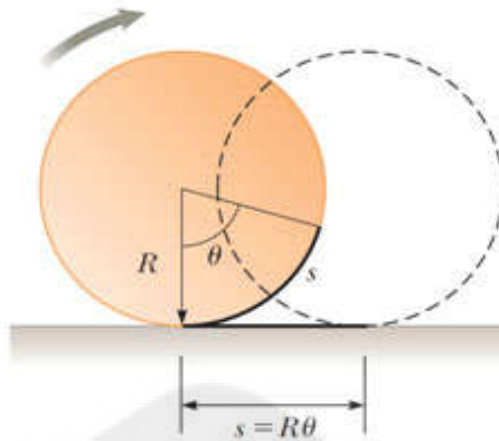
การเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (Rolling Motion) สามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่แบบหมุนและการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ดังที่แสดงในภาพประกอบ 1 วัตถุตามรูปทั้งสาม วัตถุมีการสัมผัสกับพื้นที่จุด P การเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotation Motion) เป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุรอบจุดศูนย์กลางมวล โดยความเร็วที่จุดศูนย์กลางมวลของวัตถุเท่ากับศูนย์ ที่จุดสูงสุดของวัตถุและจุด P ความเร็วจะมีทิศทางตั้งฉากกับรัศมีและมีทิศตรงข้ามกัน ดังภาพประกอบ 1 (A) ส่วนการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ (Translational motion) คือการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่ง โดยทุกตำแหน่งบนวัตถุจะมีความเร็วเท่ากันดังภาพประกอบ 1 (B) เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่ไม่มีการไถลดังภาพประกอบ 1 (C) จะเห็นว่าความเร็วในแต่ละจุดของวัตถุจะมีค่าเท่ากับความเร็วของการเคลื่อนที่แบบหมุนรวมกับการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ การเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่ไม่มีการไถลคือการเคลื่อนที่โดยวัตถุมีการเคลื่อนที่แบบหมุนและการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่พร้อมกัน หากพิจารณาความเร็วที่จุด P ซึ่งเป็นจุดหมุนและวัตถุสัมผัสกับพื้นจะพบว่าความเร็วเป็นศูนย์ แรงเสียดทานที่ปรากฏในระบบจึงได้แก่แรงเสียดทานสถิต

พิจารณาวัตถุทรงกระบอกรัศมี R เคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลไปตามพื้นแนวนราบ ดังภาพประกอบ 2 เมื่อวัตถุหมุนไปเป็นระยะทางเชิงมุม θ จุดศูนย์กลางมวลของวัตถุจะเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางเชิงเส้น S โดย $S = R\theta$ เรียกความสัมพันธ์นี้ว่าเงื่อนไขของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล



ภาพประกอบ 1 (A) วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน, (B) วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ และ (C) วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่ไม่มีการไถล

ที่มา: Raymond A. Serway; & John W. Jewett. (2014). *Physics for Scientists and Engineers*. p. 317.



ภาพประกอบ 2 เงื่อนไขของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล

ที่มา: Raymond A. Serway; & John W. Jewett. (2014). *Physics for Scientists and Engineers*. p. 317.

จากเงื่อนไขของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลอัตราเร็วเชิงเส้นที่จุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ (v_{CM}) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$v_{CM} = \frac{ds_{CM}}{dt} = R \frac{d\theta}{dt} = R\omega \quad (2.1)$$

เมื่อ ω คืออัตราเร็วเชิงมุมของวัตถุ นอกจากนี้ยังสามารถหาขนาดของความเร่งเชิงเส้นของวัตถุ a_{CM} สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$a_{CM} = \frac{dv_{CM}}{dt} = R \frac{d\omega}{dt} = R\alpha \quad (2.2)$$

เมื่อ α คือขนาดของความเร่งเชิงมุมของวัตถุที่กลิ้งโดยไม่มีการไถล โดยสมการที่ (2.1) และ (2.2) จะเป็นจริงเมื่อพิจารณาวัตถุที่เคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลเท่านั้น

1.2 การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลบนพื้นเอียงของทรงกระบอก

ทรงกระบอกมวล m ที่มีรัศมี R ถูกปล่อยจากสภาพหยุดนิ่งที่จุดสูงสุดของพื้นเอียงที่มุมเอียง ϕ ตามภาพประกอบ 3 (ตำแหน่ง 1) ให้เคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลลงมาตามพื้นเอียงโดยเริ่มลื่นที่มุม $\theta = 0$ กำหนดให้ระดับอ้างอิงอยู่ที่จุดสูงสุดของพื้นเอียง ทรงกระบอกเคลื่อนที่แบบกลิ้งไปบนพื้นเอียงเนื่องจากมีแรงเสียดทานสถิตระหว่างพื้นผิวของทรงกระบอกและพื้นผิวของพื้นเอียง พิจารณาการเคลื่อนที่ในรูปของปริมาณสเกลาร์เท่านั้น

เมื่อทรงกระบอกกลิ้งไปตามพื้นเอียงจนถึงมุม θ_i จุดศูนย์กลางมวลของทรงกระบอกจะเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางเชิงเส้น $s_i = R(\theta_i - \theta_i)$ ตามภาพประกอบ 3 (ตำแหน่ง II) ดังนั้นตามกฎการอนุรักษ์พลังงานกลเมื่อเทียบพลังงานกลได้แก่พลังงานจลน์ (E_k) และพลังงานศักย์ (E_p) ระหว่างตำแหน่ง I และตำแหน่ง II จะได้ดังสมการ

$$E_{k_{II}} + E_{p_{II}} = E_{k_I} + E_{p_I} \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{2}mv_i^2 + \frac{1}{2}I\omega_i^2 - mgh_i = 0 \quad (2.4)$$

เมื่อ I คือโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกและ h_i คือความสูงตามแนวตั้งวัดจากระดับอ้างอิงถึงตำแหน่ง II

เทียบพลังงานกลก่อนการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (ตำแหน่ง I) กับพลังงานกลเมื่อทรงกระบอกเคลื่อนที่ถึงที่ปลายของพื้นเอียงตามภาพประกอบ 3 (ตำแหน่ง III) จะได้ดังสมการ

$$\frac{1}{2}mv_f^2 + \frac{1}{2}I\omega_f^2 - mgh_f = 0 \quad (2.5)$$

เมื่อ h_f คือความสูงตามแนวตั้งวัดจากระดับอ้างอิงถึงตำแหน่ง III

ใช้เงื่อนไขของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลตามสมการ (2.1) และความสัมพันธ์ตรีโกณมิติ $h_f = s_f \sin \phi$ แทนในสมการ (2.5) จะได้

$$\omega_f^2 = \frac{2mgR(\theta_f - \theta_i) \sin \phi}{(mR^2 + I)} \quad (2.6)$$

การเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็งภายใต้ความเร่งคงที่เป็นไปตามสมการ (2.7)

$$\omega_f^2 - \omega_i^2 = 2\alpha(\theta_f - \theta_i) \quad (2.7)$$

แทนสมการ (2.6) ในสมการ (2.7) โดยพิจารณาร่วมกับเงื่อนไขเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ ได้แก่ $\omega_i = 0$ และ $\theta_i = 0$ พบว่าขนาดของความเร่งเชิงมุมมีค่าตามสมการ

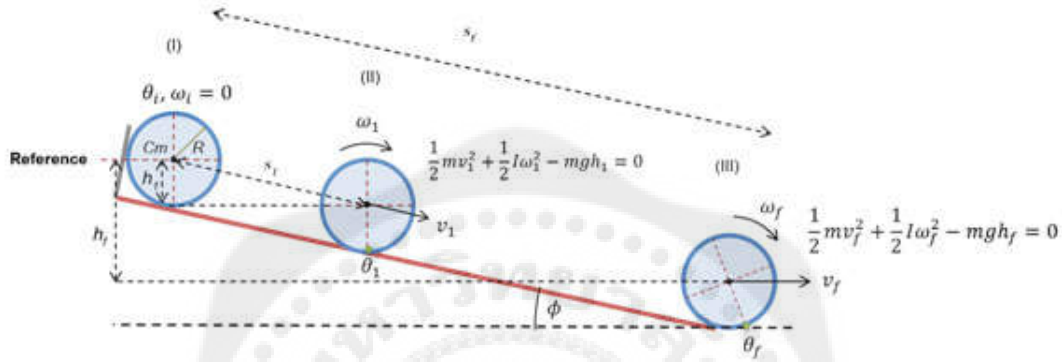
$$\alpha = \frac{mgR \sin \phi}{(mR^2 + I)} \quad (2.8)$$

อัตราเร็วเชิงมุมหาได้จากปริพันธ์ของสมการ (2.8) โดยพิจารณาร่วมกับเงื่อนไขที่จุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ ได้แก่ $\omega_i = 0$ และ $\theta_i = 0$ อัตราเร็วเชิงมุมที่เวลา t ใดๆสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\omega_f = \frac{mgR \sin \phi}{(mR^2 + I)} t \quad (2.9)$$

ระยะทางเชิงมุมหาได้จากปริพันธ์ของสมการ (2.9) โดยพิจารณาพร้อมกับเงื่อนไขที่จุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ได้แก่ $\omega_i = 0$ และ $\theta_i = 0$ ระยะทางเชิงมุมที่เวลา t ใดๆสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\theta_f = \frac{1}{2} \frac{mgR \sin \phi}{(mR^2 + I)} t^2 \quad (2.10)$$



ภาพประกอบ 3 การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกบนพื้นเอียงที่ตำแหน่งต่างๆ

1.3 มุมวิกฤตของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถบนพื้นเอียง

การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถตามภาพประกอบ 4 ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในมุมเอียงทุกค่า การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีแรงเสียดทานสถิตระหว่างวัตถุกับพื้นเอียง (f_s) เป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$f_s \leq \mu_s N \quad (2.11)$$

เมื่อ N คือแรงปฏิกิริยา มีค่าเท่ากับ $N = mg \cos \phi$ และ μ_s คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างพื้นผิวของทรงกระบอกกับพื้นผิวของพื้นเอียง

เมื่อพิจารณาบทบาทของแรงเสียดทานสถิตในระบบ พบว่าแรงเสียดทานสถิตเป็นแรงที่ทำให้เกิดทอร์ก (τ) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของทอร์กกับโมเมนต์ความเฉื่อยและความเร่งเชิงมุมสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

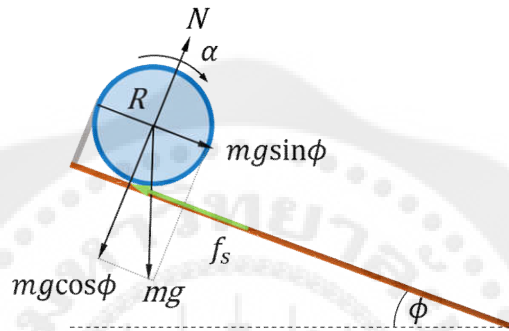
$$\begin{aligned} \sum \tau &= I \alpha \\ f_s R &= I \alpha \\ f_s &= \frac{I \alpha}{R} \end{aligned} \quad (2.12)$$

เมื่อนำสมการ (2.8) และสมการ (2.12) แทนในสมการ (2.11) จะพบว่า

$$\mu_s \geq \left(\frac{I}{mR^2 + I} \right) \tan \phi \quad (2.13)$$

$$\phi \leq \tan^{-1} \left(\frac{mR^2 + I}{I} \mu_s \right) \quad (2.14)$$

การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมุมเอียงจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับมุมวิกฤตดังสมการที่ (2.14)



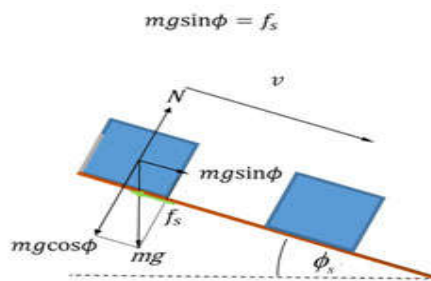
ภาพประกอบ 4 วัตถุเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล

1.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (μ_s)

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (μ_s) ระหว่างพื้นผิวของวัตถุกับพื้นเอียงสามารถหาจากการนำวัตถุไปวางบนพื้นเอียง โดยเพิ่มค่ามุมเอียงขึ้นเรื่อยๆ จนพบมุมเอียงแรกที่วัตถุเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เพียงอย่างเดียวลงไปตามพื้นเอียง ตามภาพประกอบ 5 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างพื้นผิวของวัตถุกับพื้นเอียงจะเท่ากับ

$$\mu_s = \tan \phi_s \quad (2.15)$$

เมื่อ ϕ_s คือมุมเอียงที่วัตถุเริ่มเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่



ภาพประกอบ 5 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

2. เซนเซอร์ (Sensor)

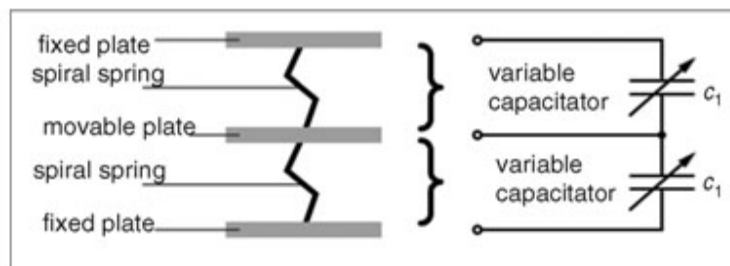
เซนเซอร์ (Sensor) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสามารถในการตรวจจับปรากฏการณ์และการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางฟิสิกส์ในสภาพแวดล้อม สามารถส่งสัญญาณให้อุปกรณ์อื่นเพื่อนำไปประมวลผลเป็นข้อมูลได้ ถือเป็นตัวแปรสัญญาณชนิดหนึ่ง หลายปีที่ผ่านมาการพัฒนาของสมาร์ตโฟนอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดโปรแกรมประยุกต์จำนวนมากที่ใช้ความสามารถของเซนเซอร์ที่บรรจุอยู่ในสมาร์ตโฟนเพื่อวัดปริมาณทางฟิสิกส์ ช่วยส่งเสริมการเรียนการสอนทางฟิสิกส์ โดยทำให้การสอนด้วยการทดลองให้ดำเนินการได้ง่ายและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ได้มีการนำเซนเซอร์หลายชนิดมาใช้ในการทดลองทางฟิสิกส์ เช่น เซนเซอร์ภาพ (Image sensor) มาตรการความเร่ง (Accelerometer) แมกนีโตมิเตอร์ (Magnetometer) และ ไจโรสโคป (Gyroscope)

2.1 เซนเซอร์ (Image sensor)

เซนเซอร์ภาพภายในสมาร์ตโฟนเป็นเครื่องมือที่สามารถตรวจพบความเข้มของคลื่นแสงและแปลงข้อมูลที่วัดได้เป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เซนเซอร์ภาพประกอบด้วยเซนเซอร์เซลล์หลายล้านเซนเซอร์เซลล์รวมกันเป็นพิกเซล พิกเซลหลายแถวต่อเนื่องกันประกอบเป็นภาพหรือวิดีโอ การทำงานของกล้องถ่ายรูปจะใช้ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกในการสร้างภาพขึ้น สารกึ่งตัวนำในเซนเซอร์ภาพมีความไวต่อรังสีสามารถประยุกต์ใช้เป็นเครื่องตรวจจับรังสีได้ อนุภาคเบต้าและรังสีแกมมาทำให้อะตอมแต่ละตัวในชิปของเซนเซอร์ภาพแตกตัวเป็นไอออน และปล่อยอิเล็กตรอนออกมาซึ่งจะถูกจับโดยสารกึ่งตัวนำและสร้างเป็นพิกเซลภาพขึ้น (Kuhn; et al. 2014: 351-356)

2.2 มาตรการความเร่ง (Accelerometer)

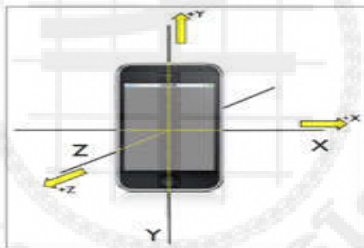
มาตรการความเร่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดขนาดและทิศทางความเร่ง โครงสร้างของมาตรการความเร่งที่ติดตั้งภายในสมาร์ตโฟนแสดงได้ดังภาพประกอบ 6 โดยมีแผ่นซิลิคอนสามแผ่นวางตัวขนานกันและถูกเชื่อมติดกันด้วยสปริง แผ่นซิลิคอนแผ่นบน แผ่นกลาง และแผ่นล่างจะถูกเชื่อมติดกับขั้วไฟฟ้า นอกจากนี้แผ่นซิลิคอนแผ่นบนและแผ่นซิลิคอนแผ่นล่างยังถูกติดตั้งให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ขณะที่แผ่นซิลิคอนแผ่นกลางสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ใน 1 มิติทำหน้าที่เป็นมวลวัดความเคลื่อนไหว เมื่อซิลิคอนแผ่นกลางมีการเคลื่อนที่ทำให้ระยะระหว่างแผ่นซิลิคอนแผ่นกลางกับแผ่นซิลิคอนแผ่นบนและแผ่นล่างเปลี่ยนไป จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุในขั้วไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงประจุที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกค่าและนำไปคำนวณหาความเร่งที่กระทำกับมวลวัดความเคลื่อนไหว (Vogt; & Kuhn. 2012: 182-183)



ภาพประกอบ 6 การออกแบบและแผนผังของมาตรความเร่ง

ที่มา: Patrik Vogt ; & Jochen Kuhn. (2012, March). Analyzing free fall with a smartphone acceleration sensor. *The Physics Teacher*. 50(3) : 182-183.

สมาร์ทโฟน iPhone 4s มีมาตรความเร่งติดตั้งเพื่อบันทึกค่าและนำไปใช้ในการคำนวณ ดังภาพประกอบที่ 7 โดยติดตั้งมาตรความเร่งในสามแกนโดยแต่ละแกนตั้งฉากต่อกันและมีความสามารถในการบันทึกความเร่งอย่างเป็นอิสระต่อกัน

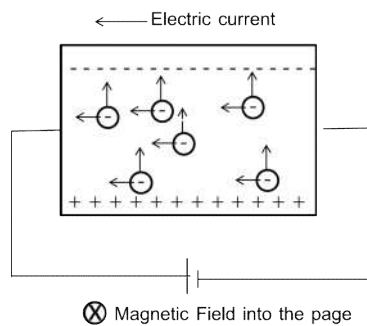


ภาพประกอบ 7 การวางตัวในแต่ละแกนของมาตรความเร่งของสมาร์ทโฟน iPhone 4s

ที่มา: Alasdair Allan. (2011). *Basic Sensors in iOS*. p. 39.

2.3 แมกนีโตมิเตอร์ (Magnetometer)

แมกนีโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดทิศทางและขนาดของสนามแม่เหล็กในสภาพแวดล้อมรอบตัวอุปกรณ์ สามารถทำงานได้โดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) โดยให้กระแสไฟฟ้ากับวัสดุนำไฟฟ้าที่อยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พิจารณาว่าพาหะของประจุไฟฟ้าเป็นอิเล็กตรอนดังภาพประกอบ 8 จะเกิดแรงลอเรนซ์ผลักประจุอิเล็กตรอนไปในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การเปลี่ยนตำแหน่งของอิเล็กตรอนทำให้เกิดความต่างศักย์เล็กน้อยกระจายไปในวัสดุตัวนำเป็นสัดส่วนกับทั้งกระแสไฟฟ้าและขนาดของสนามแม่เหล็ก หากตั้งค่าให้กระแสไฟฟ้าให้คงที่จะสามารถคำนวณขนาดของสนามแม่เหล็กจากความต่างศักย์ในวัสดุนำไฟฟ้าได้



ภาพประกอบ 8 ปรากฏการณ์ฮอลล์

สมาร์ทโฟน iPhone 4s ที่ผู้วิจัยใช้ในการดำเนินการมีการติดตั้งแมกนีโตมิเตอร์รุ่น AK8975 ของ Asahi Kasei Corporation ดังภาพประกอบ 9 ไว้ภายใน ซึ่งสามารถวัดขนาดสนามแม่เหล็กได้ในแนวแกน X, Y และ Z อย่างเป็นอิสระต่อกัน ก่อนจะนำมาประมวลผลแปลงค่าไปตามแกนบันทึกค่าของสมาร์ทโฟน



ภาพประกอบ 9 การวางตัวของแกนบันทึกค่าของแมกนีโตมิเตอร์

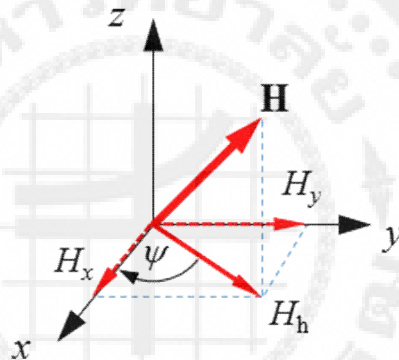
ที่มา: AKM Semiconductor, Inc. (2010). *AK8975/AK8975C Datasheet*. p. 34

ในกรณีที่แมกนีโตมิเตอร์อยู่ในบริเวณที่ไม่มีแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงอยู่ใกล้เคียง แมกนีโตมิเตอร์จะวัดค่าได้เท่ากับขนาดของสนามแม่เหล็กโลก ทำให้แมกนีโตมิเตอร์สามารถทำงานเป็นเข็มทิศดิจิทัลได้ โดยทำการวัดค่าแมกเนติกเฮดดิ้งแองเกิล (Magnetic heading angle: ψ) คือวัดมุมตามเข็มนาฬิการะหว่างแกน X ของแมกนีโตมิเตอร์และเวกเตอร์ที่ชี้ไปยังทิศเหนือของสนามแม่เหล็กโลกที่อยู่บนระนาบแนวนอนเดียวกัน ดังแสดงตามภาพประกอบ 10 (Allan. 2011: 57-59)

แมกนีโตมิเตอร์สามารถวัดขนาดของสนามแม่เหล็กแล้วส่งต่อข้อมูลให้โปรแกรมประยุกต์ของสมาร์ทโฟนนำค่าไปคำนวณเป็นแมกเนติกเฮดดิ้งแองเกิลได้ด้วยสมการ

$$\begin{aligned}\psi &= 90^\circ - \frac{180^\circ}{\pi} \arctan \frac{H_x}{H_y} && \text{when } H_y > 0 \\ \psi &= 270^\circ - \frac{180^\circ}{\pi} \arctan \frac{H_x}{H_y} && \text{when } H_y < 0 \\ \psi &= 180^\circ && \text{when } H_y = 0 \text{ and } H_x < 0 \\ \psi &= 0 && \text{when } H_y = 0 \text{ and } H_x > 0,\end{aligned}\tag{2.16}$$

เมื่อ H_x และ H_y คือขนาดของสนามแม่เหล็กในแกน x และแกน y ตามลำดับ



ภาพประกอบ 10 การวัดค่าแมกเนติกเฮดดิ้งแองเกิลของแมกนีโตมิเตอร์

2.4 ไจโรสโคป (Gyroscope)

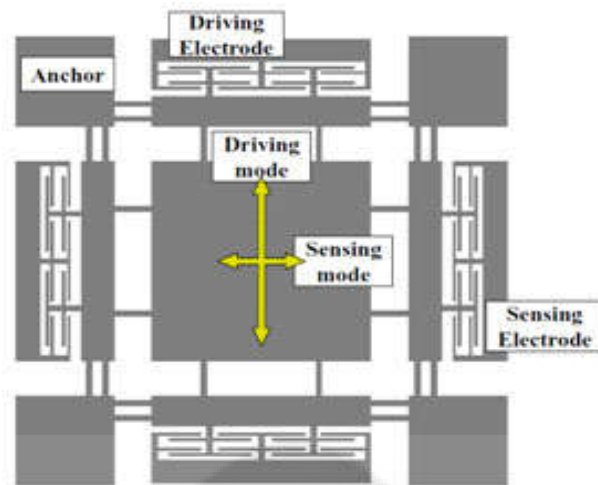
ไจโรสโคปคือเครื่องมือที่ใช้ตรวจจับลักษณะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ที่ตัวเครื่องมือติดตั้งอยู่ เป็นล้อหมุนบรรจุอยู่ในกรอบมีเข็มชี้ทิศทางดังรูปภาพประกอบ 11 ลักษณะการทำงานใช้ความเฉื่อยของล้อหมุนทำให้เข็มชี้ทิศจะชี้ไปในทิศทางเดิมอยู่เสมอ แม้สภาพแวดล้อมจะเคลื่อนที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและความเร็วไป จากความสามารถดังกล่าวทำให้ไจโรสโคปสามารถนำมาใช้เพื่อบันทึกลักษณะการเคลื่อนที่แบบหมุนของวัตถุได้อีกด้วย



ภาพประกอบ 11 โครงสร้างของไจโรสโคป

ที่มา: เรย์มอนด์ เอ. เซอร์เวย์; & จอห์น ดับเบิลยู. เจเวตต์. (2558). *ฟิสิกส์ 1*. แปลโดย
ประธาน บุรณศิริ; และ กิรยุทธ์ ศรีนวจันทร์. หน้า 359.

ในกรณีของไจโรสโคปที่ถูกพัฒนาเป็นเซนเซอร์ที่มีขนาดเล็กที่เรียกว่า Micro electro mechanical systems gyroscope มีโครงสร้างดังภาพประกอบ 12 ซึ่งประกอบไปด้วยมวลสำหรับบันทึกค่า, คานสปริง และขั้วไฟฟ้า ทำงานโดยอาศัยปรากฏการณ์แรงโคริออริส เมื่อมวลสำหรับบันทึกค่าสั่นในแกน Y เนื่องจากแรงขับไฟฟ้าสถิตจากภายนอก ความเร่งโคริออริสที่เกิดจากอัตราเร็วเชิงมุมจะทำให้มวลสำหรับบันทึกค่าสั่นในแกน X ด้วย คานสปริงที่ถูกติดตั้งให้เคลื่อนที่ได้ในทิศเดียว ใช้งานแยกกันระหว่าง Driving modes และ Sensing modes คานสปริงจะส่งผ่านการสั่นนั้นต่อไปสู่ตัวขั้วไฟฟ้าใน Sensing mode ขั้วไฟฟ้า จะรับรู้ความเปลี่ยนแปลงและสร้างสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ทำให้สามารถวัดความเร็วทั้งเชิงเส้นและเชิงมุมของวัตถุที่ติดตั้งไจโรสโคปได้ (Sung. 2014: 1-7)



ภาพประกอบ 12 แสดงแผนผังการทำงานของเซนเซอร์ไจโรสโคป

ที่มา: Jungwoo Sung; et al. (2014, July). A gyroscope fabrication method for high sensitivity and robustness to fabrication tolerances. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 24(7): 1–7.

3. การทบทวนวรรณกรรม

3.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุแข็งเกร็งในทางทฤษฎีมีผู้วิจัยหลายท่านให้ความสนใจต่อบทบาทของแรงเสียดทานต่อการเคลื่อนที่ดังนี้ Pinto และ Fiolhais (Pinto; & Fiolhais. 2001: 250-254) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกมวล m รัศมี R บนพื้นราบที่มีแรงภายนอก F มากระทำตามแนวนอนกับทรงกระบอกที่มีความสูง h ค่าต่างๆ ตามภาพประกอบ 13 โดยการเคลื่อนที่แบบกลิ้งจะเกิดการไถลหรือไม่ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยจะเกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลเมื่อ

$$\mu \geq \frac{F}{mg} \left| \frac{2h}{3R} - 1 \right| \quad (2.17)$$

ถ้า $0 \leq h < \frac{3}{2}R$ แรงเสียดทานจะมีค่าเป็นลบมีทิศต้านแรงกระทำ

ถ้า $h = \frac{3}{2}R$ แรงเสียดทานจะมีค่าเป็นศูนย์

ถ้า $\frac{3}{2}R < h \leq 2R$ แรงเสียดทานจะมีค่าเป็นบวกมีทิศเสริมแรงกระทำ

ส่วนการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถลจะเกิดเมื่อ

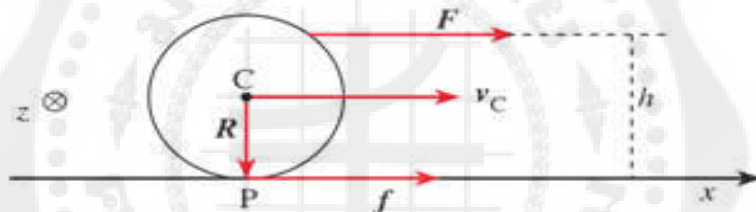
$$\mu < \frac{F}{mg} \left| \frac{2h}{3R} - 1 \right| \quad (2.18)$$

ถ้า $0 \leq h < \frac{3}{2}R$ แรงเสียดทานจะมีค่าเป็นศูนย์หรือเป็นลบมีทิศต้านแรงกระทำ

ถ้า $h = \frac{3}{2}R$ แรงเสียดทานจะมีค่าเป็นศูนย์

ถ้า $\frac{3}{2}R < h \leq 2R$ แรงเสียดทานจะมีค่าเป็นศูนย์หรือเป็นบวกมีทิศเสริมแรงกระทำ

จากผลการศึกษาพบว่าความเข้าใจทั่วไปของผู้เรียนที่ว่าแรงเสียดทานที่ปรากฏในการเคลื่อนที่แบบกลิ้งต้องต้านแรงกระทำเสมอ นั้นไม่ถูกต้องทุกกรณี ในบางกรณีอาจไม่มีแรงเสียดทานปรากฏ หรือแรงเสียดทานสามารถช่วยเสริมแรงกระทำก็เกิดขึ้นได้ ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างระดับของจุดที่ออกแรงกระทำและรัศมีของทรงกระบอก



ภาพประกอบ 13 ทรงกระบอกกลิ้งบนพื้นราบโดยมีแรงกระทำ F ตามแนวนอน และแรงเสียดทาน f ในระบบ

ที่มา: A. Pinto; & M. Fiolhais. (2001, May). Rolling cylinder on a horizontal plane. *The Physics Education*. 36(2): 250-254.

Oliveira (Oliveira. 2011: 381-388) ได้ศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อทรงกระบอกเคลื่อนที่โดยไม่มีการไถล พิจารณาทรงกระบอกมวล m รัศมี R มีแรงภายนอก F มากระทำที่มุม θ โดย $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ กับแนวนอนที่ความสูง h ตามภาพประกอบ 14 ทรงกระบอกเคลื่อนที่ไปด้วยแรงดังกล่าวโดยมีแรงเสียดทานกระทำที่จุด C ตามรูปที่ 14 พิจารณาตามกฎข้อที่สองของนิวตันแรงในแนวนอนจะได้สมการ

$$F \cos \theta + f = ma_G \quad (2.19)$$

พิจารณาตามกฎข้อที่สองของนิวตันแรงในแนวตั้งจะได้สมการ

$$F \sin \theta + N - mg = 0 \quad (2.20)$$

เมื่อ a_G เป็นความเร่งเชิงเส้นที่จุดศูนย์กลางมวล จะมีค่าเป็นบวกเมื่อมีทิศไปทางขวา และมีค่าเป็นลบเมื่อมีทิศไปทางซ้าย เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ตามกฎข้อที่สองของนิวตันในเชิงมุม จะได้ว่า

$$F \cos \theta \cdot (h - R) - F \sin \theta \cdot b - f \cdot R = \frac{1}{2} m R^2 \alpha \quad (2.21)$$

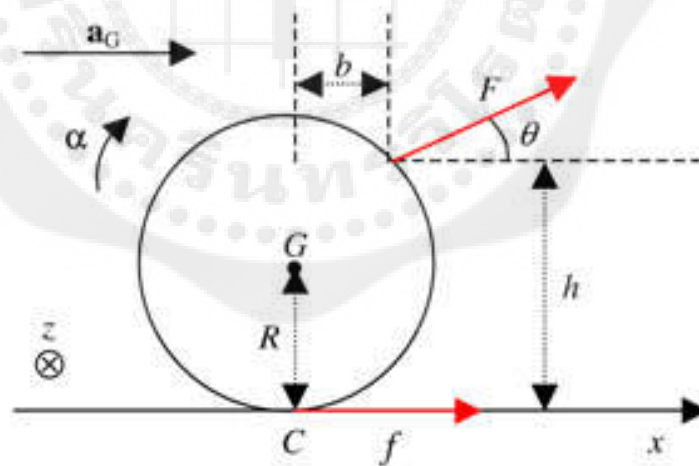
เมื่อ α คือความเร่งเชิงมุมของทรงกระบอกที่พิจารณาได้ว่ามีทิศตามเข็มนาฬิกาเมื่อเป็นบวกและมีทิศทวนเข็มนาฬิกาเมื่อเป็นลบ

เมื่อรวมสมการ (2.19) กับ (2.21) จะได้ความสัมพันธ์ของความเร่งเชิงเส้นและความเร่งเชิงมุมดังสมการ



(2.22)

พบว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างทิศทางของความเร่งเชิงมุมและทิศทางของความเร่งเชิงเส้นของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่ไม่มีแรงไถล เมื่อความเร่งเชิงเส้นมีทิศไปทางขวา ความเร่งเชิงมุมจะมีทิศตามเข็มนาฬิกาเสมอ ในทางตรงกันข้ามหากความเร่งเชิงเส้นมีทิศไปทางซ้าย ความเร่งเชิงมุมจะมีทิศทวนเข็มนาฬิกาเสมอ



ภาพประกอบ 14 ทรงกระบอกกลิ้งบนพื้นราบโดยมีแรงกระทำ F กระทำที่มุม θ และแรงเสียดทาน f ในระบบ

ที่มา: V. Oliveira. (2011, March). Angular and linear accelerations of a rolling cylinder acted by an external force. *European Journal of Physics*. 32(2): 381-388.

Niculescu (Niculescu.2006: 157-159) ได้ศึกษาการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกลมบนพื้นเอียงในรางรูปตัวยู ทดลองที่ค่าช่องว่างระหว่างรางหลายค่า โดยใช้เครื่องตรวจจับการเคลื่อนไหว (Motion detector) เพื่อหาค่าความเร่งของทรงกลมที่กลิ้งบนช่องว่างระหว่างรางรูปตัวยู พิจารณาทรงกลมกลิ้งลงมาตามพื้นเอียงไร้แรงเสียดทานตามมุมเอียง α ตามภาพประกอบ 15 A พิจารณาพลังงานศักย์ที่จุดสูงสุดเมื่อยังไม่เกิดการเคลื่อนที่เทียบกับพลังงานจลน์เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ถึงปลายพื้นเอียงตามกฎการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (2.23)$$

โดยโมเมนต์ความเฉื่อย I มีค่าเท่ากับ $I = \frac{2}{5}mR^2$ เมื่อ R เป็นรัศมีของทรงกลม ตามสมการ (2.23) โดยใช้ความสัมพันธ์จะหาความเร็วเชิงเส้น $v = R\omega$ ได้ว่า

$$v^2 = \frac{10}{7}gh \quad (2.24)$$

พิจารณาความสัมพันธ์เชิงตรีโกณมิติ $h = x \sin \alpha$ และใช้สูตรการเคลื่อนที่ $v^2 = 2ax$ ร่วมกับสมการที่ (2.23) จะหาความเร่งได้ว่า

$$a = \frac{5}{7}g \sin \alpha \quad (2.25)$$

ตามภาพประกอบ 15 B รัศมีของวัตถุขณะกลิ้งจะขึ้นกับช่องว่างของพื้นรูปตัวยูตั้ง
สมการ

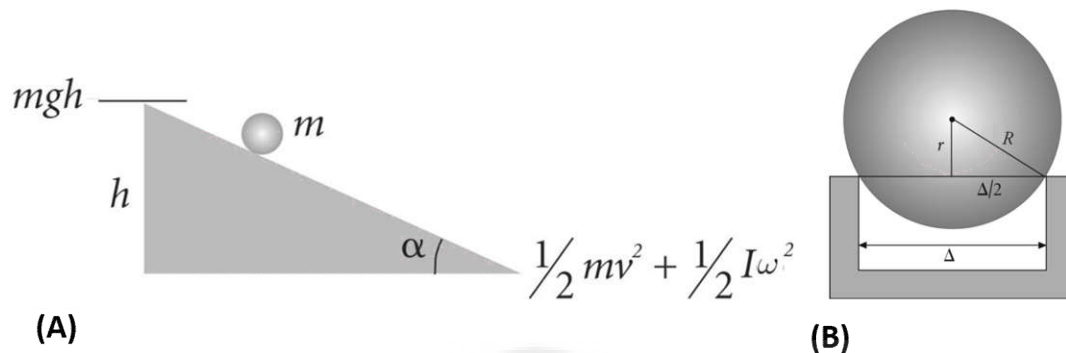
$$r = \sqrt{R^2 - \left(\frac{\Delta}{2}\right)^2} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.23) (2.24) และ (2.25) จะสามารถหาสมการความเร่งได้ว่า

$$a = \frac{1}{1 + \frac{2}{5} \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta}{d}\right)^2} \right]} g \sin \alpha \quad (2.27)$$

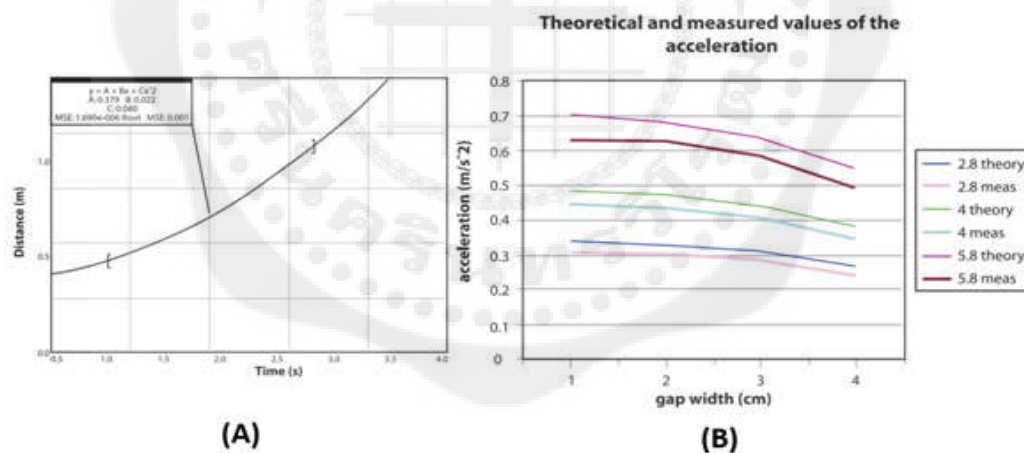
เมื่อทำการทดลองโดยใช้เครื่องตรวจจับการเคลื่อนไหวในการบันทึกค่าจะได้ระยะที่วัตถุอยู่ ณ ตำแหน่งต่างๆ สามารถเขียนกราฟได้ดังภาพประกอบ 16 (A) และหาค่าความเร่งได้จากการเทียบสมการพาราโบลาของกราฟ $y = A + Bx + Cx^2$ กับสมการการเคลื่อนที่ $L = L_0 + v_0t + 1/2at^2$ สามารถเทียบผลความเร่งกับช่องว่างระหว่างรางรูปตัวยูจากการทดลองกับผลจากการคำนวณด้วยสมการ (2.27) ได้ดังภาพประกอบ 16 (B) ได้ผลว่าความเร่งแปรผกผันกับช่องว่างระหว่างรางรูปตัว

ยูตามสมการ (2.27) แต่ค่าจากการทดลองมีค่าต่ำกว่าผลจากการคำนวณเท่ากันในทุกค่า เนื่องจากการไม่คิดแรงเสียดทาน



ภาพประกอบ 15 (A) ทรงกลมขณะเคลื่อนที่อยู่บนพื้นเอียงโดยพิจารณาในเชิงพลังงาน (B) ช่องว่างระหว่างรางรูปตัวยูพิจารณาขณะที่วัตถุเคลื่อนที่บนราง

ที่มา: A. Niculescu. (2006, March). A Rolling Sphere Experiment. *The Physics Teacher*. 44(3): 157-159.



ภาพประกอบ 16 (A) กราฟระหว่างตำแหน่งวัตถุและเวลาที่ได้รับการทดลอง (B) กราฟระหว่างความเร่งและช่องว่างระหว่างรางรูปตัวยู โดยมีกราฟของผลจากการทดลองและกราฟของผลจากการคำนวณ

ที่มา: A. Niculescu. (2006, March). A Rolling Sphere Experiment. *The Physics Teacher*. 44(3): 157-159.

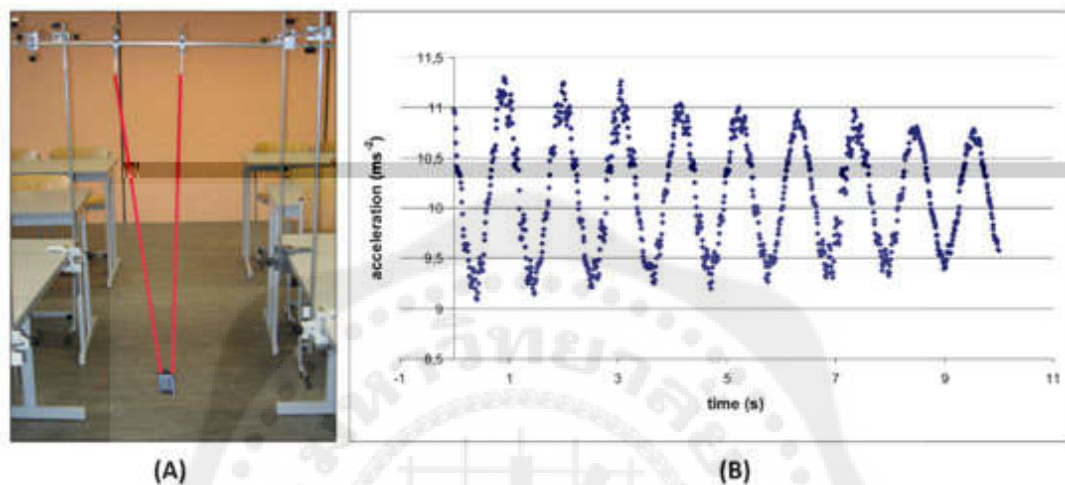
3.2 งานวิจัยด้านฟิสิกส์ศึกษา

ในด้านการวิจัยด้านการศึกษา Phommarach, Wattanakasiwich และ Johnston (Phommarach; Wattanakasiwich; & Johnston. 2012: 189-196) ได้ศึกษาการการเคลื่อนที่แบบกลิ้งในทางทฤษฎีทั้งทรงกระบอกตันและกลวงบนพื้นเอียง แล้วสร้างชุดคำถามเพื่อวัดความเข้าใจคลาดเคลื่อนของกลุ่มตัวอย่างนักร้องนักศึกษาชั้นปี ที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ 4 คน พบว่ากลุ่มตัวอย่างนักร้องมีความเข้าใจคลาดเคลื่อนเกี่ยวกับโมเมนต์ความเฉื่อยและทอร์ก แล้วจึงนำข้อมูลนำไปสร้างชุดการสาธิต วัดประสิทธิภาพด้วยการสำรวจความเข้าใจของกลุ่มตัวอย่างจากผู้เรียนวิชาฟิสิกส์พื้นฐาน 207105 ในภาคเรียนที่ 1 ปี การศึกษา 2554 โดยแบ่งเป็นสอง กลุ่มที่หนึ่งกลุ่มควบคุมมีนักศึกษา 46 คน ได้รับฟังการบรรยายที่ไม่มีการสาธิตโดยชุดสาธิตของผู้วิจัย กลุ่มที่สองกลุ่มทดลองมีนักศึกษา 64 คน ได้รับฟังการบรรยายที่เช่นเดียวกับกลุ่มวิจัยทุกประการ แต่ได้รับฟังการสาธิตประกอบจากชุดการสาธิตของผู้วิจัยด้วยโดยได้มีการเปรียบเทียบผลการทดสอบก่อนและหลังเรียนของทั้งสองกลุ่มด้วยแบบประเมินความเข้าใจการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง ปรากฏว่าการบรรยายด้วยการสาธิตโดยชุดสาธิตของผู้วิจัยได้ผลที่ดีมีประสิทธิภาพสูงกว่าการบรรยายเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามจากผลการทำแบบทดสอบก็ยังพบปัญหาความเข้าใจคลาดเคลื่อน ความเข้าใจเกี่ยวกับโมเมนต์ความเฉื่อยที่วัดหลังรับการสอนบรรยายและสาธิตแล้วกลับมีผลการตอบคำถามที่ลดลง ขาดความเข้าใจเกี่ยวกับการเคลื่อนที่เชิงมุม ด้านความเข้าใจเกี่ยวกับแรงเสียดทานที่มีบทบาทในการเคลื่อนที่แบบกลิ้งพบว่าผู้เรียนยังมีความเข้าใจคลาดเคลื่อนว่าแรงเสียดทานนั้นคือแรงเสียดทานจลน์ไม่ใช่แรงเสียดทานสถิต แม้ว่าจะได้รับฟังการสาธิตจากชุดการสาธิตของผู้วิจัยแล้วก็ตาม งานสำรวจของผู้วิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงปัญหาความเข้าใจคลาดเคลื่อนหลายประการเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่ผู้เรียนจำนวนมากแม้ผ่านการเรียนฟิสิกส์พื้นฐานมาแล้ว

3.3 การทดลองฟิสิกส์ด้วยสมาร์ตโฟน

ในปัจจุบันการทดลองทางฟิสิกส์ก็ได้มีการพัฒนาขึ้นตามการพัฒนาด้านเทคโนโลยี โดยมีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในการทดลองทางฟิสิกส์ สามารถบันทึกข้อมูลได้ต่อเนื่อง มีความแม่นยำสูง และวิเคราะห์ข้อมูลได้สะดวก โดยอุปกรณ์ที่นำมาใช้ก็มีหลายชนิด อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ชนิดที่นิยมใช้ในการทดลองทางฟิสิกส์คือสมาร์ตโฟน เนื่องจากมีเซนเซอร์วัดที่วัดปริมาณได้หลายชนิดทำให้มีความสะดวกในการใช้งาน สามารถบันทึกข้อมูลการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพและบันทึกข้อมูลได้หลายชนิดในการทดลองครั้งเดียว งานวิจัยที่ใช้สมาร์ตโฟนในการทดลองทางฟิสิกส์ ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Vogt และ Kuhn (Vogt; & Kuhn. 2012: 439-440) ที่ใช้มาตรความเร่ง (Accelerometer) ทดลองการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย (Simple pendulum) โดยทดลองติดสมาร์ตโฟนกับเชือกความยาว 1.15 เมตร ดังภาพประกอบ 17 (A) แล้วทดลองแกว่งสมาร์ตโฟนโดยสมาร์ตโฟนจะบันทึกค่าความเร่งเชิงมุมที่เวลาต่างๆ ข้อมูลจากสมาร์ตโฟนสามารถนำมาสร้างกราฟระหว่างความเร่งและเวลาได้ดังภาพ 17 (B) เมื่อคำนวณหาคาบของการเคลื่อนที่ T จากกราฟ

จะได้เท่ากับ 2.153 วินาที เมื่อนำคาบของการเคลื่อนที่มาเทียบกับผลจากการคำนวณด้วยสมการ $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ ที่มีค่าเท่ากับ 2.15 วินาที สรุปได้ว่าผลจากการทดลองและการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกัน และมาตรฐานความเร่งสามารถใช้ในการบันทึกผลการทดลองในเรื่องการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่ายได้



ภาพประกอบ 17 (A) การติดตั้งชุดการทดลองการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย (B) กราฟระหว่างความเร่งและเวลาจากผลการทดลอง

ที่มา: Patrik Vogt ; & Jochen Kuhn. (2012, October). Analyzing simple pendulum phenomena with a smartphone acceleration sensor. *The Physics Teacher*. 50(7): 439-440.

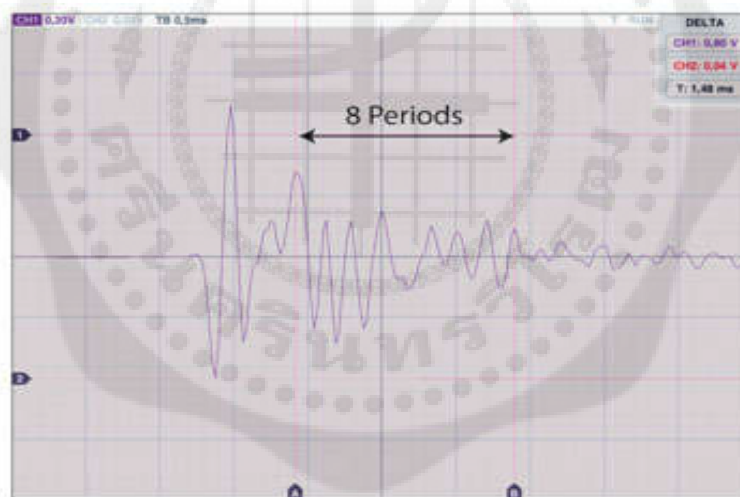
Müller และคณะ (Kuhn; et al. 2014: 351-355) ได้อาศัยความสามารถในการรับเสียงของระบบจัดเก็บข้อมูลเสียง (Sound storage system) เพื่อใช้สมาร์ทโฟนเป็นออสซิลโลสโคปในการศึกษาเสียงดังจากข้อต่อกระดูก เมื่อยึดข้อต่อพื้นที่ของข้อต่อจะเพิ่มความดันภายในจะลดลงในกระดูกของมนุษย์จะมีไขข้อที่มีก๊าซละลายอยู่ภายในเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น การที่ความดันลดลงทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซที่ละลายอยู่ภายในไขข้อในรูปฟองอากาศ ทำให้เกิดเสียงดังเกิดขึ้น ฟองนี้จะเห็นได้จากการถ่ายภาพรังสีของข้อต่อ การวิจัยนี้ใช้สมการ Minnaert frequency ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่การสั่นและพารามิเตอร์ของฟองอากาศในการวิเคราะห์ดังนี้

$$f \approx \frac{1}{2\pi \cdot r} \sqrt{\frac{3p}{\rho}} \quad (2.28)$$

เมื่อ r คือรัศมีของฟองอากาศ ρ คือความถี่ และ p คือความดันของไขข้อโดยรอบ
 แกสมการเพื่อหาสมการสำหรับหาค่า r จะได้ว่า

$$r \approx \frac{1}{2\pi \cdot f} \sqrt{\frac{3p}{\rho}} \quad (2.29)$$

ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมประยุกต์ Oscilloscope ในการบันทึกเสียงจากข้อต่อกระดูกของตัวอย่าง ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 18 ซึ่งพบการสั่นแปลครั้งในเวลา 1.5 มิลลิวินาที มีความถี่ 5.3 กิโลเฮิร์ตซ์ จากความถี่ที่ได้จากการวัดประมาณค่าต่างดังนี้โดยความหนาแน่น 1 กิโลกรัมต่อลิตร และความดัน 10^5 ปาสกาล สามารถหารรัศมีของฟองอากาศได้เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร จากความสามารถในการวัดขนาดของฟองอากาศภายในไขข้อดังที่ได้ทำมาแล้วทำให้เห็นถึงความสามารถในการประยุกต์ใช้งานของสมาร์ทโฟนที่สามารถปรับปรุงใช้ได้ในการทำการทดลองหลายชนิด

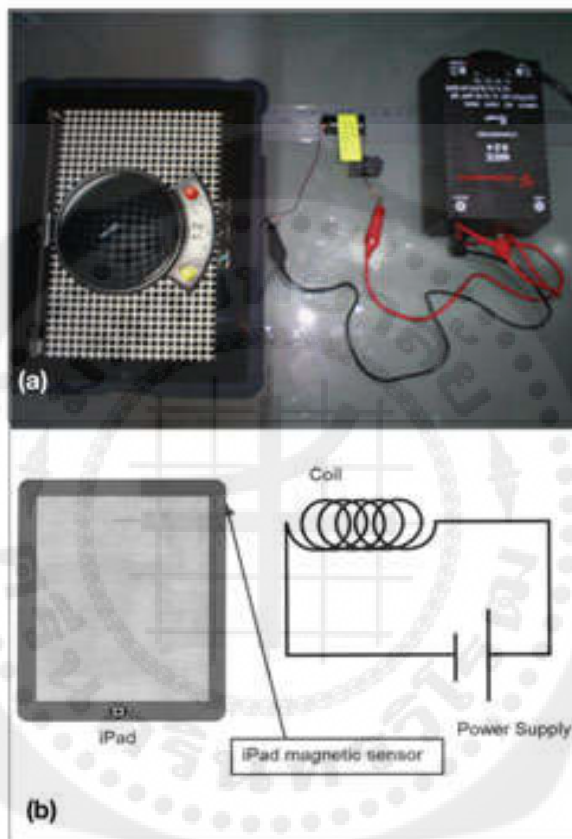


ภาพประกอบ 18 สัญญาณเสียงของเสียงจากข้อต่อกระดูก

ที่มา: Andreas Müller; et al. (2015, May). Cracking knuckles — A smartphone inquiry on bioacoustics. *The Physics Teacher*. 53(5): 351–356.

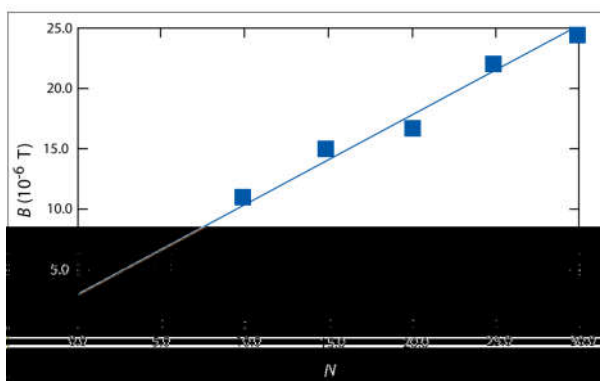
Silva (Silva. 2012: 372-373) ได้ใช้แมกนีโตมิเตอร์ภายใน iPad โดยอาศัยโปรแกรมประยุกต์ MagnetMeter-3D เพื่อสร้างชุดการทดลองการวัดสนามแม่เหล็กของขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้า โดยใช้เส้นลวดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตรจำนวนตั้งแต่ 1-6 รอบ มาใช้ในการ

ทดลอง โดยวางขดลวดห่างจากเซนเซอร์ 2 เซนติเมตร การติดตั้งชุดการทดลองดังภาพประกอบ 19 (A) และ (B) โดยผลการทดลองเป็นไปตามภาพประกอบ 20 โดยความเข้มของสนามแม่เหล็กแปรผันตรงกับจำนวนขดลวด และมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น ความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 0.739×10^{-6} เทสลาต่อรอบ โดยค่านี้เกี่ยวข้องกับรูปทรงเรขาคณิตของขดลวด กระแสไฟฟ้าในขดลวด และระยะระหว่างขดลวดกับเซนเซอร์



ภาพประกอบ 19 (A) การติดตั้งชุดการทดลองการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) แผนผังการติดตั้งชุดการทดลองการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

ที่มา: Nicolas Silva. (2012, September). Magnetic field sensor. *The Physics Teacher*. 50(6): 372-373.



ภาพประกอบ 20 ผลการทดลองการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

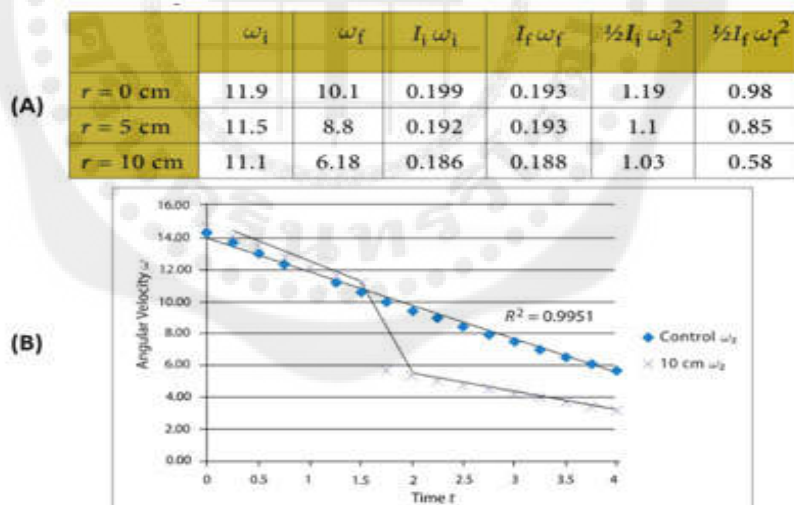
ที่มา: Nicolas Silva. (2012, September). Magnetic field sensor. *The Physics Teacher*. 50(6): 372-373.

Shakur และ Sinat (Shakur; & Sinat. 2013: 564-565) ได้ใช้ไจโรสโคป (Gyroscope) ภายในสมาร์ทโฟนในการวัดความเร็วเชิงมุมเพื่อสร้างชุดการทดลองเรื่องโมเมนตัมเชิงมุม การติดตั้งชุดการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 21 โดยติดสมาร์ทโฟนด้วยเทปกาวยสองหน้าที่ยึดของถาดหมุน ทำการหมุนถาด ขณะที่ถาดกำลังหมุนอยู่ ทำการเพิ่มมวลขนาด 1.13 กิโลกรัม โดยวางภายในถาดที่กำลังหมุนที่จุดศูนย์กลางถาดแล้วบันทึกค่า ทดลองซ้ำโดยวางมวลห่างจากจุดศูนย์กลาง r 5 และ 10 เซนติเมตรตามลำดับ จากการทดลองจะได้ผลการทดลองดังภาพประกอบ 22 (A) และภาพประกอบ 22 (B) สามารถหาโมเมนตัมเชิงมุมของระบบเมื่อวางมวลที่ 0 เซนติเมตรจากจุดศูนย์กลางได้ 2.4×10^{-3} กิโลกรัมต่อเมตร² เมื่อวางมวลที่ 5 เซนติเมตรจากจุดศูนย์กลางได้ 5.2×10^{-3} กิโลกรัมต่อเมตร² เมื่อวางมวลที่ 10 เซนติเมตรจากจุดศูนย์กลางได้ 13.7×10^{-3} กิโลกรัมต่อเมตร² จากภาพประกอบ 22 (B) จะเห็นว่าเมื่อวางมวลบนถาดหมุน ความเร็วเชิงมุมจะลดจาก 11.11 เรเดียนต่อวินาที ลงเป็น 6.18 เรเดียนต่อวินาที โมเมนตัมเชิงมุมก่อนการชนจะเท่ากับ 0.186 กิโลกรัม เมตร² ต่อวินาที โมเมนตัมเชิงมุมหลังการชนจะเท่ากับ 0.188 กิโลกรัม เมตร² ต่อวินาที โมเมนตัมเชิงมุมก่อนและหลังการชนมีความต่างกันเพียงร้อยละ 1 ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าโมเมนตัมเชิงมุมอนุรักษ์ ในส่วนของพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบหมุน ก่อนการเคลื่อนที่มีค่า 1.03 จูล หลังการหมุนมีค่าลดลงเป็น 0.581 จูล พลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบหมุนไม่อนุรักษ์มีการสูญเสียในการเคลื่อนที่ร้อยละ 44



ภาพประกอบ 21 การติดตั้งชุดการทดลองเรื่องโมเมนตัมเชิงมุม

ที่มา: Asif Shakur; & Taylor Sinatra. (2013, December). Angular momentum. *The Physics Teacher*. 51(9): 564-565.



ภาพประกอบ 22 (A) ผลการทดลองเรื่องโมเมนตัมเชิงมุม (B) กราฟระหว่างความเร็วเชิงมุมและเวลา เมื่อวางมวลที่ 10 เซนติเมตรจากจุดศูนย์กลาง

ที่มา: Asif Shakur; & Taylor Sinatra. (2013, December). Angular momentum. *The Physics Teacher*. 51(9): 564-565.

นอกจากนี้ Puttharugsa และคณะ (Puttharugsa; et al. 2016: 1-10) ได้ใช้ไจโรสโคป (Gyroscope) เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบกิ้งก้านบนพื้นเอียง โดยนำสมาร์ตโฟนมาติดด้านข้างทรงกระบอกกลวงตามภาพประกอบ 23 (B) เมื่อทำการทดลองปล่อยให้ทรงกระบอกกิ้งไปตามพื้นเอียงที่มุมเอียงค่าต่างๆ แล้วบันทึกค่าอัตราเร็วเชิงมุมต่อเวลาตามภาพประกอบ 23 (A) แล้วจึงนำข้อมูลไปหาขนาดของความเร่งเชิงมุมเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณจากสมการการเคลื่อนที่แบบกิ้งโดยไม่มีการไถลที่คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\alpha = \frac{Cg}{R} \sin \theta \quad (2.30)$$

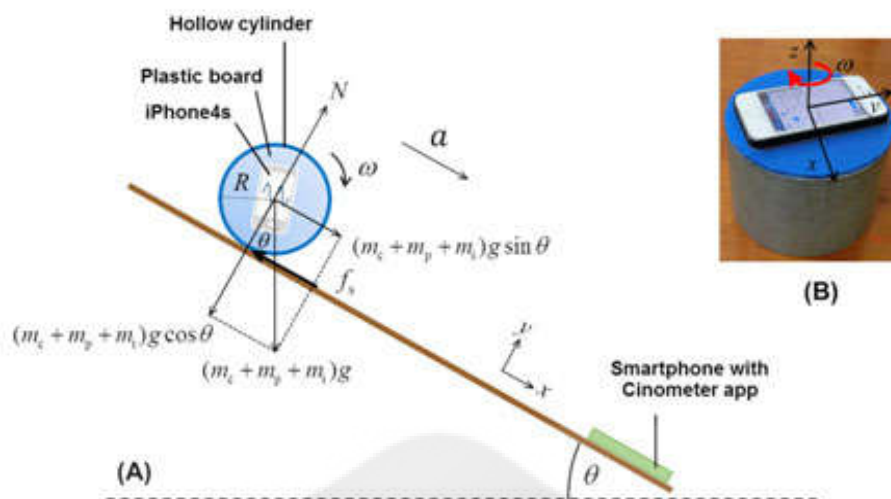
โดย $C = (m_c + m_p + m_i) / \left[2m_c + \frac{3}{2}m_p + \frac{1}{12}m_i \left(\frac{12R^2 + w^2 + l^2}{R^2} \right) \right]$, m_c คือมวลของทรงกระบอกกลวงตาม, m_p คือมวลของฟลาคสติบอร์ต, m_i คือมวลของสมาร์ตโฟน, w คือความกว้างของสมาร์ตโฟน และ l คือความยาวของสมาร์ตโฟน

การเคลื่อนที่แบบกิ้งโดยเกิดขึ้นได้เมื่อมุมเอียงเป็นไปตามเงื่อนไขการเคลื่อนที่แบบกิ้งบนพื้นเอียงดังสมการต่อไปนี้

$$\mu_s \geq E \tan \theta \quad (2.31)$$

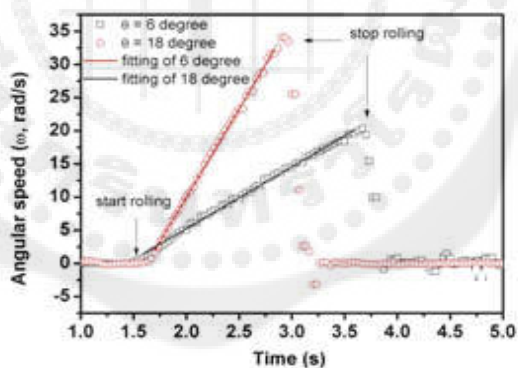
$$\text{โดย } E = \left[m_c + \frac{1}{2}m_p + \frac{1}{12}m_i \left(\frac{w^2 + l^2}{R^2} \right) \right] / \left[2m_c + \frac{3}{2}m_p + \frac{1}{12}m_i \left(\frac{12R^2 + w^2 + l^2}{R^2} \right) \right]$$

ภาพประกอบ 24 แสดงผลการทดลองที่มุม 6 และ 18 องศา โดยความชันของกราฟสามารถนำมาหาขนาดของความเร่งเชิงมุมได้ เมื่อสร้างกราฟระหว่างขนาดของความเร่งเชิงมุมกับมุมเอียงต่างๆดังภาพประกอบ 25 จะพบว่ากราฟแบ่งได้สองส่วนคือช่วงที่หนึ่งตั้งแต่มุม 4 - 26 องศา ที่ขนาดของความเร่งเชิงมุมเป็นไปตามผลคำนวณซึ่งหมายความว่าเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นเป็นแบบกิ้งโดยไม่มีการไถล และช่วงตั้งแต่มุม 28 องศา เป็นต้นไป ขนาดของความเร่งเชิงมุมไม่เป็นไปตามผลคำนวณ การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นคือการเคลื่อนที่แบบกิ้งที่มีการไถล สามารถหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (μ_s) ได้เท่ากับ 0.205 ± 0.011 เมื่อเทียบกับผลจากการทดลองเปรียบเทียบที่ได้ผลที่ 0.194 ± 0.018 มีความคลาดเคลื่อน 5 % และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (μ_k) หาค่าได้เท่ากับ 0.178 ± 0.003 เมื่อเทียบกับผลจากการทดลองเปรียบเทียบที่ได้ผลที่ 0.184 ± 0.020 มีความคลาดเคลื่อน 3 % จากผลการทดลอง สามารถกล่าวได้ว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกับผลคำนวณจากทฤษฎี มีความแม่นยำสามารถนำไปใช้ในการจัดการเรียนการสอนได้



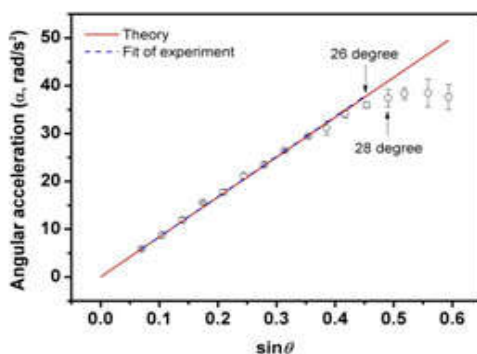
ภาพประกอบ 23 (A) แผนผังการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง (B) ภาพแสดงแกนที่มี การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของอุปกรณ์บันทึกค่า

ที่มา: Chokchai Puttharugsa; et al. (2016, July). Investigation of the rolling motion of a hollow cylinder using a smartphone. *European Journal of Physics*. 37(5): 1-10.



ภาพประกอบ 24 กราฟผลการทดลองที่มุมเอียง 6 องศา และ 18 องศา

ที่มา: Chokchai Puttharugsa; et al. (2016, July). Investigation of the rolling motion of a hollow cylinder using a smartphone. *European Journal of Physics*. 37(5): 1-10.



ภาพประกอบ 25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความเร่งเชิงมุมและมุมเอียง

ที่มา : Chokchai Puttharugsa; et al. (2016, July). Investigation of the rolling motion of a hollow cylinder using a smartphone. *European Journal of Physics*. 37(5): 1-10.

4. การประเมินผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นด้วยวิธี Normalized gain

Normalized gain คือวิธีการวัดผลการประเมินผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นของผู้เรียนหลังได้ทำการเรียนรู้แล้วโดยใช้แบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน เป็นอัตราส่วนระหว่างผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นจริงต่อผลการเรียนรู้สูงสุดที่มีโอกาสเพิ่มขึ้นได้ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\langle g \rangle = \frac{(\% \text{ post-test}) - (\% \text{ Pre-test})}{(100\%) - (\% \text{ Pre-test})} \quad (2.30)$$

โดย $\langle g \rangle$ คือ ค่า Normalized gain

% Post-test คือ ค่าเฉลี่ยของคะแนนสอบหลังเรียนเป็นเปอร์เซ็นต์

% Pre-test คือ ค่าเฉลี่ยของคะแนนสอบก่อนเรียนเป็นเปอร์เซ็นต์

การประเมินผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นด้วยวิธี Normalized gain นี้ทำให้สามารถสรุปผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นได้ในรายบุคคลและรายกลุ่ม ได้ผลสรุปที่ต่างจากวิธีทั่วไป (ศศิธร ชูแก้ว; และคนอื่นๆ. 2556: 15)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น งานวิจัย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

ขั้นตอนนี้เป็นการรวบรวมข้อมูลที่มีความสำคัญและเกี่ยวข้องกับการวิจัย ทั้งทางด้านกิจกรรมการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ ทฤษฎีการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุแข็งเกร็ง และหัวข้ออื่นๆที่เกี่ยวข้อง จากหนังสือเรียน บทความ เอกสาร และงานวิจัยที่ได้ดำเนินการเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุแข็งเกร็ง งานวิจัยด้านฟิสิกส์ศึกษา และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆกับการจัดการเรียนการสอนฟิสิกส์

ศึกษาเกี่ยวกับกิจกรรมการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุแข็งเกร็ง โจทย์ปัญหาที่ใช้ในการทดสอบวัดผล ปัญหาความเข้าใจแนวคิดที่คลาดเคลื่อนของผู้เรียน และแนวทางการแก้ปัญหาของผู้เรียน โดยรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยต่างๆ พบว่าผู้เรียนมีความเข้าใจแนวคิดที่คลาดเคลื่อนเกี่ยวกับหัวข้อดังนี้

- มวล ผู้เรียนมักเข้าใจผิดว่ามวลเกี่ยวข้องกับโมเมนต์ความเฉื่อย และมวลเป็นปริมาณที่แปรผันกับความเร่งของวัตถุในการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง

- การเคลื่อนที่เชิงมุม ผู้เรียนไม่มีการนำความรู้เกี่ยวกับการเคลื่อนที่เชิงมุมมาอธิบายการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง

- บทบาทของแรงเสียดทาน ผู้เรียนส่วนมากไม่เข้าใจถึงบทบาทของแรงเสียดทานที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลคือ และมักเข้าใจผิดว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลคือแรงเสียดทานจลน์

- กฎการอนุรักษ์พลังงาน ผู้เรียนไม่สามารถเชื่อมโยงความรู้และอธิบายการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง ว่าชนิดที่มีการไถลหรือไม่มีการไถลนั้นเกี่ยวข้องกับกฎการอนุรักษ์พลังงานอย่างไร

2. สร้างการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียง

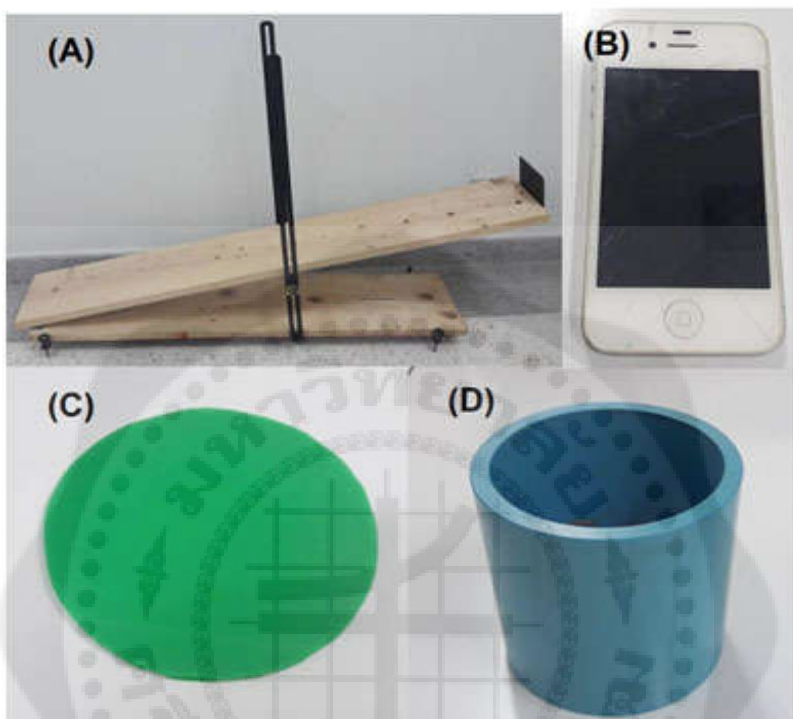
2.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. พื้นเอียงปรับค่าได้ทำจากไม้ 1 ชุด ความยาว 1.401 ± 0.001 เมตร และกว้าง 0.181 ± 0.001 เมตร

2. สมาร์ทโฟน (iPhone 4s) 1 เครื่อง ใส่ในเคสพลาสติก มีมวล (m_1) 0.15 ± 0.01 กิโลกรัม และมีขนาด (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ หนา) $0.1152 \times 0.0586 \times 0.0093 \pm 0.0001$ เมตร³

3. แผ่นดิสก์พลาสติก 1 แผ่น มีมวล (m_d) 0.012 ± 0.001 กิโลกรัม, เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.071 ± 0.001 เมตร และมีความหนา 0.002 ± 0.001 เมตร

4. ทรงกระบอกกลวงทำจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride หรือ PVC) 2 ลูก มีมวล (m_h) 1.36 ± 0.01 กิโลกรัม, รัศมีภายใน (R_1) 0.071 ± 0.001 เมตร, รัศมีภายนอก (R_2) 0.082 ± 0.001 เมตร และมีความยาว 0.161 ± 0.001 เมตร



ภาพประกอบ 26 วัสดุและอุปกรณ์ (A) พื้นเอียงปรับค่าได้ (B) สมาร์ทโฟน (iPhone 4s) (C) แผ่นดิสก์พลาสติก (D) ทรงกระบอกทำจากพอลิไวนิลคลอไรด์

2.2 การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกบนพื้นเอียง

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยนำสมาร์ทโฟนกับเคสติดเข้ากับแผ่นดิสก์พลาสติก แล้วนำไปประกอบติดกับทรงกระบอกกลวงอีกครั้งดังภาพประกอบ 27 ชุดอุปกรณ์นี้จะมีแกนหมุนร่วมกัน โมเมนต์ความเฉื่อยรวมคือ

$$I_{Total} = I_{hc} + I_d + I_s \quad (3.1)$$

เมื่อ I_{hc} คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกกลวง, I_d คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่นดิสก์พลาสติกบาง, และ I_s คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของสมาร์ทโฟน
โมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกกลวงคือ

$$I_{hc} = \frac{1}{2} m_{hc} (R_1^2 + R_2^2) \quad (3.2)$$

เมื่อ R_1 คือรัศมีภายในของทรงกระบอกกลวง R_2 คือรัศมีภายนอกของทรงกระบอกกลวง โมเมนต์ และ m_{hc} คือมวลของทรงกระบอกกลวง โมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่นดิสก์พลาสติกบางคือ

$$I_d = \frac{1}{2} m_d R_1^2 \quad (3.3)$$

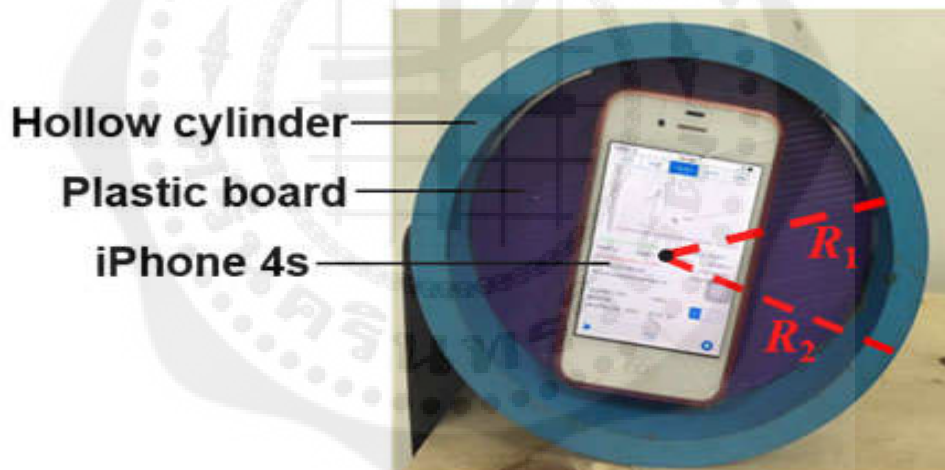
เมื่อ m_d คือมวลของแผ่นดิสก์พลาสติกบาง โมเมนต์ความเฉื่อยของสมาร์ทโฟนและเคสคือ

$$I_s = \frac{1}{12} m_s (h^2 + w^2) \quad (3.4)$$

โดย h คือความสูงของสมาร์ทโฟนและ w คือความกว้างของสมาร์ทโฟน

มวลรวมของทรงกระบอกกลวงติดกับแผ่นดิสก์พลาสติกบาง และสมาร์ทโฟนที่มีแกนหมุนร่วมกันเป็นคือ

$$m_{Total} = m_{hc} + m_d + m_s \quad (3.5)$$



ภาพประกอบ 27 ทรงกระบอกกลวงติดกับแผ่นดิสก์พลาสติกบาง และสมาร์ทโฟน

จากสมการการเคลื่อนที่ (2.8), (2.9) และ (2.10) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\alpha = \frac{m_{Total} g R_2 \sin \phi}{(m_{Total} R_2^2 + I_{Total})} \quad (3.6)$$

$$\omega_f = \frac{m_{Total} g R_2 \sin \phi}{(m_{Total} R_2^2 + I_{Total})} t \quad (3.7)$$

$$\theta_f = \frac{1}{2} \frac{m_{Total} g R_2 \sin \phi}{(m_{Total} R_2^2 + I_{Total})} t^2 \quad (3.8)$$

หากพิจารณาว่าสมาร์ทโฟนและแผ่นดิสก์พลาสติกบางที่ใช้ในการทดลองมีโมเมนต์ความเฉื่อยและมวลน้อยเมื่อเทียบกับทรงกระบอกกลวง เราสามารถประมาณได้ว่า I_{Total} มีค่าเท่ากับ I_{hc} และ $\boxed{\times}$ มีค่าเท่ากับ m_{hc} ดังนั้นสามารถเขียนสมการขนาดของความเร่งเชิงมุมที่ (3.6) ใหม่ได้ว่า

$$\alpha = \frac{g R_2 \sin \phi}{\left(R_2^2 + \left(\frac{R_1^2 + R_2^2}{2} \right) \right)} \quad (3.9)$$

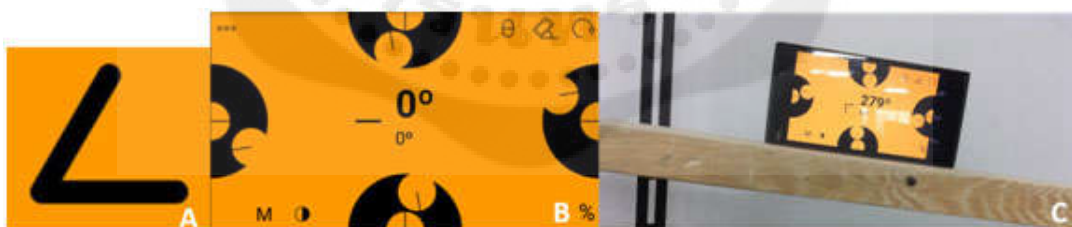
2.3 โปรแกรมประยุกต์ที่ใช้ในการทดลอง

โปรแกรมประยุกต์ที่ใช้ในการทดลองคือ Sensor log Version 1.8 โดย Bernd Thomas สามารถ download ได้จาก App store เป็นโปรแกรมประยุกต์ที่มีความสามารถในการวัดปริมาณเชิงฟิสิกส์ได้จากเซนเซอร์หลายชนิดพร้อมกัน สามารถประมาณและแสดงผลให้ทราบ ตามภาพประกอบ 28 นอกจากนี้ยังสามารถบันทึกค่าอย่างต่อเนื่องโดยอัตโนมัติและส่งข้อมูลไปยังอีเมลเพื่อนำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์ต่อไปได้



ภาพประกอบ 28 (A) สัญลักษณ์ของโปรแกรมประยุกต์ Sensorlog (B) การแสดงผลของโปรแกรมประยุกต์ Sensor log ระหว่างบันทึกข้อมูลด้วยแมกนีโตมิเตอร์

โปรแกรมประยุกต์ Angle Pro 2.3 โดย 5fuf5 สามารถ download ได้จาก Play store เป็นโปรแกรมประยุกต์ที่มีความสามารถในการวัดมุมของอุปกรณ์เทียบกับระดับพื้นราบ ใช้ในการวัดมุมของพื้นเอียงเพื่อปรับค่ามุมเอียงให้ได้ตามต้องการขณะทำการทดลอง มีหน้าจอแสดงผลตามภาพประกอบที่ 29



ภาพประกอบ 29 (A) สัญลักษณ์ของโปรแกรมประยุกต์ Angle Pro (B) และ (C) การแสดงผลของโปรแกรมประยุกต์ Angle Pro

2.4 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างพื้นผิวของพื้นเอียงและทรงกระบอกกลวง (PVC)

1. นำทรงกระบอกกลวงสองชิ้นมามัดติดกันให้เกิดการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ได้เพียงอย่างเดียว นำทรงกระบอกวางที่จุดสูงสุดของพื้นเอียงให้สัมผัสติดกับที่กั้นตามภาพประกอบ 30
2. ปรับมุมพื้นเอียงให้เพิ่มขึ้นจนกระทั่งทรงกระบอกเริ่มเคลื่อนที่ไถลไปตามพื้นเอียง
3. บันทึกค่ามุมเอียงที่เป็นค่าแรกที่ทรงกระบอกกลวงเริ่มไถล
4. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตจากสมการ (2.15)
5. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-4 จำนวน 5 ครั้ง นำค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตมาหาค่าเฉลี่ย



ภาพประกอบ 30 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

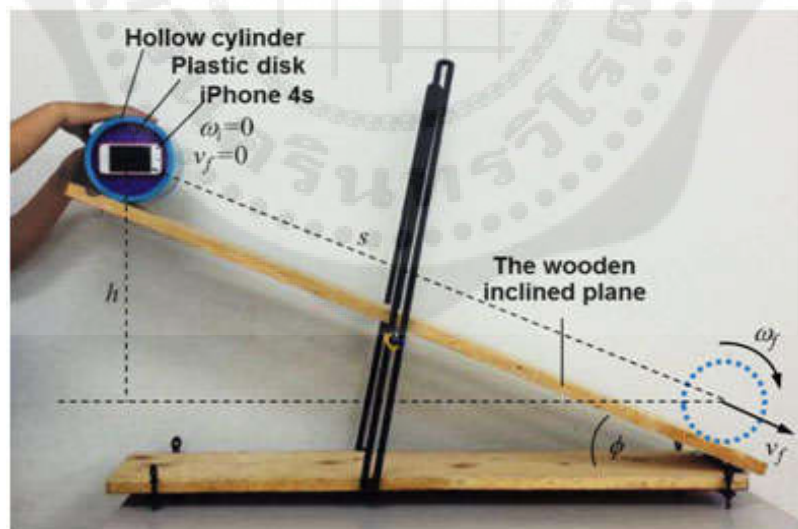
ตอนที่ 2 การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวง

1. นำสมาร์ตโฟนและเคสติดกับแผ่นดิสต์พลาสติก แล้วนำไปติดภายในทรงกระบอกกลวง
2. ตั้งค่าการบันทึกของโปรแกรมประยุกต์ Sensorlog ในโหมด Configuration โดยตั้งค่าตามลำดับต่อไปนี้ ตามภาพประกอบ 31
 - 2.1 ความถี่ในการบันทึกข้อมูลที่ 30 เฮิรตซ์
 - 2.2 ใส่ที่อยู่ของอีเมลที่เป็นปลายทางที่จะส่งของข้อมูลของการทดลอง
 - 2.3 เปิดการทำงานของแมกนีโตมิเตอร์
 - 2.4 เปิดการทำงานของไจโรสโคป



ภาพประกอบ 31 การตั้งค่าในโหมด Configuration

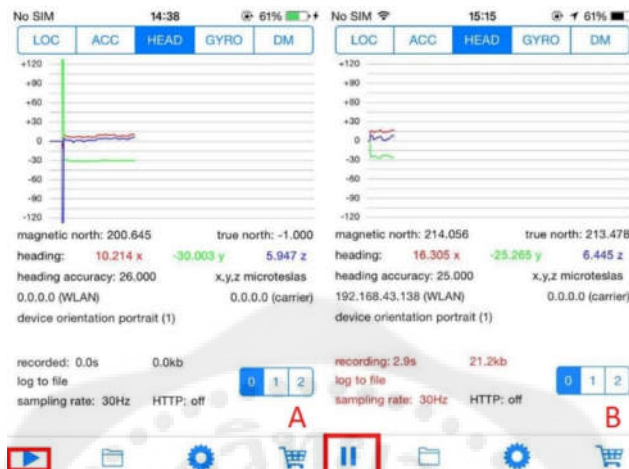
3. ใช้โปรแกรมประยุกต์ Angle Pro ในการวัดมุมของพื้นเอียง นำทรงกระบอกวางที่จุดสูงสุดของพื้นเอียงให้สัมผัสติดกับที่กั้นตามภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 การทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลาง

4. กดคำสั่งเริ่มการบันทึกข้อมูลในหน้าแสดงผลของโปรแกรมประยุกต์ Sensor log ตามภาพประกอบ 33 (A) แล้วจึงปล่อยทรงกระบอกให้กลิ้งลงมาตามพื้นเอียง

5. เมื่อทรงกระบอกเคลื่อนที่ถึงปลายของพื้นเอียง กดคำสั่งหยุดการบันทึกของมูลในหน้าแสดงผลของโปรแกรมประยุกต์ Sensor log ตามภาพประกอบ 33 (B)



ภาพประกอบ 33 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมประยุกต์ Sensorlog (A) ขณะยังไม่มีกการบันทึกผล (B) ขณะทำการบันทึกผล

6. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3-5 อีกจนครบ 3 ครั้ง

7. เพิ่มมุมเอียงครั้งละ 2 องศา ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 3-6 ไปจนถึงมุม 41 องศา

8. นำไฟล์ผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์กราฟ

8.1 ข้อมูลการทดลองจากแมกนีโตมิเตอร์ที่ได้คือมุมต่อเวลา เนื่องจากข้อจำกัดของเข็มทิศดิจิทัลที่บันทึกค่ามุมได้ตั้งแต่ 0-360 องศา ทำให้ได้กราฟของข้อมูลตามภาพประกอบ 34 (A) ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้

8.2 ปรับข้อมูลให้เหมาะสมที่จะใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป โดยทำการเพิ่มค่ามุมทุกครั้งที่ค่าสูงขึ้นจนมีค่ามากที่สุดที่ 360 องศา แล้วกลับมาเริ่มใหม่ที่ 0 องศา โดยเพิ่มค่ารอบละ 360 องศา เช่น รอบที่หนึ่ง 360 องศา รอบที่สอง 720 องศา เป็นต้น จะได้กราฟการเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นกราฟพาราโบลา ดังภาพประกอบที่ 34 (B)

8.3 ทำการวิเคราะห์กราฟเพื่อหาขนาดของความเร่งของการเคลื่อนที่ได้เทียบกับสมการ (3.8)

8.4 ผลการทดลองจากไจโรสโคปเป็นค่าอัตราเร็วเชิงมุมของทรงกระบอกกลวงต่อเวลา สามารถนำมาสร้างกราฟได้ดังภาพประกอบ 34 (D) ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาขนาดของความเร่งได้จากความชันของกราฟ

8.5 สร้างกราฟระหว่างขนาดของความเร่งและมุมเอียงที่ได้จากการทดลองที่มุมต่างๆ

8.6 สร้างกราฟระหว่างพลังงานกล พลังงานศักย์ พลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ และพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบหมุนเทียบกับเวลา

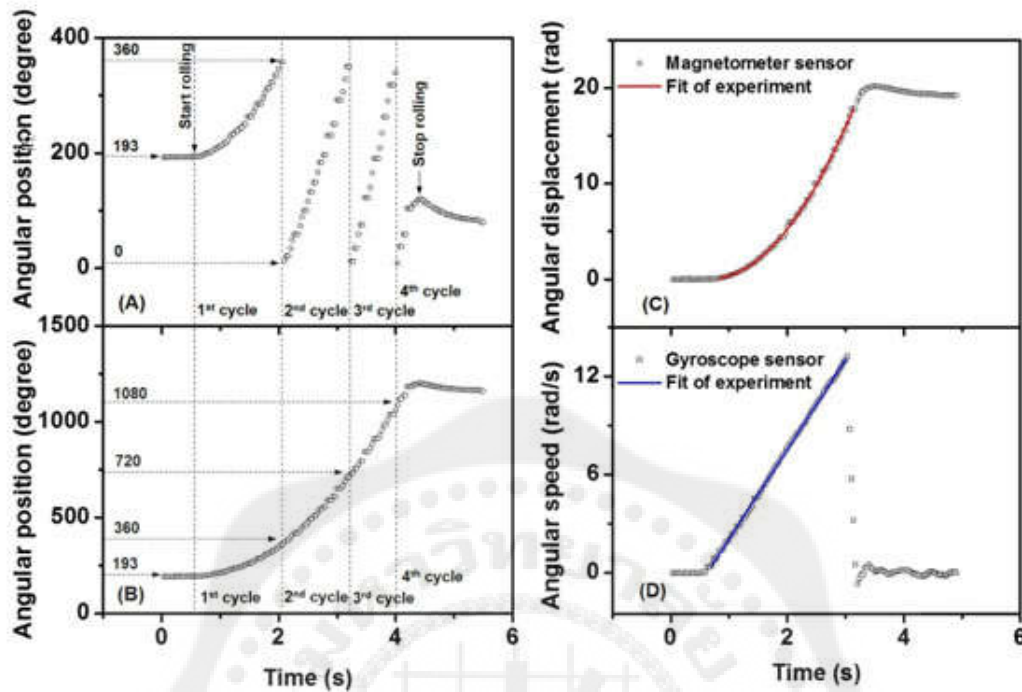
2.5 ผลการทดลอง

ในการทำการทดลองตอนที่ 1 เมื่อยกพื้นเอียงขึ้นทรงกระบอกจะเริ่มเคลื่อนที่ไถลลงตามพื้นเอียงที่มุมเอียง 11.27 ± 0.66 องศา โดยเฉลี่ยจากการทดลอง 5 ครั้ง เมื่อคำนวณตามสมการ (2.15) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างพื้นผิวของพื้นเอียงและทรงกระบอกกลงเท่ากับ 0.194 ± 0.011 โดยผลการทดลองในตอนต้นที่ 1 นี้จะใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองในตอนต้นที่ 2

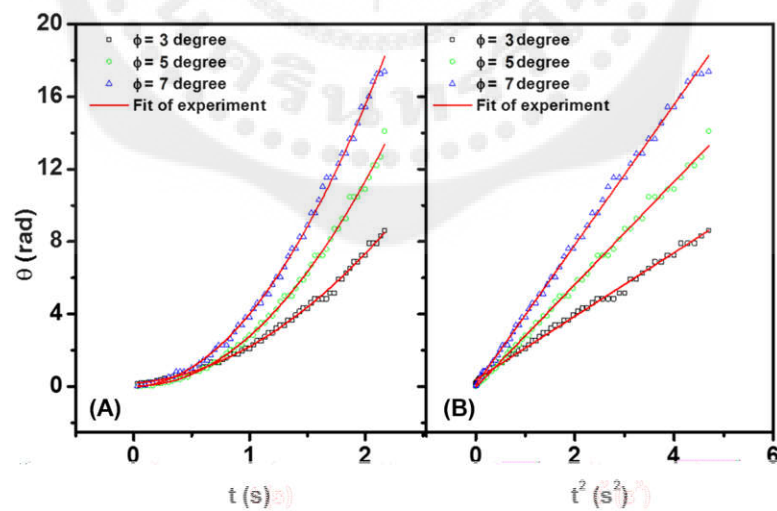
ในการทำการทดลองตอนที่ 2 ข้อมูลที่ได้จากแมกนีโตมิเตอร์จะสามารถเขียนกราฟเป็นกราฟระหว่างระยะทางเชิงมุมกับเวลาดังภาพประกอบ 34 (A) แต่ข้อมูลยังไม่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้เนื่องจากข้อจำกัดในการบันทึกค่าของแมกนีโตมิเตอร์ ต้องมีการปรับข้อมูลโดยทำการเพิ่มค่ามุมที่บันทึกได้ทุกครั้งที่ค่าสูงขึ้นจนมีค่ามากที่สุดที่ 360 องศา แล้วกลับมาเริ่มใหม่ที่ 0 องศา โดยเพิ่มค่ารอบละ 360 องศา เมื่อปรับแต่งแล้วจะได้กราฟระหว่างระยะทางเชิงมุมและเวลาเป็นรูปพาราโบลาดังภาพประกอบ 34 (B) สามารถนำไปหาขนาดของความเร่งเชิงมุมได้โดยเทียบสมการพาราโบลา $y = A + BX + CX^2$ กับสมการการเคลื่อนที่ $\theta_f = \theta_i + \omega_i t + 1/2 \alpha t^2$

จากภาพประกอบ 35 แสดงกราฟของตัวอย่างข้อมูลจากแมกนีโตมิเตอร์ที่มุมเอียง 3 ค่า ได้แก่มุม 3 ± 1 , 5 ± 1 และ 7 ± 1 องศา ข้อมูลในภาพประกอบ 35 (A) เป็นกราฟระหว่างระยะทางเชิงมุมต่อเวลา เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลหาขนาดของความเร่งเชิงมุมได้ 3.10 ± 0.05 , 5.82 ± 0.07 และ 7.50 ± 0.08 เรเดียนต่อวินาที² ตามลำดับ นอกจากนี้เรายังสามารถวิเคราะห์ข้อมูลชุดเดียวกันนี้โดยสร้างกราฟระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลา² ดังที่แสดงใน ภาพประกอบ 35 (B) ลักษณะกราฟจะเปลี่ยนเป็นกราฟเส้น ความชันของกราฟจะเท่ากับ $\alpha/2$ โดยวิธีการวิเคราะห์นี้สามารถหาขนาดของความเร่งได้จากความชันของกราฟได้ 3.50 ± 0.01 , 5.68 ± 0.02 และ 7.72 ± 0.02 rad/s² ตามลำดับ ทั้งสองวิธีการวิเคราะห์ได้ขนาดของความเร่งเชิงมุมที่ใกล้เคียงกัน โดยจากกราฟจะเห็นว่าได้ว่าขนาดความเร่งเชิงมุมแปรผันตรงกับมุมเอียง

ส่วนข้อมูลจากไจโรสโคปสามารถนำมาเขียนกราฟระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมและเวลาได้ดังภาพประกอบ 34 (D) โดยสามารถหาขนาดของความเร่งเชิงมุมได้จากความชันของกราฟ



ภาพประกอบ 34 (A) กราฟของข้อมูลที่บันทึกโดยแมกนีโตมิเตอร์ที่มุมเอียง 5 ± 1 องศา (B) กราฟของข้อมูลที่ถูกรับแต่งเพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่บนพื้นเอียง (C) กราฟของข้อมูลที่ถูกรับแต่งจากแมกนีโตมิเตอร์ (D) กราฟของข้อมูลจากไจโรสโคป



ภาพประกอบ 35 ข้อมูลจากแมกนีโตมิเตอร์ (A) กราฟฟังก์ชันของระยะทางเชิงมุมกับเวลา (B) กราฟฟังก์ชันของระยะทางเชิงมุมกับเวลา²

เมื่อนำข้อมูลการทดลองที่ทำซ้ำ 3 ครั้ง จากทั้งแมกนีโตมิเตอร์และไจโรสโคปมาวิเคราะห์ จะได้ผลการทดลองดังตาราง 1

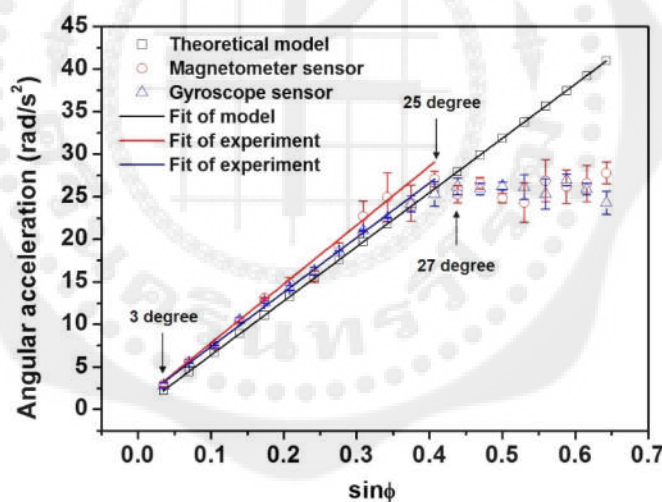
ตาราง 1 แสดงผลการวิเคราะห์หาขนาดของความเร่งเชิงมุมของการเคลื่อนที่ของทรงกระบอกเอียงที่มุมเอียงตั้งแต่ 3 ± 1 ถึง 41 ± 1 องศา

มุมเอียง (องศา)	แมกนีโตมิเตอร์		ไจโรสโคป	
	ขนาดของความเร่ง เชิงมุม (rad/s^2)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ขนาดของความเร่ง เชิงมุม (rad/s^2)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
3 ± 1	2.91	0.26	2.81	0.20
5 ± 1	5.61	0.22	5.45	0.03
7 ± 1	7.51	0.30	7.49	0.06
9 ± 1	10.47	0.29	10.51	0.24
11 ± 1	13.07	0.08	12.57	0.14
13 ± 1	14.78	0.75	14.28	0.25
15 ± 1	15.60	0.68	16.23	0.48
17 ± 1	19.08	0.47	18.61	0.02
19 ± 1	22.68	1.79	21.04	0.05
21 ± 1	24.95	2.86	22.54	0.07
23 ± 1	24.23	2.10	24.16	0.94
25 ± 1	27.10	0.92	25.32	1.43
27 ± 1	25.27	1.01	26.21	0.98
29 ± 1	26.59	0.66	25.91	0.68
31 ± 1	24.83	0.53	26.24	0.48
33 ± 1	24.31	2.31	26.13	1.43
35 ± 1	26.88	2.49	25.33	1.80
37 ± 1	26.18	1.98	26.96	0.67
39 ± 1	26.55	2.14	25.88	0.67
41 ± 1	27.79	1.28	24.28	1.38

ขนาดของความเร่งที่วิเคราะห์ได้จากเซนเซอร์ทั้งสองที่มุมเอียงค่าต่างๆ ถูกเปรียบเทียบกับรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่ไม่มีแรงเสียดทานที่คำนวณจากสมการ (3.6) ภาพประกอบ 36 แสดงขนาดของความเร่งเชิงมุมเพิ่มขึ้นตามมุมของพื้นเอียงที่เพิ่มขึ้นเป็นไปตาม

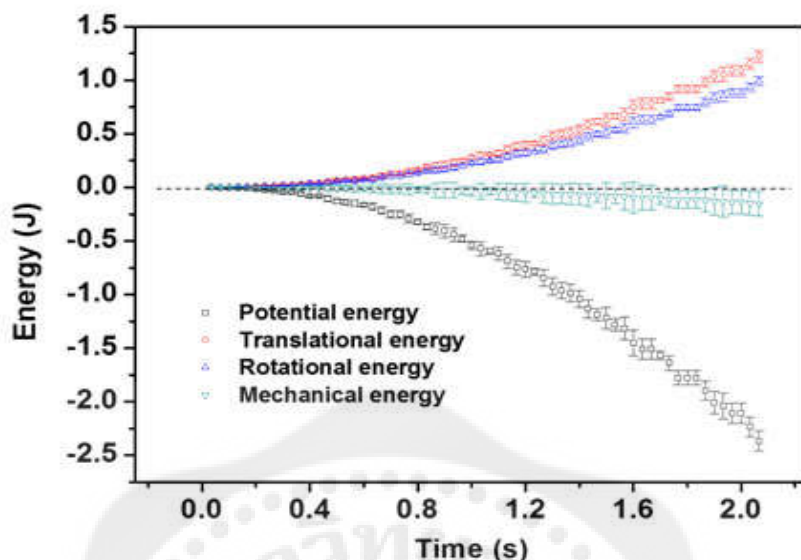
ทฤษฎีตั้งแต่มุม 3 ± 1 ถึง 25 ± 1 องศา ซึ่งหมายความว่าเกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่ไม่มีการไถลและระบบอนุรักษ์พลังงานกล หลังจากนั้นเมื่อมุมเอียงมีค่าตั้งแต่ 27 ± 1 องศาขึ้นไปขนาดของความเร่งเชิงมุมจากเซนเซอร์ทั้งสองชนิดเริ่มไม่เป็นไปตามการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งหมายความว่าเกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่มุมเอียงในช่วงเกิดการไถลและนี่ไม่เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน เมื่อทำการวิเคราะห์กราฟผลการทดลองจากหาความชันของกราฟเพื่อเทียบกับกราฟจากการคำนวณที่มีความชัน 63.74 ± 0.01 วินาที⁻² กราฟผลการทดลองจากแมกนีโตมิเตอร์มีความชัน 69.32 ± 1.28 วินาที⁻² มีความคลาดเคลื่อนจากรูปแบบที่คำนวณไว้ 8.8 % ส่วนกราฟผลการทดลองจากไจโรสโคปมีความชัน 64.20 ± 0.47 วินาที⁻² มีความคลาดเคลื่อนจากรูปแบบที่คำนวณไว้ 0.7 % ผลการวิเคราะห์จากข้อมูลผลการทดลองจากทั้งสองแหล่งมีความใกล้เคียงกับผลคำนวณ

จากผลการทดลอง มุมวิกฤตคือมุมที่ 25 ± 1 องศา เนื่องจากเป็นมุมสุดท้ายที่ขนาดของความเร่งเชิงมุมจากผลการทดลองมีค่าสอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎี เมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายตามสมการ (2.13) จะได้เท่ากับ 0.205 เมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสถิติจากผลการทดลองจากตอนที่ 1 พบว่ามีความคลาดเคลื่อน 5.4 % ผลการทดลองที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองตอนที่ 1



ภาพประกอบ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความเร่งเชิงมุมและมุมเอียง

นอกจากนี้ข้อมูลจากผลการทดลองที่ได้รับจากแมกนีโตมิเตอร์ยังสามารถนำมาคำนวณหา พลังงานกล พลังงานศักย์ พลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ และพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบหมุนได้ ภาพประกอบ 37 แสดงพลังงานชนิดต่างๆ ของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลที่มุมเอียง 5 ± 1 องศา โดยพลังงานศักย์มีค่าลดลง และเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ และพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบหมุน โดยพลังงานกลรวมมีค่าเฉลี่ย -0.05 ± 0.06 จูล คงที่ตลอดการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน



ภาพประกอบ 37 พลังงานกลชนิดต่างๆในการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลที่มุมเอียง 5 ± 1 องศา

2.7 สรุปผลการทดลอง

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกลงบนพื้นเอียง โดยใช้ความสามารถของเซนเซอร์ภายในสมาร์ทโฟนคือแอมมิเตอร์และไจโรสโคปในการบันทึกข้อมูลการเคลื่อนที่ และนำข้อมูลไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าปริมาณทางฟิสิกส์ ผลการทดลองที่ได้จากแอมมิเตอร์และไจโรสโคปสามารถใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่แบบกลิ้งได้ การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นเมื่อมุมเอียงมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับมุมวิกฤตคือการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลโดยพลังงานกลอนุรักษ์ ขนาดของความเร่งเชิงมุมมีค่าสอดคล้องกับผลคำนวณทางทฤษฎี และมีค่าแปรผันตรงกับมุมเอียง เมื่อมุมเอียงมีค่าสูงกว่ามุมวิกฤตจะเกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถลพลังงานไม่อนุรักษ์ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตที่ได้จากการทดลองทั้งสองตอนมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเราสามารถใช้สมาร์ทโฟนเป็นอุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลทางฟิสิกส์สำหรับการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกบนพื้นเอียงได้ ในขั้นตอนต่อไปผู้วิจัยจะชุดออกแบบชุดการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกบนพื้นเอียงและเครื่องมือ เพื่อนำไปใช้กับกลุ่มผู้เรียน เพื่อให้ผู้เรียนสามารถสร้างความเข้าใจแนวคิดที่ถูกต้องและแก้ไขความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนต่อไป

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกบนพื้นเอียงโดยใช้แมกนีโตมิเตอร์และไจโรสโคปของสมาร์ทโฟน สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปริมาณทางฟิสิกส์เช่น ขนาดของความเร่งเชิงมุม, ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต, มุมวิกฤต, พลังงานกล, พลังงานศักย์, พลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ และพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบหมุน จากนั้นผู้วิจัยได้นำชุดการทดลองมาใช้ในการจัดการเรียนรู้ตามแนวทางรูปแบบการสอนแบบสืบเสาะหาความรู้ (5E) และได้ศึกษาผลการเรียนรู้ที่เปลี่ยนแปลงไปของผู้เรียนเพื่อเปรียบเทียบกับการสอนแบบบรรยายด้วยวิธี Normalized gain

1. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. แผนการจัดการเรียนรู้ตามแนวทางรูปแบบการสอนแบบสืบเสาะหาความรู้ (5E) เรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง 1 แผนการเรียนรู้เป็นเวลา 3 คาบ
2. เอกสารประกอบการเรียนการสอน การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุบนพื้นเอียง
3. แบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน เรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง เป็นแบบทดสอบชนิดแบบอัตนัย จำนวน 5 ข้อ มีค่าความตรงกับวัตถุประสงค์โดยผู้เชี่ยวชาญ (IOC) 0.945

2. วิธีการดำเนินการรวบรวมข้อมูล

1. ทำการทดลองกับผู้เรียนกลุ่มนาร่องโดยใช้ผู้เรียนจำนวน 10 คน จัดการสอนโดยใช้ชุดการทดลองและทำการวัดผลก่อนเรียนและหลังเรียน เพื่อนำผลที่ได้มาปรับปรุงเครื่องมือ
2. ส่งแผนการจัดการเรียนรู้ และแบบทดสอบก่อนเรียนหลังเรียน ให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน ตรวจสอบ และนำเครื่องมือมาปรับปรุงแก้ไข
3. นำแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน เรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียงไปใช้ทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่ม ใช้เวลา 15 นาที แล้วบันทึกเป็นคะแนนเป็นคะแนนก่อนเรียน
4. แบ่งกลุ่มผู้เรียนเป็นสองกลุ่ม คือกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม จากนั้นดำเนินการจัดการเรียนรู้ เรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียงโดย โดยกลุ่มทดลองใช้ชุดการทดลองจัดการเรียนรู้ตามแนวทางรูปแบบการสอนแบบสืบเสาะหาความรู้ (5E) ส่วนกลุ่มควบคุมใช้การจัดการเรียนการสอนแบบบรรยาย

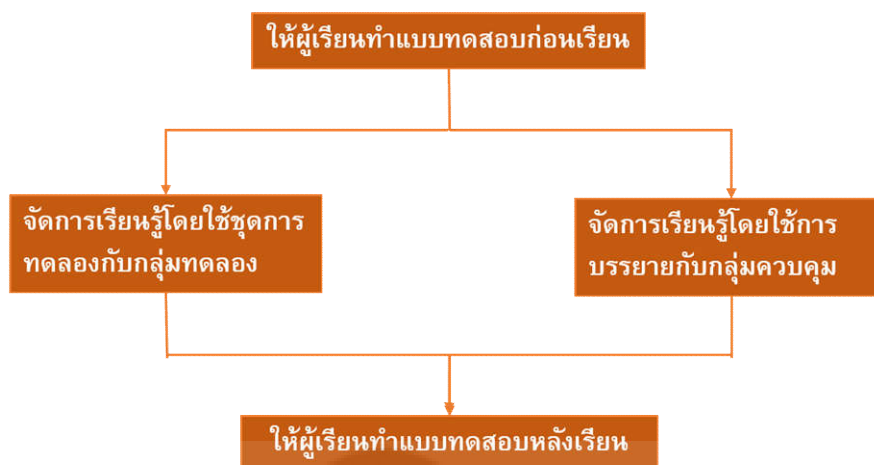


ภาพประกอบ 38 ผู้เรียนกลุ่มทดลองขณะทำการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง



ภาพประกอบ 39 ผู้เรียนกลุ่มควบคุมขณะบรรยายเรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง

5. เมื่อดำเนินการจัดการเรียนรู้แล้ว จึงทดสอบผู้เรียนทั้งสองกลุ่มอีกครั้งโดยใช้แบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน เรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง ใช้เวลา 20 นาที แล้วบันทึกเป็นคะแนนเป็นคะแนนหลังเรียน



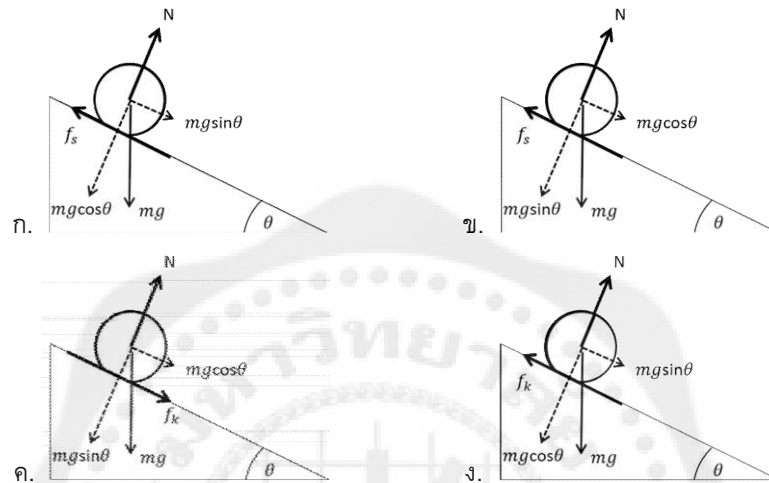
ภาพประกอบ 40 แผนภาพแสดงการเก็บข้อมูลการวิจัย

3. ผลแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน และวิเคราะห์การทำแบบทดสอบของผู้เรียน

แบบทดสอบก่อนเรียนหลังเรียนเรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง มีจำนวน 5 ข้อเป็นข้อสอบแบบปรนัย และให้ผู้เรียนเขียนอธิบายถึงแนวคิดที่ผู้เรียนใช้ในการอธิบายคำตอบด้วย โดยผู้เรียนต้องเลือกตัวเลือกที่ถูกต้องและให้คำอธิบายที่สอดคล้องกับแนวคิดทางฟิสิกส์ด้วยจึงจะนับว่าตอบได้ถูกต้อง แบบทดสอบใช้ชุดเดียวกันทั้งทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน เพื่อวัดความเข้าใจในแนวคิดและเนื้อหาของผู้เรียนมีเนื้อหาดังนี้

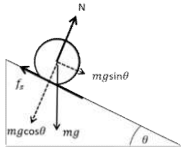
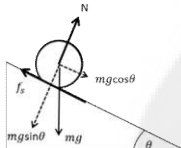
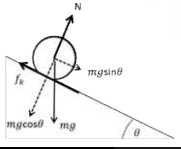
3.1 ผลการทดสอบด้วยแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 1

แบบทดสอบข้อที่ 1 ต้องการทดสอบความเข้าใจเรื่องแรงในระบบของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งข้อที่ 1. ภาพ Free Body Diagram ในข้อใดแสดงแรงภายนอกที่กระทำต่อทรงกระบอกที่กำลังกลิ้งโดยไม่มีการไถลได้ถูกต้อง



เฉลย ก. แรงเสียดทานที่มีบทบาทในการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลคือแรงเสียดทานสถิต ส่วนการแตกเวกเตอร์ mg ของทรงกระบอกเข้าสู่แกนของพื้นเอียง แรงที่ขนานกับพื้นเอียงเท่ากับ $mg \sin \theta$ และแรงส่วนที่ตั้งฉากกับพื้นเอียงเท่ากับ $mg \cos \theta$

ตาราง 2 แสดงการให้เหตุผลในการตอบแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 1

ตัวเลือกที่ผู้เรียน เลือกตอบ	คำอธิบาย	กลุ่มทดลอง		กลุ่มควบคุม	
		จำนวน ผู้ตอบ ก่อน เรียน (%)	จำนวน ผู้ตอบ หลัง เรียน (%)	จำนวน ผู้ตอบ ก่อน เรียน (%)	จำนวน ผู้ตอบ หลัง เรียน (%)
ก. 	เนื่องจากผิวของทรงกระบอก และพื้นเอียงมีความเร็วเทียบกัน เท่ากับศูนย์ (ถูกต้อง)	48	83	60	80
	ไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้	14	-	-	-
ข. 	แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงในทิศ ขนานกับพื้นเอียงคือ $mg \cos \theta$	4	-	-	-
ง. 	ทรงกระบอกมีการเคลื่อนที่แรง เสียดทานในระบบจึงเป็นแรง เสียดทานจลน์	30	17	40	20
	ไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้	4	-	-	-

จากผลแบบทดสอบก่อนเรียนของกลุ่มทดลอง ผู้เรียน 48 % สามารถตอบได้ถูกต้องว่า ภาพใดอะแแกรมที่ถูกต้องคือตัวเลือก ก. โดยให้เหตุผลว่าแรงเสียดทานในระบบคือแรงเสียดทานสถิต นอกจากนี้มีผู้เรียน 30 % ที่เข้าใจว่าแรงเสียดทานที่ปรากฏในการเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่ไม่มีการไถลคือแรงเสียดทานจลน์ เพราะสรุปว่าเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่แรงเสียดทานที่ปรากฏในระบบต้องเป็นแรงเสียดทานจลน์ แสดงถึงความไม่เข้าใจแนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลว่าบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัตถุกับพื้นมีความเร็วเทียบกันเป็นศูนย์ และแรงเสียดทานที่จะปรากฏขึ้นในระบบนั้นจะเป็นแรงเสียดทานชนิดใดต้องพิจารณาที่ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุและพื้นที่วัตถุเคลื่อนที่ไปว่ามีความเร็วเมื่อเทียบกันหรือไม่ ดังตัวอย่างคำอธิบายของผู้เรียน A1 และ A6 ดังนี้

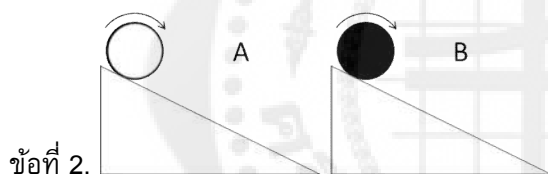
A1: “แรงเสียดทานจะเป็นแรงเสียดทานจลน์ เพราะทรงกระบอกกำลังเคลื่อนที่”

A6: “ทรงกระบอกกำลังกลิ้งแสดงว่ามีการเคลื่อนที่ ดังนั้นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นต้องเป็น f_k ”

จากผลแบบทดสอบหลังเรียนของกลุ่มทดลอง ผู้เรียน 83 % ตอบและให้เหตุผลได้ถูกต้อง ขณะที่ยังมีผู้เรียน 17 % ยังคงเข้าใจว่าแรงเสียดทานที่ปรากฏในระบบคือแรงเสียดทานจลน์ กรณีของกลุ่มควบคุมก่อนเรียนผู้เรียน 60 % สามารถตอบได้ถูกต้องว่าภาพไดอะแกรมแสดงการเคลื่อนที่ที่ถูกต้องคือภาพในตัวเลือก ก. โดยให้เหตุผลเกี่ยวกับแรงเสียดทานสถิต ขณะที่ผู้เรียน 40 % เข้าใจว่าแรงเสียดทานที่ปรากฏในการเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่ไม่มีการไถลคือแรงเสียดทานจลน์ด้วย แนวคิดเดียวกับผู้ที่เลือกคำตอบเดียวกันในกลุ่มทดลอง จากผลแบบทดสอบหลังเรียนของกลุ่มควบคุม ผู้เรียน 80 % เข้าใจและให้เหตุผลได้ถูกต้องว่าภาพไดอะแกรมแสดงการเคลื่อนที่ที่ถูกต้องคือภาพในตัวเลือก ก. ขณะที่ยังมีผู้เรียน 20 % ยังคงเข้าใจว่าแรงเสียดทานที่ปรากฏในการเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่ไม่มีการไถลคือแรงเสียดทานจลน์

3.2 ผลการทดสอบด้วยแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน และวิเคราะห์การทำแบบทดสอบของผู้เรียนข้อที่ 2

แบบทดสอบข้อที่ 2 ต้องการทดสอบความเข้าใจเกี่ยวกับบทบาทของมวลในการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง



ข้อที่ 2.

ปล่อยทรงกระบอกสองทรงกระบอกที่มีรูปทรงเหมือนกันจากจุดสูงสุดของพื้นเอียงให้กลิ้งโดยไม่มีการไถลไปบนพื้นที่มีมุมเอียง (ϕ) เท่ากัน โดยทรงกระบอกทั้งสองมีโมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากันแต่มวลของทรงกระบอก A มากกว่าทรงกระบอก B ข้อใดต่อไปนี้เป็นคำตอบที่ถูกต้อง

- ก. ทรงกระบอก A ถึงพื้นก่อน ทรงกระบอก B
- ข. ทรงกระบอก B ถึงพื้นก่อน ทรงกระบอก A
- ค. ทรงกระบอกทั้งสองถึงพื้นพร้อมกัน
- ง. สรุปไม่ได้

เฉลย ค. ทรงกระบอกทั้งสองถึงพื้นพร้อมกัน ถ้าวัตถุมีรูปทรงเหมือนกัน มวลจะไม่มีผล

ต่อการเคลื่อนที่แบบกลิ้งดังสมการ (3.9)
$$\alpha = \frac{gR \sin \phi}{R_2^2 + \left(\frac{R_1^2 + R_2^2}{2} \right)}$$

ตาราง 3 แสดงการให้เหตุผลในการตอบแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 2

ตัวเลือกที่ ผู้เรียน เลือกตอบ	คำอธิบาย	กลุ่มทดลอง		กลุ่มควบคุม	
		จำนวน ผู้ตอบ ก่อน เรียน (%)	จำนวน ผู้ตอบ หลังเรียน (%)	จำนวน ผู้ตอบ ก่อน เรียน (%)	จำนวน ผู้ตอบ หลังเรียน (%)
ก. ทรงกระบอก A มีมวลมากกว่า จึง ถึงพื้นก่อน ทรงกระบอก B	มีแรง $mg \sin \theta$ มากกว่า	26	4	40	46
	มีโมเมนต์ความเฉื่อยมากกว่า	4	-	-	-
	ไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้	9	-	-	-
ข. ทรงกระบอก B มีมวลน้อยกว่า จึง ถึงพื้นก่อน ทรงกระบอก A	มีแรง $mg \sin \theta$ น้อยกว่าเกิดแรง เสียดทานด้านการเคลื่อนที่น้อย กว่า	9	-	7	-
	มีแรง $mg \sin \theta$ จึงมีโมเมนต์ ความเฉื่อยน้อยกว่า	4	-	-	-
ค. ทรงกระบอก ทั้งสองถึงพื้น พร้อมกัน	ความเร่งเชิงมุมไม่ขึ้นอยู่กับมวล (ถูกต้อง)	35	96	27	46
	ไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้	13	-	13	-
ง. สรุปไม่ได้	ข้อมูลไม่เพียงพอ	-	-	13	8

จากผลแบบทดสอบก่อนเรียนของกลุ่มทดลอง ผู้เรียน 35 % สามารถตอบได้ถูกต้องว่า ทรงกระบอกทั้งสองเคลื่อนที่ถึงพื้นพร้อมกัน โดยให้เหตุผลว่าถ้าวัตถุมีรูปทรงเหมือนกัน มวลจะไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่แบบกลิ้งดังสมการ (3.9) อย่างไรก็ตามมีผู้เรียน 26 % ที่เข้าใจว่าทรงกระบอก A จะถึงพื้นก่อน ทรงกระบอก B เนื่องจากทรงกระบอก A มีมวลมากกว่า จึงมีแรง $mg \sin \theta$ มากกว่า ซึ่งแรงนี้เป็นแรงที่ผู้เรียนคิดว่าทำให้เกิดการเคลื่อนที่ แสดงให้เห็นถึงความไม่เข้าใจเกี่ยวกับแนวคิดทางฟิสิกส์พื้นฐานเกี่ยวกับแรงเสียดทาน การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลแรงเสียดทานที่ปรากฏในระบบคือแรงเสียดทานสถิต แรงเสียดทานสถิตนี้จะมีค่าแปรผันตรงกับแรงกระทำที่กระทำ

ต่อวัตถุ หากแรงเสียดทานสถิตยังไม่เพิ่มขึ้นมากกว่าแรงเสียดทานสถิตสูงสุด ฉะนั้นแรง $mg \sin \theta$ มีมากขึ้นหรือไม่จึงไม่มีผลต่อความเร็วของทรงกระบอก ตัวอย่างคำอธิบายของผู้เรียน A12 และ A16 ดังนี้

A12: “เพราะการเคลื่อนที่แบบกลิ้งแรงที่กระทำใหวัตถุเคลื่อนที่ไปข้างหน้าคือแรง $mg \sin \theta$ แสดงว่ามีผลต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุ”

A16: “เนื่องจากทรงกระบอก A มีมวลมากกว่าทรงกระบอก B จึงน่าจะทำให้ตกลงมาเร็วกว่าเพราะมีแรงดึงดูดมากกว่า”

จากผลแบบทดสอบหลังเรียนของกลุ่มทดลอง ผู้เรียนส่วนมากถึง 96 % ตอบและให้เหตุผลได้ถูกต้อง แต่ยังมีผู้เรียน 4 % ยังคงเข้าใจว่าทรงกระบอก A จะถึงพื้นก่อน ทรงกระบอก B กรณีของกลุ่มควบคุมก่อนเรียนผู้เรียน 27 % สามารถตอบได้ถูกต้องว่าทรงกระบอกทั้งสองเคลื่อนที่ถึงพื้นพร้อมกัน โดยให้เหตุผลว่าถ้าวัตถุมีรูปทรงเหมือนกัน มวลจะไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง ขณะที่ผู้เรียน 40 % เข้าใจว่าทรงกระบอก A จะถึงพื้นก่อน ทรงกระบอก B ด้วยแนวคิดเดียวกับผู้ที่เลือกคำตอบเดียวกันในกลุ่มทดลอง จากผลแบบทดสอบหลังเรียนของกลุ่มควบคุม ผู้เรียนส่วนใหญ่ 46 % ตอบและให้เหตุผลได้ถูกต้อง อย่างไรก็ตามกลับมีผู้เรียนที่เข้าใจผิดเพิ่มขึ้นถึง 46 % โดยเข้าใจว่าทรงกระบอก A จะถึงพื้นก่อน ทรงกระบอก B เนื่องจากทรงกระบอก A มีมวลมากกว่า

3.3 ผลการทดสอบด้วยแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน และวิเคราะห์การทำแบบทดสอบของผู้เรียนข้อที่ 3

แบบทดสอบข้อที่ 3 ต้องการทดสอบความเข้าใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงมุมและมุมเอียง

ข้อที่ 3. เมื่อปล่อยทรงกระบอกจากมุมเอียง (ϕ) ที่สูงขึ้นเรื่อยๆตามลำดับ โดยมุมเอียงนั้นมีค่าต่ำกว่ามุมวิกฤต (ϕ_c) ความเร่งเชิงมุมจะมีความสัมพันธ์เป็นอย่างไรกับมุมเอียง

ก. แปรผันตรง

ข. แปรผกผัน

ค. อัตราคงที่เมื่อเปรียบเทียบกัน

ง. ไม่มีรูปแบบความสัมพันธ์

เฉลย ก. แปรผันตรง หากมุมเอียงมีค่าเพิ่มมากขึ้นความเร่งจะสูงขึ้นตาม มีลักษณะเป็น

การแปรผันตรงเป็นไปตามสมการ (3.9)
$$\alpha = \frac{gR \sin \phi}{R_2^2 + \left(\frac{R_1^2 + R_2^2}{2} \right)}$$

ตาราง 4 แสดงการให้เหตุผลในการตอบแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 3

ตัวเลือกที่ ผู้เรียน เลือกตอบ	คำอธิบาย	กลุ่มทดลอง		กลุ่มควบคุม	
		จำนวน ผู้ตอบก่อน เรียน (%)	จำนวน ผู้ตอบหลัง เรียน (%)	จำนวน ผู้ตอบก่อน เรียน (%)	จำนวน ผู้ตอบหลัง เรียน (%)
ก. แปรผัน ตรง	เป็นไปตามสมการ (3.9) (ถูกต้อง)	9	35	13	40
	ไม่สามารถอธิบายเหตุ ผลได้	74	30	53	27
ข. แปรผกผัน	เมื่อมุมเพิ่มขึ้นแรงเสียด ทานด้านการเคลื่อนที่ เพิ่มขึ้น	4	4	-	-
	ไม่สามารถอธิบายเหตุ ผลได้	13	21	33	33

จากผลแบบทดสอบก่อนเรียนของกลุ่มทดลอง ผู้เรียน 9 % สามารถตอบได้ถูกต้องว่า เมื่อปล่อยทรงกระบอกจากมุมเอียงสูงขึ้นเป็นลำดับที่มุมต่ำกว่ามุมวิกฤต ความเร่งเชิงมุมจะแปรผันตรงกับมุมเอียง โดยผู้เรียนมีวิธีการอธิบายดังตัวอย่างคำอธิบายของผู้เรียน A8 และ A12 ดังนี้

A8: “จากสมการ $\alpha = mgR \sin \phi / (mR^2 + I)$ จะเห็นได้ว่า α แปรผันตรงกับ $\sin \phi$ ตัวแปรอื่นเป็นค่าคงตัว”

A12: “เพราะถ้าเพิ่มมุมขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้มีความเร่งเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัตถุเคลื่อนที่แบบกลิ้งเพราะแรงเสียดทานที่มีขนาดเท่าแรง $mg \sin \phi$ ยิ่ง ϕ มากยิ่งมีความเร่งมาก”

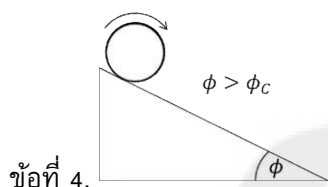
แต่อย่างไรก็ตามมีผู้เรียนจำนวนมากถึง 74 % ที่เลือกตอบว่าปริมาณทั้งสองนั้นมีความสัมพันธ์กันแบบแปรผกผันตรงแต่ไม่สามารถอธิบายให้เหตุผลประกอบได้

จากผลแบบทดสอบหลังเรียนของกลุ่มทดลอง ผู้เรียน 35 % ตอบและให้เหตุผลได้ถูกต้อง แต่ยังมีผู้เรียน 30 % ที่ตอบข้อที่ถูกต้องแต่ให้เหตุผลไม่ได้ กรณีของกลุ่มควบคุมก่อนเรียน ผู้เรียน 13 % สามารถตอบได้ถูกต้องว่าเมื่อปล่อยทรงกระบอกจากมุมเอียงสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยมุมเอียงมีค่าต่ำกว่ามุมวิกฤต ความเร่งเชิงมุมจะแปรผันตรงกับมุมเอียง โดยผู้เรียน 53 % เลือกตัวเลือกนี้เช่นกันแต่ไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้ ขณะที่ผู้เรียน 33 % เข้าใจว่ามุมเอียงและความเร่งเชิงมุมแปรผกผันกันโดยไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้ จากผลแบบทดสอบหลังเรียนของกลุ่มควบคุม

ผู้เรียนส่วนใหญ่ 40 % ตอบและให้เหตุผลได้ถูกต้อง ขณะที่ผู้เรียน 23 % เลือกคำตอบที่ถูกต้องแต่ให้เหตุผลไม่ได้ อย่างไรก็ตามมีผู้เรียนที่เข้าใจว่าความสัมพันธ์เป็นแบบผกผันจำนวน 33 % เท่ากับก่อนเรียน

3.4 ผลการทดสอบด้วยแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน และวิเคราะห์การทำแบบทดสอบของผู้เรียนข้อที่ 4

แบบทดสอบข้อที่ 4 ต้องการทดสอบความเข้าใจเกี่ยวกับมุมวิกฤต



ข้อที่ 4.

เมื่อปล่อยทรงกระบอกจากมุมเอียง (ϕ) ที่มีค่าสูงกว่ามุมวิกฤต (ϕ_c) เมื่อทรงกระบอกกลิ้งไปตามพื้นเอียง การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นจะเป็นการเคลื่อนที่ชนิดใด พลังงานกลรวมจะคงที่หรือไม่

- ก. การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ พลังงานกลรวมคงที่
- ข. การเคลื่อนที่แบบหมุน พลังงานกลรวมไม่คงที่
- ค. การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถล พลังงานกลรวมไม่คงที่
- ง. การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล พลังงานกลรวมคงที่

เฉลย ค. การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถล พลังงานกลรวมไม่คงที่ เพราะเมื่อปล่อยวัตถุที่มุมสูงกว่ามุมวิกฤต แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบจะเป็นแรงเสียดทานจลน์ทำให้วัตถุเคลื่อนที่โดยมีการไถลเกิดขึ้นเกิดการเสียพลังงานออกจากระบบ พลังงานกลรวมไม่คงที่

ตาราง 5 แสดงการให้เหตุผลในการตอบแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 4

ตัวเลือกที่ผู้เรียนเลือกตอบ	คำอธิบาย	กลุ่มทดลอง		กลุ่มควบคุม	
		จำนวนผู้ตอบก่อนเรียน (%)	จำนวนผู้ตอบหลังเรียน (%)	จำนวนผู้ตอบก่อนเรียน (%)	จำนวนผู้ตอบหลังเรียน (%)
ก. การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ พลังงานกลรวมไม่คงที่	เมื่อมุมเอียงมากกว่ามุมวิกฤต แรงเสียดทานสถิตที่ทำให้ทรงกระบอกลื่นที่แบบกลิ้งหายไป	40	22	-	40
ข. การเคลื่อนที่แบบหมุน พลังงานกลรวมคงที่	ไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้	4	-	6	-
ค. การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถล พลังงานกลรวมไม่คงที่	แรงเสียดทานในระบบเป็นแรงเสียดทานจลน์ ทำให้เกิดการไถลขึ้น พลังงานกลรวมไม่คงที่ (ถูกต้อง)	30	70	27	27
ง. การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล พลังงานกลรวมคงที่	ไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้	26	8	67	33

จากผลแบบทดสอบก่อนเรียนของกลุ่มทดลอง ผู้เรียน 30 % สามารถตอบได้ถูกต้องว่า จะเกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถล พลังงานกลรวมไม่คงที่ อย่างไรก็ตามมีผู้เรียน 40 % คิดว่าจะเกิดการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ พลังงานกลรวมไม่คงที่ โดยผู้เรียนที่เลือกคำตอบนี้เข้าใจว่าเมื่อทรงกระบอกลื่นที่ไปตามพื้นเอียงที่มีมุมเอียงสูงกว่ามุมวิกฤตแรงเสียดทานสถิตจะหายไป การเคลื่อนที่แบบกลิ้งจะกลายเป็นการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่แต่เพียงอย่างเดียว โดยไม่เข้าใจว่าเมื่อมีแรงกระทำที่มากกว่าแรงเสียดสถิตสูงสุดมากจะทำกับทรงกระบอกลื่นทำให้เกิดการไถล แรงเสียดทานสถิตจะหายไปแต่แรงเสียดทานจลน์จะปรากฏขึ้นแทน ดังตัวอย่างคำอธิบายของผู้เรียน A8 และ A21 ดังนี้

A8: “เนื่องจากไม่มีแรงเสียดทานในระบบอีกต่อไป”

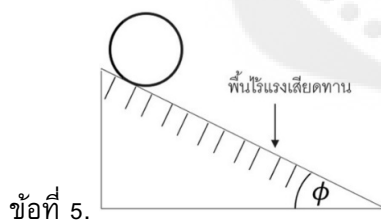
A21: “เมื่อปล่อยทรงกระบอกที่มุมเอียงที่มีค่ามากกว่ามุมวิกฤตจะทำให้ทรงกระบอกเลื่อนตำแหน่งไปอย่างเดียว ไม่มีส่วนของการหมุน เพราะไม่มีแรงมากระทำจุดอื่นนอกจากจุด cm แล้ว”

นอกจากนี้ผู้เรียน 26 % คิดว่าจะเกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลที่พลังงานกลรวมคงที่ โดยไม่สามารถอธิบายเหตุผลได้ แสดงถึงความไม่เข้าใจว่านิยามของมุมวิกฤตคืออะไรและการเคลื่อนที่ที่มุมต่ำกว่าและสูงกว่ามุมวิกฤตต่างกันอย่างไร

จากผลแบบทดสอบหลังเรียนของกลุ่มทดลอง ผู้เรียน 70 % ตอบและให้เหตุผลได้ถูกต้อง แต่ยังมีผู้เรียน 22 % คิดว่าจะเกิดการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ และอีก 8 % คิดว่าจะเกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล และพลังงานกลรวมคงที่ กรณีของกลุ่มควบคุมผลก่อนเรียน ผู้เรียน 27 % สามารถตอบได้ถูกต้องว่าจะเกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถล พลังงานกลรวมไม่คงที่ โดยผู้เรียนมากถึง 67 % คิดว่าทรงกระบอกยังเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลและพลังงานกลรวมจะยังคงที่ เมื่อผู้เรียนกลุ่มควบคุมได้ผ่านการจัดการเรียนรู้ด้วยการบรรยายแล้ว ผู้เรียนจำนวนเท่ากับก่อนเรียนที่ 27 % ตอบและให้เหตุผลได้ถูกต้อง ขณะที่ผู้เรียน 33 % คิดว่าทรงกระบอกยังเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลและพลังงานกลรวมจะยังคงที่ แต่ผู้เรียนถึง 40 % กลับเข้าใจว่าจะเกิดการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ พลังงานกลรวมไม่คงที่ ทั้งที่ไม่มีผู้เลือกข้อนี้ในช่วงก่อนเรียน เนื่องมาจากความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนเกี่ยวกับแรงเสียดทาน

3.5 ผลการทดสอบด้วยแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน และวิเคราะห์การทำแบบทดสอบของผู้เรียนข้อที่ 5

แบบทดสอบข้อที่ 5 ต้องการทดสอบความเข้าใจเกี่ยวกับบทบาทของแรงเสียดทาน



เมื่อปล่อยทรงกระบอกที่จุดสูงสุดของพื้นเอียงที่ลื่นไม่มีแรงเสียดทาน ทรงกระบอกจะเกิดการเคลื่อนที่ชนิดใด

- ก. การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล
- ข. การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถล
- ค. การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เพียงอย่างเดียว
- ง. ไม่เกิดการเคลื่อนที่

เฉลย ค. การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เพียงอย่างเดียวเพราะไม่มีแรงเสียดทานมากระทำกับทรงกระบอก ทำให้ไม่มีแรงกระทำใดที่มากกระทำกับทรงกระบอกโดยไม่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล ทำให้การเคลื่อนที่แบบหมุนไม่เกิดขึ้นจึงไม่มีการเคลื่อนที่แบบกิ้งกิ้งเกิดขึ้น มีเพียงแต่การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เนื่องจากแรง $mg \sin \phi$ เพียงอย่างเดียว

ตาราง 6 แสดงการให้เหตุผลในการตอบแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนข้อที่ 5

ตัวเลือกที่ ผู้เรียน เลือกตอบ	คำอธิบาย	กลุ่มทดลอง		กลุ่มควบคุม	
		จำนวน ผู้ตอบ ก่อน เรียน (%)	จำนวน ผู้ตอบ หลัง เรียน (%)	จำนวน ผู้ตอบ ก่อน เรียน (%)	จำนวน ผู้ตอบ หลัง เรียน (%)
ก. การเคลื่อนที่แบบกิ้งกิ้งโดยไม่มีการไถล	วัตถุที่มีพื้นฐานเป็นทรงกลมต้องเกิดการเคลื่อนที่แบบกิ้งกิ้งเสมอ	21	9	33	-
ข. การเคลื่อนที่แบบกิ้งกิ้งโดยมีการไถล	ไม่มีแรงเสียดทานมากระทำ ทำให้ทรงกระบอกกิ้งกิ้งโดยไม่มีการไถล	70	31	60	47
ค. การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เพียงอย่างเดียว	ไม่มีแรงเสียดทานมากระทำต่อทรงกระบอกให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุน ทรงกระบอกจึงเกิดการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เพียงอย่างเดียว (ถูกต้อง)	9	65	7	53

จากผลแบบทดสอบก่อนเรียนของกลุ่มทดลอง ผู้เรียน 9 % สามารถตอบได้ถูกต้องว่าจะเกิดการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เพียงอย่างเดียว โดยผู้เรียนจำนวนมากถึง 70 % เชื่อว่าจะเกิดการเคลื่อนที่แบบกิ้งกิ้งโดยมีการไถลเพราะไม่มีแรงเสียดทานมาต้านแรง $mg \sin \phi$ แสดงว่าผู้เรียนขาดความเข้าใจแนวคิดเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบกิ้งกิ้ง ซึ่งต้องมีการเคลื่อนที่แบบหมุนและการเคลื่อนที่

แบบเคลื่อนที่เกิดขึ้นพร้อมกันจึงเกิดเป็นการเคลื่อนที่แบบกลิ้งได้ เมื่อแรงเสียดทานสถิตซึ่งเป็นแรง
 ทอร์คที่ทำให้การเคลื่อนที่แบบหมุนหายไป ไม่มีแรงเสียดทานจลน์ปรากฏขึ้นทำหน้าที่แทนการ
 เคลื่อนที่แบบกลิ้งจึงเกิดขึ้นไม่ได้ ดังตัวอย่างคำอธิบายของผู้เรียน A3 และ A17 ดังนี้

A3: “วัตถุจะเกิดการไถล เพราะไม่มีแรงเสียดทาน แต่ยังคงอยู่”

A17: “ไม่มีแรงเสียดทานสถิตทำให้การเคลื่อนที่แบบกลิ้งเกิดการไถลขึ้น”

จากผลแบบทดสอบหลังเรียนของกลุ่มทดลอง ผู้เรียน 65 % ตอบและให้เหตุผลได้
 ถูกต้อง แต่ยังมีผู้เรียน 31 % ยังคิดว่าจะเกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถล และอีก 9 % คิดว่า
 จะเกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล กรณีของกลุ่มควบคุมก่อนเรียนผู้เรียน 7 % สามารถ
 ตอบได้ถูกต้องว่าจะเกิดการเคลื่อนที่แบบเคลื่อนที่เพียงอย่างเดียว โดยผู้เรียนมากถึง 60 % คิดว่าจะ
 เกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถล จากผลแบบทดสอบหลังเรียนของกลุ่มควบคุม ผู้เรียน
 จำนวน 53 % ตอบและให้เหตุผลได้ถูกต้อง ขณะที่ผู้เรียน 47 % ยังคิดว่าจะเกิดการเคลื่อนที่แบบ
 กลิ้งโดยมีการไถล

4. สรุปผลการสอนโดยใช้ชุดการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอก บนพื้นเอียง

จากผลสรุปของแบบทดสอบก่อนเรียนหลังเรียนตามตารางที่ 7 ทำให้ทราบว่าการจัดการ
 เรียนการสอนโดยใช้ชุดการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกบนพื้นเอียงช่วยให้ผู้เรียน
 มีความเข้าใจที่มากขึ้นกว่าการจัดการเรียนการสอนด้วยการบรรยายเพียงอย่างเดียว โดย
 แบบทดสอบข้อที่ 1 ทดสอบความเข้าใจเรื่องแรงในระบบของการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง พบว่ากลุ่ม
 ทดลองผู้เรียนที่ตอบถูกเพิ่มขึ้น 35 % มีค่า Normalized gain 0.67 มากกว่ากลุ่มควบคุมที่มีผู้เรียน
 ตอบถูกเพิ่มขึ้น 20 % มีค่า Normalized gain 0.5 กรณีของแบบทดสอบข้อที่ 2 ทดสอบความเข้าใจ
 เกี่ยวกับบทบาทของมวลในการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง พบว่ากลุ่มทดลองผู้เรียนที่ตอบถูกเพิ่มขึ้น 61 %
 มีค่า Normalized gain 0.94 มากกว่ากลุ่มควบคุมที่มีผู้เรียนตอบถูกเพิ่มขึ้น 20 % มีค่า Normalized
 gain 0.27 กรณีของแบบทดสอบข้อที่ 3 ทดสอบความเข้าใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเร่ง
 เชิงมุมและมุมเอียง พบว่ากลุ่มทดลองผู้เรียนที่ตอบถูกเพิ่มขึ้น 26 % มีค่า Normalized gain 0.29
 น้อยกว่ากลุ่มควบคุมที่มีผู้เรียนตอบถูกเพิ่มขึ้น 27 % มีค่า Normalized gain 0.31 กรณีของ
 แบบทดสอบข้อที่ 4 ทดสอบความเข้าใจเกี่ยวกับมุมวิกฤต พบว่ากลุ่มทดลองผู้เรียนที่ตอบถูกเพิ่มขึ้น
 40 % มีค่า Normalized gain 0.57 มากกว่ากลุ่มควบคุมที่จำนวนผู้เรียนที่ตอบถูกไม่มีการ
 เปลี่ยนแปลง มีค่า Normalized gain เป็นศูนย์ และแบบทดสอบข้อที่ 5 ทดสอบความเข้าใจเกี่ยวกับ
 บทบาทของแรงเสียดทาน พบว่ากลุ่มทดลองผู้เรียนที่ตอบถูกเพิ่มขึ้น 56 % มีค่า Normalized gain
 0.62 มากกว่ากลุ่มควบคุมที่มีผู้เรียนตอบถูกเพิ่มขึ้น 46 % มีค่า Normalized gain 0.49

จากผลแบบทดสอบก่อนเรียนหลังเรียนพบว่าแบบทดสอบที่ 1,2,4 และ 5 กลุ่มทดลองที่ใช้การสอนด้วยการใช้ชุดการทดลองมีความเข้าใจที่มากขึ้นกว่ากลุ่มควบคุมการสอนแบบบรรยาย โดยมีแบบทดสอบข้อที่ 3 เท่านั้นที่มีผลที่น้อยกว่าเล็กน้อย ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการใช้ชุดการทดลอง การเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียงให้ผลที่ดีกว่าการสอนบรรยาย

อย่างไรก็ตามผู้วิจัยก็ยังพบว่าผู้เรียนยังขาดความเข้าใจเกี่ยวกับแนวคิดทางฟิสิกส์ในหลายหัวข้อได้แก่การเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่ผู้เรียนขาดความเข้าใจเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง และ บทบาทของแรงเสียดทานต่อการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง ซึ่งพบความเข้าใจที่ไม่ถูกต้องเกี่ยวกับนิยามของแรงเสียดทาน ชนิดของแรงเสียดทาน บทบาทของแรงเสียดทานในการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

ตาราง 7 แสดงผลสรุปแบบทดสอบก่อนเรียนหลังเรียน

แบบทดสอบ ที่	จำกลุ่มทดลอง			กลุ่มควบคุม		
	ก่อนเรียน	หลังเรียน	Normalized gain	ก่อนเรียน	หลังเรียน	Normalized gain
1	48	83	0.67	60	80	0.5
2	35	96	0.94	27	47	0.27
3	9	35	0.29	13	40	0.31
4	30	70	0.57	27	27	0
5	9	65	0.62	7	53	0.49

บทที่ 5

สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเพื่อพัฒนาชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียงโดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน เพื่อศึกษาผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นของผู้เรียนด้วยวิธี Normalized gain โดยใช้การสอนตามแนวทางรูปแบบการสอนแบบสืบเสาะหาความรู้ (5E) เปรียบเทียบกับการสอนแบบบรรยาย เพื่อพัฒนาความเข้าใจแนวคิดและศึกษาความเข้าใจคลาดเคลื่อนของผู้เรียนระดับอุดมศึกษาในสาขาฟิสิกส์ ซึ่งสรุปผลได้ดังนี้

ความมุ่งหมายของการวิจัยข้อที่ 1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียง ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียงโดยศึกษาในมุมมองของการเคลื่อนที่เชิงมุมและพิจารณาการเคลื่อนที่ในเชิงพลังงาน สร้างรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ควรจะเป็นตามทฤษฎี แล้วจึงได้สร้างชุดการทดลองขึ้นโดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนได้แก่ แมกนีโตมิเตอร์และไจโรสโคปในการบันทึกผลการทดลอง ทำการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต ความเร่งเชิงมุมที่มุมเอียงค่าต่างๆ มุมวิกฤต และพลังงานกลของระบบพบว่า 1) ขนาดความเร่งเชิงมุมในการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียงที่มุมเอียงที่น้อยกว่าหรือเท่ากับมุมวิกฤตแปรผันตรงกับมุมเอียง เมื่อมุมเอียงมีค่าสูงกว่ามุมวิกฤตค่าความเร่งเชิงมุมจะไม่สอดคล้องกับทฤษฎี 2) ที่มุมเอียงที่น้อยกว่าหรือเท่ากับมุมวิกฤตการเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่เกิดขึ้นจะไม่มีกลไกล พลังงานกลของระบบจะเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน เมื่อมุมเอียงมีค่าสูงกว่ามุมวิกฤตการเคลื่อนที่แบบกลิ้งที่เกิดขึ้นจะมีการไถล พลังงานกลจะไม่เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน 3) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตจากการทดลองด้วยเซนเซอร์ทั้งสองชนิด มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดลองตอนที่ 1

ความมุ่งหมายของการวิจัยข้อที่ 2 เพื่อสร้างชุดการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกบนพื้นเอียงโดยใช้เซนเซอร์ของสมาร์ทโฟน ผู้วิจัยได้สร้างชุดการทดลองเพื่อให้ผู้เรียนสามารถศึกษาได้จากการลงมือทำการทดลอง วิเคราะห์ และสรุปผลด้วยตัวเอง โดยได้นำชุดการทดลองไปใช้กับนิสิตที่ลงเรียนวิชาฟิสิกส์ 183 ปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 และวิชาฟิสิกส์ 185 ปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐาน 1 จากข้อมูลตามตาราง 1 เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 36 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความเร่งเชิงมุมและมุมเอียง ความชันของกราฟจากผลการทดลองที่บันทึกค่าโดยใช้แมกนีโตมิเตอร์พบความคลาดเคลื่อน 8.8 % ความชันของกราฟจากผลการทดลองที่บันทึกค่าโดยใช้ไจโรสโคปพบความคลาดเคลื่อน 0.7 % จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชุดการทดลองมีประสิทธิภาพในการใช้เพื่อทำการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวงบนพื้นเอียง โดยผู้วิจัยนำไจโรสโคปไปใช้ดำเนินการกับผู้เรียนเนื่องจากมีผลมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า

ความมุ่งหมายของการวิจัยข้อที่ 3 เพื่อวัดผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้นของผู้เรียนด้วยวิธี Normalized gain หลังจากได้รับการจัดการเรียนการสอนจากชุดการทดลอง โดยเปรียบเทียบกับ การจัดการเรียนการสอนด้วยการบรรยาย โดยผู้วิจัยแบ่งผู้เรียนเป็นสองกลุ่มคือกลุ่มทดลองได้รับการจัดการเรียนการสอนโดยใช้ชุดการทดลอง และกลุ่มควบคุมที่จัดการเรียนการสอนด้วยการบรรยาย จากผล Normalized gain ของผู้เรียนกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุมแยกเป็นรายข้อ กลุ่มทดลองมีผล Normalized gain รายข้อ 0.67, 0.94, 0.29, 0.57 และ 0.62 ตามลำดับ ขณะที่กลุ่มควบคุมมีผล Normalized gain รายข้อ 0.50, 0.27, 0.34, 0.00 และ 0.49 ตามลำดับ พบว่าค่า Normalized gain ของกลุ่มทดลองส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าค่า Normalized gain ของกลุ่มควบคุม แสดงว่าผู้เรียนที่ได้รับการจัดการเรียนการสอนด้วยชุดการทดลองมีความเข้าใจแนวคิดมากขึ้นกว่าผู้เรียนที่ได้รับการจัดการเรียนการสอนด้วยการบรรยาย

ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยยังพบจากผลการวิเคราะห์แบบทดลองก่อนเรียนหลังเรียนว่าผู้เรียนมีความเข้าใจคลาดเคลื่อนเกี่ยวกับแนวคิดฟิสิกส์ในหลายหัวข้อ แม้ได้รับการจัดการเรียนการสอนด้วยชุดการทดลองแล้ว ได้แก่ การเคลื่อนที่แบบกลิ้ง มุมวิกฤต และแรงเสียดทาน จากการวิจัยนี้ทำให้เห็นว่าควรมีการพัฒนาปรับปรุงการจัดการเรียนการสอนในหัวข้อเหล่านี้ ให้ผู้เรียนเข้าใจว่าการเคลื่อนที่แบบกลิ้งนั้นต้องเกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนและการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่พร้อมกัน เน้นถึงบทบาทของมุมวิกฤตเกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์พลังงาน บทบาท ธรรมชาติ ผลกระทบต่อการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง และความแตกต่างของแรงเสียดทานสถิตและแรงเสียดทานจลน์ เพื่อให้ผู้เรียนมีความเข้าใจที่ถูกต้อง เพื่อนำความเข้าใจเหล่านี้เป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจระบบที่ซับซ้อนขึ้นต่อไป

ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยนี้การสร้างชุดการทดลองเป็นเรื่องที่มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นสื่อการเรียนรู้ที่ต้องใช้ตลอดการจัดการเรียนการสอน การสร้างชุดการทดลองที่ช่วยให้ผู้เรียนทำการทดลองได้สะดวกและศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างสะดวกจะช่วยให้ผู้เรียนมีผลการเรียนรู้ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เงื่อนไขข้อจำกัดทางการเงินก็ยังเป็นหัวข้อที่ควรให้ความสำคัญ เพื่อให้ผู้เรียนมีโอกาสเข้าถึงได้ง่ายชุดการทดลองจะต้องสามารถสร้างได้ง่ายโดยมีราคาต่ำจัดทำที่ประหยัด โดยชุดการทดลองของผู้วิจัยมีค่าจัดทำตามรายการดังนี้

1. ค่าจัดทำชุดการทดลอง

1.1 พื้นเอียงปรับค่าได้ สร้างจากไม้ เหล็กไลท์เกรด และอุปกรณ์เบ็ดเตล็ด 1 ชุด มีค่าจัดทำ 2,300 บาท

1.2 สมาร์ทโฟน (iPhone 4s) 1 เครื่อง มีราคา 2,000 บาท

1.3 แผ่นดิสก์พลาสติก 1 แผ่น มีค่าจัดทำ 50 บาท

1.4 ทรงกระบอกกลวงทำจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride หรือ PVC) 2 ลูก มีค่าจัดทำ 800 บาท

รวมมีค่าจัดทำอุปกรณ์ 5,150 บาท หลังจากดำเนินการวิจัยทำให้ทราบถึงข้อที่ต้องคำนึงถึง เพื่อปรับปรุงชุดการทดลองและการจัดการเรียนรู้ให้ดีขึ้นดังนี้

2. ข้อเสนอแนะของชุดการทดลอง

2.1 พื้นเอียงปรับค่าได้ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดใหญ่ใช้งานไม่สะดวก ควรปรับปรุงให้มีขนาดเล็กลง เพราะจะทำให้ใช้งานง่ายขึ้นและมีราคาค่าจัดสร้างลดลง

2.2 ปรับปรุงอุปกรณ์บันทึกผล โดยใช้เซนเซอร์ที่มีขนาดเล็กติดตั้งบนทรงกระบอกกลวง แล้วส่งข้อมูลไปที่สมาร์ทโฟน แทนที่การนำตัวเครื่องสมาร์ทโฟนไปติดตั้ง จะทำให้ทรงกระบอกกลวงมีขนาดลดลงได้และลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายกับสมาร์ทโฟน

2.3 การส่งข้อมูลการทดลองผ่านระบบอินเทอร์เน็ตเกิดปัญหาในการส่งข้อมูลได้ง่าย ควรมีการปรับใช้โปรแกรมประยุกต์ที่สามารถบันทึกข้อมูลผลการทดลองเก็บไว้ในตัวเครื่องมือ แล้วจึงถ่ายโอนข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ในภายหลัง

2.4 ควรเพิ่มเครื่องมือรับแรงกระแทกเมื่อทรงกระบอกกลวงเคลื่อนที่ถึงปลายพื้นเอียง เพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายในการทดลอง

3. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

3.1 วิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียงที่มีมุมเอียงสูงกว่ามุมวิกฤต

3.2 ศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็งรูปทรงอื่นๆ

3.3 ปรับปรุงใช้เซนเซอร์ชนิดอื่นๆในการบันทึกผลการทดลอง



บรรณานุกรม

- เซอร์เวย์, เรย์มอนด์ เอ.; & เจเวตต์, จอห์น ดับเบิลยู. (2558). ฟิสิกส์ 1. แปลโดย ประธาน บุรณศิริ; และ กิรยุทธ์ ศรีนวลจันทร์. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- ศศิธร ชูแก้ว; และคนอื่นๆ. (2556, กรกฎาคม). การใช้คอมพิวเตอร์มัลติมีเดียส่งเสริมการเรียนรู้ เรื่องการประกันคุณภาพการศึกษา. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล 5*.
- สรายุทธ พรหมราช. (2554). *การพัฒนาการสาธิตสำหรับการสอนการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง*. สืบค้นเมื่อ 30 เมษายน 2558, จาก <http://cmuir.cmu.ac.th/handle/6653943832/35037>
- Aghamohammadi, C.; & Aghamohammadi, A. (2011, July). Slipping and rolling on an inclined plane. *European Journal of Physics*. 32(4): 1049-1057. Retrieved April 21, 2016, from <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/32/4/017/pdf>
- Alexa, Vasile; et al. (2017, January). Research on the rolling moment in the symmetrical and asymmetrical rolling process. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 163. Retrieved July 11, 2017, from <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/163/1/012047>
- AKM Semiconductor, Inc. (2010). *AK8975/AK8975C Datasheet*. Retrieved April 21, 2016, from <http://www.akm.com/akm/en/file/datasheet/AK8975.pdf>
- Allan, Alasdair. (2011). *Basic Sensors in iOS*. 1st ed. Sebastopol: O'Reilly Media.
- Müller, Andreas; et al. (2015, May). Cracking knuckles — A smartphone inquiry on bioacoustics. *The Physics Teacher*. 53(5): 351–356. Retrieved January 27, 2016, from <http://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.4917442?journalCode=pte>
- Niculescu, A. (2006, March). A Rolling Sphere Experiment. *The Physics Teacher*. 44(3): 157-159. Retrieved September 16, 2015, from <http://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.2173322>
- Oliveira, V. (2011, January). Angular and linear accelerations of a rolling cylinder acted by an external force. *European Journal of Physics*. 32(2): 381-388. Retrieved September 13, 2015, from <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/32/2/011>
- Phommarach, S.; Wattanakasiwich, P.; & Johnston, I. (2012, February). Video analysis of rolling cylinders. *Physics Education*. 47(2): 189-196. Retrieved July 8, 2015, from <https://eric.ed.gov/?id=EJ985099>

- Pinto, A.; & Fiolhais, M. (2001, May). Rolling cylinder on a horizontal plane. *Physics Education*. 36(2): 250-254. Retrieved April 21, 2016, from <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/36/3/312/meta>
- Puttharugsa, Chokchai; et al. (2016, July). Investigation of the rolling motion of a hollow cylinder using a smartphone. *European Journal of Physics*. 37(5): 1-10. Retrieved July 20, 2016, from <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/37/5/055004/meta>
- Serway, Raymond A.; & Jewett, John W. (2014). *Physics for Scientists and Engineers*. 9th ed. Boston: Cengage Learning.
- Silva, N. (2012, September). Magnetic field sensor. *The Physics Teacher*. 50(6): 372-373. Retrieved March 3, 2016, from <http://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.4745697?journalCode=pte>
- Sung, Jungwoo; et al. (2014, July). A gyroscope fabrication method for high sensitivity and robustness to fabrication tolerances. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 24(7): 1–7. Retrieved February 6, 2015, from <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/24/7/075013/meta>
- Vogt, P.; & Kuhn, J. (2012, February). Analyzing free fall with a smartphone acceleration sensor. *The Physics Teacher*. 50(3): 182–183. Retrieved May 21, 2014, from <http://aapt.scitation.org/doi/full/10.1119/1.3685123>
- Vogt, P.; & Kuhn, J. (2012, October). Analyzing simple pendulum phenomena with a smartphone acceleration sensor. *The Physics Teacher*. 50(7): 439-440. Retrieved November 23, 2015, from <http://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.4752056?journalCode=pte>



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

รายนามผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือวิจัย

รายนามผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือวิจัย

1. ดร.สุรุष्มิ วิจารณ์

อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2. นายชาลี ครองศักดิ์ศิริ

ครู โรงเรียนเบญจมราชูทิศในพระบรมราชูปถัมภ์ เขตพระนคร กรุงเทพมหานคร

3. นายพลวัฒน์ ดำรงกิจภากร

ครู โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม



ภาคผนวก ข
ผลการหาคุณภาพเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย



ความเหมาะสม (IOC) ของแผนการจัดการเรียนรู้ เรื่อง การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุบนพื้นเอียง

รายการประเมิน	ความคิดเห็นของ ผู้เชี่ยวชาญ			ΣR	IOC	สรุปผล
	1	2	3			
1. แผนการจัดการเรียนรู้สอดคล้องกับ หน่วยการเรียนรู้ที่กำหนดไว้	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
2. แผนการจัดการเรียนรู้มี องค์ประกอบสำคัญครบถ้วน	0	1	-1	0	0	ต้อง ปรับปรุง
3. แผนการจัดการเรียนรู้มี องค์ประกอบต่างๆ สอดคล้องสัมพันธ์ กัน	0	1	1	2	0.67	นำไปใช้ได้
4. จุดประสงค์การเรียนรู้มีความชัดเจน ครอบคลุมเนื้อหาสาระ	1	1	0	2	0.67	นำไปใช้ได้
5. จุดประสงค์การเรียนรู้พัฒนาผู้เรียน ครอบคลุมด้านความรู้ทักษะ กระบวนการและเจตคติ	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
6. การเขียนสาระสำคัญในแผนถูกต้อง	0	1	-1	0	0	ต้อง ปรับปรุง
7. กำหนดเนื้อหาสาระเหมาะสมกับ คาบเวลา	1	0	0	1	0.34	ต้อง ปรับปรุง
8. กิจกรรมการเรียนรู้สอดคล้องกับ จุดประสงค์การเรียนรู้และเนื้อหาสาระ	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
9. กิจกรรมการเรียนรู้เหมาะสมกับ ระดับชั้นของนักเรียน	1	0	1	2	0.67	นำไปใช้ได้
10. กิจกรรมการเรียนรู้มีความ หลากหลายและสามารถปฏิบัติได้จริง	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
11. กิจกรรมการเรียนรู้สามารถพัฒนา ครอบคลุมด้านองค์ความรู้ กระบวนการและเจตคติ	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
12. กิจกรรมการเรียนรู้เน้นให้นักเรียน ปฏิบัติจริง	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
13. กิจกรรมการเรียนรู้เป็นกิจกรรมที่ ส่งเสริมกระบวนการคิดของนักเรียน	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้

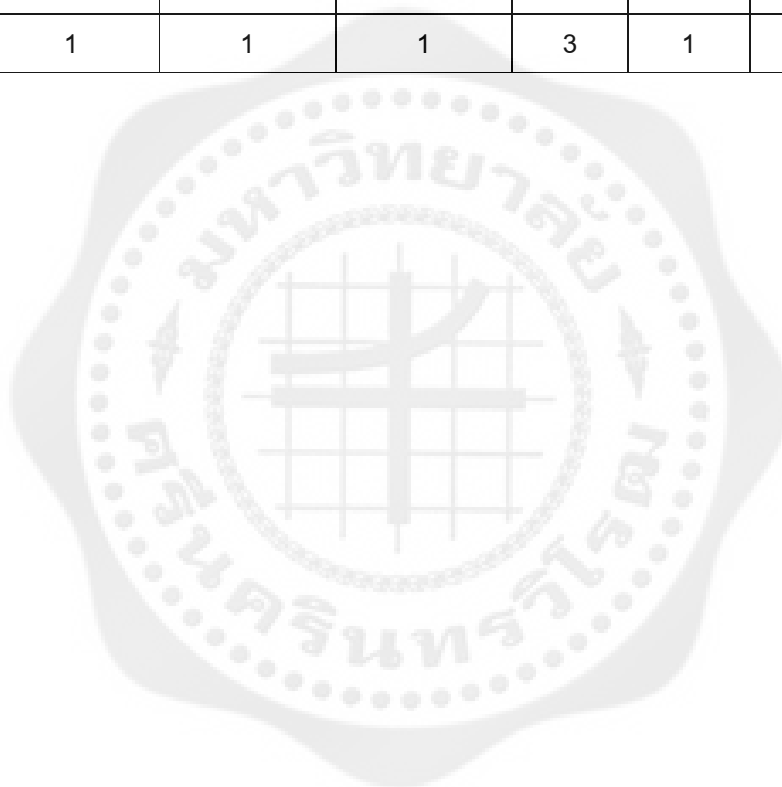
รายการประเมิน	ความคิดเห็นของ ผู้เชี่ยวชาญ			ΣR	IOC	สรุปผล
14. นักเรียนได้รับมอบหมายงานที่ได้ ใช้ความรู้ ความคิดมากกว่าการทำ ตามที่ครูกำหนด	1	1	0	2	0.67	นำไปใช้ได้
15. มีการใช้สื่อประกอบในกิจกรรมการ เรียนรู้	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
16. มีการวัดและประเมินผลที่ สอดคล้องกับจุดประสงค์การเรียนรู้	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
17. มีการระบุเครื่องมือวัดและ ประเมินผลไว้อย่างชัดเจน	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้

ความเหมาะสม (IOC) ของเอกสารประกอบการเรียนการสอน การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุบนพื้นเอียง

รายการประเมิน	ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ			ΣR	IOC	สรุปผล
	1	2	3			
1. เนื้อหาสาระ						
1.1 เนื้อหาครบถ้วนครอบคลุม	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
1.2 เนื้อหาถูกต้อง	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
1.3 เนื้อหาเหมาะสมกับการจัดการเรียนรู้	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
1.4 เนื้อหาสอดคล้องกับจุดประสงค์การเรียนรู้	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
2. รูปแบบการเขียน						
2.1 การจัดลำดับเนื้อหาเหมาะสม	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
2.2 รูปแบบการเขียนมีความชัดเจน	1	1	-1	1	0.34	ต้องปรับปรุง
2.3 ใช้ภาษาเข้าใจง่าย ไม่ซับซ้อน	0	1	0	1	0.34	ต้องปรับปรุง

ความเหมาะสม (IOC) ของแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน เรื่อง การเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง

ข้อที่	ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ			ΣR	IOC	สรุปผล
	1	2	3			
1	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
2	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
3	1	1	0	2	0.67	นำไปใช้ได้
4	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้
5	1	1	1	3	1	นำไปใช้ได้



ภาคผนวก ค
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยหลังการปรับปรุง



แผนการจัดการเรียนรู้ เรื่อง การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุบนพื้นเอียง

รายวิชาฟส 183 ปฏิบัติการฟิสิกส์ 1

หน่วยการเรียนรู้เรื่อง การเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2560 จำนวน 2 คาบ

ผู้วิจัย นายภัทร วัฒนโยธิน

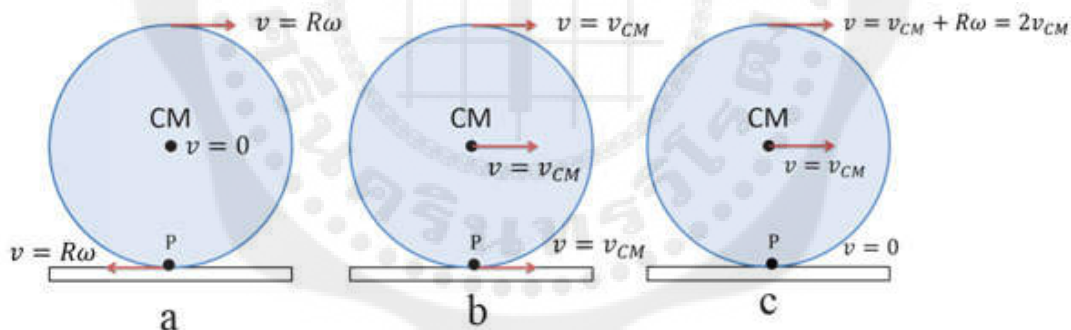
วันที่ 21 เดือน เมษายน พ.ศ. 2560

จุดประสงค์การเรียนรู้

- สามารถอธิบายถึงที่มา และความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลได้
- สามารถอธิบายถึงความหมาย และคำนวณหามุมวิกฤตได้
- สืบค้น ทดลองและอธิบายการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลได้

สาระสำคัญ

การเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (Rolling motion) คือการเคลื่อนที่ซึ่งวัตถุมีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ (Translation Motion) และการเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotational Motion) ไปพร้อมๆ กัน



ภาพประกอบ 1 a วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน, b วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ และ c วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

เมื่อพิจารณาวัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง พลังงานจลน์ของระบบจะมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ (K_t) และพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบหมุน (K_r)

$$K = K_t + K_r = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (1)$$

เมื่อ I คือโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกกลวง

ขั้นตอนการจัดกิจกรรมการเรียนรู้

ขั้นที่ 1 ขั้นสร้างความสนใจ (Engagement) เป็นการนำเข้าสู่บทเรียนซึ่งอาจเกิดความสนใจ ความสงสัย จากเหตุการณ์ที่กำลังเกิดขึ้น เป็นการกระตุ้นให้เกิดความสนใจใคร่รู้ นำไปสู่ประเด็นที่จะศึกษาค้นคว้าให้ชัดเจนยิ่งขึ้น

1. ผู้สอนให้ผู้เรียนทำแบบทดสอบก่อนเรียนเรื่อง การเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง
2. ผู้สอนและผู้เรียนร่วมกันอภิปรายเพื่อทบทวนความรู้เรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลโดยมีสาระสำคัญ ดังนี้
 - การเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (Rolling motion) คือการเคลื่อนที่ซึ่งวัตถุมีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ (Translation Motion) และการเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotational Motion) ไปพร้อม ๆ กัน
 - เมื่อพิจารณาวัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง พลังงานจลน์ของวัตถุนั้นจะมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ (K_t) และพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่แบบหมุน (K_r)

$$K = K_t + K_r = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (1)$$

เมื่อ I คือโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอก

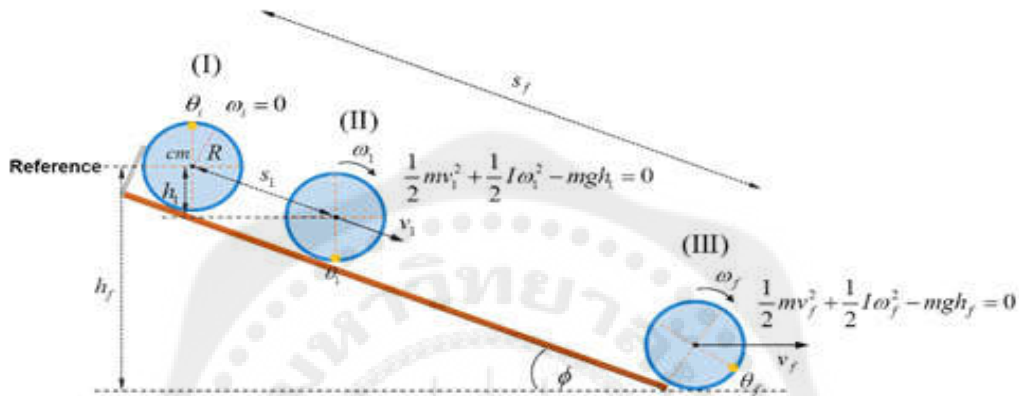
- พิจารณาทรงกระบอกมวล m ที่มีรัศมี R เริ่มต้นกลิ้งโดยไม่มีการไถลจากสภาพหยุดนิ่งที่จุดสูงสุดของพื้นเอียงตามภาพประกอบ 2 (state I) มุมอยู่ที่ θ_i เมื่อเริ่มเคลื่อนที่ ตัวทรงกระบอกมีความเร่งและเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลได้ เนื่องจากมีแรงเสียดทานสถิตระหว่างพื้นผิวทรงกระบอกและพื้นเอียง ก่อให้เกิดทอร์กที่กระทำต่อจุดศูนย์กลางมวลของทรงกระบอก เมื่อทรงกระบอกกลิ้งไปตามพื้นเอียงเป็นมุม θ ขณะเดียวกันนั้นจุดศูนย์กลางมวลของทรงกระบอกก็เคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางเชิงเส้น $s_1 = R(\theta_1 - \theta_i)$ ตามภาพประกอบ 2 (state II) กำหนดให้ระดับอ้างอิงอยู่ที่ state I ดังนั้นตามกฎการอนุรักษ์พลังงานกลเมื่อเทียบพลังงานกลระหว่าง state I และ state II จะได้ว่า

$$K_{II} + U_{II} = K_I + U_I$$

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}I\omega_1^2 - mgh_1 = 0 \quad (2)$$

- ดังนั้นหากเทียบพลังงานกลก่อนการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (state I) กับพลังงานกลเมื่อทรงกระบอกเคลื่อนที่ถึงที่ปลายของพื้นเอียง (state III) เขียนได้ว่า

$$\frac{1}{2}mv_f^2 + \frac{1}{2}I\omega_f^2 - mgh_f = 0 \quad (3)$$



ภาพประกอบ 2 การเคลื่อนที่ของทรงกระบอกบนพื้นเอียงโดยไม่มีการไถล พิจารณาในเชิงพลังงาน

- เมื่อใช้เงื่อนไขของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล $v_f = R\omega_f$ และความสัมพันธ์ตรีโกณมิติ $h_f = s_f \sin \phi$ มาประกอบการพิจารณา จะเขียนสมการที่ (3) ใหม่ได้ว่า

$$\omega_f^2 = \frac{2mgR(\theta_f - \theta_i) \sin \phi}{(mR^2 + I)} \quad (4)$$

- จากสมการการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็งภายใต้ความเร่งคงที่

$$\omega_f^2 - \omega_i^2 = 2\alpha(\theta_f - \theta_i) \quad (5)$$

- แทนสมการ (4) ในสมการ (5) และพิจารณาปริมาณต่างๆจากสภาพหยุดนิ่งก่อนการเคลื่อนที่ของทรงกระบอก ($\omega_i = 0$ และ $\theta = \theta_i$) จะพบว่า

$$\alpha = \frac{mgR \sin \phi}{(mR^2 + I)} \quad (6)$$

- การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในทุกๆค่ามุมเอียง จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีแรงเสียดทานสถิตมากพอที่จะทำให้ทรงกระบอกเคลื่อนที่โดยไม่ไถลได้ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขนี้

$$f_s R_2 \geq I\alpha \quad (7)$$

- ทอร์คสูงสุดของแรงเสียดทานสถิตที่กระทำต่อทรงกระบอกจะต้องมีค่าเท่ากับ

$$f_s = \mu_s N \quad (8)$$

- เมื่อ $N = mg \cos \phi$ และ μ_s คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างทรงกระบอกกับพื้นเอียง รวมสมการ (6), (7) และ (8) จะได้

$$\mu_s \geq \left(\frac{mR_2^2 + I}{I} \right) \tan \phi \text{ หรือ } \phi \leq \tan^{-1} \left(\frac{mR_2^2 + I}{I} \mu_s \right) \quad (9)$$

- มุมเอียงที่จะเกิดการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลได้ จะต้องมิต่ำกว่าหรือเท่ากับ มุมเอียง ϕ ในสมการที่ (9) นอกจากนี้สมการดังกล่าวยังแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมเอียงและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตด้วย
3. ผู้สอนแนะนำการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลโดยอธิบายถึง การทำงานของเครื่องมือบันทึกผลการทดลอง และวิธีการทำงานของเครื่องมือ
- ไจโรสโคปคือเครื่องมือที่ใช้ตรวจจับลักษณะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ที่ตัวเครื่องมือติดตั้งอยู่ เป็นล้อหมุนบรรจุอยู่ในกรอบมีเข็มชี้ทิศทางดังรูปภาพประกอบ 3 ลักษณะการทำงานใช้ความเฉื่อยของล้อหมุนทำให้หมุนไปในทิศทางต่างๆ แกนใดก็ได้อย่างอิสระ โดยเข็มชี้ทิศจะชี้ไปในทิศทางเดิมอยู่เสมอ จากความสามารถดังกล่าวทำให้ไจโรสโคปสามารถนำมาใช้เพื่อบันทึกลักษณะการเคลื่อนที่แบบหมุนของวัตถุได้อีกด้วย



ภาพประกอบ 3 โครงสร้างของไจโรสโคป

ที่มา: เซอร์เวย์, เรย์มอนด์ เอ.; & เจเวตต์, จอห์น ดับเบิลยู. (2558). *ฟิสิกส์ 1*. แปลโดย ประธาน บุรณศิริ; และ กิรยุทธ์ ศรีนวาลจันทร์. หน้า 359

- อุปกรณ์ในการทดลองประกอบไปด้วย
 1. พื้นเอียงปรับค่าได้ทำจากไม้ 1 ชุด ความยาว 1.401 ± 0.001 เมตร และกว้าง 0.181 ± 0.001 เมตร

2. สมาร์ทโฟน (iPhone 4s) 1 เครื่อง ใส่ในเคสพลาสติก มีมวล (m_1) 0.15 ± 0.01 กิโลกรัมและมีขนาด (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ หนา) $0.1152 \times 0.0586 \times 0.0093 \pm 0.0001$ เมตร³
3. แผ่นดิสก์พลาสติก 1 แผ่น มีมวล 0.012 ± 0.001 กิโลกรัม, เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.071 ± 0.001 เมตร และมีความหนา 0.002 ± 0.001 เมตร
4. ทรงกระบอกกลวงทำจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride หรือ PVC) 2 ลูก มีมวล (m_h) 1.36 ± 0.01 กิโลกรัม, รัศมีภายใน (R_1) 0.071 ± 0.001 เมตร, รัศมีภายนอก (R_2) 0.082 ± 0.001 เมตร และมีความยาว 0.161 ± 0.001 เมตร

4. ให้ผู้เรียนแลกเปลี่ยนความเห็นกันภายในกลุ่มของตนเองแล้วทำนายผลของการทดลองว่า เมื่อทำการทดลองควรจะได้กราฟมุมต่อเวลาออกมาเป็นอย่างไร เมื่อหาค่าความเร่งเชิงมุมที่มุมเอียงต่างๆออกมาแล้วความเร่งเชิงมุมกับมุมเอียงจะมีความสัมพันธ์กันอย่างไร

ขั้นที่ 2 สำรวจและค้นหา (Exploration) เป็นการทำความเข้าใจในประเด็นที่ศึกษา วิธีการศึกษาอาจเป็นการตรวจสอบ การทดลอง การปฏิบัติ การสืบค้นความรู้ เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลอย่างพอเพียงในการที่จะใช้ในขั้นต่อไป

5. ให้ผู้เรียนแต่ละกลุ่มทำการทดลองตามเอกสารประกอบการเรียนการสอน โดยแต่ละกลุ่มทำการทดลองที่มุมเอียงแต่ละมุมแตกต่างกัน เมื่อได้ข้อมูลผลการทดลองแล้วให้ทำการวิเคราะห์หากราฟการเคลื่อนที่ และวิเคราะห์หาความเร่งเชิงมุมของการเคลื่อนที่ ณ มุมเอียงนั้นๆ

ขั้นที่ 3 อธิบายและลงข้อสรุป (Explanation) เป็นการนำข้อมูลข้อสังเกตที่ได้มาวิเคราะห์ แปลผล สรุปผล และนำเสนอในรูปแบบของภาพวาด ตาราง แผนภูมิ การค้นพบในขั้นนี้อาจเป็นการสนับสนุนหรือโต้แย้งสมมติฐานก็ได้ ผลที่ได้สามารถสร้างความรู้และช่วยให้เกิดการเรียนรู้ได้

6. ผู้เรียนอธิบายผลการทดลองที่ได้ทำการทดลองไป โดยแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับสมาชิกในกลุ่มแล้วเขียนบันทึกสรุปผลการทดลองในใบบันทึกของตนเอง

ขั้นที่ 4 ขยายความรู้ (Elaboration) เป็นการนำความรู้ที่สร้างขึ้นไปเชื่อมโยงกับความรู้เดิมหรือแนวคิดที่ได้ค้นคว้าเพิ่มเติม หรือนำข้อสรุปไปอธิบายสถานการณ์เหตุการณ์ต่าง ๆ ทำให้เกิดความรู้ที่กว้างขึ้น

7. ผู้สอนอธิบายสรุปเชิงฟิสิกส์เกี่ยวกับผลการทดลองได้แก่
 - ขนาดของความเร่งเชิงมุมแปรผันตรงกับมุมเอียง
 - เมื่อทำการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียงที่มุมเอียงที่ต่ำกว่ามุมวิกฤตผลการทดลองจะใกล้เคียงกับผลคำนวณจากทฤษฎี เนื่องจากการเคลื่อนที่เป็นการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล แต่เมื่อทำการทดลองที่มุมเอียงที่สูงกว่ามุมวิกฤตผลการทดลองจะไม่เป็นไปตามผลคำนวณจากทฤษฎี เนื่องจากเกิดการไถลขึ้น

8. ผู้สอนให้ผู้เรียนยกตัวอย่างการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลในชีวิตประจำวัน เช่น

- การเคลื่อนที่ของลูกบอลกลิ้ง
- การเคลื่อนที่ของลูกบิลเลียด

ขั้นที่ 5 ประเมิน (Evaluation) เป็นการประเมินการเรียนรู้ด้วยกระบวนการต่าง ๆ ว่ามีความรู้
อะไรบ้าง รู้มากน้อยเพียงใดและนำไปประยุกต์ความรู้สู่เรื่องอื่น ๆ

1. ผู้สอนให้ผู้เรียนทำแบบทดสอบหลังเรียนเรื่อง การเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง

สื่อ/แหล่งการเรียนรู้

- ชุดการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง
- แบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน เรื่อง การเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง
- เอกสารประกอบการเรียนการสอน เรื่อง การเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง

ความเห็นของหัวหน้าสถานศึกษา/ผู้ที่ได้รับมอบหมาย

ได้ทำการตรวจแผนการจัดการเรียนรู้ของ.....แล้วมีความคิดเห็น
ดังนี้

1. เป็นแผนการจัดการเรียนรู้ที่

- ☐ ดีมาก
- ☐ ดี
- ☐ พอใช้
- ☐ ควรปรับปรุง

2. การจัดกิจกรรมได้นำเอากระบวนการเรียนรู้

- ☐ เน้นผู้เรียนเป็นสำคัญมาใช้ในการสอนได้อย่างเหมาะสม
- ☐ ยังไม่เน้นผู้เรียนเป็นสำคัญ ควรปรับปรุงพัฒนาต่อไป

3. เป็นแผนการจัดการเรียนรู้ที่

- ☐ นำไปใช้ได้จริง
- ☐ ควรปรับปรุงก่อนนำไปใช้

4. ข้อเสนอแนะอื่นๆ

.....
.....

ลงชื่อ.....

(.....)

ตำแหน่ง.....

ชื่อ รหัสนิสิต

เอกสารประกอบการเรียนการสอน การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของวัตถุบนพื้นเอียง

วัตถุประสงค์

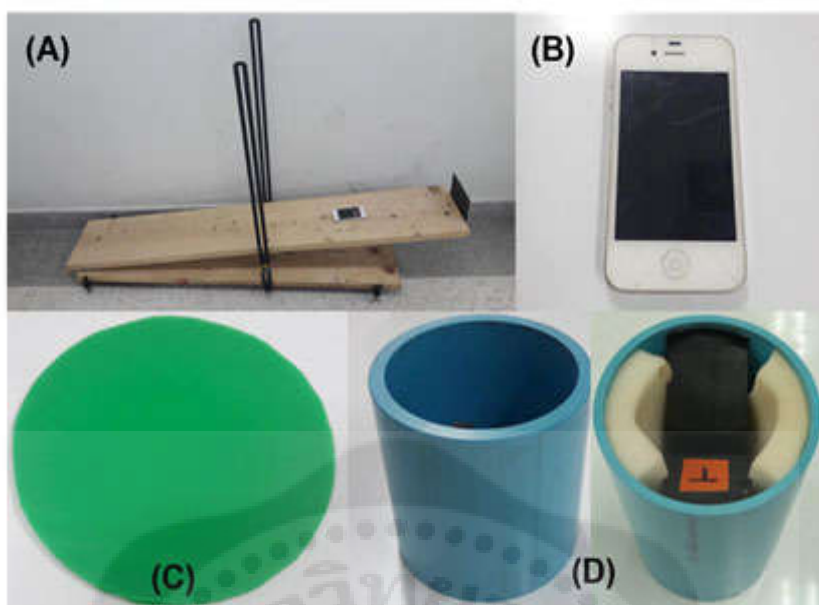
1. เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลโดยใช้โดยใช้เครื่องจักรโรสโคปของสมาร์ตโฟน
2. เพื่อหาขนาดของความเร่งเชิงมุมและมุมวิกฤต นำไปเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณ
3. เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต นำไปเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณ

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและมุมเอียงได้
2. ทดลองให้เห็นได้ว่าการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียงเป็นการเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งคงตัว
3. หาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตและเปรียบเทียบผลกับการทดลองเปรียบเทียบได้

วัสดุและอุปกรณ์

1. พื้นเอียงปรับค่าได้ทำจากไม้ 1 ชุด ความยาว 1.401 ± 0.001 เมตร และกว้าง 0.181 ± 0.001 เมตร
2. สมาร์ทโฟน (iPhone 4s) 1 เครื่อง ใส่ในเคสพลาสติก มีมวล (m_i) 0.15 ± 0.01 กิโลกรัมและมีขนาด (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ หยา) $0.1152 \times 0.0586 \times 0.0093 \pm 0.0001$ เมตร³
3. แผ่นดิสก์พลาสติก 1 แผ่น มีมวล 0.012 ± 0.001 กิโลกรัม, เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.071 ± 0.001 เมตร และมีความหนา 0.002 ± 0.001 เมตร
4. ทรงกระบอกกลวงทำจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride หรือ PVC) 2 ลูก มีมวล (m_h) 1.36 ± 0.01 กิโลกรัม, รัศมีภายใน (R_i) 0.071 ± 0.001 เมตร, รัศมีภายนอก (R_o) 0.082 ± 0.001 เมตร และมีความยาว 0.161 ± 0.001 เมตร



ภาพประกอบ 1 วัสดุและอุปกรณ์ (A) พื้นเอียงปรับค่าได้ (B) สมาร์ทโฟน (iPhone 4s)
(C) แผ่นดิสก์แผ่นดิสก์พลาสติก (D) ทรงกระบอกทำจากพอลิไวนิลคลอไรด์

โปรแกรมประยุกต์ที่ใช้ในการทดลอง

โปรแกรมประยุกต์ Phyphox

โปรแกรมประยุกต์ Phyphox Version 1.0.7 จัดทำโดย Sebastian Kuhlen และคณะ จากสถาบันฟิสิกส์ มหาวิทยาลัย RWTH Aachen สามารถ download ได้จาก App store เป็นโปรแกรมประยุกต์ที่มีความสามารถในการวัดปริมาณเชิงฟิสิกส์หลายชนิดได้จากเซนเซอร์หลายชนิด สามารถประมาณและแสดงผลให้ทราบแบบทันที ตามภาพประกอบ 2 นอกจากนี้ยังสามารถบันทึกค่าอย่างต่อเนื่องโดยอัตโนมัติและส่งข้อมูลไปยังที่อยู่อีเมลเพื่อนำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์ต่อไปได้



ภาพประกอบ 2 (A) สัญลักษณ์ของโปรแกรมประยุกต์ Phyphox (B) การแสดงผลของโปรแกรม

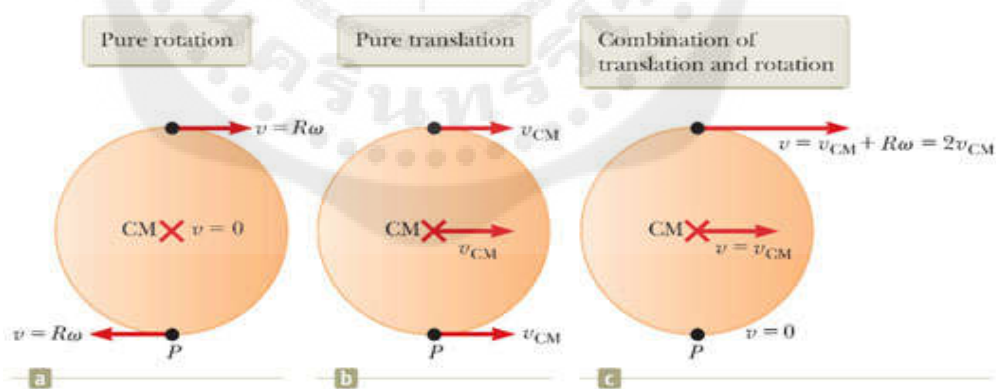
ประยุกต์ Phyphox ระหว่างวัดค่าความเอนเอียงของพื้นผิว (C) การแสดงผลของโปรแกรม
 ประยุกต์ Phyphox ระหว่างวัดค่าบันทึกผลด้วยไมโครสโคป

ทฤษฎี

การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล

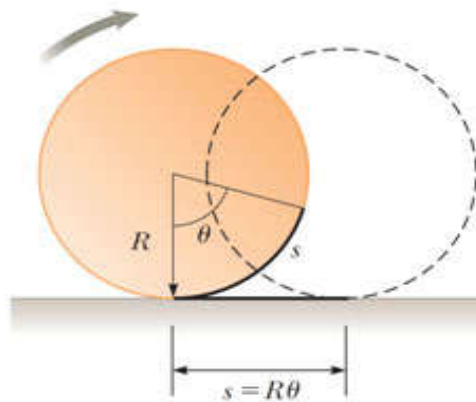
การเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (Rolling Motion) คือการเคลื่อนที่โดยวัตถุมีการเคลื่อนที่แบบหมุน และการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ไปพร้อมกัน โดยการเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotation Motion) เป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุรอบแกนหมุน โดยวัตถุส่วนพื้นผิวด้านนอกสุดจะมีความเร็วตั้งฉากกับรัศมีเสมอ ดังภาพประกอบ 3 a ส่วนการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ (Translational motion) คือการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่ง อาจเป็นแนวตรงหรือไม่ก็ได้ โดยขณะเคลื่อนที่ทุกตำแหน่งบนวัตถุจะมีความเร็วเท่ากันทั้งขนาดและทิศทางดังภาพประกอบ 3 b เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่แบบกลิ้งดังภาพประกอบ 3 c จะเห็นว่าความเร็วในแต่ละจุดของวัตถุจะมีค่าเท่ากับความเร็วของการเคลื่อนที่แบบหมุนรวมกับการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่

ถ้าพิจารณาวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่แบบกลิ้งวัตถุนั้นมีรัศมี R หมุนเป็นมุม θ จะพบว่าจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุนั้นจะเคลื่อนที่ได้เป็นระยะทางเชิงเส้น S โดย $S = R\theta$ ความสัมพันธ์นี้คือเงื่อนไขของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล ถ้าวัตถุหมุนครบหนึ่งรอบการระยะทางเชิงเส้นจะเท่ากับเส้นรอบวงของวัตถุพอดีดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 3 a วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน, b วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ และ c วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

ที่มา: Raymond A. Serway ; & John W. Jewett. (2014). *Physics for Scientists and Engineers*. p. 317.



ภาพประกอบ 4 เงื่อนไขของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล

ที่มา: Raymond A. Serway ; & John W. Jewett. (2014). *Physics for Scientists and Engineers*. p. 317.

จากเงื่อนไขของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลอัตราเร็วเชิงเส้นที่จุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ (v_{CM}) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$v_{CM} = \frac{ds_{CM}}{dt} = R \frac{d\theta}{dt} = R\omega \quad (1)$$

เมื่อ ω คืออัตราเร็วเชิงมุมของวัตถุ นอกจากนี้ยังสามารถหาขนาดของความเร่งเชิงเส้นของวัตถุ (a_{CM}) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$a_{CM} = \frac{dv_{CM}}{dt} = R \frac{d\omega}{dt} = R\alpha \quad (2)$$

เมื่อ α คือขนาดของความเร่งเชิงมุมของวัตถุที่กลิ้งโดยไม่มีการไถล โดยสมการที่ (1) และ (2) จะเป็นจริงเมื่อพิจารณาวัตถุที่เคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลเท่านั้น

1.2 การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลบนพื้นเอียงของทรงกระบอก

พิจารณาทรงกระบอกมวล m ที่มีรัศมี R ถูกปล่อยจากสภาพหยุดนิ่งที่จุดสูงสุดของพื้นเอียง ที่มุมเอียง ϕ ตามภาพประกอบ 5 (ตำแหน่ง I) ให้เคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลลงมาตามพื้นเอียงโดยเริ่มกลิ้งที่มุม $\theta_i = 0$ กำหนดให้ระดับอ้างอิงอยู่ที่จุดสูงสุดของพื้นเอียง ทรงกระบอกเคลื่อนที่แบบกลิ้งไปบนพื้นเอียงเนื่องจากมีแรงเสียดทานสถิตระหว่างพื้นผิวของทรงกระบอกและพื้นผิวของพื้นเอียงก่อให้เกิดทอร์กที่กระทำต่อจุดศูนย์กลางมวลของทรงกระบอก

เมื่อทรงกระบอกกลิ้งไปตามพื้นเอียงจนถึงมุม θ_f จุดศูนย์กลางมวลของทรงกระบอกจะเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางเชิงเส้น $s_f = R(\theta_f - \theta_i)$ ตามภาพประกอบ 5 (ตำแหน่ง II) ดังนั้นตามกฎ

การอนุรักษ์พลังงานกลเมื่อเทียบพลังงานกลได้แก่พลังงานจลน์ (E_k) และพลังงานศักย์ (E_p) ระหว่างตำแหน่ง I และตำแหน่ง II ได้ตั้งสมการ

$$E_{k_{II}} + E_{p_{II}} = E_{k_I} + E_{p_I} \quad (3)$$

$$\frac{1}{2}mv_I^2 + \frac{1}{2}I\omega_I^2 - mgh_I = 0 \quad (4)$$

เมื่อ I คือโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกและ h_I คือความสูงวัดจากระดับอ้างอิงอยู่ที่จุดสูงสุดของพื้นเอียงลงมาถึงระดับที่วัตถุอยู่ ณ ตำแหน่ง II

หากเทียบพลังงานกลก่อนการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (ตำแหน่ง I) กับพลังงานกลเมื่อทรงกระบอกเคลื่อนที่ถึงที่ปลายของพื้นเอียงตามภาพประกอบ 5 (ตำแหน่ง III) ได้ตั้งสมการ

$$\frac{1}{2}mv_f^2 + \frac{1}{2}I\omega_f^2 - mgh_f = 0 \quad (5)$$

เมื่อ h_f คือความสูงวัดจากระดับอ้างอิงอยู่ที่จุดสูงสุดของพื้นเอียงลงมาถึงระดับปลายของพื้นเอียง หากใช้เงื่อนไขของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลตามสมการ (1) และความสัมพันธ์ตรีโกณมิติ $h_f = s_f \sin \phi$ มาประกอบการพิจารณา สามารถเขียนสมการ (5) ได้ใหม่ว่า

$$\omega_f^2 = \frac{2mgR(\theta_f - \theta_i) \sin \phi}{(mR^2 + I)} \quad (6)$$

การเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็งภายใต้ความเร่งคงที่เป็นไปตามสมการ (7)

$$\omega_f^2 - \omega_i^2 = 2\alpha(\theta_f - \theta_i) \quad (7)$$

แทนสมการ (6) ในสมการ (7) และพิจารณาเงื่อนไขที่ตำแหน่งเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ได้แก่ $\omega_i = 0$ และ $\theta_i = 0$ จะพบว่าขนาดของความเร่งเชิงมุมมีค่าตามสมการ

$$\alpha = \frac{mgR \sin \phi}{(mR^2 + I)} \quad (8)$$

อัตราเร็วเชิงมุมหาได้จากปริพันธ์ของสมการ (8) และพิจารณาเงื่อนไขที่จุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ได้แก่ $\omega_i = 0$ และ $\theta_i = 0$ อัตราเร็วเชิงมุมที่เวลา t ใดๆสามารถเขียนได้ตั้งสมการ

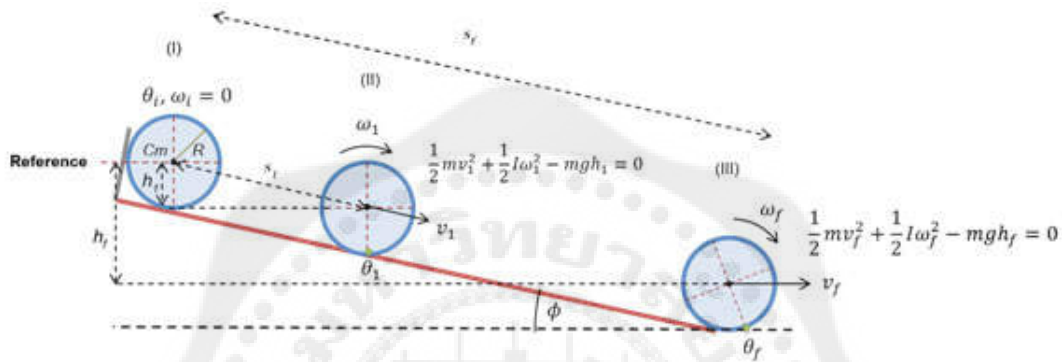
$$\omega_f = \frac{mgR \sin \phi}{(mR^2 + I)} t \quad (9)$$

มุมหาได้จากปริพันธ์ของสมการ (9) และพิจารณาเงื่อนไขที่จุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ได้แก่ $\omega_i = 0$ และ $\theta_i = 0$ มุมที่เวลา t ใดๆสามารถเขียนได้ตั้งสมการ

$$\theta_f = \frac{1}{2} \frac{mgR \sin \phi}{(mR^2 + I)} t^2 \quad (10)$$

เมื่อพิจารณาว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีโมเมนต์ความเฉื่อยและมวลเท่ากับทรงกระบอกกลวง โดยมีเมื่อกำลังโมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากับ $I = m \left(\frac{R_1^2 + R_2^2}{2} \right)$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการความเร่งเชิงมุมที่ 8 ใหม่ได้ว่า

$$\alpha = \frac{gR \sin \phi}{R_2^2 + \left(\frac{R_1^2 + R_2^2}{2} \right)} \quad (11)$$



ภาพประกอบ 5 การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกบนพื้นเอียงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังนี้ ตำแหน่ง I ทรงกระบอกอยู่ที่จุดสูงสุดของพื้นเอียง, ตำแหน่ง II ทรงกระบอกอยู่ที่ตำแหน่งใดๆ และตำแหน่ง III ทรงกระบอกอยู่ที่จุดปลายสุดของพื้นเอียง

1.3 มุมวิกฤตของการเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล

การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลตามภาพประกอบ 6 ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในทุกมุมเอียง การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีแรงเสียดทานสถิต (f_s) เป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้

$$f_s \leq \mu_s N \quad (12)$$

เมื่อ N คือแรงปฏิกิริยา มีค่าเท่ากับ $N = mg \cos \phi$ และ μ_s คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างพื้นผิวของทรงกระบอกกับพื้นผิวของพื้นเอียง

ทอร์ก (τ) มีความสัมพันธ์กับโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกระบอกและความเร่งเชิงมุมในกรณีที่วัตถุหมุนรอบจุดศูนย์กลางมวลดังนี้

$$\sum \tau = I\alpha \quad (13)$$

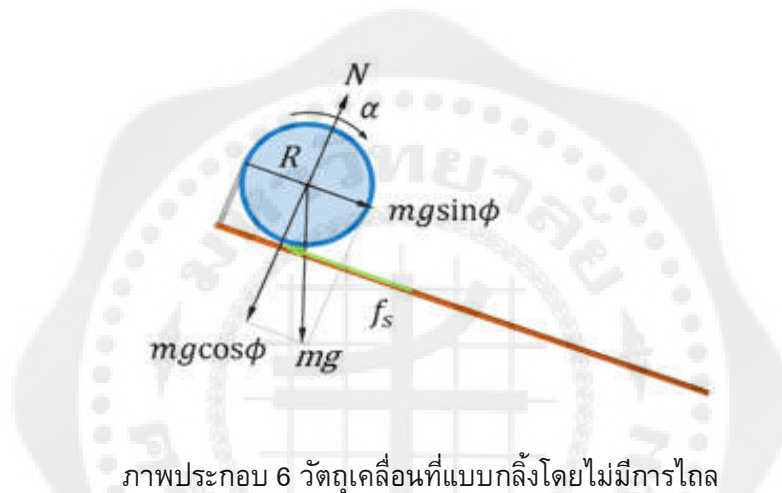
$$f_s R = I\alpha$$

เมื่อพิจารณาสมการ (11), (12) และ (13) จะพบว่า

$$\mu_s \geq \left(\frac{I}{mR^2 + I} \right) \tan \phi \quad (14)$$

$$\phi \leq \tan^{-1} \left(\frac{mR^2 + I}{I} \mu_s \right) \quad (15)$$

การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถลจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมุมเอียงจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ มุมวิกฤต ϕ ในสมการที่ (15) นอกจากนี้สมการดังกล่าวยังแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียง และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตด้วย



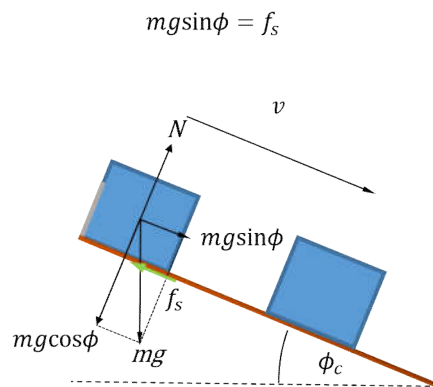
ภาพประกอบ 6 วัตถุเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล

1.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างพื้นผิวของวัตถุกับพื้นเอียงสามารถหาจาก นำวัตถุไปวางบนพื้นเอียง ยกพื้นเอียงขึ้นทีละน้อยจนวัตถุไถลลงไปตามพื้นเอียงโดยไม่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน ตามภาพประกอบ 7 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างพื้นผิวของวัตถุกับพื้นเอียงจะเท่ากับ

$$\mu_s = \tan \phi_c \quad (16)$$

เมื่อ ϕ_c คือมุมเอียงที่วัตถุเริ่มไถลเป็นมุมแรก



ภาพประกอบ 7 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

1. นำทรงกระบอกกลวงสองอันมาติดกันให้เกิดการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เพียงอย่างเดียว
2. ปรับมุมพื้นเอียงให้เพิ่มขึ้น จนทรงกระบอกเริ่มเคลื่อนที่ไถล
3. บันทึกค่ามุมเอียงค่าแรกที่ทรงกระบอกกลวงเริ่มไถลลงตามพื้นเอียง
4. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตจากสมการ (16)
5. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 2-4 ประมาณ 5 ครั้ง นำค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตมาหาค่าเฉลี่ย
6. นำค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตไปคำนวณหาค่ามุมวิกฤตตามสมการที่ (15)



ภาพประกอบ 8 ภาพการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

ตอนที่ 2 การเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวง

- นำสมาร์ทโฟนและเคสติดกับแผ่นดิสก์พลาสติก แล้วนำไปติดภายในทรงกระบอกตามภาพประกอบ 9



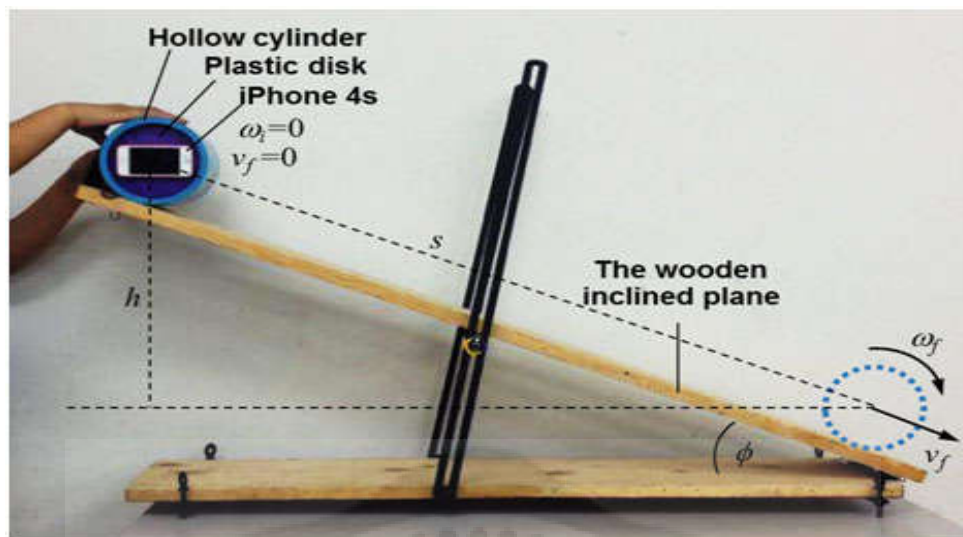
ภาพประกอบ 9 ทรงกระบอกกลวงติดกับแผ่นดิสก์พลาสติกบาง และสมาร์ทโฟน

- ใช้โปรแกรมประยุกต์ Phyphox ตั้งค่าพื้นเอียงที่ตามภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 การใช้โปรแกรมประยุกต์ Phyphox ในการวัดมุมเอียง

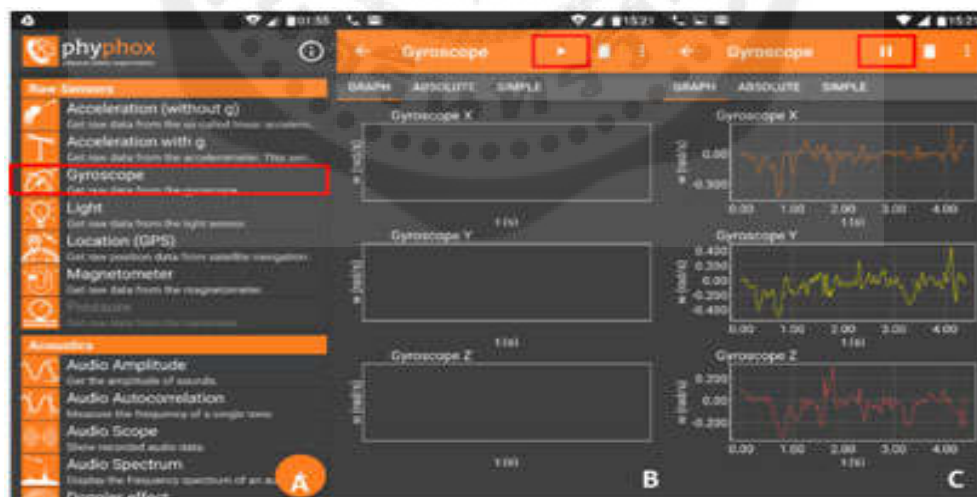
- ตั้งมุมเอียงที่ 3 องศา นำทรงกระบอกวางที่จุดสูงสุดของพื้นเอียงให้สัมผัสติดกับที่กั้นตามภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 ภาพการทดลองการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของทรงกระบอกกลวง

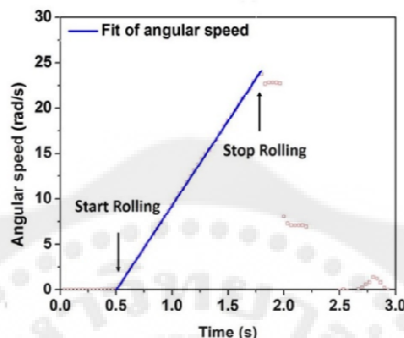
3. กดเข้าโหมด Gyroscope ของโปรแกรมประยุกต์ Phyphox ตามภาพประกอบ 12 A กดคำสั่งเริ่มการบันทึกของมูลในหน้าแสดงผล ตามภาพประกอบ 12 B แล้วปล่อยทรงกระบอกให้กลิ้งลงมาตามพื้นเอียง

4. เมื่อทรงกระบอกเคลื่อนที่ถึงปลายของพื้นเอียง กดคำสั่งหยุดการบันทึกของมูลในหน้าแสดงผลของโปรแกรมประยุกต์ Phyphox ตามภาพประกอบ 12 C



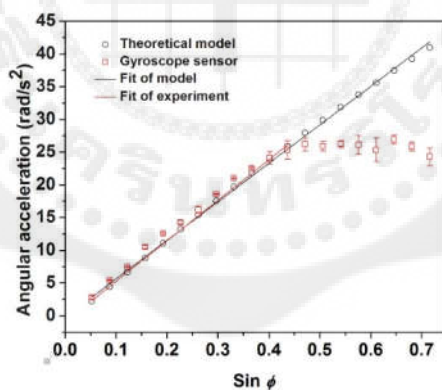
ภาพประกอบ 12 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมประยุกต์ Phyphox (A) หน้าจอขณะเลือกโหมดการบันทึกค่า (B) ขณะยังไม่มีผลการบันทึกผลในโหมด Gyroscope (C) ขณะทำการบันทึกผลในโหมด Gyroscope

6. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3-5 อีก 3 ครั้ง
7. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 3-6 ที่มุมเอียง 9, 15 และ 21 จากนั้นเพิ่มมุมเอียงทีละ 2 องศา ไปจนถึงมุม 35 องศา
8. ผลการทดลองจากไจโรสโคปเป็นค่าอัตราเร็วเชิงมุมของทรงกระบอกกลิ้งต่อเวลา สามารถนำมาสร้างกราฟได้ดังภาพประกอบ 13 ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาขนาดของความเร่งได้จากความชันของกราฟ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสมการ (11)



ภาพประกอบ 13 กราฟข้อมูลของการทดลองกลิ้งของทรงกระบอกกลิ้งบนพื้นเอียงจากไจโรสโคป

9. สร้างกราฟระหว่างขนาดของความเร่งและมุมเอียงที่ได้จากการทดลองที่มุมต่างๆตามตัวอย่างในภาพประกอบที่ 14



ภาพประกอบ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของความเร่งเชิงมุมและ $\sin \phi$

10. พิจารณามุมวิกฤตจากผลการทดลองโดยมุมวิกฤตคือมุมสุดท้ายที่ความเร่งเชิงมุมจากการทดลองเป็นไปตามทฤษฎี นำไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตตามสมการที่ (3-9)
11. ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยใช้ทรงกระบอกอีกขนาดหนึ่ง
12. สรุปผลการทดลอง

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตอนที่ 1

มุมเอียงค่าแรกที่ทรงกระบอกกลวงเริ่มไถล (rad)			ค่าเฉลี่ย (rad)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		

มุมวิกฤต

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ตอนที่ 2

ทรงกระบอกที่ 1

มุมเอียง	ความเร่งเชิงมุม (rad/s^2)					ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ผลคำนวณจากทฤษฎี	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย (rad/s^2)	
9						
15						
21						
23						
25						
27						
29						
31						
33						
35						

มุมวิกฤต

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

ทรงกระบอกที่ 2

มุม เอียง	ความเร่งเชิงมุม (rad/s^2)					ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ผลคำนวณจาก ทฤษฎี	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย (rad/s^2)	
9						
15						
21						
23						
25						
27						
29						
31						
33						
35						

มุมวิกฤต

.....

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

.....

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

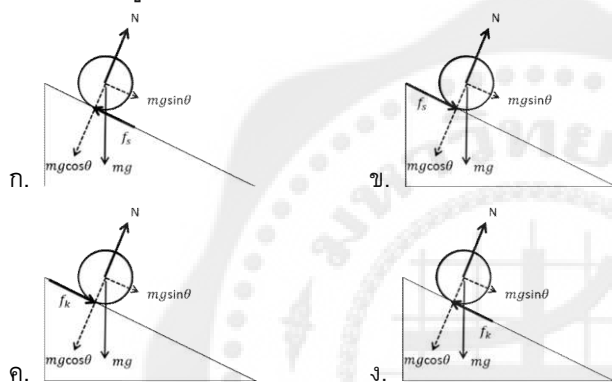
ชื่อ รหัสนิสิต

แบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน เรื่อง การเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียง

คำชี้แจง

1. แบบทดสอบนี้เป็นส่วนหนึ่งของการทำวิจัยเพื่อพัฒนาการสอนเรื่องการเคลื่อนที่แบบกลิ้งบนพื้นเอียงโดยใช้สมาร์ทโฟน
2. กรุณาตอบเลือกตัวเลือกคำตอบ และให้เหตุผลในการเลือกตัวเลือก ข้อมูลที่ได้จากแบบทดสอบนี้ จะไม่มีการเปิดเผยตัวตนและไม่มีผลต่อคะแนนการเรียนการสอนของผู้ตอบแบบสอบถาม

1. ภาพ free body diagram ในข้อใดแสดงแรงภายนอกที่กระทำต่อทรงกระบอกที่กำลังกลิ้งโดยไม่มีการไถลได้ถูกต้อง



2.

ปล่อยทรงกระบอกสองทรงกระบอกที่มีรูปทรงเหมือนกันจากจุดสูงสุดของพื้นเอียงให้กลิ้งโดยไม่มีการไถลไปบนพื้นที่มีมุมเอียง (ϕ) เท่ากัน โดยทรงกระบอกทั้งสองมีโมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากันแต่มวลของทรงกระบอก A มากกว่าทรงกระบอก B ข้อใดต่อไปนี้ถูกต้อง

- ก. ทรงกระบอก A ถึงพื้นก่อน ทรงกระบอก B
- ข. ทรงกระบอก B ถึงพื้นก่อน ทรงกระบอก A
- ค. ทรงกระบอกทั้งสองถึงพื้นพร้อมกัน
- ง. สรุปไม่ได้

3. เมื่อปล่อยทรงกระบอกจากมุมเอียง (ϕ) ที่สูงขึ้นเรื่อยๆตามลำดับ โดยมุมเอียงนั้นมีค่าต่ำกว่ามุมวิกฤต (ϕ_c) ความเร่งเชิงมุมจะมีความสัมพันธ์เป็นอย่างไรกับมุมเอียง

ก. แปรผกผันตรง

ข. แปรผกผัน

ค. อัตราคงที่เมื่อเปรียบเทียบกัน

ง. ไม่มีรูปแบบความสัมพันธ์

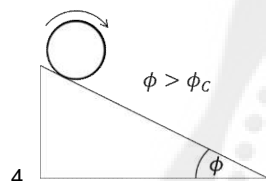
.....

.....

.....

.....

.....



เมื่อปล่อยทรงกระบอกจากมุมเอียง (ϕ) ที่มีค่าสูงกว่ามุมวิกฤต (ϕ_c) เมื่อทรงกระบอกกลิ้งไปตามพื้นเอียง การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นจะเป็นการเคลื่อนที่ชนิดใด พลังงานกลรวมจะคงที่หรือไม่

ก. การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่ พลังงานกลรวมไม่คงที่

ข. การเคลื่อนที่แบบหมุน พลังงานกลรวมคงที่

ค. การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถล พลังงานกลรวมไม่คงที่

ง. การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล พลังงานกลรวมคงที่

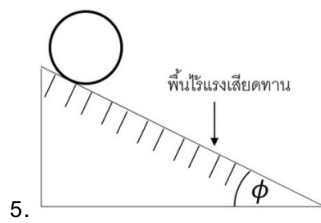
.....

.....

.....

.....

.....



เมื่อปล่อยทรงกระบอกที่จุดสูงสุดของพื้นเอียงที่ลื่นไม่มีแรงเสียดทาน ทรงกระบอกจะเกิดการเคลื่อนที่ชนิดใด

- ก. การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยไม่มีการไถล
- ข. การเคลื่อนที่แบบกลิ้งโดยมีการไถล
- ค. การเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่เพียงอย่างเดียว
- ง. ไม่เกิดการเคลื่อนที่

.....

.....

.....

.....

ภาคผนวก ง
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



Investigation of the rolling motion of a hollow cylinder using a smartphone's digital compass

Phattara Wattanayotin, Chokchai Puttharugsa¹
and Supitch Khemmani

Department of Physics, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, 114 Sukhumvit 23,
Wattana, Bangkok 10110, Thailand

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



Abstract

This study used a smartphone's digital compass to observe the rolling motion of a hollow cylinder on an inclined plane. The smartphone (an iPhone 4s) was attached to the end of one side of a hollow cylinder to record the experimental data using the SensorLog application. In the experiment, the change of angular position was measured by the smartphone's digital compass. The obtained results were then analyzed and calculated to determine various parameters of the motion, such as the angular velocity, angular acceleration, critical angle, and coefficient of static friction. The experimental results obtained from using the digital compass were compared with those obtained from using a gyroscope sensor. Moreover, the results obtained from both sensors were consistent with the calculations for the rolling motion. We expect that this experiment will be valuable for use in physics laboratories.

1. Introduction

Electronic devices now play an important role in introductory physics courses, especially in laboratory classes. These devices, such as motion detectors [1], webcams [2], digital cameras [3], and optical mouse [4], are used to record experimental data in physics laboratory classes. This helps students understand the connection between physics concepts and experimental data. Previous papers have reported the use of electronic devices in physics laboratories. For example, motion detectors use ultrasound to measure the position of a moving object. This information can be used to obtain the velocity and acceleration. Optical mouse have also been developed as displacement sensors to detect position as a function of

time. Digital cameras are used to record videos of moving objects so that motion can be analyzed using appropriate software, such as Tracker. This method helps students to visualize and relate physics theories to real motion. Although these devices can successfully track or record experimental data for a moving object, they require specific software, and students are not familiar with them. Alternatively, we can use a smartphone as an experimental tool in physics laboratories. This is possible because of the embedded sensors in smartphones, such as microphones, cameras, acceleration sensors, magnetic sensors (magnetometers), gyroscope sensors, light sensors, and GPS receivers. All of the sensors can be read, and data can be recorded using appropriate software or applications (apps). Examples of these applications include SensorLog and SPARKvue for the

¹ Author to whom any correspondence should be addressed.

iOS system, and Physics Toolbox Sensor Suite and AndroSensor for the Android system. Thus, experiments concerning physics phenomena can be conducted using a smartphone. For example, Castro Palacio studied oscillation motions (simple and damped harmonic motion) using the acceleration sensor of a smartphone [5, 6]. Vogt and Kuhn used an acceleration sensor and gyroscope sensor to investigate circular motion. They studied the relationship between angular velocity and centripetal acceleration [7]. Hirt used the microphone and sound storage system to analyze the acoustic signal of a beat frequency [8]. Kuhn used the CCD sensor (acting as a radioactive counter) to detect particles of ionizing radiation [9]. Moreover, the magnetometer sensor in a smartphone was used to monitor the magnetic field from a solenoid coil and a small magnet [10, 11]. Smartphone sensors can be seen to act as tools for recording experimental data in physics laboratory classes. This will make experiments more interesting and exciting.

Recently, our group reported the use of a smartphone (digital gyroscope) to study the rolling motion of a hollow cylinder on an inclined plane. In this paper, we present a similar study, but one that uses a smartphone's digital compass. The digital compass was used to measure the angular position of the hollow cylinder. The recorded data were then analyzed to determine the magnitude of the angular acceleration. Moreover, the experimental results obtained from using the digital compass were compared with those obtained from using the gyroscope sensor and those obtained from the theoretical model.

2. Theoretical background

2.1. Pure rolling motion

Consider a hollow cylinder with mass m and radius R rolling without slipping after being at rest at the top of an inclined plane, as shown in figure 1(a) (state I). The hollow cylinder starts rolling at an angular position of θ_i . It is only accelerated if a static friction force is present between the cylinder and the incline to produce a torque at the centre of mass (cm). The hollow cylinder rolls without slipping when it rotates through an angle of θ_f , and the centre of mass moves in a linear displacement $s_1 = R(\theta_f - \theta_i)$ (state II, figure 1(a)). For the hollow cylinder, the earth system in

figure 1(a), we define the zero configuration of the gravitational potential energy (reference) as being when the hollow cylinder is in state I on the incline. Therefore, conservation of mechanical energy gives us

$$K_{II} + U_{II} = K_I + U_I,$$

$$\frac{1}{2}mv_i^2 + \frac{1}{2}I\omega_i^2 - mgh_i = 0. \quad (1)$$

Thus for the hollow cylinder in state III (figure 1(a)), the conservation of mechanical energy can be written as

$$\frac{1}{2}mv_f^2 + \frac{1}{2}I\omega_f^2 - mgh_f = 0. \quad (2)$$

The term $\frac{1}{2}I\omega_f^2$ represents the rotational kinetic energy of the hollow cylinder at the centre of mass, and the term $\frac{1}{2}mv_f^2$ represents the translation kinetic energy of the centre of mass, where I is the moment of inertia of the hollow cylinder. The magnitude of angular acceleration, angular velocity, and angular displacement of a hollow cylinder can be determined by equation (A.6), (A.7), and (A.8), respectively (see appendix).

2.2. Critical angle for rolling without slipping

Rolling motion without slipping cannot be sustained for every range of inclination angle. Pure rolling motion is possible if the static friction is strong enough to prevent the hollow cylinder from slipping. This means that the torque on the hollow cylinder from the maximum static friction force must be greater than the total torque on the hollow cylinder when it rolls. We can express the condition for rolling without slipping as

$$f_s R \geq I\alpha. \quad (3)$$

Then we have the maximum static friction force:

$$f_s = \mu_s N, \quad (4)$$

where $N = (m_c + m_i + m_p)g \cos \phi = mg \cos \phi$ and μ_s is the coefficient of static friction between the hollow cylinder and the inclined plane.

Combining equations (A.6), (3), and (4), we obtain

$$\mu_s \geq \left(\frac{mR^2 + I}{I} \right) \tan \phi, \quad (5)$$

Investigation of the rolling motion of a hollow cylinder using a smartphone's digital compass

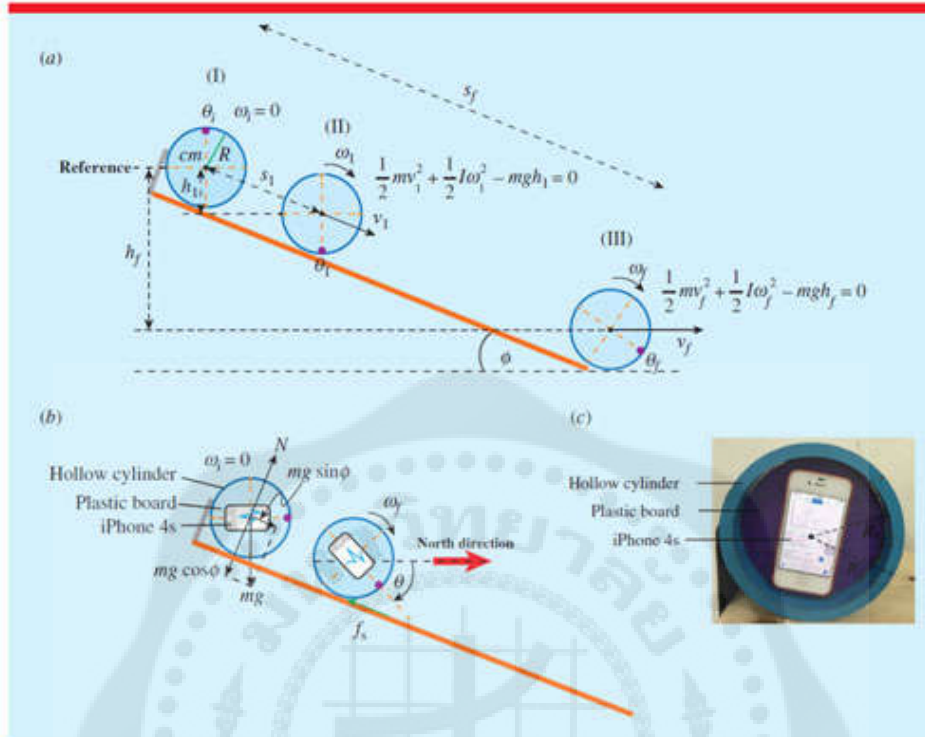


Figure 1. (a) The rolling motion of the cylinder on an inclined plane at different stages. State I: the cylinder is released at the top of the incline. State II: the cylinder is rolling for a distance s_1 . State III: the cylinder is rolling at the end of the inclined plane. (b) The smartphone is attached to the side of the cylinder to measure the change of angle using a magnetometer sensor. (c) A digital image of the hollow cylinder with the smartphone attached on the plastic board.

$$\text{or } \phi \leq \tan^{-1} \left(\frac{I}{mR_2^2 + I} \mu_s \right). \quad (6)$$

In other words, the angle of the inclined plane must be less than some critical angle value, as shown in equation (6), for rolling without slipping motion. The relationship between the critical angle and the coefficient of static friction is shown in equation (5).

2.3. Determination of the coefficient of static friction

The coefficient of static friction between the hollow cylinder and the wooden inclined plane can be determined from

$$\mu_s = \tan^{-1} \beta_c, \quad (7)$$

where β_c is the critical angle at which the object starts sliding down the inclined plane.

The experimental setup follows that detailed in [12]. Briefly, two hollow cylinders are attached at the side using double-sided tape to prevent the cylinder on the inclined plane from rolling. The attached cylinders are placed on the inclined plane, which is equipped with a smartphone's angle meter. The inclined plane is slowly raised until the attached cylinders slide and the critical angle β_c is recorded at the angle of the inclined plane.

2.4. Using the iPhone 4s's digital compass to determine an angular position

A digital or electronic compass is one of the applications in a smartphone. It exploits the magnetometer sensor embedded in the smartphone to point in the direction of the magnetic north (the north magnetic pole of the Earth) or true north (the geographical North Pole). Generally, the smartphone's

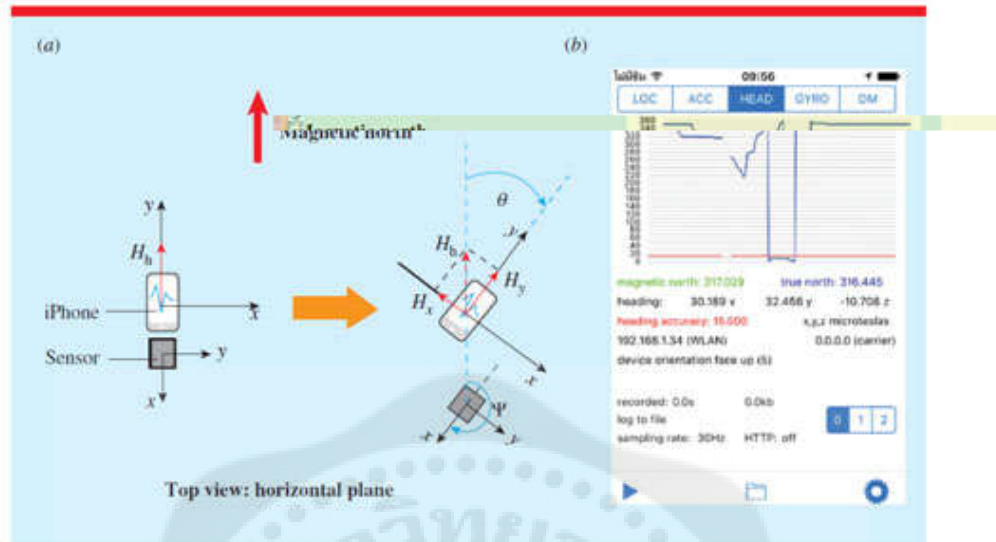


Figure 2. (a) The magnetometer sensor and the iPhone 4s for the detection of the magnetic north. (b) A screen capture of the SensorLog app for measuring the value of the magnetic north and the strength of the magnetic field.

magnetometer sensor has three axes, and can measure the strength of the magnetic field in each axis. The coordinates of the iPhone 4s and the magnetometer sensor are shown in figure 2(a). At the surface of the Earth, the local magnetic field $\mathbf{H}$ has a fixed component H_h on the horizontal plane that points to the magnetic north. The magnetometer sensor can determine the angle between the x axis of the magnetometer sensor and the magnetic north on the horizontal plane, and acts as a digital compass (see figure 2(a)). This angle ψ is called the heading angle, and this is measured in the clockwise direction according to the following relations (in units of degrees):

$$\begin{aligned} \psi &= 90^\circ - \frac{180^\circ}{\pi} \arctan \frac{H_x}{H_y} \quad \text{when } H_y > 0 \\ \psi &= 270^\circ - \frac{180^\circ}{\pi} \arctan \frac{H_x}{H_y} \quad \text{when } H_y < 0 \\ \psi &= 180^\circ \quad \text{when } H_y = 0 \text{ and } H_x < 0 \\ \psi &= 0^\circ \quad \text{when } H_y = 0 \text{ and } H_x > 0. \end{aligned} \quad (8)$$

where H_x and H_y are the magnetic field strength in the x and y axes.

Usually, the application of the digital compass for the iPhone 4s is measured with respect to the y axis (the coordinate system of the smartphone, see figure 2(a)). To obtain the angle θ we must add 180 degrees to the angle ψ . When the

smartphone is tilted, the magnetometer sensor needs to be compensated using an accelerometer sensor. Thus, we can determine the angular position by using the digital compass of the smartphone. However, the smartphone should be placed away from strong magnetic fields. Figure 2(b) shows a screen capture of the SensorLog app on the iPhone 4s. The sensor reports the magnetic north direction and the strength of the magnetic field in three directions of the x , y , and z axes. It also automatically plots graphs from the data (the magnetic field strength) obtained from the sensor in three directions (the x , y , and z axes).

3. Experiment

The schematic of the experimental setup is shown in figure 1(b). The apparatus includes a wooden inclined plane, a hollow cylinder of polyvinyl chloride (PVC), and a smartphone iPhone 4s. The inclined plane has a length of 1.400 ± 0.001 m, a width of 0.300 ± 0.001 m, and a thickness of 0.050 ± 0.001 m. It can be adjusted to different angles. A smartphone with the Angle Pro application is used to measure the angle of the inclined plane. The hollow cylinder of PVC has a mass (m_c) of 1.50 ± 0.01 kg, an inner radius (R_1) of 0.071 ± 0.001 m, an outer radius of (R_2) 0.082 ± 0.001 m, and a length of 0.020 ± 0.001 m. The plastic board has a disc shape with a radius

Investigation of the rolling motion of a hollow cylinder using a smartphone's digital compass

(R_1) of 0.071 ± 0.001 m and a mass (m_p) of 0.004 ± 0.001 kg. The mass of the iPhone 4s with its case (m_i) is 0.160 ± 0.001 kg, and its dimensions ($w \times l \times h$) are $0.0586 \times 0.115 \times 0.0093$ m³. The plastic board is mounted tightly at the inner end of the hollow cylinder using epoxy glue. The iPhone 4s with its case is then attached to the centre of the plastic board using thin double-sided tape (see figure 1(c), denoted as the hollow cylinder). This setup can prevent the smartphone from breaking. The SensorLog application is used to record the angular position and angular speed. The data are recorded at a rate of 30 data points per second or 30 Hz and are then sent to the user via e-mail for analysis.

In the experiment, the hollow cylinder is released at the top of the inclined plane at various inclination angles. The angular position of the hollow cylinder is measured and recorded by the iPhone 4s's digital compass through the SensorLog application. The experiment on rolling motion on the inclined plane is performed by attaching the iPhone 4s to the hollow cylinder, as shown in figure 1(b). A change of angle positions (angular displacement) in the digital compass with respect to the North Pole is recorded in real time by the SensorLog application. The digital compass can record the angular position at a range of 0 to 360 degrees (for the first cycle). This means that the angular position is greater than 360 degrees, and the sensor will record from 0 to 360 degrees in the new cycle (second cycle), as shown in figure 3(a). Thus, the data obtained from the magnetometer sensor must be processed before the rolling motion of the hollow cylinder is analyzed. This can be performed by adding the angular position for the second cycle with 360 degrees, the third cycle with 720 degrees, and the fourth cycle with 1080 degrees. The processed data are obtained as the angular displacement ($\theta_f - \theta_i$) and are further analyzed for the rolling motion of the hollow cylinder.

4. Results and discussion

Figure 3(a) shows an example of the (raw) data obtained from the magnetometer sensor at 5 ± 1 degrees of inclination. We exploited the magnetometer sensor to measure the change of angle with respect to the North Pole, as shown in figure 2(a). The smartphone's sensor was linked

to the SensorLog application to record data. The hollow cylinder initially rolled at an angle position of 193 degrees (initial angle θ_i) at $t = 0.6$ s. Data were recorded using the magnetometer sensor up to 360 degrees for the first cycle. Then the sensor started to record for the second and third cycles at an angle of 0 to 360 degrees. For the fourth cycle, the hollow cylinder stopped rolling at $t = 4.3$ s. It could be seen that the slope of the obtained data increased in each cycle. This implies that the hollow cylinder rolled quickly in each cycle, or that the angular speed increased in each cycle. We then processed the raw data to analyze the rolling motion. This can be performed simply by adding an angular distance of 360 degrees into the second cycle data, and then one of 720 degrees into the third cycle data, and one of 1080 degrees into the fourth cycle data. The processed data were obtained as shown in figure 3(b). After that, we changed the angular distance from units of degrees to units of radians, as shown in figure 4(a). The rolling motion was then analyzed by fitting the processed data using equation (A.8). The fitting parameter was 2.90 ± 0.05 rad s⁻². If we multiply this value by two we can obtain the angular acceleration. Thus, the magnitude of the angular acceleration was 5.80 ± 0.05 rad s⁻². Moreover, we can calculate the linear displacement of the rolling motion from figure 4(a) using the kinematic motion of $s_f = R(\theta_f - \theta_i)$. Based on the result in (figure 4(a)), the linear displacement was approximately 1.56 m. This value from the experiment was compared to the length of the inclined plane, which was 1.40 m. The error of these values was 11.4%. A large error may come from the cylinder being tilted out of a straight-line trajectory during the experiment. The magnitude of the angular acceleration obtained from the magnetometer sensor was also compared to that obtained from the gyroscope sensor. Figure 4(b) shows the angular speed obtained from the gyroscope sensor. The slope of the fitting data (figure 4(b)) was the angular acceleration value, and this was 5.47 ± 0.02 rad s⁻². Moreover, the magnitude of the acceleration was calculated, and this was 5.75 ± 0.02 rad s⁻². It can be seen that the values obtained from each sensor are close to the value obtained from calculations. The uncertainty of these values was 0.8% and 4.9% for the magnetometer and gyroscope sensors, respectively. This suggests that we can use the smartphone's

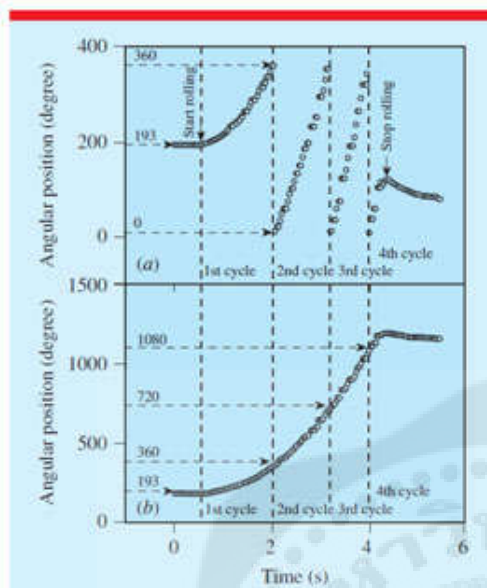


Figure 3. (a) The data were recorded using a magnetometer at 5 ± 1 degrees of inclination. (b) The data were processed to analyze the rolling motion.

magnetometer sensor to measure the change of angular distance to analyze the rolling motion of the hollow cylinder.

Figure 5 shows an example of the data obtained from the magnetometer sensor for three angles of inclination ($\phi = 3 \pm 1$, 5 ± 1 , and 7 ± 1 degrees). The data in figure 5(a) were plotted as a function of t . The curvature increased as a function of inclination. Fitting the data with a parabolic equation can obtain the value of the angular acceleration. According to this method, the magnitude of the angular acceleration was 3.10 ± 0.05 , 5.82 ± 0.07 , and $7.50 \pm 0.08 \text{ rad s}^{-2}$ for $\phi = 3 \pm 1$, 5 ± 1 , and 7 ± 1 degrees, respectively. Alternatively, we can simply plot the data as a function of t^2 , as shown in figure 5(b). The parabolic data will change to linear data. The data can then be interpreted easily; the linear slope of the plots was $\alpha/2$. Their slopes increased as the inclination of the plane increased. According to this method, the magnitude of the angular acceleration was $3.50 \pm 0.01 \text{ rad s}^{-2}$, $5.68 \pm 0.02 \text{ rad s}^{-2}$, and $7.72 \pm 0.02 \text{ rad s}^{-2}$ for $\phi = 3 \pm 1$, 5 ± 1 , and 7 ± 1 degrees, respectively. Both methods obtained a very similar magnitude for the angular acceleration.

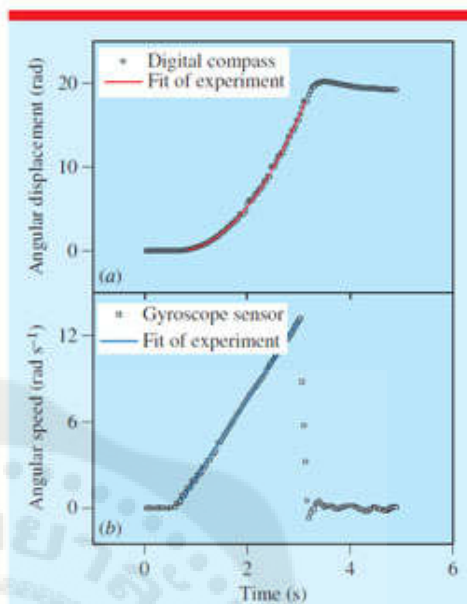


Figure 4. (a) The processed data obtained from the magnetometer sensor. (b) The data obtained from the gyroscope sensor.

The angular acceleration values obtained from the experiments (magnetometer and gyroscope sensors) were compared with those from the theoretical model calculations (figure 6). The angular acceleration magnitude was plotted at different angles of the inclined plane. The angular acceleration values increased as the inclination of the plane was in the range of 3 ± 1 to 24 ± 1 degrees, which is consistent with equation (A.6). After that, the angular acceleration value was not satisfied by equation (A.6) (or the theoretical model) for either experiment. This implies that the hollow cylinder will roll with a slip on the inclined plane. Note that the error bar of the data increased in this region ($\phi > 24 \pm 1$ degrees). The experimental results were linearly fitted, yielding a slope of 69.32 ± 1.28 and $64.20 \pm 0.47 \text{ s}^{-2}$ for the magnetometer and gyroscope sensors, respectively, while the theoretical value of $mgR_2/(mR_2^2 + I)$ is $63.74 \pm 0.01 \text{ s}^{-2}$. The error of these values obtained from the magnetometer and gyroscope sensors, compared with the theoretical value, is 8.8% and 0.7%, respectively. This implies that the experimental data are in good agreement with the theoretical model. The

Investigation of the rolling motion of a hollow cylinder using a smartphone's digital compass

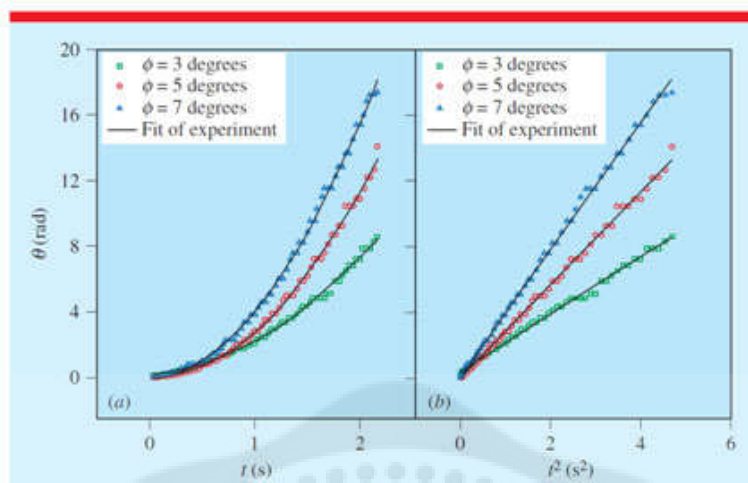


Figure 5. The data obtained from the magnetometer sensor were plotted as a function of t (a) and t^2 (b).

critical angle was determined to be the angle that starts to deviate from equation (A.6), which described the pure rolling motion. Evidently, at $\theta = 27 \pm 1$ degrees the angular acceleration did not satisfy the theory of pure rolling motion. At this angle, the hollow cylinder motion contained both rolling and slipping components. Therefore, $\theta = 27 \pm 1$ degrees was determined to be the critical angle in this experiment, because it is the last data point that still satisfies the rolling without a slipping condition. In addition, at a critical angle the static friction is at its maximum value according to equation (6). Thus, the coefficient of static friction (μ_s) can be determined from equation (5). Taking a critical angle of $\phi_c = 27 \pm 1$ degrees gives $\mu_s = 0.205$. The μ_s between the wooden plane and the PVC cylinder was then alternatively determined using equation (7). The critical angle β_c was 11.27 ± 0.66 degrees, and the calculation of μ_s was 0.194 ± 0.011 . Comparing the coefficient of static friction values obtained from the different experiments showed an error of 5.5%.

Finally, the angular positions of the hollow cylinder obtained from the magnetometer sensor were used to calculate the gravitational potential, translational kinetic, rotational kinetic, and total mechanical energy at an inclination of 5 ± 1 degrees (see figure 7). This graph, which is an example of pure rolling motion at $\phi = 5 \pm 1$ degrees, is usually used to consider the conservation of energy. It is not familiar to students because the reference of the hollow cylinder

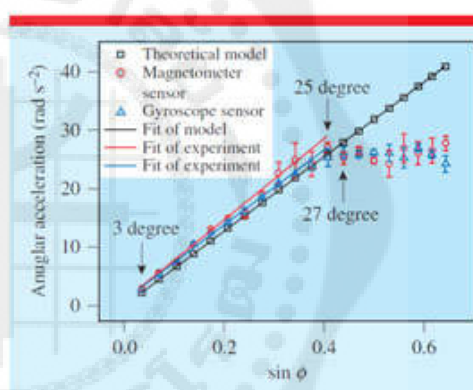


Figure 6. The relationship between the magnitude of angular acceleration and $\sin \phi$.

is at the top of the incline plane, yielding a minus sign for potential energy. However, this will make students understand the other situation for energy transfer. The decreased gravitational potential energy will convert into translational and rotational kinetic energy. The total of these energies, the gravitational potential, translational kinetic, and rotational kinetic energy, is determined to be the total mechanical energy. Fluctuations of the total mechanical energy at a later time are most probably attributable to increased uncertainty because of the large speed value towards the end of the incline. The average of the total mechanical energy is -0.05 ± 0.06 J. The uncertainty is quite small for pure rolling motion; thus, the

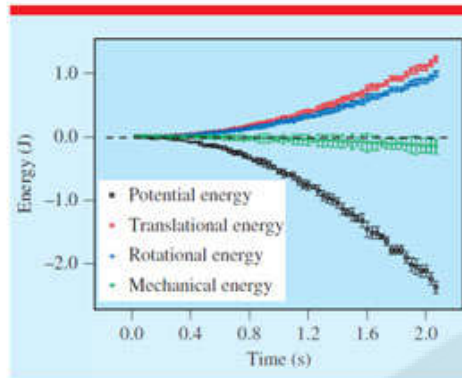


Figure 7. Conventional mechanical energy.

total mechanical energy can be considered to be conserved.

5. Conclusion

We analyzed the rolling motion of a hollow cylinder along an inclined plane successfully using a smartphone's digital compass. The angular position obtained from the digital compass agrees with that from the theoretical model and is consistent with the experimental data obtained from a gyroscope sensor. Important parameters can be determined from the rolling motion experiment, such as the angular speed, angular acceleration, critical angle, and coefficient of static friction. Therefore, smartphones with suitable applications offer an alternative way to study rolling motion in physics laboratory classes.

Acknowledgments

This work was supported by the Graduate School of Srinakharinwirot University, Thailand. PW gratefully acknowledges financial support from the Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology.

Appendix

By using $v_f = R\omega_f$ for pure rolling motion and $h_f = s_f \sin \phi$ for the trigonometry relationship, we can express equation (2) as

$$\omega_f^2 = \frac{2mgR(\theta_f - \theta_i) \sin \phi}{(mR^2 + I)}. \quad (\text{A.1})$$

Under constant angular acceleration, we can write the equation of the kinematic of the rigid body as

$$\omega_f^2 - \omega_i^2 = 2\alpha(\theta_f - \theta_i). \quad (\text{A.2})$$

Substituting equation (A.1) with equation (A.2) and applying the initial condition ($\omega_i = 0$ and $\theta = \theta_i$), one obtains the magnitude of angular acceleration:

$$\alpha = \frac{mgR \sin \phi}{(mR^2 + I)}. \quad (\text{A.3})$$

The angular speed can be found by integrating equation (A.3) with an initial condition, $t = 0$ s, and $\omega_i = 0$. Thus, the angular speed at any time t is given by

$$\omega_f = \frac{mgR \sin \phi}{(mR^2 + I)} t. \quad (\text{A.4})$$

The angular displacement is also obtained by integrating equation (A.4) with an initial condition, $t = 0$ s, and $\theta = \theta_i$. Thus, the angular displacement at any time t is given by

$$\theta_f = \frac{1}{2} \frac{mgR \sin \phi}{(mR^2 + I)} t^2. \quad (\text{A.5})$$

For the experiment in this paper, the hollow cylinder (mass m_c) has an outer radius R_2 and an inner radius R_1 , as shown in figure 1(C). The iPhone 4s (mass m_i) is attached to a plastic board (mass m_p and radius R_1), which is mounted on the end of the hollow cylinder, as shown in figure 1(b). Thus, we can rewrite equations (A.3)–(A.5) as

$$\alpha = \frac{mgR_2 \sin \phi}{(mR_2^2 + I)}, \quad (\text{A.6})$$

$$\omega_f = \frac{mgR_2 \sin \phi}{(mR_2^2 + I)} t, \quad (\text{A.7})$$

$$\text{and } \theta_f = \frac{1}{2} \frac{mgR_2 \sin \phi}{(mR_2^2 + I)} t^2, \quad (\text{A.8})$$

where $m = m_c + m_i + m_p$ and I are the total of the moment of inertia. This includes the moment of inertia of (1) the hollow cylinder (I_c), (2) the iPhone 4s (I_i), and (3) the plastic board (I_p). Thus, the total of the moment of inertia can be written as

Investigation of the rolling motion of a hollow cylinder using a smartphone's digital compass

$$I = I_c + I_i + I_p = \frac{1}{2}m_c(R_1^2 + R_2^2) + \frac{1}{12}m_i(w^2 + l^2) + \frac{1}{2}m_p R_l^2. \quad (\text{A.9})$$

Note that equations (A.6)–(A.8) are only valid in the case of pure rolling motion of the hollow cylinder on the inclined plane.

Received 8 February 2017, in final form 15 March 2017

Accepted for publication 29 March 2017

<https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa6a0a>

[11] Arribas E *et al* 2015 *Eur. J. Phys.* **36** 065002

[12] Puttharugsa C, Khemmani S, Utayarat P and Luangtip W 2016 *Eur. J. Phys.* **37** 055004



Phattara Wattanayotin graduated with a degree in Physics in 2013 at Srinakharinwirot University (Bangkok, Thailand) and is a Master's student in physics education at Srinakharinwirot University. His research interests include applying a smartphone to fundamental physics experiments.

References

- [1] Niculescu A 2006 *Phys. Teach.* **44** 157
- [2] Shamim S, Zia W and Anwar M S 2011 *Am. J. Phys.* **78** 433
- [3] Poonyawatpornkul J and Wattanakasiwich P 2013 *Phys. Educ.* **48** 782
- [4] Ng T W and Ang K T 2005 *Am. J. Phys.* **73** 793
- [5] Castro-Palacio J C, Velázquez-Abad L, Giménez F and Monsoriu J A 2013 *Eur. J. Phys.* **34** 737
- [6] Castro-Palacio J C, Velázquez-Abad L, Giménez M H and Monsoriu J A 2013 *Am. J. Phys.* **81** 472
- [7] Vogt P and Kuhn J 2013 *Phys. Teach.* **51** 182
- [8] Hirth M, Kuhn J and Müller A 2016 *Phys. Teach.* **53** 120
- [9] Kuhn J, Molz A, Gröber S and Fröbis J 2014 *Phys. Teach.* **52** 351
- [10] Silva N 2012 *Phys. Teach.* **50** 372



Chokchai Puttharugsa 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.



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



ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายภัทร วัฒนโยธิน
วันเดือนปีเกิด	12 มกราคม พ.ศ. 2535
สถานที่เกิด	ระยอง
สถานที่อยู่	64 หมู่ 3 ตำเพ อำเภอมะเมืองระยอง จังหวัดระยอง 21160
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2553	ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนวัดป่าประดู่ จังหวัดระยอง
พ.ศ. 2556	วิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2561	การศึกษามหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ