ศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันบนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์

พรทิพย์ จันทร์ขาว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
พฤษภาคม 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ พรทิพย์ จันทร์ขาว ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์สำเภา จงจิตต์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน
(ดร.วิเชียร ศิริพรม)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์สำเภา จงจิตต์)

..... กรรมการ
(ดร.ธนัสถา รัตนะ)

..... กรรมการ
(ดร.ศรัณย์ ภิบาลชนม์)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ ศรีสุข)
วันที่ 24 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2559

การวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษา
โครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์
จากสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ระดับปริญญาโท ปีการศึกษา 2556

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจากรองศาสตราจารย์สำเภา จงจิตต์ อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรพันธ์ ถาวรธิรา ที่กรุณาให้คำแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อพิพัฒน์ จันทร์ขาว คุณแม่ละเอียด จันทร์ขาว คุณเสงียบ ผลจรุง ช่างไม้ คณะครูโรงเรียนวิเชียรมาตุ และเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ที่สนับสนุนทุนการศึกษา และทุนวิจัยตลอดหลักสูตร

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทีแด่บุพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

พรทิพย์ จันทร์ขาว

56920167: สาขาวิชา: ฟิสิกส์ศึกษา; วท.ม. (ฟิสิกส์ศึกษา)
คำสำคัญ: การเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง / การเคลื่อนที่แบบกลิ้ง /
การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์

พรทิพย์ จันทร์ขาว: ศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันบนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ (A STUDY OF THE APPROPRIATED MOTION PATTERN OF OBJECTS MOTION ON RAIL OF THE EXPERIMENTAL SET OF PROJECTILE MOTION) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: สำเภา จงจิตต์, วท.ม., 78 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

การวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตัน 2 ขนาด บนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ โดยวัดระยะการกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันทั้ง 2 ขนาด เมื่อเคลื่อนที่หลุดจากปลายรางเปรียบเทียบกับการคำนวณโดยใช้รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง คือ วัตถุมีการเปลี่ยนตำแหน่งโดยมีลักษณะเป็นเส้นขนาน และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง คือ วัตถุมีการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบจุดศูนย์กลางมวล และเลื่อนตำแหน่งไปพร้อมกัน และศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง ผลการวิจัยพบว่าวัตถุทรงกลมตันขนาดที่ 1 และขนาดที่ 2 มีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะการกระจัดตามแนวระดับเทียบกับการคำนวณโดยใช้รูปแบบเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่งมีค่าเท่ากับ 21.45 เปอร์เซ็นต์ และ 13.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะการกระจัดตามแนวระดับเทียบกับการคำนวณโดยใช้รูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้งมีค่าเท่ากับ 8.15 เปอร์เซ็นต์ และ 2.34 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สรุปได้ว่ารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันทั้ง 2 ขนาด บนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง และความสัมพันธ์ของค่าการกระจัดในแนวดิ่งกับการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสองมีความสัมพันธ์ตาม $y \alpha x^2$ หรือ $y = kx^2$

56920167: MAJOR: PHYSICS EDUCATION; M.Sc. (PHYSICS EDUCATION)
KEYWORDS: TRANSLATIONAL MOTION / ROLLING MOTION / PROJECTILEMOTION

PHONTIP JUNKAW: A STUDY OF THE APPROPRIATED MOTION PATTERN OF OBJECTS MOTION ON RAIL OF THE EXPERIMENTAL SET OF PROJECTILE MOTION. ADVISORY COMMITTEE: SAMPHAO JONGJITTA, M.Sc. 78 P. 2015.

The purpose of research is to study the appropriated motion pattern of two-sized sphere objects moving on rail of the experimental set of projectile motion to measure the distance of the horizontal displacement of two-sized sphere objects when moving off the rail compared to calculated by using a translation motion is the object has changed its position with a parallel and a rolling motion is the object rotational motion around the center of mass and promoted together and a study the graph of the relationship between vertical displacement and horizontal displacement squared. The results showed. The average values of a percentage errors of the horizontal displacement distance compared between the calculated the experimental method for the translation motion was 21.45% and 13.31%, respectively, and a method for the rolling motion was 8.15% and 2.34%, respectively. We concluded that the appropriated motion of objects moving on the rails of projectile motion is a rolling motion and the relationship of the vertical displacement and horizontal displacement squared corresponding to the equation $y = kx^2$

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... จ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ญ

บทที่

1 บทนำ..... 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

สมมติฐานของการวิจัย..... 2

ตัวแปรที่จะศึกษา..... 2

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย..... 3

ขอบเขตของการวิจัย..... 3

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4

รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง..... 4

กฎอนุรักษ์พลังงาน..... 7

การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์..... 8

โมเมนต์ความเฉื่อย..... 14

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 17

3 วิธีดำเนินการวิจัย..... 18

กรอบแนวคิดของการวิจัย..... 18

การศึกษาข้อมูลเพื่อเตรียมการวิจัย..... 20

การออกแบบและแนวทางการทดลอง..... 22

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... 22

วิธีดำเนินการทดลอง..... 27

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

4 ผลการทดลอง..... 30

ตอนที่ 1 วัดขนาดมวลและเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมโลหะทั้ง 2 ขนาด.. 30

ตอนที่ 2 ทดลองหาระยะการกระจัดในแนวระดับเพื่อเปรียบเทียบกับ
ระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณตามรูปแบบ
การเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง.... 31

ตอนที่ 3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับ
ระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง..... 35

5 สรุปผล อภิปรายผลการทดลอง และข้อแนะนำ..... 37

สรุปผล..... 37

อภิปรายผลการทดลอง..... 39

ข้อเสนอแนะ..... 39

บรรณานุกรม..... 41

ภาคผนวก..... 42

ภาคผนวก ก..... 43

ภาคผนวก ข..... 54

ภาคผนวก ค..... 56

ภาคผนวก ง..... 62

ภาคผนวก จ..... 65

ภาคผนวก ฉ..... 75

ประวัติย่อของผู้วิจัย..... 78

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4 – 1 ขนาดมวลและเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมตันโลหะ..... 30

ก – 1 ผลการทดลองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง..... 43

ก – 2 ผลการทดลองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง..... 45

ก – 3 ผลการทดลองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง..... 48

ก – 4 ผลการทดลองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง..... 50

ค – 1 วิธีคำนวณหาเวลา (t) ของวัตถุทรงกลมตันโลหะ..... 56

ง – 1 วิธีคำนวณหาระยะกระจัดในแนวระดับ (S_x) จากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง..... 62

ง – 2 วิธีคำนวณหาระยะกระจัดในแนวระดับ (S_x) จากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง..... 63

จ – 1 วิธีคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง..... 65

จ – 2 วิธีคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง..... 67

จ – 3 วิธีคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง..... 69

จ – 4 วิธีคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง..... 71

ฉ – 1 ระยะกระจัดในแนวดิ่งกับระยะกระจัดในแนวระดับยกกำลังสองของของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1..... 75

ฉ – 2 ระยะกระจัดในแนวดิ่งกับระยะกระจัดในแนวระดับยกกำลังสองของของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2..... 76

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2 – 1 การเลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง..... 4

2 – 2 การหมุนของวัตถุแข็งเกร็ง..... 5

2 – 3 ภาพตัดขวางของวัตถุที่กลิ้งไปบนพื้นราบ..... 5

2 – 4 ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมบนรางอลูมิเนียมในชุด
ทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์..... 7

2 – 5 การเคลื่อนที่ของวัตถุแบบโพรเจคไทล์สองชิ้น..... 9

2 – 6 การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ที่ความเร็วต้นทำมุม α_0 11

2 – 7 การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์โดยเริ่มจากจุดกำเนิดที่มุมเอียงต่างกัน
ขึ้นไปเหนือพื้นราบด้วยอัตราเร็วต้นที่เท่ากัน..... 14

2 – 8 การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ที่ความเร็วต้นขนานกับแนวราบ..... 14

3 – 1 กรอบแนวคิดการวิจัย..... 19

3 – 2 ชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์..... 23

3 – 3 ขาตั้งปรับระดับความสูง..... 23

3 – 4 วัตถุทรงกลมตันโลหะ..... 23

3 – 5 เครื่องชั่งดิจิตอล ที่มีค่าความละเอียด 0.01 g..... 24

3 – 6 เวอร์เนียคาลิเปอร์ที่มีค่าความละเอียด 0.02 mm..... 24

3 – 7 (ก) แอพพลิเคชั่นวัดระดับน้ำที่ชื่อว่า clinometer เวอร์ชั่น 4.3
(ข) หน้าจอแสดงการวัดระดับน้ำในแนวระดับ
(ค) หน้าจอแสดงการวัดระดับน้ำในแนวดิ่ง..... 25

3 – 8 กระดาษ A4 และ กระดาษคาร์บอน..... 26

3 – 9 ไม้บรรทัดและตลับเมตร..... 26

3 – 10 เทปกาวและกรรไกร..... 26

3 – 11 การประกอบรางอลูมิเนียมเข้ากับแป้นไม้ของชุดทดลองการเคลื่อนที่
แบบโพรเจคไทล์..... 27

3 – 12 การนำชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ประกอบติดกับ
ขาตั้งปรับระดับความสูง..... 28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4 – 1 ระยะการกระจัดในแนวระดับและระยะการกระจัดในแนวดิ่งของวัตถุ
ทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง..... 31
4 – 2 ระยะการกระจัดในแนวระดับและระยะการกระจัดในแนวดิ่งของวัตถุ
ทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง..... 32
4 – 3 ระยะการกระจัดในแนวระดับและระยะการกระจัดในแนวดิ่งของวัตถุ
ทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง..... 33
4 – 4 ระยะการกระจัดในแนวระดับและระยะการกระจัดในแนวดิ่งของวัตถุ
ทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนกลิ้ง.....34
4 – 5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับ
ยกกำลังสองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 35
4 – 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับ
ยกกำลังสองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 36

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายด้วยชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ในแบบเรียน รายวิชาเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 1 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 – 6 กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (สำหรับนักเรียนที่เน้นวิทยาศาสตร์) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551 ซึ่งจัดทำโดยสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) กระทรวงศึกษาธิการนั้น เป็นชุดทดลองประกอบด้วยรางอลูมิเนียมที่มีลักษณะลาดเอียง มีปลายรางด้านบนสูงกว่าปลายรางด้านล่าง 7 เซนติเมตร ประกอบกับแป้นไม้ซึ่งมีขนาด 24 × 30 เซนติเมตร และเป้าโลหะ ในการทดลองนั้นจะทดลองโดยปล่อยวัตถุทรงกลมตันโลหะเคลื่อนที่ตามรางอลูมิเนียมเข้าชนเป้าโลหะ ที่มีกระดาษคาร์บอนปิดทับกระดาษกราฟไว้ เมื่อวัตถุทรงกลมตันโลหะเคลื่อนที่ชนเป้าทำให้ปรากฏเป็นจุดบนกระดาษกราฟ และเมื่อมีการเลื่อนเป้าโลหะให้ห่างออกจากปลายรางอลูมิเนียมครั้งละ 1 เซนติเมตร จะมีจุดปรากฏบนกระดาษกราฟ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ โดยมีจุดประสงค์ของการทดลองคือ

1. ให้นักเรียนสามารถเข้าใจวิถีการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์โดยลากเส้นจากจุดต่าง ๆ ที่ปรากฏบนกระดาษกราฟ
2. ให้นักเรียนสามารถเขียนกราฟการกระจัดในแนวดิ่งกับการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง
3. ให้นักเรียนสามารถสรุปได้ว่าวิถีการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์เป็นเส้นโค้งพาราโบลา

จากชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ดังกล่าว ครูและนักเรียนสามารถอภิปรายผลหลังการทดลองได้ว่า

1. แนวการเคลื่อนที่ที่ปรากฏบนกระดาษกราฟเป็นแนวโค้ง
2. กราฟระหว่างการกระจัดในแนวดิ่งกับการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (x^2) มีลักษณะเป็นเส้นตรง ทำให้สรุปได้ว่า $y \propto x^2$ หรือ $y = kx^2$
3. สมการของเส้นกราฟเป็นสมการพาราโบลา

จากผลการอภิปรายการทดลองดังกล่าว ยังมีประเด็นการศึกษาที่น่าสนใจที่ผู้วิจัยต้องการศึกษา นั่นคือประเด็นเกี่ยวกับรูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันโลหะ 2 ขนาดบนรางอลูมิเนียมของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์

โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ผู้วิจัยต้องการศึกษาคือรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง โดยผู้วิจัยทำการทดลองใช้วัตถุทรงกลมตันโลหะ 2 ขนาด ให้เคลื่อนที่บนรางอลูมิเนียมของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ แล้วคำนวณหาอัตราเร็วของวัตถุทรงกลมตันโลหะที่หลุดจากปลายรางอลูมิเนียมด้านล่าง โดยใช้รูปแบบการคำนวณการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง ($v_T = \sqrt{2gh}$) และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง($v_R = \sqrt{\frac{2gh}{1+\frac{I_{cm}}{MR^2}}}$) นำค่าอัตราเร็วที่ได้มาคำนวณหาระยะการกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะเมื่อหลุดจากปลายรางอลูมิเนียม เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับผลการวัดระยะในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะทั้ง 2 ขนาด จากการทดลอง

โดยระยะการกระจัดของรูปแบบการเคลื่อนที่แบบใดที่มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าก็จะเป็นรูปแบบที่จะใช้อธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันโลหะบนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันโลหะ 2 ขนาด บนรางอลูมิเนียมของชุดการทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ศึกษา คือ รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง ว่ารูปแบบการเคลื่อนที่ใดสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ที่ควรจะเป็น

2. เพื่อศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดในแนวดิ่งกับการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (x^2) มีลักษณะเป็นเส้นตรง ตามสมการ $y \propto x^2$ หรือ $y = kx^2$

สมมติฐานของการวิจัย

รูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้งน่าจะเป็นรูปแบบที่จะใช้อธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันโลหะ 2 ขนาด บนรางอลูมิเนียมของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ และมีความสัมพันธ์กับระยะการกระจัดในแนวระดับตามทฤษฎีในแบบเรียน

ตัวแปรที่จะศึกษา

ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย

ตัวแปรต้น ได้แก่ ขนาดของวัตถุทรงกลมตันโลหะ ระยะความสูงของรางอลูมิเนียมบนชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์

ตัวแปรตาม ได้แก่ ระยะการกระจัดในแนวระดับวัดจากปลายรางถึงตำแหน่งที่วัตถุทรงกลมตันโลหะตกถึงพื้น

ตัวแปรควบคุม ได้แก่ ชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ ตำแหน่งในการปล่อยวัตถุทรงกลมตันโลหะ และมุมองศาของปลายรางอลูมิเนียม

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายรูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันโลหะที่เคลื่อนที่บนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์

2. สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าการกระจัดในแนวดิ่งกับการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (x^2) มีลักษณะเป็นเส้นตรง ตามความสัมพันธ์ $y \propto x^2$ หรือ $y = kx^2$

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันโลหะ 2 ขนาด ที่เคลื่อนที่หลุดจากปลายรางอลูมิเนียมของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ ตามแบบเรียนรายวิชาฟิสิกส์ เพิ่มเติม เล่ม 1 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 – 6 กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (สำหรับนักเรียนที่เน้นวิทยาศาสตร์) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551 ซึ่งจัดทำโดยสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) กระทรวงศึกษาธิการ โดยผู้วิจัยศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

และได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดในแนวดิ่งกับการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (x^2) มีลักษณะเป็นเส้นตรงตามสมการ $y \propto x^2$ หรือ $y = kx^2$

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังหัวข้อต่อไปนี้

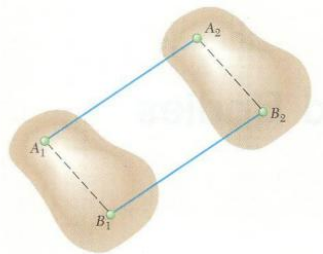
1. รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body)
2. กฎอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy)
3. การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ (Projectile Motion)
4. โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง

วัตถุแข็งเกร็ง คือ วัตถุที่มีระยะห่างระหว่างอนุภาคซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัตถุคงที่ ถึงแม้ว่าวัตถุนั้นจะอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงหรือทอร์ก (Torque) ที่กระทำกับวัตถุ ด้วยเหตุนี้ วัตถุแข็งเกร็งจึงยังคงมีรูปร่างเหมือนเดิมตลอดระยะเวลาที่มีการเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

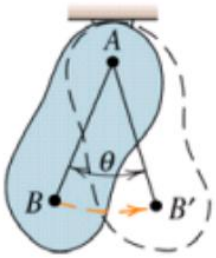
1. การเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง (Translational Motion) เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่ง โดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีลักษณะเป็นเส้นขนาน



ภาพที่ 2 – 1 การเลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง

(http://www.tm.kmutnb.ac.th/blackboard/PDF%20Dynamics/week10.pdf)

2. การเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotational Motion) เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุในลักษณะที่แต่ละอนุภาคจะอยู่ตามแนวหรือวิถีของวงกลมรอบแกนหมุน

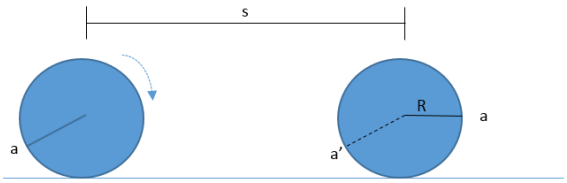


ภาพที่ 2 – 2 การหมุนของวัตถุแข็งเกร็ง

(http://www.tm.kmutnb.ac.th/blackboard/PDF%20Dynamics/week10.pdf)

การหมุนรอบแกนที่เคลื่อนที่

พิจารณาเฉพาะกรณีการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (Rolling Motion) คือ การเคลื่อนที่ที่ประกอบด้วยการเลื่อนตำแหน่งกับการหมุนบนพื้นราบของวัตถุแข็งเกร็งเนื้อเดียวที่มีรูปทรงสมมาตรสมมติให้วัตถุรูปทรงกระบอกอันหนึ่งมีรัศมี R กลิ้งไปบนพื้นระดับเป็นแนวตรง ดังภาพที่ 2 – 3 เมื่อกลิ้งผ่านไปได้ขนาดกระจัดเชิงมุมเป็น θ จุดศูนย์กลางมวลซึ่งเคลื่อนที่เป็นแนวตรงจะเคลื่อนที่ได้ระยะทาง $s = R\theta$ ขนาดของความเร็วและขนาดของความเร่งของจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง จะได้



ภาพที่ 2 – 3 ภาพตัดขวางของวัตถุที่กลิ้งไปบนพื้นราบ

พิจารณาที่จุดใด ๆ บนวัตถุแข็งเกร็งที่กำลังหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω ความเร็วเชิงเส้น v มีความสัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุมคือ

$$v_{cm} = \frac{ds}{dt} = R\frac{d\theta}{dt} = R\omega \qquad (2-1)$$

และเมื่อวัตถุหมุนด้วยความเร่งเชิงมุมคงที่ จุดที่อยู่บนวัตถุจะมีความเร่งในแนวเส้นสัมผัส (Tangential Acceleration, a_t) และความเร่งในแนวรัศมี (Radial Acceleration , a_r) ซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาณเชิงมุม คือ

$$a_t = \frac{dv}{dt} = R\frac{d\omega}{dt} = R\alpha \qquad (2-2)$$

$$a_r = \frac{v^2}{R} = R\omega^2 \qquad (2-3)$$

ดังนั้นความเร่งลัพธ์ที่จุดใด ๆ บนวัตถุแข็งเกร็งคือการรวมกันแบบเวกเตอร์ขององค์ประกอบความเร่งทั้งสองแนวซึ่งมีขนาดเท่ากับ

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_r^2} = \sqrt{R^2\alpha^2 + R^2\omega^2} = R\sqrt{\alpha^2 + \omega^2} \qquad (2-4)$$

พลังงานจลน์ของการหมุน

อนุภาคมวล m_i อยู่ห่างจากแกนหมุนเป็นระยะ R_i และมีอัตราเร็วเป็น v_i ที่ประกอบเป็นวัตถุแข็งเกร็งซึ่งกำลังหมุนรอบแกน z ด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω จะมีพลังงานจลน์เป็น

$$K_i = \frac{1}{2}m_i v_i^2 \qquad (2-5)$$

เนื่องจาก $v_i = R_i\omega$ ดังนั้นเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$K_i = \frac{1}{2}m_i R_i^2\omega^2 \qquad (2-6)$$

เมื่อรวมพลังงานจลน์ของอนุภาคทั้งหมดที่ประกอบขึ้นมาเป็นวัตถุแข็งเกร็งทำให้ได้พลังงานจลน์ของการหมุนเป็น

$$K = \sum_i K_i = \sum_i (\frac{1}{2}m_i R_i^2)\omega^2 = \frac{1}{2}(\sum_i m_i R_i^2)\omega^2 \qquad (2-7)$$

เมื่อ $I = \sum m_i R_i^2$ ซึ่งเรียกว่า โมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia) ดังนั้นจึงเขียนสมการพลังงานจลน์ได้เป็น

$$K = \frac{1}{2}I\omega^2 \qquad (2-8)$$

การเคลื่อนที่แบบหมุนและเลื่อนตำแหน่งของวัตถุแข็งเกร็งในขณะเดียวกัน

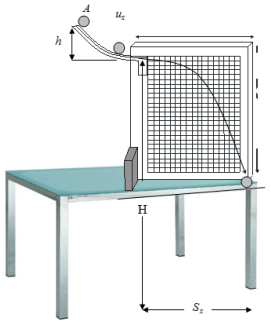
พิจารณาการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็งที่มีทั้งการหมุนและเลื่อนตำแหน่งในขณะเดียวกัน จากวัตถุทรงกลมที่มีการหมุนรอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลตามสมการ $v_{cm} = \omega R$ โดย v_{cm} คือความเร็วในการเลื่อนที่ของแกนหมุน และ ω คือความเร็วเชิงมุมของวัตถุรอบแกนหมุน โดยทุก ๆ จุดบนวัตถุจะมีเฉพาะการหมุนรอบแกนหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω เท่ากัน และมีพลังงานจลน์ของการหมุนรอบแกนหมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลคือ $\frac{1}{2}I\omega^2$ เมื่อ I คือโมเมนต์ความเฉื่อย ของวัตถุทรงกลมที่หมุนรอบแกนที่ขนานกับแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล ซึ่งก็คือจุดศูนย์กลางมวลของการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และพลังงานจลน์ในการเลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางมวลคือ $\frac{1}{2}mv^2$ เมื่อ v คือ ความเร็วของจุดศูนย์กลางมวล นั่นคือพลังงานทั้งหมดเขียนได้ว่า

$$K = \frac{1}{2}I\omega^2 + \frac{1}{2}mv^2 \qquad (2-9)$$

ถ้าวัตถุกลิ้งโดยไม่ไถล (Slipping) จะได้ว่า

$$K = \frac{1}{2}\left(\frac{I}{R^2} + m\right)v^2 \qquad (2-10)$$

กฎอนุรักษ์พลังงาน



ภาพที่ 2 – 4 ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมบนรางอลูมิเนียมในชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์

พิจารณาวัตถุรูปทรงกระบอกมวล M รัศมี R ที่กลิ้งจากพื้นเอียงสูง h ยาว x ขณะที่วัตถุรูปทรงกระบอกอยู่ด้านบนสุดของพื้นเอียงจะมีเฉพาะพลังงานศักย์มีค่าเท่ากับ Mgh เมื่อเคลื่อนที่ลงถึงพื้นล่าง พลังงานศักย์จะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ สามารถหาความเร็วเชิงเส้นของจุดศูนย์กลางมวลเมื่อทรงกระบอกเคลื่อนที่ลงมาถึงพื้นล่างได้คือ

$$Mgh = \frac{1}{2}Mv_{cm}^2 + \frac{1}{2}I_{cm}\omega^2 \qquad (2-11)$$

จากความสัมพันธ์ $v_{cm} = \omega R$ จะได้ว่า

$$Mgh = \frac{1}{2}Mv_{cm}^2 + \frac{1}{2}I_{cm}\frac{v_{cm}^2}{R^2} \qquad (2-12)$$

$$v_{cm}^2 = \frac{2Mgh}{M + \frac{I_{cm}}{R^2}} = \frac{2gh}{1 + \frac{I_{cm}}{MR^2}} \qquad (2-13)$$

$$v_{cm} = \sqrt{\frac{2gh}{1 + \frac{I_{cm}}{MR^2}}} \qquad (2-14)$$

หากพิจารณาการหาความเร็วของวัตถุจากการเลื่อนตำแหน่งจากด้านบนสุดของพื้นเอียง ถึงพื้นด้านล่าง จะได้ว่า

$$Mgh = \frac{1}{2}Mv_{cm}^2 \qquad (2-15)$$

$$v_{cm} = \sqrt{2gh} \qquad (2-16)$$

การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์

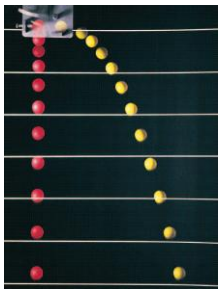
การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์เป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุใด ๆ ที่มีความเร็วต้นและเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดภายใต้อิทธิพลของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกและแรงต้านอากาศเท่านั้น เรียกเส้นทางของการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ว่า เส้นวิถี (Trajectory) ซึ่งเป็นรูปพาราโบลา (Parabola)

การวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์สามารถใช้แบบจำลองในทางอุดมคติได้ กล่าวคือ แทนวัตถุด้วยอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเคลื่อนที่ภายใต้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่มีขนาดและทิศทางคงตัว ส่วนผลของแรงต้านอากาศรวมไปถึงความโค้งของผิวโลกและการหมุนรอบตัวของโลกสามารถละทิ้งได้

การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ถูกจำกัดอยู่ในระนาบดิ่งที่ถูกกำหนดโดยทิศของความเร็วต้น เพราะความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีทิศในแนวดิ่งอย่างเดียว แรงโน้มถ่วงเคลื่อนโพรเจคไทล์ไปด้านข้างไม่ได้ การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์จึงเป็นการเคลื่อนที่ในสองมิติ เราเรียกระนาบการเคลื่อนที่ว่าระนาบ xy โดยแกน x เป็นแกนนอน และแกน y ชี้ขึ้นแนวดิ่ง สิ่งสำคัญของการวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์อยู่ที่การพิจารณาพิกัด x และ y แยกกันได้ องค์ประกอบ x ของความเร่งมีค่าเป็นศูนย์ และองค์ประกอบ y มีค่าคงตัวเท่ากับ $-g$ (โดยนิยาม g เป็นบวกเสมอ ในขณะที่จากทิศของพิกัดที่เราเลือก a_y มีค่าเป็นลบ) ดังนั้นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์เป็นการรวมกันของการเคลื่อนที่แนวนอนด้วยความเร็วคงตัว กับการเคลื่อนที่แนวดิ่งด้วยความเร่งคงตัว ดังภาพที่ 2 – 5 แสดงโพรเจคไทล์สองชิ้นที่มีการเคลื่อนที่แนว x ต่างกันแต่มีการเคลื่อนที่แนว y เหมือนกันทุกประการ โพรเจคไทล์ชิ้นหนึ่งถูกทิ้งลงมาจากหยุดนิ่ง และอีกชิ้นหนึ่งถูกปาออกไปในแนวระดับ แต่โพรเจคไทล์ทั้งสองชิ้นตกลงมาระยะทางเท่ากันในเวลาที่เท่ากัน ดังนั้นเราสามารถเขียนความสัมพันธ์เวกเตอร์ทั้งหมดสำหรับตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง โดยแยกสมการออกเป็นองค์ประกอบตามแนวนอนและแนวดิ่ง การเคลื่อนที่แท้จริงของโพรเจคไทล์เป็นการรวมกัน ของการเคลื่อนที่แยกกันนี้ องค์ประกอบของ $\vec{a}$ คือ

$$a_x = 0, \quad a_y = -g \qquad (2-17)$$

(การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ไม่คิดแรงต้านของอากาศ)



ภาพที่ 2 – 5 การเคลื่อนที่ของวัตถุแบบโพรเจคไทล์สองชิ้น

(http://serc.carleton.edu/sp/mnstep/activities/48582.html)

เรามักจะใช้ $g = 9.8\ m/s^2$ เนื่องจากความเร่งตามแกน x และความเร่งตามแกน y มีค่าคงตัวทั้งคู่ สมมติว่า $t = 0$ อนุภาคจะอยู่ที่จุด (x_0, y_0) และที่เวลานี้องค์ประกอบความเร็วมีค่าตั้งต้น v_{0x} และ v_{0y} องค์ประกอบของความเร่งคือ $a_x = 0$, $a_y = -g$ พิจารณาการเคลื่อนที่ตามแกน x ก่อน และแทน v ด้วย v_x v_0 ด้วย v_{0x} และ a ด้วย 0 พบว่า

$$v_x = v_{0x} \qquad (2-18)$$

และ

$$x = x_0 + v_0 t \qquad (2-19)$$

สำหรับแกน y แทน x ด้วย y, แทน v ด้วย v_y, แทน v_0 ด้วย v_{0y} และแทน a ด้วย $-g$ พบว่า

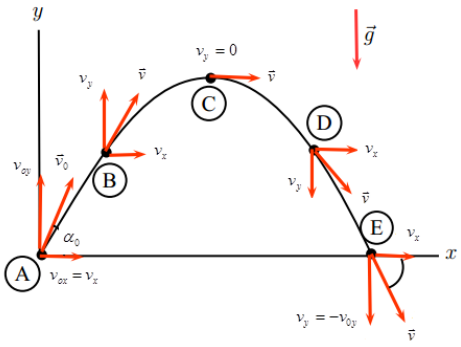
$$v_y = v_{oy} - gt \qquad (2-20)$$

$$y = y_0 + v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \qquad (2-21)$$

การเลือกตำแหน่งตั้งต้น (ที่เวลา $t = 0$) เป็นจุดกำเนิดมักทำให้เกิดปัญหาง่ายที่สุด ในกรณีนี้ $x_0 = y_0 = 0$ จุดนี้อาจเป็นตำแหน่งของลูกบอลขณะที่หลุดออกจากมือผู้โยน

ภาพที่ 2 – 6 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ความเร็วต้นทำมุม α_0 กับแนวราบ โดยเส้นทางของโพรเจคไทล์ซึ่งเริ่มเคลื่อนที่ (หรือผ่าน) จุดกำเนิด ที่ $t = 0$ โดยภาพที่ 2 – 6 แสดงตำแหน่ง ความเร็ว องค์ประกอบความเร็ว และความเร่งที่ลำดับเวลาต่าง ๆ ซึ่งมี

ช่วงเวลาห่างเท่ากัน a_x มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น v_x มีค่าคงตัว a_y มีค่าคงตัวและไม่เป็นศูนย์ ดังนั้น v_y มีค่าเปลี่ยนไปเท่ากันในช่วงเวลาที่เท่ากัน ที่จุดสูงสุดของเส้นวิถี $v_y = 0$



ภาพที่ 2 – 6 การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ที่ความเร็วต้นทำมุม α_0

แทนความเร็วต้น $\vec{v}_0$ ด้วยขนาด v_0 (อัตราเร็วต้น) และมุม α_0 ที่กระทำกับแกนบวก x ได้ ในรูปของปริมาณเหล่านี้ องค์ประกอบ v_{0x} และ v_{0y} ของความเร็วต้นคือ

$$v_{0x} = v_0 \cos\alpha_0, \qquad v_{0y} = v_0 \sin\alpha_0 \tag{2 – 22}$$

จากสมการ (2 – 18) ถึง (2 – 21) และ แทนค่า $x_0 = y_0 = 0$ จะได้ว่า

$$x = (v_0 \cos\alpha_0)t \quad \text{(การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์)} \tag{2 – 23}$$

$$y = (v_0 \sin\alpha_0)t - \frac{1}{2}gt^2 \text{ (การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์)} \tag{2 – 24}$$

$$v_x = v_0 \cos\alpha_0 \quad \text{(การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์)} \tag{2 – 25}$$

$$v_y = v_0 \sin\alpha_0 - gt \text{ (การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์)} \tag{2 – 26}$$

เราสามารถหาระยะทางที่เวลาใด ๆ ของโพรเจคไทล์จากจุดกำเนิด (ขนาดของเวกเตอร์ตำแหน่ง $\vec{r}$) ได้จาก

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \qquad (2-27)$$

อัตราเร็วของโพรเจคไทล์ (ขนาดของความเร็วของโพรเจคไทล์) ที่เวลาใด ๆ คือ

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \qquad (2-28)$$

ทิศของความเร็วในรูปของมุม α ที่ความเร็วทำกับแกนบวก x หาได้จาก

$$\tan\alpha = \frac{v_y}{v_x} \qquad (2-29)$$

เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดกำเนิด (0,0) ถึงตำแหน่งสูงสุดในแนวดิ่ง จากสมการ (2 – 26) $v_y = 0$ จะได้ว่า

$$t = \frac{v_0 \sin\alpha_0}{g} \qquad (2-30)$$

นำสมการ (2 – 30) แทนในสมการ (2 – 24) จะได้

$$y = (v_0 \sin\alpha_0)\left[\frac{v_0 \sin\alpha_0}{g}\right] - \frac{1}{2}g\left[\frac{v_0 \sin\alpha_0}{g}\right]^2 \qquad (2-31)$$

$$y = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{g} - \frac{1}{2}g\frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{g^2}$$

$$y = \frac{2v_0^2 g \sin^2\alpha - v^2 g \sin^2\alpha}{2g^2}$$

$$y = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g} \qquad (2-32)$$

จากสมการ (2 – 32) เป็นระยะทางสูงสุดที่วัตถุเคลื่อนที่นับจากจุดเริ่มต้น (A) ถึง (C) จุดสูงสุดระยะในแนวนอนจากจุดเริ่มต้น (A) ถึงตำแหน่ง (E) คือตำแหน่งในแนวราบของการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ ซึ่งใช้เวลาในการเคลื่อนที่เป็นสองเท่าของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จนถึงจุดสูงสุด นั่นคือเวลา $t = 2\frac{v_0 \sin\alpha_0}{g}$ จากสมการ (2 – 23) จะได้

$$x = (v_0 \cos\alpha_0)2\frac{v_0 \sin\alpha_0}{g} \qquad (2-33)$$

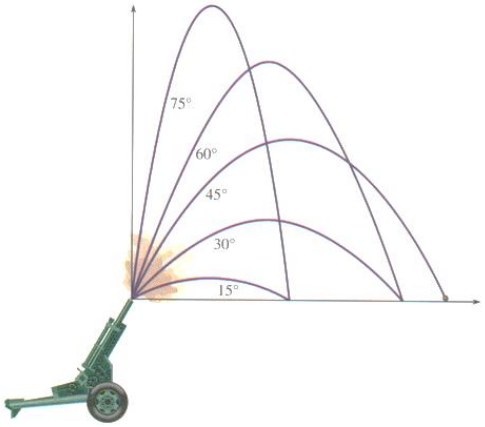
$$x = \frac{2v_0^2 \sin\alpha_0 \cos\alpha_0}{g}$$

จากเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ $\sin 2\theta = 2\sin\theta\ \cos\theta$ ทำให้เราสามารถเขียนระยะในแนวนอนให้อยู่ในรูปที่สั้นกว่าได้เป็น

$$x = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha_0}{g} \qquad (2-34)$$

โดยค่าระยะในแนวนอนมากที่สุดซึ่งจะสามารถคำนวณได้ คือ $x_{\max} = \frac{v_0^2}{g}$ ผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีเหตุผลเพราะว่า ค่ามากที่สุดของ $\sin 2\theta = 1$ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ $2\theta = 90°$ ดังนั้นค่า x จะมากที่สุดเมื่อ $\theta = 45°$

จากภาพที่ 2 – 7 แสดงให้เห็นเส้นทางของการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ที่แตกต่างกัน โดยแต่ละเส้นทางมีอัตราเร็วเท่ากันแต่มีมุมเอียงแตกต่างกันไป จากภาพจะเห็นได้ว่ามุม $\theta = 45°$ ทำให้ระยะในแนวราบมีค่ามากที่สุด นอกจากนี้สำหรับมุม θ ที่ไม่ใช่มุม $45°$ จะมีมุม θ สองมุมใด ๆ ที่ทำให้เกิดระยะในแนวราบซึ่งมีพิกัดฉาก $(R,0)$ เท่ากัน ตัวอย่างเช่นมุม $75°$ และ $15°$ ทำให้เกิดระยะในแนวราบเท่ากัน ซึ่งแน่นอนว่าระยะสูงสุดและเวลาของการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละมุมเอียงเหล่านั้นมีค่าแตกต่างกัน

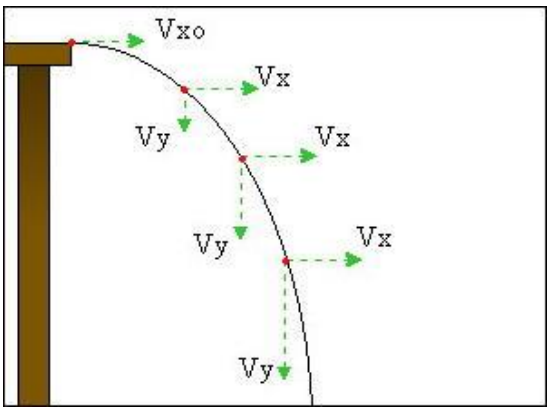


ภาพที่ 2 – 7 การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์โดยเริ่มจากจุดกำเนิดที่มุมเอียงต่างกันขึ้นไปเหนือพื้นราบด้วยอัตราเร็วต้นที่เท่ากัน

(http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/98/index98.htm)

การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์กรณีความเร็วต้นขนานกับแนวราบ

การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ของวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต้นขนานกับแนวราบ จะมีเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้ง ดังภาพที่ 2 – 8



ภาพที่ 2 – 8 การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ที่ความเร็วต้นขนานกับแนวราบ

(https://www.mansfieldct.org/Schools/MMS/staff/hand/Projectilemotion.htm)

จากภาพที่ 2 – 8 สมการระยะทางตามแนวดิ่งจะได้

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \qquad (2-35)$$

$y_0 = 0$ และ $v_0 = 0$ จะได้

$$y = \frac{1}{2} g t^2 \qquad (2-36)$$

ดังนั้นเวลาที่วัตถุใช้ในการเคลื่อนที่เป็นไปตามสมการ

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}} \qquad (2-37)$$

จากสมการ (2 – 17) จะได้ระยะทางในแนวราบ เมื่อ $x_0 = 0$

$$x = v_0 t \qquad (2-38)$$

นำค่า t จากสมการ (2 – 37) แทนในสมการ (2 – 38) จะได้

$$x = v_0 \sqrt{\frac{2y}{g}} \qquad (2-39)$$

การเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ที่กล่าวมาไม่คิดแรงต้านจากอากาศ แลแรงอื่น ๆ เช่น แรงลม ความแตกต่างของสนามโน้มถ่วง ซึ่งต่างก็มีผลต่อการเคลื่อนที่โพรเจคไทล์ทั้งสิ้น แนวการเคลื่อนที่ของวัตถุที่คิดถึงแรงต่าง ๆ เหล่านี้จึงมักไม่เป็นเส้นโค้งพาราโบลาที่สมบูรณ์ เช่น วัตถุที่ถูกยิงออกไป ถ้าไม่คิดแรงต้านอากาศแนวการเคลื่อนที่ของวัตถุจะเป็นเส้นโค้งพาราโบลา แต่ความจริงอากาศมีแรงต้านต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุ แต่มีผลน้อยมาก

โมเมนต์ความเฉื่อย

โมเมนต์ความเฉื่อยมีคำจำกัดความคล้ายกันกับคำจำกัดความของมวล โดยที่มวลหมายถึงค่าที่วัดความสามารถของวัตถุที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงความเร็ว (เชิงเส้น) ของวัตถุนั้น ๆ โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรอบแกนหมุนใด ๆ จึงหมายถึงค่าที่วัดความสามารถของวัตถุที่ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมรอบแกนหมุนดังกล่าว โมเมนต์ความเฉื่อยจึงเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า ความเฉื่อยเชิงมุม (Rotational Inertia)

การคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยเมื่ออนุภาคมวล m_1, m_2, m_3, …, m_n อยู่ห่างจากแกนหมุนเป็นระยะ r_1, r_2, $r_3, \ldots, r_n$ ตามลำดับ ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหมุนของระบบอนุภาคในกรณีนี้คือ

$$I = \sum m_i r_i^2 = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \ldots + m_n r_n^2 \qquad (2-40)$$

การคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยของระบบอนุภาคที่อยู่อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากวัตถุแข็งเกร็งประกอบด้วยอนุภาคมากมายอยู่ชิดกัน จึงถือได้ว่าเป็นเนื้อเดียวกัน ถ้าเราจินตนาการให้ก้อนวัตถุแข็งเกร็งดังกล่าวประกอบขึ้นด้วยปริมาตรเล็ก ๆ ซึ่งมีมวล Δm_i และอยู่ห่างจากแกนหมุนเป็นระยะ r_i ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหมุนของก้อนวัตถุแข็งเกร็งจึงหาได้จาก

$$I = \lim_{\Delta m_i \to 0} \sum r_i^2 \Delta m_i = \int r^2 dm \qquad (2-41)$$

ถ้าวัตถุแข็งเกร็งมีรูปทรงเป็นมิติเดียว ความหนาแน่นเชิงเส้นมีค่าความหนาแน่นเชิงเส้น (linear density) $\lambda = \dfrac{m}{L}$ นั่นคือ $dm = \lambda dL$ เมื่อ λ เป็นค่ามวลต่อหนึ่งหน่วยความยาว

ถ้าวัตถุแข็งเกร็งมีรูปทรงเป็นสองมิติ ความหนาแน่นเชิงพื้นผิว (surface density) มีค่า $\sigma = \dfrac{m}{A}$ นั่นคือ $dm = \sigma dA$ เมื่อ σ เป็นค่ามวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

ถ้าวัตถุแข็งเกร็งมีรูปทรงเป็นสามมิติ ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (volumetric density) มีค่า $\rho = \dfrac{m}{V}$ นั่นคือ $dm = \rho dV$ เมื่อ ρ เป็นค่ามวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

การคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยของกรณีวัตถุมิติเดียว เราสามารถกำหนดให้วัตถุวางตัวอยู่ตามแนวแกน x โดยระยะ x วัดจากจุดกำเนิด (จุดที่หมุนตัดผ่าน) แล้วหาปริพันธ์ตลอดความยาวของวัตถุ จะได้

$$I = \int \lambda x^2 dx \qquad (2-41)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าเป็นวัตถุที่มีรูปร่างแบนสองมิติที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับพื้นที่ เมื่อให้ r เป็นระยะจากแกนหมุนไปยังพื้นที่น้อยยิ่ง dA เราหาโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนดังกล่าวได้จาก

$$I = \int \sigma r^2 dA \qquad (2-42)$$

ส่วนกรณีวัตถุทรงสามมิติหมุนรอบแกน เมื่อให้ r เป็นระยะจากแกนหมุนไปยังปริมาตรน้อยยิ่ง dV เราหาโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนดังกล่าวได้ดังนี้

$$I = \int \rho r^2 dV \qquad (2-43)$$

การหาโมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกลมรอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของทรงกลม ทำได้โดยการแบ่งทรงกลมออกเป็นแผ่นจานบางหนา dx รัศมี r คือ

$$r = \sqrt{R^2 - x^2} \qquad (2-44)$$

ปริมาตรของแผ่นทรงกลมคือ

$$dV = \pi r^2 dx = \pi(R^2 - x^2)dx \qquad (2-45)$$

มวลของแผ่นทรงกลมคือ

$$dm = \rho dV = \pi\rho(R^2 - x^2)dx \qquad (2-46)$$

โมเมนต์ความเฉื่อยของแผ่นจานรัศมี r และมวล dm คือ

$$\begin{aligned} dI = \frac{1}{2} r^2 dm &= \frac{1}{2}(\sqrt{R^2 - x^2})^2 \left[\pi\rho(R^2 - x^2)dx\right] \\ &= \frac{\pi\rho}{2}(R^2 - x^2)^2 dx \end{aligned} \qquad (2-47)$$

จากความสมมาตร I ของทรงกลมมีค่าเป็นสองเท่าของค่านี้คือ

$$I = (2)\frac{\pi\rho}{2}\int_0^R (R^2 - x^2)^2 dx \qquad (2-48)$$

$$I = \frac{8\pi\rho}{15} R^5 \qquad (2-49)$$

มวล M ของทรงกลมปริมาตร $V = \frac{4\pi R^3}{3}$ คือ

$$M = \rho V = \frac{4\pi\rho R^3}{3} \qquad (2-50)$$

โดยการเปรียบเทียบนิพจน์สำหรับ I และ M จะได้ว่า

$$I = \frac{2}{5}MR^2 \qquad (2-51)$$

รัศมีไจเรชัน (Radius of gyration)

พิจารณาวัตถุรูปทรงกลมตัน โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนมีค่า

จากสมการ (2 – 51) $I = \frac{2}{5}MR^2 = M(\frac{2R^2}{5})$

พบว่าค่า $\frac{2R^2}{5}$ เป็นค่าคงที่คงหนึ่งของแต่ละกรณี สมมติให้เท่ากับ k โดยที่ k เป็นระยะคงที่ เมื่อพิจารณาอนุภาคเล็ก ๆ มวล M กำลังเคลื่อนที่รอบแกนคงที่โดยห่างจากแกนเป็นระยะ k จะพบว่าโมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าเป็น

$$I = Mk^2 \qquad (2-52)$$

ดังนั้นในกรณีวัตถุขนาดใหญ่เป็นรูปทรงกลม ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยอาจหาได้จากผลคูณระหว่างมวลกับกำลังสองของระยะห่างจากแกนหมุนค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งเสมือนว่าเอามวลของวัตถุเกร็งทั้งก้อนปั้นให้เป็นก้อนเล็กมาก ๆ เกือบเป็นจุดแล้วให้เคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบแกนหมุนด้วยรัศมี k ระยะ k เรียกว่า รัศมีไจเรชัน (Radius of Gyration)

ดังนั้น รัศมีไจเรชันของวัตถุรูปทรงกลมตันจึงเป็น $k = \frac{R}{\sqrt{2}}$ (2 – 53)

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Guner Tural (2013) ศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปพลังงานของพลังงานศักย์ยืดหยุ่น และพลังงานจลน์ของการหมุนของวัตถุที่เคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์

Paola La Rocca and Francesco Riggi (2009) ศึกษาการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ที่ไม่มีแรงใด ๆ กระทำต่อวัตถุนอกจากแรงโน้มถ่วงและแรงเสียดทานในอากาศ

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันโลหะ 2 ขนาด ที่มีอัตราเร็วที่หลุดจากปลายรางอลูมิเนียมด้านล่าง ตามรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้งของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ ตามแบบเรียน รายวิชาฟิสิกส์เพิ่มเติม เล่ม 1 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 – 6 กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (สำหรับนักเรียนที่เน้นวิทยาศาสตร์) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551 ซึ่งจัดทำโดยสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) กระทรวงศึกษาธิการ กับระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณ เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการทดลอง และได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (x^2) มีลักษณะเป็นเส้นตรง สัมพันธ์กันตามสมการ $y \propto x^2$ หรือ $y = kx^2$ โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังนี้

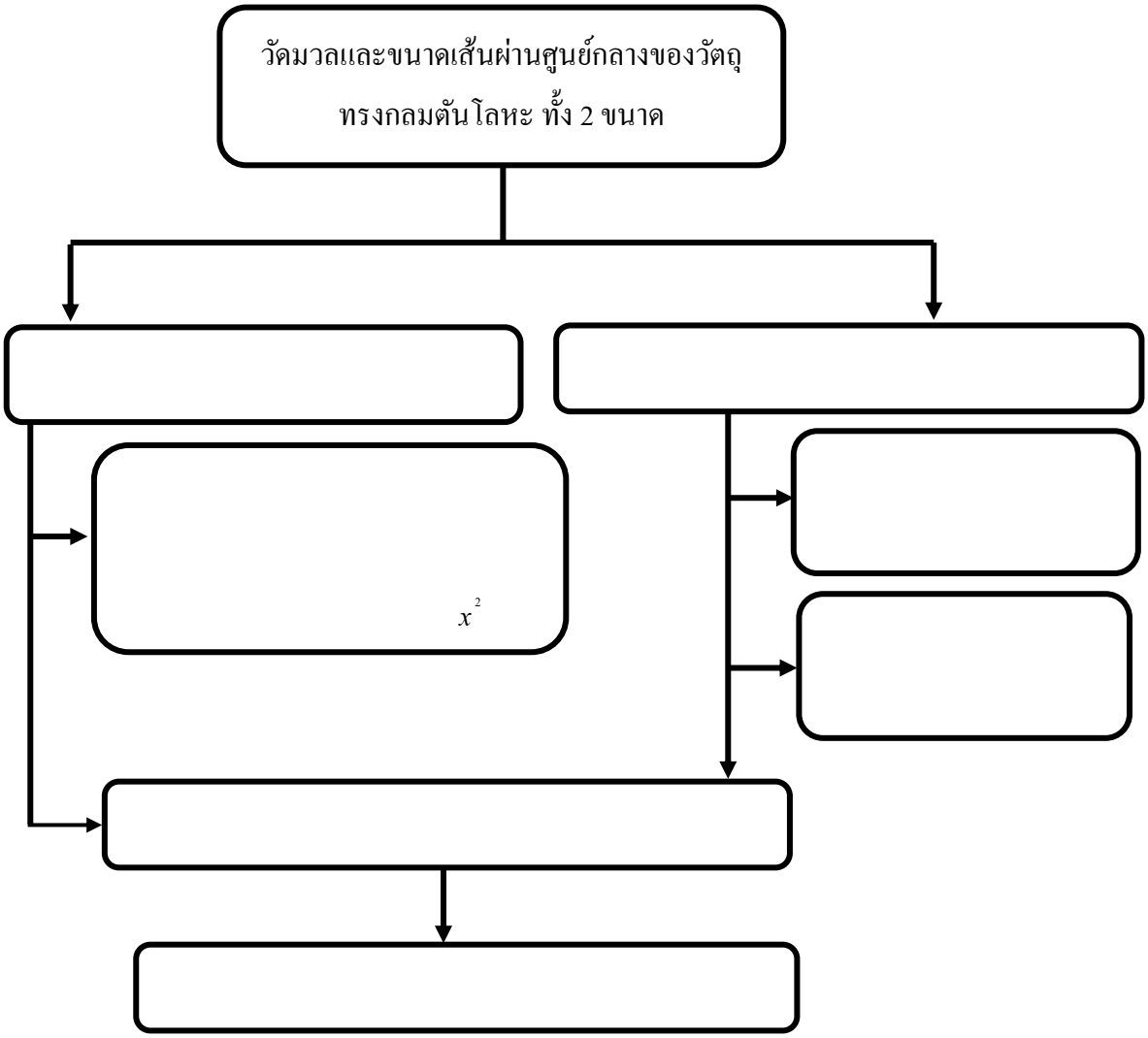
กรอบแนวคิดการวิจัย

ผู้วิจัยได้แบ่งการดำเนินงานวิจัยนี้เป็น 3 ตอน คือ

ตอนที่ 1 : วัดมวลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมตันโลหะทั้ง 2 ขนาด

ตอนที่ 2 : ทดลองหาระยะการกระจัดในแนวระดับเพื่อเปรียบเทียบกับระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณ ตามรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

ตอนที่ 3 : ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (x^2)



ภาพที่ 3 – 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

การศึกษาข้อมูลเพื่อเตรียมการวิจัย

ในการทำการวิจัยได้ศึกษาจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงวิธีการคำนวณหาระยะการกระจัดในแนวระดับจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (x^2) ตามสมการ $y \propto x^2$ หรือ $y = kx^2$ โดยมีวิธีการดังนี้

การคำนวณหาระยะการกระจัดในแนวระดับจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง

การคำนวณหาระยะการกระจัดในแนวระดับจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง (S_x) จากสมการ

$$S_x = v_T t \qquad (3-1)$$

โดย v_T คือ อัตราเร็วของวัตถุทรงกลมตันโลหะที่หลุดจากปลายรางอลูมิเนียมด้านล่างของรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง

การคำนวณหาอัตราเร็วของวัตถุทรงกลมตันโลหะที่หลุดจากปลายรางอลูมิเนียมด้านล่างของรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง (v_T) คำนวณได้จากสมการ $Mgh = \frac{1}{2}Mv^2$ จะได้ สมการของอัตราเร็วคือ

$$v = \sqrt{2gh} \qquad (3-2)$$

t คือ เวลาที่วัตถุทรงกลมตันโลหะใช้ในการเคลื่อนที่จากปลายรางอลูมิเนียมด้านล่างถึงพื้น

การคำนวณหาเวลาใช้สมการการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง $H = H_0 + v_0 t + \frac{1}{2}gt^2$ เมื่อ $H_0 = 0$ และ $v_0 = 0$ จะได้ สมการของเวลา คือ

$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}} \qquad (3-3)$$

นำสมการ (3 – 2) และ (3 – 3) แทนในสมการ (3 – 1)

ดังนั้นจะได้สมการระยะการกระจัดในแนวระดับจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง (S_x) คือ

$$S_X = \left(\sqrt{2gh}\right)\left(\sqrt{\frac{2H}{g}}\right) \qquad (3-4)$$

การคำนวณหาระยะการกระจัดในแนวระดับจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

การคำนวณระยะการกระจัดในแนวระดับจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (S_x) จากสมการ

$$S_X = v_R t \qquad (3-5)$$

โดย v_R คืออัตราเร็วของวัตถุทรงกลมตันโลหะที่หลุดจากปลายรางอลูมิเนียมด้านล่างของรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้งคำนวณได้จาก $Mgh = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{2}I\frac{v^2}{R^2}$ จะได้สมการของอัตราเร็วคือ

$$v_R = \sqrt{\frac{2gh}{1+\frac{I}{MR^2}}} \qquad (3-6)$$

โดย I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกลมตัน มีค่าเท่ากับ $I = \frac{2}{5}MR^2$

นำไปแทนในสมการ (3 – 6) ดังนั้นสมการของอัตราเร็วคือ

$$v_R = \sqrt{\frac{10gh}{7}} \qquad (3-7)$$

t คือ เวลาที่วัตถุทรงกลมตันโลหะใช้ในการเคลื่อนที่จากปลายรางอลูมิเนียมด้านล่างถึงพื้นซึ่งมีค่าตามสมการ (3 – 3)

นำสมการ (3 – 7) และ (3 – 3) แทนในสมการ (3 – 5)

ดังนั้นจะได้สมการระยะการกระจัดในแนวระดับจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (S_X) คือ

$$S_X = \left(\sqrt{\frac{10gh}{7}}\right)\left(\sqrt{\frac{2H}{g}}\right) \qquad (3-8)$$

การออกแบบและแนวทางการทดลอง

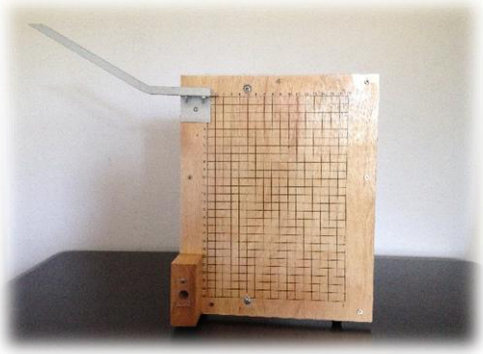
งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองหารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันโลหะ 2 ขนาด บนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ตามแบบเรียนในรายวิชาฟิสิกส์เพิ่มเติม เล่ม 1 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 – 6 โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ศึกษาคือ รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง ผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมตันโลหะโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ และมวลของวัตถุโดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอล หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทดลองปล่อยวัตถุทรงกลมตันโลหะ 2 ขนาดบนรางอลูมิเนียมของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ ที่ระดับความสูงที่แตกต่างกัน โดยการปรับระดับความสูงนั้นทำโดยนำชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ไปประกอบติดกับขาตั้งที่สามารถปรับระดับความสูงได้ แล้ววัดระยะการกระจัดในแนวระดับ เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนกับระยะการกระจัดในแนวระดับที่คำนวณโดยรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และระยะการกระจัดในแนวระดับที่คำนวณโดยรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

หลังจากนั้นได้ศึกษาความสัมพันธ์ของระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (x^2) ตามสมการ $y \propto x^2$ หรือ $y = kx^2$

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

1. ชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ (แผ่นไม้กระดานขนาด 24 cm × 30 cm และรางอลูมิเนียม) ดังภาพที่ 3 – 2
2. ขาตั้งปรับระดับความสูง ดังภาพที่ 3 – 3
3. วัตถุทรงกลมตันโลหะ 2 ขนาด ดังภาพที่ 3 – 4
4. เครื่องชั่งดิจิตอล ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น PB602 – S ที่มีความละเอียด 0.01 g ดังภาพที่ 3 – 5
5. เวอร์เนียคาลิเปอร์ ดังภาพที่ 3 – 6
6. ที่วัดระดับน้ำ (ในการทดลองใช้ แอพพลิเคชั่นที่ชื่อว่า Clinometer เวอร์ชั่น 4.3) ดังภาพที่ 3 – 7
7. กระดาษ A4 และ กระดาษคาร์บอน ดังภาพที่ 3 – 8
8. ไม้บรรทัด และ ตลับเมตร ดังภาพที่ 3 – 9
9. เทปกาว และ กรรไกร ดังภาพที่ 3 – 10



ภาพที่ 3 – 2 ชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์

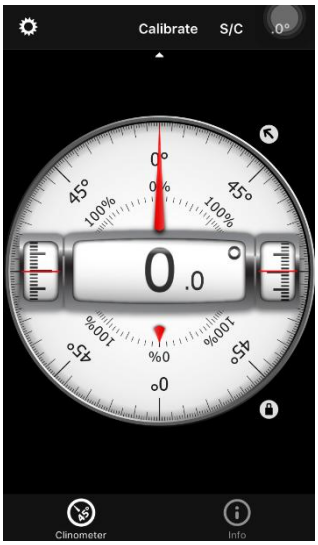
ภาพที่ 3 – 3 ขาตั้งปรับระดับความสูง

ภาพที่ 3 – 4 วัตถุทรงกลมตันโลหะ

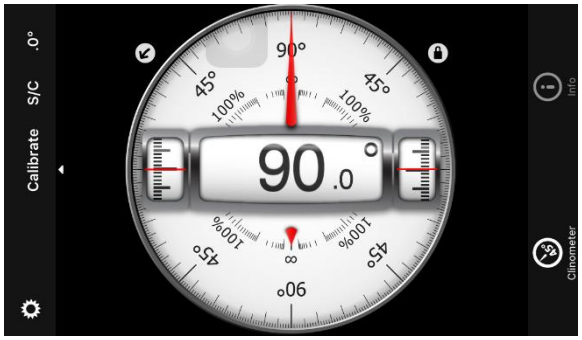
ภาพที่ 3 – 5 เครื่องชั่งดิจิตอล ที่มีค่าความละเอียด 0.01 g

ภาพที่ 3 – 6 เวอร์เนียคาลิเปอร์ ที่มีค่าความละเอียด 0.02 mm

(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3 – 7 (ก) แอพพลิเคชั่นวัดระดับน้ำ ที่ชื่อว่า Clinometer เวอร์ชั่น 4.3
(ข) หน้าจอแสดงการวัดระดับน้ำในแนวระดับ และ
(ค) หน้าจอแสดงการวัดระดับน้ำในแนวดิ่ง

ภาพที่ 3 – 8 กระดาษ A4 และ กระดาษคาร์บอน

ภาพที่ 3 – 9 ไม้บรรทัดและตลับเมตร

ภาพที่ 3 – 10 เทปกาวและกรรไกร

วิธีดำเนินการทดลอง

วิธีดำเนินการทดลองสำหรับการศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันโลหะ 2 ขนาด บนรางอลูมิเนียมของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองและมีรายละเอียดดังนี้

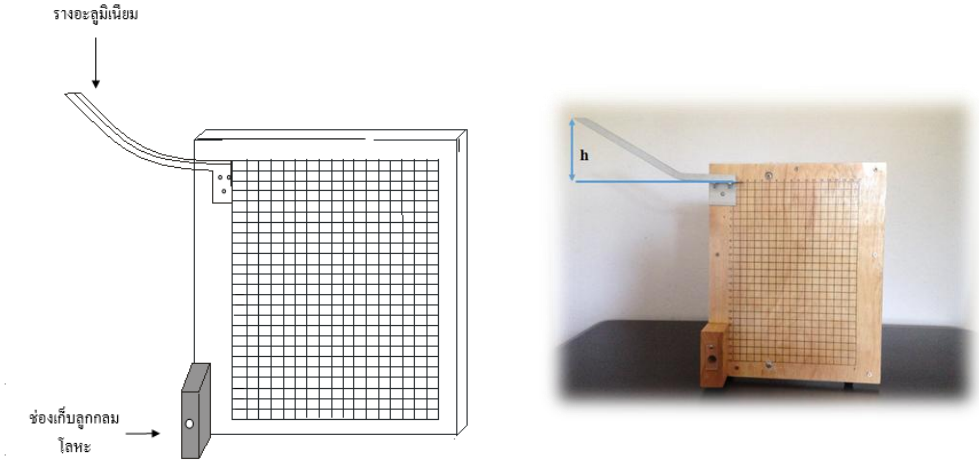
ตอนที่ 1 วัดมวลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมตันโลหะทั้ง 2 ขนาด

1. ชั่งมวลของวัตถุทรงกลมตันโลหะโดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอลที่มีค่าความละเอียด 0.01 กรัม

2. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมตันโลหะโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ ค่าความละเอียด 0.02 มิลลิเมตร

ตอนที่ 2 ทดลองหาระยะการกระจัดในแนวระดับเพื่อเปรียบเทียบกับระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณ ตามรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

1. ประกอบรางอลูมิเนียมเข้ากับแป้นไม้ของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ โดยให้รางอลูมิเนียมตอนล่างอยู่ในแนวระดับขนานกับพื้น วัดระยะจากปลายรางอลูมิเนียมด้านบนถึงปลายรางอลูมิเนียมด้านล่าง



ภาพที่ 3 – 11 การประกอบรางอลูมิเนียมเข้ากับแป้นไม้ของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์

2. นำชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ที่ประกอบรางอลูมิเนียมไปประกอบติดเข้ากับขาตั้งปรับระดับความสูง โดยเริ่มที่ตำแหน่งต่ำสุด

ภาพที่ 3 – 12 การนำชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ประกอบติดกับขาตั้งปรับระดับความสูง

3. ปิดกระดาษคาร์บอนทับบนกระดาษ A4 สีขาว นำไปยึดติดบนพื้นที่ทำการทดลอง

4. วางวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 บนรางอลูมิเนียมที่ปลายรางด้านบน แล้วปล่อยวัตถุทรงกลมตันโลหะให้เคลื่อนที่ลงมาตามรางอลูมิเนียม เมื่อวัตถุทรงกลมตันโลหะหลุดจากปลายรางอลูมิเนียมในแนวระดับจะตกลงบนพื้นที่มีกระดาษคาร์บอนปิดทับกระดาษ A4 สีขาวไว้ เมื่อยกกระดาษคาร์บอนขึ้น จะเห็นจุดดำบนกระดาษ A4 สีขาว ใช้ไม้เมตรวัดระยะกระจัดในแนวระดับ

5. ทำการทดลองซ้ำ โดยแต่ละครั้งที่ทดลองต้องวางวัตถุทรงกลมตันโลหะที่ตำแหน่งเดิม แต่มีการปรับชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ให้มีความสูงจากพื้นครั้งถัดไปครั้งละ 1 cm

6. ทำการทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนเป็นวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2

7. คำนวณหาระยะการกระจัดในแนวระดับจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และระยะการกระจัดในแนวระดับจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

8. เปรียบเทียบค่าระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการทดลองของวัตถุทรงกลมโลหะขนาดที่ 1 กับระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

9. เปรียบเทียบค่าระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการทดลองของวัตถุทรงกลมโลหะขนาดที่ 2 กับระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

ตอนที่ 3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (x^2)

1. นำระยะการกระจัดในแนวดิ่งจากการทดลองในตอนที่ 2 เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (x^2) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าว

2. สรุปผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในงานวิจัยเรื่องการศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันโลหะ 2 ขนาดบนรางอลูมิเนียมของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ ผู้วิจัยได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานเป็น 3 ตอน คือ

ตอนที่ 1 วัดมวลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมตันโลหะทั้ง 2 ขนาด

ตอนที่ 2 คือ ทดลองหาระยะการกระจัดในแนวระดับเพื่อเปรียบเทียบกับระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณ ตามรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง และ

ตอนที่ 3 คือ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (x^2) ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

ตอนที่ 1 วัดมวลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมตันโลหะทั้ง 2 ขนาด

การวัดขนาดมวลและเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมตันโลหะบันทึกได้ดังตารางที่ 4 – 1

ตารางที่ 4 – 1 ขนาดมวลและเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมตันโลหะ

วัตถุทรงกลมตันโลหะ	มวล (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)
ขนาดที่ 1	3.52	9.52
ขนาดที่ 2	5.59	11.18

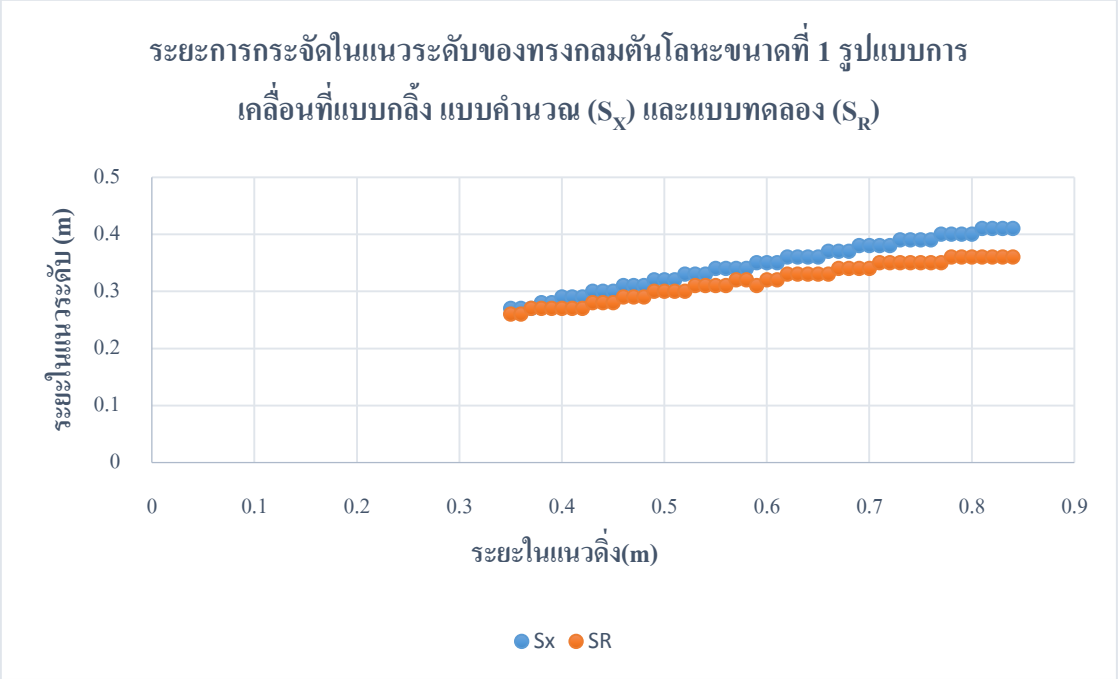
ตอนที่ 2 ทดลองหาระยะการกระจัดในแนวระดับเพื่อเปรียบเทียบกับระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณ ตามรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

จากการทดลองปล่อยวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 (ลูกเล็ก) บนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์โดยเลื่อนระดับความสูงจากพื้นครั้งละ 1 cm จดสุดแป้นไม้ยกระดับความสูง โดยรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง ได้ข้อมูลจากการตามตารางที่ ก – 1 และแสดงผล ค่าระยะการกระจัดในแนวระดับและระยะการกระจัดในแนวดิ่ง ดังกราฟในภาพที่ 4 – 1

ภาพที่ 4 – 1 ระยะการกระจัดในแนวระดับและระยะการกระจัดในแนวดิ่งของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง

จากผลการทดลองดังภาพที่ 4 – 1 จะสังเกตได้ว่า ระยะการกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่งจากการคำนวณ (S_X) มีค่าสูงกว่าระยะการกระจัดในแนวระดับจากการทดลอง (S_T) และค่าที่ได้มีความแตกต่างกันมาก เมื่อระยะการกระจัดในแนวดิ่งมีค่าเพิ่มขึ้น ระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลองแตกต่างกันเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง 0.06 – 0.12 m

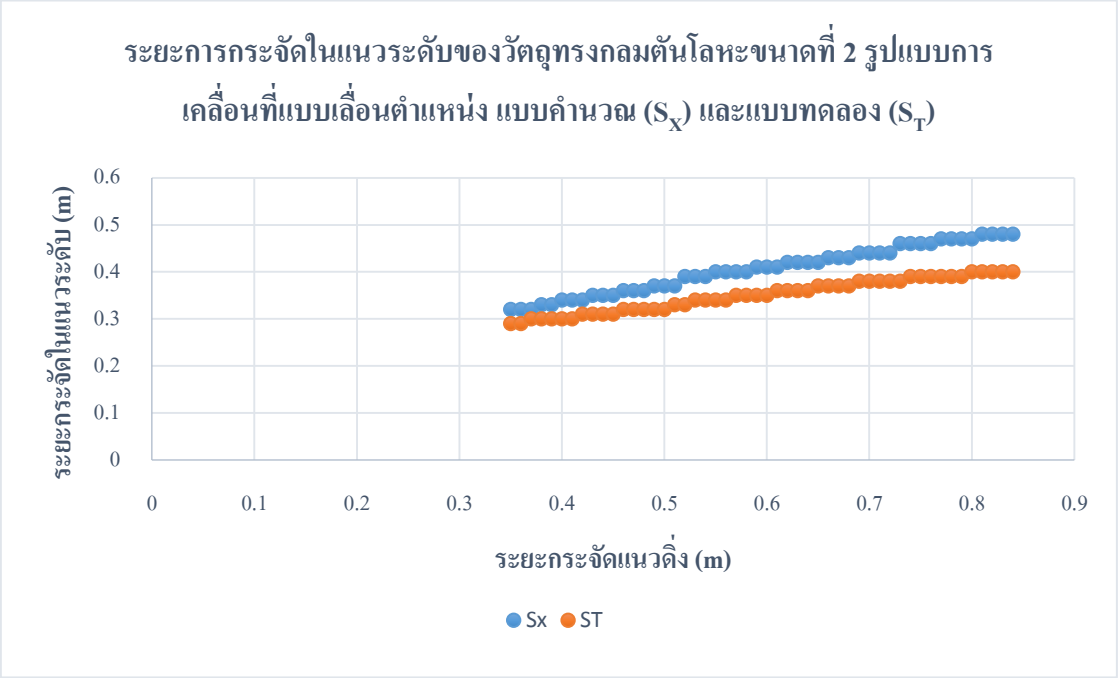
จากการทดลองปล่อยวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 (ลูกเล็ก) บนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์โดยเลื่อนระดับความสูงจากพื้นครั้งละ 1 cm จนสุดแป้นไม้ยกระดับความสูงโดยรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง ได้ข้อมูลจากการทดลองตามตารางที่ ก – 2 และแสดงผลค่าระยะการกระจัดในแนวระดับและระยะการกระจัดในแนวดิ่ง ดังกราฟในภาพที่ 4 – 2



ภาพที่ 4 – 2 ระยะกระจัดในแนวระดับและระยะการกระจัดในแนวดิ่งของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

จากผลการทดลองดังภาพที่ 4 – 2 จะสังเกตได้ว่า ระยะการกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้งจากการคำนวณ (S_X) มีค่าสูงกว่าระยะการกระจัดในแนวระดับจากการทดลอง (S_R) และค่าที่ได้มีความแตกต่างกันค่อนข้างน้อย เมื่อระยะการกระจัดในแนวดิ่งเพิ่มขึ้น ระยะการกระจัดในแนวระดับจากการคำนวณและจากการทดลองแตกต่างกันเพิ่มขึ้น โดยมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง 0.01 – 0.05 m

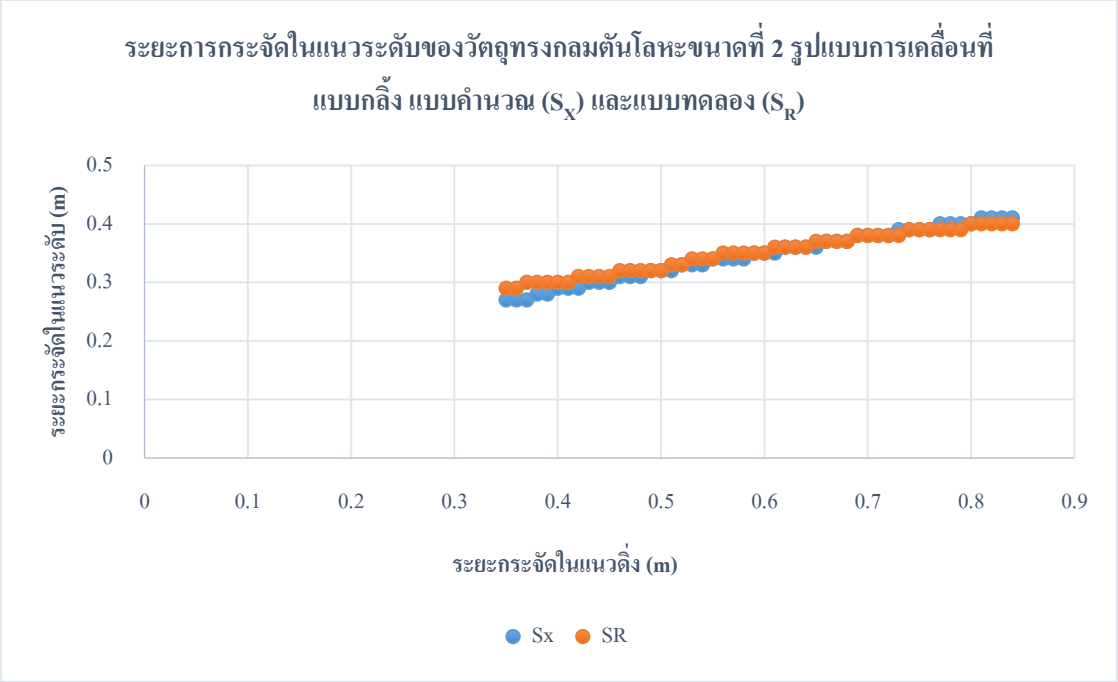
จากการทดลองปล่อยวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 (ลูกใหญ่) บนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์โดยเลื่อนระดับความสูงจากพื้นครั้งละ 1 cm จนสุดแป้นไม้ยกระดับความสูง โดยรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง ได้ข้อมูลจากการทดลองตามตารางที่ ก – 3 และแสดงผลค่าระยะการกระจัดในแนวระดับและระยะการกระจัดในแนวดิ่ง ดังกราฟที่แสดงในภาพที่ 4 – 3



ภาพที่ 4 - 3 ระยะการกระจัดในแนวระดับและระยะการกระจัดในแนวดิ่งของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง

จากผลการทดลองดังภาพที่ 4 – 3 จะสังเกตได้ว่า ระยะการกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่งจากการคำนวณ (S_X) มีค่าสูงกว่าระยะการกระจัดในแนวระดับจากการทดลอง (S_T) และค่าที่ได้มีความแตกต่างค่อนข้างมากเมื่อระยะการกระจัดในแนวดิ่งเพิ่มขึ้น ระยะการกระจัดในแนวระดับจากการคำนวณและจากการทดลองแตกต่างกันเพิ่มขึ้น โดยมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง 0.03 – 0.08 m

จากการทดลองปล่อยวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 (ลูกใหญ่) บนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์โดยเลื่อนระดับความสูงจากพื้นครั้งละ 1 cm จนสุดแป้นไม้ยกระดับความสูง โดยรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง ได้ข้อมูลจากการทดลองตามตารางที่ ก – 4 และแสดงผลค่าระยะการกระจัดในแนวระดับและระยะการกระจัดในแนวดิ่ง ดังกราฟในภาพที่ 4 – 4

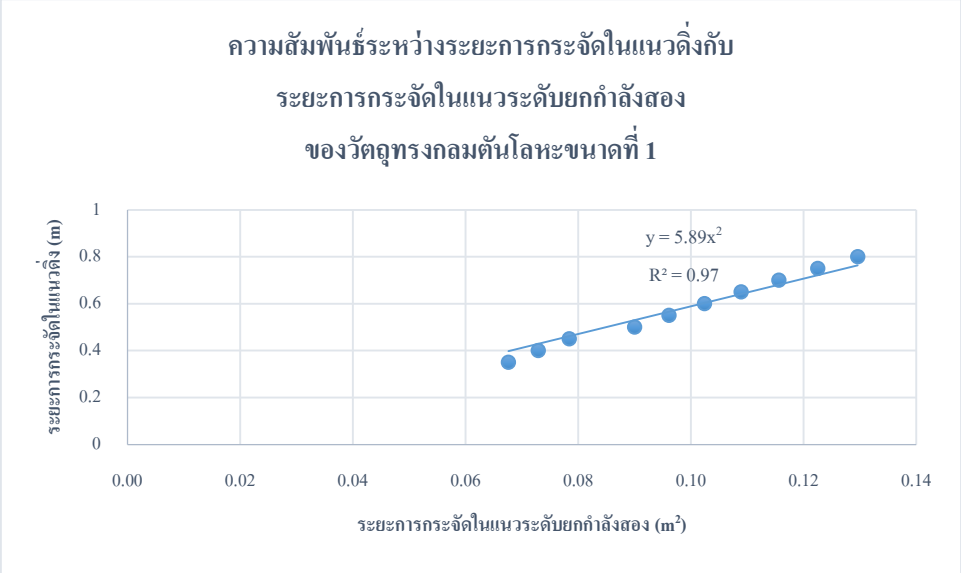


ภาพที่ 4 – 4 ระยะกระจัดในแนวระดับและระยะการกระจัดในแนวดิ่งของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

จากผลการทดลองดังภาพที่ 4 – 4 จะสังเกตได้ว่า ระยะการกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้งจากการคำนวณ (S_X) และระยะการกระจัดในแนวระดับจากการทดลอง (S_R) มีความแตกต่างกันน้อยมาก เมื่อระยะการกระจัดในแนวดิ่งเพิ่มขึ้น ระยะการกระจัดในแนวระดับจากการคำนวณและจากการทดลองมีความแตกต่างกันอยู่ในช่วง 0.01 – 0.03 m

ตอนที่ 3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (x^2)

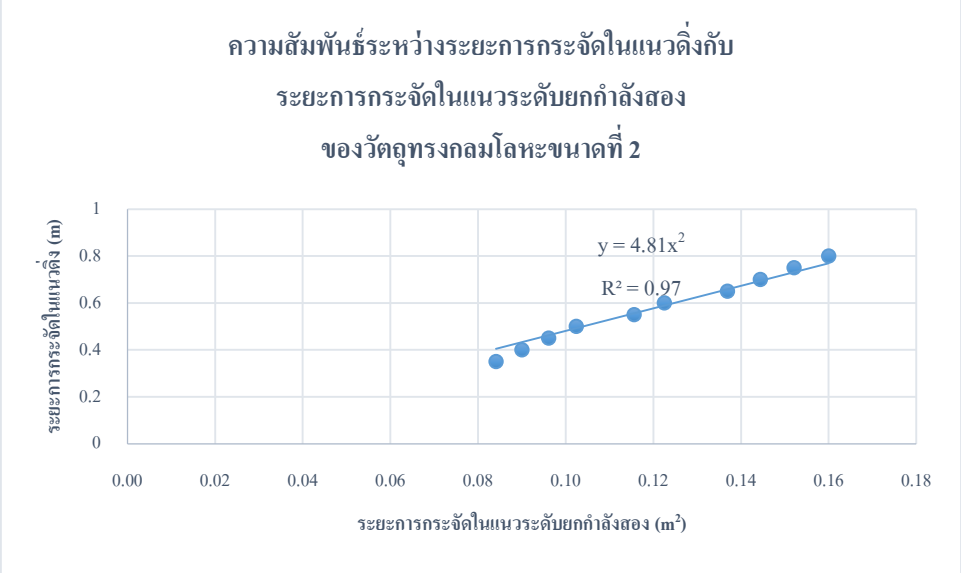
จากการทดลองปล่อยวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 (ลูกเล็ก) บนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์โดยเลื่อนระดับความสูงจากพื้นครั้งละ 1 cm จนสุดแป้นไม้ยกระดับความสูงได้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง ตามตารางที่ ฉ – 1 และแสดงผลค่าระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับ ดังกราฟที่ 4 – 5



ภาพที่ 4 – 5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1

จากผลการทดลองดังภาพที่ 4 – 5 จะสังเกตได้ว่า ระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 มีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นตรง และมีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.97

จากการทดลองปล่อยวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 (ลูกใหญ่) บนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์โดยเลื่อนระดับความสูงจากพื้นครั้งละ 1 cm จนสุดแป้นไม้ยกระดับความสูงได้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง ตามตารางที่ ฉ – 2 และแสดงผลค่าระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับ ดังกราฟที่ 4 – 6



ภาพที่ 4 – 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2

จากผลการทดลองดังภาพที่ 4 – 6 จะสังเกตได้ว่า ระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 มีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นตรง และมีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.97

บทที่ 5
สรุปผล อภิปรายผลการทดลอง และข้อแนะนำ

จากการทดลองเพื่อศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันโลหะ 2 ขนาด บนรางอลูมิเนียมของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ โดยการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ระยะการกระจัดในแนวระดับจากการทดลอง กับ ระยะการกระจัดในแนวระดับจากการคำนวณโดยรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และระยะการกระจัดในแนวระดับจากการคำนวณโดยรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระจัดในแนวดิ่งกับระยะกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง สามารถสรุปผลและอภิปรายผลรวมทั้งให้ข้อเสนอแนะได้ดังนี้

สรุปผล อภิปรายผลการทดลอง และข้อแนะนำ

ตอนที่ 1 วัดมวลและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมตันโลหะทั้ง 2 ขนาด

วัตถุทรงกลมโลหะขนาดที่ 1 มีมวล 3.52 g และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.52 mm

วัตถุทรงกลมโลหะขนาดที่ 2 มีมวล 5.59 g และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.18 mm

ตอนที่ 2 ทดลองหาระยะการกระจัดในแนวระดับเพื่อเปรียบเทียบกับระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณ ตามรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

วัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 มีระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณ โดยรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 21.45 %

วัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 มีระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณ โดยรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 8.15 %

วัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 มีระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณ โดยรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 13.31 %

วัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 มีระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับระยะการกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณ โดยรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.34 %

ตอนที่ 3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (x^2)

ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 และขนาดที่ 2 ที่ปล่อยบนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์โดยเลื่อนระดับความสูงจากพื้นครั้งละ 1 cm จนสุดแป้นไม้ยกระดับความสูง มีค่า สหสัมพันธ์ $R^2 = 0.97$ แสดงว่าระยะการกระจัดในแนวดิ่งสัมพันธ์กับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง เป็นแบบเชิงเส้นตรง และมีค่าสหสัมพันธ์เกือบเท่ากับ 1

สรุปได้ว่า รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันโลหะบนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ในแบบเรียน รายวิชาฟิสิกส์เพิ่มเติม เล่ม 1 เป็นการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของระยะการกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 และ ขนาดที่ 2 มีค่าน้อยกว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของระยะการกระจัดในแนวระดับของการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง

และระยะการกระจัดในแนวดิ่งกับระยะการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสองจากการทดลองปล่อยวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 และขนาดที่ 2 บนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ทำให้สรุปได้ว่า $y \propto x^2$ หรือ $y = kx^2$

อภิปรายผลการทดลอง

จากข้อมูลที่สรุปผลการวิจัย จะเห็นได้ชัดเจนว่า

1. รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันโลหะที่เคลื่อนที่บนรางของชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

2. ความสัมพันธ์ของค่าการกระจัดในแนวดิ่งกับการกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (x^2) มีลักษณะเป็นเส้นตรงตามความสัมพันธ์ $y \propto x^2$ หรือ $y = kx^2$

3. ค่า k จากการทดลองดังภาพที่ 4 – 5 ของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 5.89 นำไปหาค่า g มีค่าเท่ากับ 11.55 m/s^2 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 17.86%

4. ค่า k จากการทดลองดังภาพที่ 4 – 6 ของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 4.81 นำไปหาค่า g มีค่าเท่ากับ 9.43 m/s^2 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 3.78%

ข้อแนะนำ

1. ควรมีการทดลองกับวัตถุทรงกลมตันโลหะ ขนาดแตกต่างจากที่ผู้วิจัยได้ทำการทดลอง

2. ควรมีการทดลองกับวัตถุรูปทรงอื่นที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างจากวัตถุทรงกลมตันโลหะ เช่น วงแหวน เป็นต้น

3. ในสมการการคำนวณควรมีการคำนวณแรงเสียดทานระหว่างรางอลูมิเนียมกับทรงกลมตันโลหะ และ แรงต้านอากาศ

4. ควรมีการบันทึกภาพแสดงแนวการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันโลหะขณะหลุดจากปลายรางอลูมิเนียมเพื่อเป็นการพิสูจน์ว่า วัตถุทรงกลมตันโลหะหลุดจากปลายรางอลูมิเนียมในแนวขนานกับพื้นราบ

บรรณานุกรม

ทรงวุฒิ ฉิมจินดา และ นุพันธ์ เขียวไม้งาม. (2554). *ฟิสิกส์บูรพา รวมเล่ม 1 และ เล่ม 2.* ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

ทวี ฉิมอ้อย และ มนู เฟื่องฟุ้ง. (2546). *ฟิสิกส์สำหรับวิศวกร1.* กรุงเทพ ฯ : มหาวิทยาลัย-ธรรมศาสตร์.

ปรเมษฐ์ ปัญญาเหล็ก. (2553*). ฟิสิกส์ 1*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

พงษ์ศักดิ์ ชินนาบุญ. (2550). *ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัย เล่ม 1.* กรุงเทพฯ : วิทยพัฒน์.

ศรีธน วรศักดิ์โยธิน.(2553). *ฟิสิกส์ 1.* ปทุมธานี : สกายบุ๊กส์ จำกัด.

ศรีประจักร ครองสุข. (ม.ป.ป.). General Physics 1. เข้าถึงได้จาก http://www.physics.rmutk.ac.th/wp-content/uploads/2013/06/315102

สมพงษ์ ใจดี. (2542). *ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย 1* .กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สิริลักษณ์ ตีรณธนากุล และ เกรียงยุทธ ผิวอ่อน. (2554). *ฟิสิกส์ 1 กลศาสตร์ระดับมหาวิทยาลัย.* กรุงเทพฯ : ศูนย์สื่อเสริม.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกระทรวงศึกษาธิการ.(2557). *หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมฟิสิกส์ เล่ม 1.* กรุงเทพฯ : สกสค.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกระทรวงศึกษาธิการ.(2557). คู่มือครู *รายวิชาเพิ่มเติมฟิสิกส์ เล่ม 1.* กรุงเทพฯ : สกสค.

Raymond A. Serway & John W. Jewett,Jr. (2558). *Physics for Scientists and Engineers I* (ประธาน บุรณศิริ และคณะ แปล). กรุงเทพฯ : เซนเกจ เลินนิ่ง อินโด–ไชน่า จำกัด.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดลองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 และ วัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2

ภาคผนวก ก
ผลการทดลองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 และ ขนาดที่ 2

ตารางที่ ก – 1 ผลการทดลองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)	ความเร็ว V_T (m/s)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.35	0.27	1.17	0.32	0.26	18.75
0.36	0.27	1.17	0.32	0.26	18.75
0.37	0.27	1.17	0.32	0.27	15.63
0.38	0.28	1.17	0.33	0.27	18.18
0.39	0.28	1.17	0.33	0.27	18.18
0.40	0.29	1.17	0.34	0.27	20.59
0.41	0.29	1.17	0.34	0.27	20.59
0.42	0.29	1.17	0.34	0.27	20.59
0.43	0.30	1.17	0.35	0.28	20.00
0.44	0.30	1.17	0.35	0.28	20.00
0.45	0.30	1.17	0.35	0.28	20.00
0.46	0.31	1.17	0.36	0.29	19.44
0.47	0.31	1.17	0.36	0.29	19.44
0.48	0.31	1.17	0.36	0.29	19.44
0.49	0.32	1.17	0.37	0.30	18.92
0.50	0.32	1.17	0.37	0.30	18.92
0.51	0.32	1.17	0.37	0.30	18.92
0.52	0.33	1.17	0.39	0.30	23.07
0.53	0.33	1.17	0.39	0.31	20.51
0.54	0.33	1.17	0.39	0.31	20.51

ตารางที่ ก – 1 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)	ความเร็ว V_T (m/s)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์คลาดคลาดเคลื่อน (%)
0.55	0.34	1.17	0.40	0.31	22.50
0.56	0.34	1.17	0.40	0.31	22.50
0.57	0.34	1.17	0.40	0.32	20.00
0.58	0.34	1.17	0.40	0.32	20.00
0.59	0.35	1.17	0.41	0.31	24.39
0.60	0.35	1.17	0.41	0.32	21.95
0.61	0.35	1.17	0.41	0.32	21.95
0.62	0.36	1.17	0.42	0.33	21.43
0.63	0.36	1.17	0.42	0.33	21.43
0.64	0.36	1.17	0.42	0.33	21.43
0.65	0.36	1.17	0.42	0.33	21.43
0.66	0.37	1.17	0.43	0.33	23.26
0.67	0.37	1.17	0.43	0.34	20.93
0.68	0.37	1.17	0.43	0.34	20.93
0.69	0.38	1.17	0.44	0.34	22.73
0.70	0.38	1.17	0.44	0.34	22.73
0.71	0.38	1.17	0.44	0.35	20.45
0.72	0.38	1.17	0.44	0.35	20.45
0.73	0.39	1.17	0.46	0.35	23.91
0.74	0.39	1.17	0.46	0.35	23.91
0.75	0.39	1.17	0.46	0.35	23.91
0.76	0.39	1.17	0.46	0.35	23.91
0.77	0.40	1.17	0.47	0.35	25.53
0.78	0.40	1.17	0.47	0.36	23.40
0.79	0.40	1.17	0.47	0.36	23.40

ตารางที่ ก – 1 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)	ความเร็ว V_T (m/s)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.80	0.40	1.17	0.47	0.36	23.40
0.81	0.41	1.17	0.48	0.36	25.00
0.82	0.41	1.17	0.48	0.36	25.00
0.83	0.41	1.17	0.48	0.36	25.00
0.84	0.41	1.17	0.48	0.36	25.00

ตารางที่ ก – 2 ผลการทดลองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)	ความเร็ว V_{cm} (m/s)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_R (m)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.35	0.27	0.99	0.27	0.26	3.70
0.36	0.27	0.99	0.27	0.26	3.70
0.37	0.27	0.99	0.27	0.27	0.00
0.38	0.28	0.99	0.28	0.27	3.57
0.39	0.28	0.99	0.28	0.27	3.57
0.40	0.29	0.99	0.29	0.27	6.90
0.41	0.29	0.99	0.29	0.27	6.90
0.42	0.29	0.99	0.29	0.27	6.90
0.43	0.30	0.99	0.30	0.28	6.67
0.44	0.30	0.99	0.30	0.28	6.67
0.45	0.30	0.99	0.30	0.28	6.67
0.46	0.31	0.99	0.31	0.29	6.45

ตารางที่ ก – 2 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)	ความเร็ว V_R (m/s)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_R (m)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.47	0.31	0.99	0.31	0.29	6.45
0.48	0.31	0.99	0.31	0.29	6.45
0.49	0.32	0.99	0.32	0.30	6.25
0.50	0.32	0.99	0.32	0.30	6.25
0.51	0.32	0.99	0.32	0.30	6.25
0.52	0.33	0.99	0.33	0.30	9.09
0.53	0.33	0.99	0.33	0.31	6.06
0.54	0.33	0.99	0.33	0.31	6.06
0.55	0.34	0.99	0.34	0.31	8.82
0.56	0.34	0.99	0.34	0.31	8.82
0.57	0.34	0.99	0.34	0.32	5.88
0.58	0.34	0.99	0.34	0.32	5.88
0.59	0.35	0.99	0.35	0.31	11.43
0.60	0.35	0.99	0.35	0.32	8.57
0.61	0.35	0.99	0.35	0.32	8.57
0.62	0.36	0.99	0.36	0.33	8.33
0.63	0.36	0.99	0.36	0.33	8.33
0.64	0.36	0.99	0.36	0.33	8.33
0.65	0.36	0.99	0.36	0.33	8.33
0.66	0.37	0.99	0.37	0.33	10.81
0.67	0.37	0.99	0.37	0.34	10.81
0.68	0.37	0.99	0.37	0.34	10.81

ตารางที่ ก – 2 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)	ความเร็ว V_R (m/s)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_R (m)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.69	0.38	0.99	0.38	0.34	10.53
0.70	0.38	0.99	0.38	0.34	10.53
0.71	0.38	0.99	0.38	0.35	7.89
0.72	0.38	0.99	0.38	0.35	7.89
0.73	0.39	0.99	0.39	0.35	10.26
0.74	0.39	0.99	0.39	0.35	10.26
0.75	0.39	0.99	0.39	0.35	10.26
0.76	0.39	0.99	0.39	0.35	10.26
0.77	0.40	0.99	0.40	0.35	12.50
0.78	0.40	0.99	0.40	0.36	10.00
0.79	0.40	0.99	0.40	0.36	10.00
0.80	0.40	0.99	0.40	0.36	10.00
0.81	0.41	0.99	0.41	0.36	12.20
0.82	0.41	0.99	0.41	0.36	12.20
0.83	0.41	0.99	0.41	0.36	12.20
0.84	0.41	0.99	0.41	0.36	12.20

ตารางที่ ก – 3 ผลการทดลองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)	ความเร็ว V_T (m/s)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.35	0.27	1.17	0.32	0.29	9.38
0.36	0.27	1.17	0.32	0.29	9.38
0.37	0.27	1.17	0.32	0.30	6.25
0.38	0.28	1.17	0.33	0.30	9.09
0.39	0.28	1.17	0.33	0.30	9.09
0.40	0.29	1.17	0.34	0.30	11.76
0.41	0.29	1.17	0.34	0.30	11.76
0.42	0.29	1.17	0.34	0.31	8.82
0.43	0.30	1.17	0.35	0.31	11.43
0.44	0.30	1.17	0.35	0.31	11.43
0.45	0.30	1.17	0.35	0.31	11.43
0.46	0.31	1.17	0.36	0.32	11.11
0.47	0.31	1.17	0.36	0.32	11.11
0.48	0.31	1.17	0.36	0.32	11.11
0.49	0.32	1.17	0.37	0.32	13.51
0.50	0.32	1.17	0.37	0.32	13.51
0.51	0.32	1.17	0.37	0.33	10.81
0.52	0.33	1.17	0.39	0.33	15.38
0.53	0.33	1.17	0.39	0.34	12.82
0.54	0.33	1.17	0.39	0.34	12.82
0.55	0.34	1.17	0.40	0.34	15.00
0.56	0.34	1.17	0.40	0.34	15.00

ตารางที่ ก – 3 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)	ความเร็ว V_T (m/s)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.57	0.34	1.17	0.40	0.35	12.50
0.58	0.34	1.17	0.40	0.35	12.50
0.59	0.35	1.17	0.41	0.35	14.63
0.60	0.35	1.17	0.41	0.35	14.63
0.61	0.35	1.17	0.41	0.36	12.20
0.62	0.36	1.17	0.42	0.36	14.29
0.63	0.36	1.17	0.42	0.36	14.29
0.64	0.36	1.17	0.42	0.36	14.29
0.65	0.36	1.17	0.42	0.37	11.90
0.66	0.37	1.17	0.43	0.37	13.95
0.67	0.37	1.17	0.43	0.37	13.95
0.68	0.37	1.17	0.43	0.37	13.95
0.69	0.38	1.17	0.44	0.38	13.64
0.70	0.38	1.17	0.44	0.38	13.64
0.71	0.38	1.17	0.44	0.38	13.64
0.72	0.38	1.17	0.44	0.38	13.64
0.73	0.39	1.17	0.46	0.38	17.39
0.74	0.39	1.17	0.46	0.39	15.22
0.75	0.39	1.17	0.46	0.39	15.22
0.76	0.39	1.17	0.46	0.39	15.22
0.77	0.40	1.17	0.47	0.39	17.02
0.78	0.40	1.17	0.47	0.39	17.02
0.79	0.40	1.17	0.47	0.39	17.02
0.80	0.40	1.17	0.47	0.40	14.89

ตารางที่ ก – 3 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)	ความเร็ว V_T (m/s)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.81	0.41	1.17	0.48	0.40	16.67
0.82	0.41	1.17	0.48	0.40	16.67
0.83	0.41	1.17	0.48	0.40	16.67
0.84	0.41	1.17	0.48	0.40	16.67

ตารางที่ ก – 4 ผลการทดลองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 รูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)	ความเร็ว V_R (m/s)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_R (m)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.35	0.27	0.99	0.27	0.29	7.41
0.36	0.27	0.99	0.27	0.29	7.41
0.37	0.27	0.99	0.27	0.30	11.11
0.38	0.28	0.99	0.28	0.30	7.14
0.39	0.28	0.99	0.28	0.30	7.14
0.40	0.29	0.99	0.29	0.30	3.45
0.41	0.29	0.99	0.29	0.30	3.45
0.42	0.29	0.99	0.29	0.31	6.90
0.43	0.30	0.99	0.30	0.31	3.33
0.44	0.30	0.99	0.30	0.31	3.33
0.45	0.30	0.99	0.30	0.31	3.33
0.46	0.31	0.99	0.31	0.32	3.23
0.47	0.31	0.99	0.31	0.32	3.23

ตารางที่ ก – 4 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)	ความเร็ว V_R (m/s)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_R (m)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.48	0.31	0.99	0.31	0.32	3.23
0.49	0.32	0.99	0.32	0.32	0.00
0.50	0.32	0.99	0.32	0.32	0.00
0.51	0.32	0.99	0.32	0.33	3.13
0.52	0.33	0.99	0.33	0.33	0.00
0.53	0.33	0.99	0.33	0.34	3.03
0.54	0.33	0.99	0.33	0.34	3.03
0.55	0.34	0.99	0.34	0.34	0.00
0.56	0.34	0.99	0.34	0.35	2.94
0.57	0.34	0.99	0.34	0.35	2.94
0.58	0.34	0.99	0.34	0.35	2.94
0.59	0.35	0.99	0.35	0.35	0.00
0.60	0.35	0.99	0.35	0.35	0.00
0.61	0.35	0.99	0.35	0.36	2.86
0.62	0.36	0.99	0.36	0.36	0.00
0.63	0.36	0.99	0.36	0.36	0.00
0.64	0.36	0.99	0.36	0.36	0.00
0.65	0.36	0.99	0.36	0.37	2.78
0.66	0.37	0.99	0.37	0.37	0.00
0.67	0.37	0.99	0.37	0.37	0.00
0.68	0.37	0.99	0.37	0.37	0.00
0.69	0.38	0.99	0.38	0.38	0.00
0.70	0.38	0.99	0.38	0.38	0.00
0.71	0.38	0.99	0.38	0.38	0.00

ตารางที่ ก – 4 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)	ความเร็ว V_R (m/s)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_R (m)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0.72	0.38	0.99	0.38	0.38	0.00
0.73	0.39	0.99	0.39	0.38	2.56
0.74	0.39	0.99	0.39	0.39	0.00
0.75	0.39	0.99	0.39	0.39	0.00
0.76	0.39	0.99	0.39	0.39	0.00
0.77	0.40	0.99	0.40	0.39	2.50
0.78	0.40	0.99	0.40	0.39	2.50
0.79	0.40	0.99	0.40	0.39	2.50
0.80	0.40	0.99	0.40	0.40	0.00
0.81	0.41	0.99	0.41	0.40	2.44
0.82	0.41	0.99	0.41	0.40	2.44
0.83	0.41	0.99	0.41	0.40	2.44
0.84	0.41	0.99	0.41	0.40	2.44

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาอัตราเร็วของวัตถุทรงกลมตันโลหะ

ภาคผนวก ข
การคำนวณหาอัตราเร็วของวัตถุทรงกลมตันโลหะ

การคำนวณหาอัตราเร็วของวัตถุทรงกลมตันโลหะที่หลุดจากปลายรางอลูมิเนียมด้านล่างของรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง (v_T)ได้จาก $Mgh=\frac{1}{2}Mv^2$
จะได้สมการของอัตราเร็วคือ

$$v_T=\sqrt{2gh}$$

โดย h คือ ระยะจากปลายรางอลูมิเนียมด้านบน ถึง ด้านล่างมีค่าเท่ากับ 7 cm
ดังนั้น อัตราเร็วของรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่งจึงมีค่าคงคี่ เท่ากับ

$$(v_T)=\sqrt{2gh}=\sqrt{2(9.8\,m/s^2)(0.07\,m)}=1.17\,m/s$$

การคำนวณหาอัตราเร็วของวัตถุทรงกลมตันโลหะที่หลุดจากปลายรางอลูมิเนียมด้านล่างของรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (v_R) คำนวณได้จาก $Mgh=\frac{1}{2}Mv^2+\frac{1}{2}I\frac{v^2}{R^2}$
จะได้สมการของอัตราเร็วคือ

$$v_R=\sqrt{\frac{2gh}{1+\frac{I}{MR^2}}}$$

โดย I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของทรงกลมตัน มีค่าเท่ากับ $I=\frac{2}{5}MR^2$
ดังนั้นสมการของอัตราเร็วคือ

$$v_R=\sqrt{\frac{10gh}{7}}$$

ดังนั้นอัตราเร็วของรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (v_R) มีค่าเท่ากับ

$$v_R=\sqrt{\frac{10gh}{7}}=\sqrt{\frac{10(9.8\,m/s^2)(0.07\,m)}{7}}=0.99\,m/s$$

ภาคผนวก ค
การคำนวณค่าเวลา (t) ของวัตถุทรงกลมตันโลหะ
จากปลายรางอลูมิเนียมด้านล่างถึงพื้น

ภาคผนวก ค
การคำนวณค่าเวลา (t) ของวัตถุทรงกลมตันโลหะจาก ปลายรางอลูมิเนียมด้านล่างถึงพื้น

ระยะการกระจัดในแนวดิ่ง H (m) เป็นระยะที่ได้จากการทดลอง โดยการปรับชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบโพรเจคไทล์ให้มีความสูงจากพื้นครั้งละ 1 cm โดยระยะเริ่มต้นที่ปลายรางอลูมิเนียมสูงจากพื้นคือ 35 cm จนถึงระยะ 84 cm รวม 50 ข้อมูล

โดยสมการการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง $H = H_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$ เมื่อ $H_0 = 0$ และ $v_0 = 0$

จะได้สมการของเวลาคือ $t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$

ตาราง ค–1 แสดงวิธีการคำนวณหาเวลา (t) ของวัตถุทรงกลมตันโลหะ

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)
0.35	$t = \sqrt{\frac{2H}{g}} = \sqrt{\frac{2(0.35m)}{9.8m/s^2}} = 0.27$
0.36	$t = \sqrt{\frac{2H}{g}} = \sqrt{\frac{2(0.36m)}{9.8m/s^2}} = 0.27$
0.37	$t = \sqrt{\frac{2H}{g}} = \sqrt{\frac{2(0.37m)}{9.8m/s^2}} = 0.27$
0.38	$t = \sqrt{\frac{2H}{g}} = \sqrt{\frac{2(0.38m)}{9.8m/s^2}} = 0.28$
0.39	$t = \sqrt{\frac{2H}{g}} = \sqrt{\frac{2(0.39m)}{9.8m/s^2}} = 0.28$
0.40	$t = \sqrt{\frac{2H}{g}} = \sqrt{\frac{2(0.40m)}{9.8m/s^2}} = 0.29$

ตาราง ค–1 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)
0.41	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.41m)}{9.8m/s^2}}=0.29$
0.42	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.42m)}{9.8m/s^2}}=0.29$
0.43	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.43m)}{9.8m/s^2}}=0.30$
0.44	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.44m)}{9.8m/s^2}}=0.30$
0.45	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.45m)}{9.8m/s^2}}=0.30$
0.46	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.46m)}{9.8m/s^2}}=0.31$
0.47	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.47m)}{9.8m/s^2}}=0.31$
0.48	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.48m)}{9.8m/s^2}}=0.31$
0.49	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.49m)}{9.8m/s^2}}=0.32$
0.50	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.50m)}{9.8m/s^2}}=0.32$
0.51	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.51m)}{9.8m/s^2}}=0.32$
0.52	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.52m)}{9.8m/s^2}}=0.33$

ตาราง ค–1 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)
0.53	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.53m)}{9.8m/s^2}}=0.33$
0.54	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.54m)}{9.8m/s^2}}=0.33$
0.55	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.55m)}{9.8m/s^2}}=0.34$
0.56	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.56m)}{9.8m/s^2}}=0.34$
0.57	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.57m)}{9.8m/s^2}}=0.34$
0.58	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.58m)}{9.8m/s^2}}=0.34$
0.59	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.59m)}{9.8m/s^2}}=0.35$
0.60	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.60m)}{9.8m/s^2}}=0.35$
0.61	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.61m)}{9.8m/s^2}}=0.35$
0.62	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.62m)}{9.8m/s^2}}=0.36$
0.63	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.63m)}{9.8m/s^2}}=0.36$
0.64	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.64m)}{9.8m/s^2}}=0.36$

ตาราง ค–1 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)
0.65	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.65m)}{9.8m/s^2}}=0.36$
0.66	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.66m)}{9.8m/s^2}}=0.37$
0.67	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.67m)}{9.8m/s^2}}=0.37$
0.68	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.68m)}{9.8m/s^2}}=0.37$
0.69	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.69m)}{9.8m/s^2}}=0.38$
0.70	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.70m)}{9.8m/s^2}}=0.38$
0.71	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.71m)}{9.8m/s^2}}=0.38$
0.72	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.72m)}{9.8m/s^2}}=0.38$
0.73	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.73m)}{9.8m/s^2}}=0.39$
0.74	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.74m)}{9.8m/s^2}}=0.39$
0.75	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.75m)}{9.8m/s^2}}=0.39$
0.76	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.76m)}{9.8m/s^2}}=0.39$

ตาราง ค–1 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	เวลา t (s)
0.77	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.77m)}{9.8m/s^2}}=0.40$
0.78	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.78m)}{9.8m/s^2}}=0.40$
0.79	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.79m)}{9.8m/s^2}}=0.40$
0.80	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.80m)}{9.8m/s^2}}=0.40$
0.81	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.81m)}{9.8m/s^2}}=0.41$
0.82	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.82m)}{9.8m/s^2}}=0.41$
0.83	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.83m)}{9.8m/s^2}}=0.41$
0.84	$t=\sqrt{\frac{2H}{g}}=\sqrt{\frac{2(0.84m)}{9.8m/s^2}}=0.41$

ภาคผนวก ง
การคำนวณหาระยะการกระจัดในแนวระดับ

ภาคผนวก ง
การคำนวณหาระยะการกระจัดในแนวระดับ

การคำนวณหาระยะการกระจัดในแนวระดับจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง (S_x) จากสมการ

$$S_x = v_T t$$

ตารางที่ ง–1 วิธีคำนวณหาระยะกระจัดในแนวระดับ (S_X) จากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง

เวลา t (s)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_X (m)
0.27	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.27s) = 0.32$
0.28	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.28s) = 0.33$
0.29	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.29s) = 0.34$
0.30	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.30s) = 0.35$
0.31	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.31s) = 0.36$
0.32	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.32s) = 0.37$
0.33	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.33s) = 0.39$
0.34	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.34s) = 0.40$
0.35	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.35s) = 0.41$
0.36	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.36s) = 0.42$
0.37	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.37s) = 0.43$
0.38	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.38s) = 0.44$
0.39	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.39s) = 0.46$
0.40	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.40s) = 0.47$
0.41	$S_X = v_T t = (1.17\,m/s)(0.41s) = 0.48$

การคำนวณหาระยะการกระจัดในแนวระดับจากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง (S_x) จากสมการ

$$S_x = v_T t$$

ตารางที่ ง–2 แสดงวิธีคำนวณหาระยะกระจัดในแนวระดับ (S_X) จากรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

เวลา t (s)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_X (m)
0.27	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.27s) = 0.27$
0.28	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.28s) = 0.28$
0.29	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.29s) = 0.29$
0.30	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.30s) = 0.30$
0.31	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.31s) = 0.31$
0.32	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.32s) = 0.32$
0.33	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.33s) = 0.33$
0.34	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.34s) = 0.34$
0.35	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.35s) = 0.35$
0.36	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.36s) = 0.36$
0.37	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.37s) = 0.37$
0.38	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.38s) = 0.38$
0.39	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.39s) = 0.39$
0.40	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.40s) = 0.40$
0.41	$S_X = v_R t = (0.99\,m/s)(0.41s) = 0.41$

ภาคผนวก จ
การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะกระจัดในแนวระดับ จากการคำนวณและจากการทดลอง

ภาคผนวก จ
การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะกระจัดในแนวระดับ จากการคำนวณและจากการทดลอง

ระยะกระจัดในแนวระดับที่ได้จากการทดลอง (S_T) เป็นระยะที่วัดจากปลายรางอลูมิเนียมด้านล่าง ถึง ตำแหน่งที่วัตถุทรงกลมตันโลหะตกในแนวระดับ เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนคำนวณได้จาก

$$\left| \frac{\text{ค่าทดลอง}(S_T) - \text{ค่าจริง}(S_X)}{\text{ค่าจริง } (S_X)} \right| \times 100\%$$

ตารางที่ จ–1 วิธีคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 ในรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง

ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน (%)
0.32	0.26	$\left\|\frac{0.26-0.32}{0.32}\right\| \times 100\% = 18.75$
0.32	0.27	$\left\|\frac{0.27-0.32}{0.32}\right\| \times 100\% = 15.63$
0.33	0.27	$\left\|\frac{0.27-0.33}{0.33}\right\| \times 100\% = 18.18$
0.34	0.27	$\left\|\frac{0.27-0.34}{0.34}\right\| \times 100\% = 20.59$
0.35	0.28	$\left\|\frac{0.28-0.35}{0.35}\right\| \times 100\% = 20.00$
0.36	0.29	$\left\|\frac{0.29-0.36}{0.36}\right\| \times 100\% = 19.44$
0.37	0.30	$\left\|\frac{0.30-0.37}{0.37}\right\| \times 100\% = 18.92$

ตารางที่ จ–1 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน (%)
0.39	0.30	$\left\|\frac{0.30-0.39}{0.39}\right\| \times 100\% = 23.07$
0.39	0.31	$\left\|\frac{0.31-0.39}{0.39}\right\| \times 100\% = 20.51$
0.40	0.31	$\left\|\frac{0.31-0.40}{0.40}\right\| \times 100\% = 22.50$
0.40	0.32	$\left\|\frac{0.32-0.40}{0.40}\right\| \times 100\% = 20.00$
0.41	0.31	$\left\|\frac{0.31-0.41}{0.41}\right\| \times 100\% = 24.39$
0.41	0.32	$\left\|\frac{0.32-0.41}{0.41}\right\| \times 100\% = 21.95$
0.42	0.33	$\left\|\frac{0.33-0.42}{0.42}\right\| \times 100\% = 21.43$
0.43	0.33	$\left\|\frac{0.33-0.43}{0.43}\right\| \times 100\% = 23.26$
0.43	0.34	$\left\|\frac{0.34-0.43}{0.43}\right\| \times 100\% = 20.93$
0.44	0.34	$\left\|\frac{0.34-0.44}{0.44}\right\| \times 100\% = 22.73$
0.44	0.35	$\left\|\frac{0.35-0.44}{0.44}\right\| \times 100\% = 20.45$
0.46	0.35	$\left\|\frac{0.35-0.46}{0.46}\right\| \times 100\% = 23.91$

ตารางที่ จ–1 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน (%)
0.47	0.35	$\left\|\frac{0.35-0.47}{0.47}\right\| \times 100\% = 25.53$
0.47	0.36	$\left\|\frac{0.36-0.47}{0.47}\right\| \times 100\% = 23.40$
0.48	0.36	$\left\|\frac{0.36-0.48}{0.48}\right\| \times 100\% = 25.00$

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนคำนวณได้จาก

$$\left|\frac{\text{ค่าทดลอง}(S_R)-\text{ค่าจริง}(S_X)}{\text{ค่าจริง}\ (S_X)}\right| \times 100\%$$

ตารางที่ จ–2 แสดงการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1 ในรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_R (m)	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน (%)
0.27	0.26	$\left\|\frac{0.26-0.27}{0.27}\right\| \times 100\% = 3.70$
0.27	0.27	$\left\|\frac{0.27-0.27}{0.27}\right\| \times 100\% = 0.00$
0.28	0.27	$\left\|\frac{0.27-0.28}{0.28}\right\| \times 100\% = 3.57$

ตารางที่ จ–2 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_R (m)	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน (%)
0.29	0.27	$\left\|\frac{0.27-0.29}{0.29}\right\| \times 100\% = 6.90$
0.30	0.28	$\left\|\frac{0.28-0.30}{0.30}\right\| \times 100\% = 6.67$
0.31	0.29	$\left\|\frac{0.29-0.31}{0.31}\right\| \times 100\% = 6.45$
0.32	0.30	$\left\|\frac{0.30-0.32}{0.32}\right\| \times 100\% = 6.25$
0.33	0.30	$\left\|\frac{0.30-0.33}{0.33}\right\| \times 100\% = 9.09$
0.33	0.31	$\left\|\frac{0.31-0.33}{0.33}\right\| \times 100\% = 6.06$
0.34	0.31	$\left\|\frac{0.31-0.34}{0.34}\right\| \times 100\% = 8.82$
0.35	0.31	$\left\|\frac{0.31-0.35}{0.35}\right\| \times 100\% = 11.53$
0.35	0.32	$\left\|\frac{0.32-0.35}{0.35}\right\| \times 100\% = 8.57$
0.36	0.33	$\left\|\frac{0.33-0.36}{0.36}\right\| \times 100\% = 8.33$
0.37	0.33	$\left\|\frac{0.33-0.37}{0.37}\right\| \times 100\% = 10.81$
0.37	0.34	$\left\|\frac{0.34-0.37}{0.37}\right\| \times 100\% = 10.81$

0.38	0.34	$\left\|\frac{0.34-0.38}{0.38}\right\| \times 100\% = 10.53$

ตารางที่ จ–2 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_R (m)	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน (%)
0.38	0.35	$\left\|\frac{0.35-0.38}{0.38}\right\| \times 100\% = 7.89$
0.39	0.35	$\left\|\frac{0.35-0.39}{0.39}\right\| \times 100\% = 10.26$
0.40	0.35	$\left\|\frac{0.35-0.40}{0.40}\right\| \times 100\% = 12.50$
0.40	0.36	$\left\|\frac{0.36-0.40}{0.40}\right\| \times 100\% = 10.00$
0.41	0.36	$\left\|\frac{0.36-0.41}{0.41}\right\| \times 100\% = 12.20$

ตารางที่ จ–3 แสดงการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 ในรูปแบบการเคลื่อนที่แบบเลื่อนตำแหน่ง

ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน (%)
0.32	0.29	$\left\|\frac{0.29-0.32}{0.32}\right\| \times 100\% = 9.38$
0.32	0.30	$\left\|\frac{0.30-0.32}{0.32}\right\| \times 100\% = 6.25$
0.33	0.30	$\left\|\frac{0.30-0.33}{0.33}\right\| \times 100\% = 9.09$

0.34	0.30	$\left\lvert\frac{0.30-0.34}{0.34}\right\rvert \times 100\% = 11.76$

ตารางที่ จ–3 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน(%)
0.34	0.31	$\left\lvert\frac{0.31-0.34}{0.34}\right\rvert \times 100\% = 8.82$
0.35	0.31	$\left\lvert\frac{0.31-0.35}{0.35}\right\rvert \times 100\% = 11.43$
0.36	0.32	$\left\lvert\frac{0.32-0.36}{0.36}\right\rvert \times 100\% = 11.11$
0.37	0.32	$\left\lvert\frac{0.32-0.37}{0.37}\right\rvert \times 100\% = 13.51$
0.37	0.33	$\left\lvert\frac{0.33-0.37}{0.37}\right\rvert \times 100\% = 10.81$
0.39	0.33	$\left\lvert\frac{0.33-0.39}{0.39}\right\rvert \times 100\% = 15.38$
0.39	0.34	$\left\lvert\frac{0.34-0.39}{0.39}\right\rvert \times 100\% = 12.82$
0.40	0.34	$\left\lvert\frac{0.34-0.40}{0.40}\right\rvert \times 100\% = 15.00$
0.40	0.35	$\left\lvert\frac{0.35-0.40}{0.40}\right\rvert \times 100\% = 12.50$
0.41	0.35	$\left\lvert\frac{0.35-0.41}{0.41}\right\rvert \times 100\% = 14.63$
0.41	0.36	$\left\lvert\frac{0.36-0.41}{0.41}\right\rvert \times 100\% = 12.20$

0.42	0.36	$\left\lvert\frac{0.36-0.42}{0.42}\right\rvert \times 100\% = 14.29$
0.42	0.37	$\left\lvert\frac{0.37-0.42}{0.42}\right\rvert \times 100\% = 11.90$

ตารางที่ จ–3 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน(%)
0.43	0.37	$\left\lvert\frac{0.37-0.43}{0.43}\right\rvert \times 100\% = 13.95$
0.44	0.38	$\left\lvert\frac{0.38-0.44}{0.44}\right\rvert \times 100\% = 13.64$
0.46	0.38	$\left\lvert\frac{0.38-0.46}{0.46}\right\rvert \times 100\% = 17.39$
0.46	0.39	$\left\lvert\frac{0.39-0.46}{0.46}\right\rvert \times 100\% = 15.22$
0.47	0.39	$\left\lvert\frac{0.39-0.47}{0.47}\right\rvert \times 100\% = 17.02$
0.47	0.40	$\left\lvert\frac{0.40-0.47}{0.47}\right\rvert \times 100\% = 14.89$
0.48	0.40	$\left\lvert\frac{0.40-0.48}{0.48}\right\rvert \times 100\% = 16.67$

ตารางที่ จ–4 แสดงการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะกระจัดในแนวระดับของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2 ในรูปแบบการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง

ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน (%)

0.27	0.29	$\left\lvert\frac{0.29-0.27}{0.27}\right\rvert \times 100\% = 7.41$
0.27	0.30	$\left\lvert\frac{0.30-0.27}{0.27}\right\rvert \times 100\% = 11.11$

ตารางที่ จ–4 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน (%)
0.28	0.30	$\left\lvert\frac{0.30-0.28}{0.28}\right\rvert \times 100\% = 7.14$
0.29	0.30	$\left\lvert\frac{0.30-0.29}{0.29}\right\rvert \times 100\% = 3.45$
0.29	0.31	$\left\lvert\frac{0.31-0.29}{0.29}\right\rvert \times 100\% = 6.90$
0.30	0.31	$\left\lvert\frac{0.31-0.30}{0.30}\right\rvert \times 100\% = 3.33$
0.31	0.32	$\left\lvert\frac{0.32-0.31}{0.31}\right\rvert \times 100\% = 3.23$
0.32	0.32	$\left\lvert\frac{0.32-0.32}{0.32}\right\rvert \times 100\% = 0.00$
0.32	0.33	$\left\lvert\frac{0.33-0.32}{0.32}\right\rvert \times 100\% = 3.13$
0.33	0.33	$\left\lvert\frac{0.33-0.33}{0.33}\right\rvert \times 100\% = 0.00$
0.33	0.34	$\left\lvert\frac{0.34-0.33}{0.33}\right\rvert \times 100\% = 3.03$
0.34	0.34	$\left\lvert\frac{0.34-0.34}{0.34}\right\rvert \times 100\% = 0.00$

0.34	0.35	$\left\lvert\frac{0.35-0.34}{0.34}\right\rvert \times 100\% = 2.94$
0.35	0.35	$\left\lvert\frac{0.35-0.35}{0.35}\right\rvert \times 100\% = 0.00$
0.35	0.36	$\left\lvert\frac{0.36-0.35}{0.35}\right\rvert \times 100\% = 2.86$

ตารางที่ จ–4 (ต่อ)

ระยะกระจัดในแนวระดับ S_x (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S_T (m)	เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อน (%)
0.36	0.36	$\left\lvert\frac{0.36-0.36}{0.36}\right\rvert \times 100\% = 0.00$
0.36	0.37	$\left\lvert\frac{0.37-0.36}{0.36}\right\rvert \times 100\% = 2.78$
0.37	0.37	$\left\lvert\frac{0.37-0.37}{0.37}\right\rvert \times 100\% = 0.00$
0.38	0.38	$\left\lvert\frac{0.38-0.38}{0.38}\right\rvert \times 100\% = 0.00$
0.39	0.38	$\left\lvert\frac{0.38-0.39}{0.39}\right\rvert \times 100\% = 2.56$
0.39	0.39	$\left\lvert\frac{0.39-0.39}{0.39}\right\rvert \times 100\% = 0.00$
0.40	0.39	$\left\lvert\frac{0.39-0.40}{0.40}\right\rvert \times 100\% = 2.50$
0.40	0.40	$\left\lvert\frac{0.40-0.40}{0.40}\right\rvert \times 100\% = 0.00$
0.41	0.40	$\left\lvert\frac{0.40-0.41}{0.41}\right\rvert \times 100\% = 2.44$

ภาคผนวก ฉ
ระยะกระจัดในแนวดิ่ง กับระยะกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง

ภาคผนวก ฉ
ระยะกระจัดในแนวดิ่งกับระยะกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง

ตารางที่ ฉ–1 ระยะกระจัดในแนวดิ่งกับระยะกระจัดในแนวระดับยกกำลังสองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 1

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (m^2)
0.35	0.26	0.07
0.40	0.27	0.07
0.45	0.28	0.08
0.50	0.30	0.09
0.55	0.31	0.10
0.60	0.32	0.10
0.65	0.33	0.11
0.70	0.34	0.12
0.75	0.35	0.12
0.80	0.36	0.13

ตารางที่ ฉ–2 ระยะกระจัดในแนวดิ่งกับระยะกระจัดในแนวระดับยกกำลังสองของวัตถุทรงกลมตันโลหะขนาดที่ 2

ระยะกระจัดในแนวดิ่ง H (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับ S (m)	ระยะกระจัดในแนวระดับยกกำลังสอง (m^2)
0.35	0.29	0.08
0.40	0.30	0.09
0.45	0.31	0.10
0.50	0.32	0.10
0.55	0.34	0.12
0.60	0.35	0.12
0.65	0.37	0.14
0.70	0.38	0.14
0.75	0.39	0.15
0.80	0.40	0.16