



รายงานวิจัย

วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้อิทธิพลแรงโน้มถ่วงของโลก

Analysis the motion of objects under the
gravitational influence of the Earth

โดย

โรสลีนา ยูโซะ

นุรไอนี รีรา

นุรีฮัน บอเนาะ

รอซาลี กายอ

วันซามัน มุซายี

อันวา หะยีบากา

อิบรอเฮง จารง

อาปีติน ตะแซสาเมาะ

ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณบำรุงการศึกษาประจำปี 2557

มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

รายงานวิจัย

วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้อิทธิพลแรงโน้มถ่วงของโลก

Analysis the motion of objects under the
gravitational influence of the Earth

โดย

โรสลีนา ยูโซะ

นุรไอนี รีรา

นุรีฮัน บอเนาะ

รอซาลี กายอ

วันซามัน มุซายี

อันวา หะยีบากา

อิบรอเฮง จารง

อาบีดิน ตะแซสตาเมาะ

ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณบำรุงการศึกษาประจำปี 2557

มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา

ชื่อเรื่อง วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้อิทธิพลแรงโน้มถ่วงของโลก

ผู้วิจัย นางสาวโรสลีนา ยูโซะ และคณะ

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้อิทธิพลแรงโน้มถ่วงของโลก โดยการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยโปรแกรม Tracker 4.05 ซึ่งได้ทำการวิจัยออกเป็น 3 กรณี คือ การตกอิสระภายใต้แรงต้านอากาศ การตกอิสระของวัตถุภายใต้ของเหลวที่มีความหนืด และการเคลื่อนที่แบบวิถีโค้ง สำหรับการตกอย่างอิสระของวัตถุ พบว่า เมื่อปล่อยวัตถุตกอย่างอิสระที่เวลา 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 s ทำให้ความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.60 1.72 2.65 3.57 และ 4.29 m/s ตามลำดับ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี เท่ากับ 3.2 2.8 1.4 0.2 และ 2.5 % ตามลำดับ และเมื่อทำการทดลอง การตกอย่างอิสระภายใต้แรงต้านอากาศ พบว่า ความเร็วปลายมีค่าเท่ากับ 0.146 m/s และมีค่าคงตัวเท่ากับ $b = 0.053 \text{ kg/s}$ สำหรับการตกอิสระของวัตถุภายใต้ของเหลวที่มีความหนืด พบว่า ความเร็วของวัตถุขณะตกลงในของของเหลวที่อุณหภูมิ 30 50 70 และ 90°C ของเหลวที่มีความหนืดมากที่สุดคือ น้ำมันเครื่อง น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะกอก ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำมันที่อุณหภูมิ 30°C มีค่าเท่ากับ 0.702 N.s/m^2 สำหรับการเคลื่อนที่แบบวิถีโค้ง จากการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำด้วยแรงดันที่ 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 bar ที่มุมยิง 45 องศา พบว่า เมื่อเพิ่มแรงดันจาก 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 bar จะทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 12.41 19.52 25.88 27.15 และ 32.0 m ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% และมีสมการความสัมพันธ์ $y = 18.72p + 9.35$

คำสำคัญ การตกอย่างอิสระ จรวดขวดน้ำ ความหนืดของของเหลว โปรแกรม Tracker 4.05

Title Analysis the motion of objects under the gravitational influence of the Earth.

Author Miss. Roseleena Yusoh and et al

Year 2014

Abstract

This research aims to study the motion of objects under the gravitational influence of the earth by photo analysis with the Tracker 4.0, which has study research into 3 case.

The first case is study free falling object under the force of air resistance. The analysis of the experiment at time of 0.1 0.2 0.3 0.4 and 0.5 s found that the speed has increased to 0.60 1.72 2.65 3.57 and 4.29 m/s respectively .The results of the analysis with the accuracy of time at 0.1 0.2 0.3 0.4 and 0.5 s are 3.2 2.8 1.4 0.2 and 2.5 % respectively. The result of the object free falling under the force of air resistance on the object found that the speed of the terminal velocity is equal to 0.146 m/s and the constant b is equal to 0.053 kg/s.

The second case is study free falling object under the viscosity. The result found that the viscosity of liquid at temperatures of 30 50 70 and 90°C most are lubricating oil, palm oil , soybean oil , and olive oil , respectively. The viscosity coefficient from lubricating oil experiment that temperatures of 30°C is 0.702 N.s/m^2 .

The last case is study projectile motion by water rocket motion. At the pressure of water rocket are 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 bar with a 45 degree. The results showed that with increasing pressure from 0.25 to 1.25 bar the distance of the motion is increased from 12.41 19.52 25.88 27.15 to 32.0 m. respectively. The different of experiment and theory is less than 5% and the equation of the relationship $y = 18.72p + 9.35$.

Keywords: Free fall, Water Rocket, Viscosity of liquid, Tracker Program

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากคณาจารย์และนักวิทยาศาสตร์ ประจำหลักสูตรฟิสิกส์ หลักสูตรวิทยาศาสตร์ทั่วไป และศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ที่ให้ความช่วยเหลือและข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลาที่ให้บสนับสนุนในการทำการวิจัยและขอบคุณนักศึกษาสาขาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

นางสาวโรสลีนา ยูโซะ

และคณะ

กันยายน 2557

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญ	(4)
สารบัญภาพ	(6)
สารบัญตาราง	(9)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขต	2
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎี	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	20
3.1 เครื่องมือวัสดุและอุปกรณ์	20
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง	21
3.3 วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม tracker 4.05	26
บทที่ 4 ผลการวิจัย และอภิปรายผล	29
4.1 ศึกษาการตกอิสระภายใต้แรงต้านอากาศ	29
4.2 ศึกษาการตกอิสระภายใต้ของเหลวที่มีความหนืด	33
4.3 ศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบวิถีโค้ง	44
บทที่ 5 สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ	52
5.1 สรุปผลการทดลอง	52
5.2 อภิปรายผลการทดลอง	53
5.3 ข้อเสนอแนะ	54

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	55
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก เครื่องและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	57
ภาคผนวก ข การติดตั้งโปรแกรม Tracker	66
ประวัติผู้ทำวิจัย	72

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ความเร็วจากการตกอย่างอิสระของวัตถุ ภายใต้สนามโน้มถ่วงของโลกเฉลี่ย $g = 9.8 \text{ m/s}^2$	33
2	ความหนาแน่นของน้ำมันแต่ละชนิด	34
3	สัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำมัน 4 ชนิด	42
4	สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ	43
5	ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ระยะทางแนวราบด้วยโปรแกรม tracker	50
6	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะทางในแนวราบและแนวตั้งจากการ วิเคราะห์	50
7	ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์มุมยิง	51

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ทิศทางของแรงต้านการเคลื่อนที่ของอากาศ และแรงโน้มถ่วงกระทำต่อวัตถุ	5
2	การเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุที่ตกอย่างอิสระ	7
3	แรงที่กระทำต่อลูกเหล็กขณะที่เคลื่อนที่ในของเหลวที่มีความหนืด	11
4	การเคลื่อนที่วิถีโค้งของกระแสน้ำ	13
5	การเคลื่อนที่แนวราบความเร็วคงตัวและแนวโค้งด้วยความเร่งคงตัว	13
6	การเคลื่อนที่วิถีโค้ง	14
7	เปรียบเทียบกราฟ $y - t$ กับ $v - t$	14
8	วิธีการของการเคลื่อนที่แบบโค้ง	16
9	ขวดน้ำ (PET) ขนาด 450 cm^3	10
10	การประกอบขวดทดลอง	21
11	การนำลูกบอลปล่อยลงในขวดชุดการทดลอง	22
12	การวัดความถ่วงจำเพาะสารของเหลว	23
13	การบันทึกภาพศึกษาการตกอิสระของเหลวที่มีความหนืด	23
14	ส่วนประกอบของจรวด	24
15	การติดจรวดเข้ากับฐานยิงจรวด	25
16	การยิงจรวดที่มุม 45 องศา	25
17	ไฟล์ที่ต้องการวิเคราะห์	26
18	กำหนดเวลาที่วัตถุเริ่มเคลื่อนที่	26
19	กำหนดจุดเริ่มต้นที่ต้องการวิเคราะห์	27
20	กำหนดจุดอ้างอิง	27
21	การลือกจุดโฟกัสที่วัตถุเริ่มต้น	27
22	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในแนวราบกับเวลา	29
23	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยการตกอย่างอิสระ ของวัตถุภายใต้สนามโน้มถ่วง	30
24	ความเร็วของการเคลื่อนที่โดยการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้สนามโน้มถ่วง	30
25	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในแนวราบกับเวลา	31

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยการตกอย่างอิสระ ของวัตถุภายใต้แรงต้านอากาศ	31
27	ความเร็วของการเคลื่อนที่โดยการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้แรงต้านอากาศ	32
28	ค่าความถ่วงจำเพาะ (ก) น้ำมันถั่วเหลือง (ข) น้ำมันปาล์ม (ค) น้ำมันมะกอก (ง) น้ำมันเครื่อง	34
29	ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุตกผ่านน้ำมันปาล์ม (ก) ตำแหน่งกับเวลา (ข) อัตราเร็วกับเวลา	37
30	ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุตกผ่านน้ำมันถั่วเหลือง (ก) ตำแหน่งกับเวลา (ข) อัตราเร็วกับเวลา	38
31	ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุตกผ่านน้ำมันมะกอก (ก) ตำแหน่งกับเวลา (ข) อัตราเร็วกับเวลา	39
32	ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุตกผ่านน้ำมันปาล์ม (ก) ตำแหน่งกับเวลา (ข) อัตราเร็วกับเวลา	40
33	ความเร็วของวัตถุเคลื่อนที่ผ่านของเหลว 4 ชนิด	41
34	สัมประสิทธิ์ความหนืดและอุณหภูมิ	43
35	จรวดขวดน้ำจากขวดน้ำอัดลม (PET)	44
36	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำที่แรงดัน 0.25 bar	44
37	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำที่แรงดัน 0.50 bar	45
38	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำที่แรงดัน 0.75 bar	45
39	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำที่แรงดัน 1.00 bar	45
40	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำที่แรงดัน 1.25 bar	46
41	การกระจัดแนวตั้งของจรวด	46
42	การเคลื่อนที่ในแนวราบที่ความดันในการยิง 0.25-1.25 bar	47
43	ความเร็วในแนวตั้งที่ 0.25 bar	48
44	ความเร็วในแนวตั้งที่ 0.50 bar	48

ภาพที่

หน้า

45

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการยิงในแนวราบ

49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีบทบาทสำคัญต่อมนุษย์และการพัฒนาประเทศเป็นอย่างมาก เพราะวิทยาศาสตร์เกี่ยวข้องกับชีวิตของทุกคน ทั้งการดำรงชีวิตประจำวันและในงานอาชีพต่างๆ เครื่องมือเครื่องใช้ตลอดจนผลผลิตทางด้านเทคโนโลยีที่ใช้เพื่ออำนวยความสะดวกในชีวิตและการทำงาน ล้วนเป็นผลของความรู้ทางวิทยาศาสตร์ผสมผสานกับความคิดที่สร้างสรรค์และศาสตร์อื่นๆ ความรู้วิทยาศาสตร์ทำให้เกิดการพัฒนาด้านเทคโนโลยีอย่างมาก ในทางกลับกันเทคโนโลยีก็มีส่วนสำคัญมากที่ทำให้มีการศึกษาค้นคว้าความรู้ทางวิทยาศาสตร์เพิ่มขึ้นอย่างไม่หยุดยั้ง วิทยาศาสตร์ทำให้คนได้พัฒนาวิธีคิด ทั้งความคิด เป็นเหตุเป็นผล คิดวิเคราะห์ วิเคราะห์ คิดสร้างสรรค์ มีทักษะสำคัญในการค้นคว้าหาความรู้มีความสามารถในการแก้ปัญหาได้อย่างเป็นระบบ

การจัดการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์มีรูปแบบต่างๆ ที่จะช่วยส่งเสริมให้นักเรียนเกิดกระบวนการเรียนรู้ โดยผ่านกระบวนการสังเกต การสำรวจตรวจสอบ การศึกษาค้นคว้าอย่างเป็นระบบ และการสืบค้นข้อมูล ทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ และวิชาฟิสิกส์เป็นวิทยาศาสตร์ที่สำคัญสาขาหนึ่งของวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับความจริงที่เกิดขึ้นในธรรมชาติเพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจในปรากฏการณ์ทางธรรมชาติและสามารถค้นคว้าหาข้อเท็จจริงอย่างมีเหตุผล นอกจากนี้แล้วความรู้ทางฟิสิกส์ยังเป็นความรู้พื้นฐานในการประยุกต์ใช้ในสาขาวิชาต่างๆ อีกมากมาย ดังนั้น ในงานวิจัยชิ้นนี้ คณะผู้วิจัยเห็นความสำคัญกับการจัดกิจกรรมการเรียนรู้วิชาฟิสิกส์ โดยจะทำการศึกษาวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้อิทธิพลแรงโน้มถ่วงของโลก โดยศึกษาการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้แรงต้านอากาศ การตกอิสระของวัตถุภายใต้ของเหลวที่มีความหนืด และการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบวิถีโค้ง ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยใช้ภาพถ่าย โดยใช้โปรแกรม Tracker 4.05 เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่สามารถระบุตำแหน่งความเร็ว ความเร่ง พิกัดตำแหน่งของวัตถุ ได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ยังเป็นโปรแกรมที่สามารถใช้เป็นสื่อในการช่วยพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนให้สูงขึ้น และทำให้การเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการตกอิสระภายใต้แรงต้านอากาศ
2. เพื่อศึกษาการตกอิสระของวัตถุภายใต้ของเหลวที่มีความหนืด
3. เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่แบบวิถีโค้ง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อให้นักศึกษาสามารถเข้าใจและประยุกต์ใช้ในการเรียนรายวิชาฟิสิกส์พื้นฐาน
2. เพื่อเป็นแนวทางสำหรับครูผู้สอน ในการพัฒนาการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์โดยใช้โปรแกรม Tracker 4.05 ซึ่งสามารถช่วยในการส่งเสริมการเรียนการสอนง่ายขึ้น
3. เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับผู้สนใจในการศึกษาค้นคว้าในพัฒนาความรู้ต่อไป

1.4 ขอบเขต

วิเคราะห์การเคลื่อนที่ในการตกอย่างอิสระของวัตถุด้วยโปรแกรม Tracker 4.05

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

โปรแกรม Tracker 4.05 คือ เป็น Freeware ที่สามารถใช้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของสิ่งต่างๆ ครั้งละเฟรม จากวิดีโอภาพเคลื่อนไหว ซึ่งเป็นโปรแกรมหนึ่งที่ใช้วิเคราะห์ภาพถ่ายที่นิยมใช้เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่ใช้ได้ง่ายและเป็นโปรแกรมฟรีแวร์ไม่มีลิขสิทธิ์ พัฒนาโดย Doug Brown เมื่อมีถุนายน 2548(ค.ศ.2005) ปัจจุบันนี้มีการพัฒนาโปรแกรม Tracker 4.72 เมื่อวันที่ 26 สิงหาคม 2555 ภายใต้ความร่วมมือของ Open Source Physics (OSP) ซึ่งเปิดโอกาสให้ผู้สนใจร่วมพัฒนาโปรแกรมได้โดยไม่มีลิขสิทธิ์ โปรแกรมสามารถระบุตำแหน่งความเร็วและความเร่ง สามารถแสดงออกเป็นกราฟ อีกทั้งยังสามารถกำหนดสมการได้ ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการสอนวิชาฟิสิกส์ทั้งภาคบรรยายและภาคปฏิบัติ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

1. การตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้แรงต้านอากาศ

1.1 การตกอย่างอิสระ (Free Fall)

การตกอย่างเสรีภายใต้อิทธิพลของสนามความโน้มถ่วงของโลก เป็นการเคลื่อนที่ในหนึ่งมิติด้วยความเร่งคงที่ ความเร่งของการเคลื่อนที่ในกรณีนี้ เรียกว่า ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง ซึ่งนิยมให้สัญลักษณ์เป็น g ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลกมีทิศเข้าสู่ศูนย์กลางของโลกเสมอ โดยปกติค่า g ขึ้นกับระดับความสูงแต่ที่ใกล้ผิวเปลือกโลกค่าของ $g \approx 9.8 \text{ m/s}^2$ (ไม่คิดแรงต้านอากาศ) ซึ่งถ้าไม่ระบุเป็นอย่างอื่นให้ใช้ค่านี้ในการคำนวณ

เมื่อโยนวัตถุขึ้นหรือลงตามแนวดิ่ง แต่ละกรณีวัตถุจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเท่ากัน ความเร่ง g มีเครื่องหมายเป็นบวกหรือลบขึ้นกับการพิจารณาแนวแกน xy กล่าวคือ เมื่อกำหนดให้แกน $+y$ ตั้งขึ้น ทิศลงล่างย่อมแทนได้ด้วยเครื่องหมายลบ ดังนั้นความเร่งของการเคลื่อนที่ตามแนวดิ่งอย่างเสรีคือ $a = -g$ จึงเขียนสมการของการเคลื่อนที่ตามแนวดิ่งอย่างเสรี ดังนี้

$$v = v_0 - gt \quad (1)$$

$$y - y_0 = \frac{1}{2}(v + v_0)t \quad (2)$$

$$y - y_0 = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (3)$$

$$v^2 = v_0^2 - 2g(y - y_0) \quad (4)$$

การตกอย่างอิสระ เป็นการเคลื่อนที่ของวัตถุ ในแนวดิ่งแบบความเร่งคงที่โดยมีความเร็วต้นของการเคลื่อนที่มีค่าเป็นศูนย์เมื่อนำสมการเหล่านี้ไปใช้ (ในระบบที่ $+y$ ตั้งขึ้น) ให้แทนค่า $g=9.8 \text{ m/s}^2$ ได้ทันที

ลักษณะของการเคลื่อนที่การตกอย่างอิสระมี 2 ลักษณะ

1. ปล่อยลงในแนวดิ่งด้วยความเร็วต้นเท่ากับศูนย์ ($u = 0$)

2. โยน/ปาขึ้นหรือลงในแนวดิ่งด้วยความเร็วต้น ($u > 0$)

การเคลื่อนที่ลักษณะที่ 1 และ 2 วัตถุเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงด้วยความเร่ง g คงที่ใช้สมการคำนวณ คือ

$$v = u + gt \quad (5)$$

$$s = ut + \frac{1}{2} gt^2 \quad (6)$$

$$v^2 = u^2 + 2gs \quad (7)$$

1.2 วัตถุตกอย่างอิสระภายใต้แรงต้านอากาศ

แรงต้าน หมายถึง แรงที่มีทิศต้านทิศทางการเคลื่อนที่ แรงต้านอาจทำให้วัตถุไม่เกิดการเคลื่อนที่หรือทำให้วัตถุที่เคลื่อนที่อยู่มีการเคลื่อนที่ช้าลง

แรงเสียดทาน หมายถึง แรงที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างผิววัตถุที่มีการเคลื่อนที่หรือพยายามที่จะเคลื่อนที่แรงเสียดทานเป็นแรงต้านแบบหนึ่งที่มีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่เสมอ

แรงเสียดทานมี 2 ชนิด คือ

1. แรงเสียดทานสถิต (f_s) คือ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะวัตถุเริ่มเคลื่อนที่

2. แรงเสียดทานจลน์ (f_k) คือ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะวัตถุกำลังเคลื่อน

ขณะวัตถุตกอย่างอิสระเป็นการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งภายใต้สนามโน้มถ่วงของโลก (g) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ใน 1 มิติ ถ้าพิจารณาการเคลื่อนที่ของวัตถุใกล้ผิวโลก โดยไม่คิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของอากาศที่กระทำต่อวัตถุ จะได้แรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุ (F) เป็นไปตามสมการดังนี้

$$F = -mg \quad (8)$$

เครื่องหมายลบแสดงแรงลัพธ์ F มีทิศพุ่งลงในแนวดิ่ง และจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตันจะได้ว่า

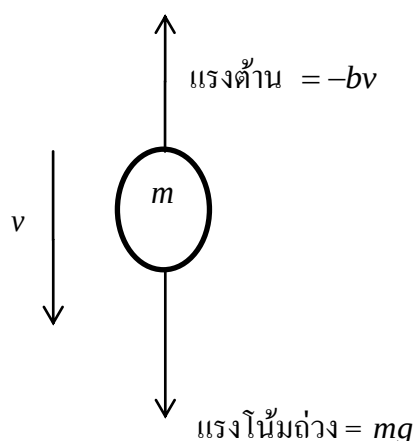
$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -mg \quad (9)$$

จากสมการ (9) สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของวัตถุ (v) กับเวลา (t) ได้ดังนี้

$$v = v_0 - gt$$

$$\text{และ} \quad x = x_0 + v_0 t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (10)$$

การพิจารณากรณีที่มีแรงต้านการเคลื่อนที่ของอากาศ โดยแรงต้านนี้จะเป็นสัดส่วนโดยกับ v ยกกำลังหนึ่ง ($\therefore v$ มีค่าน้อย) ซึ่งทิศทางของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อวัตถุแสดงได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ทิศทางของแรงต้านการเคลื่อนที่ของอากาศ และแรงโน้มถ่วงกระทำต่อวัตถุ
ที่มา (รัชณี, 2551)

จากภาพที่ 1 สามารถนำมาเขียนแรงลัพธ์ F ที่กระทำต่อวัตถุได้ดังนี้

$$F = -mg - bv \quad (11)$$

กำหนดให้ทิศขึ้นบนเป็นบวก และวัตถุกำลังเคลื่อนที่ลง ดังนั้น v จึงมีค่าเป็นลบทำให้ปริมาณ $-bv$ เป็นบวก ดังนั้น v จึงมีค่าเป็นลบทำให้ปริมาณ $-bv$ เป็นบวก ดังนั้นแรงทั้งสองในสมการ (11) จึงมีทิศตรงข้ามกันเสมอสำหรับค่าคงตัว b ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของวัตถุรวมทั้งความหนืดของอากาศ จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตันจะได้ว่า

$$-mg - bv = m \frac{dv}{dt}$$

ให้ความเร็วต้นของวัตถุ $v_0 = 0$ ที่เวลา $t = 0$

$$\int_0^v \frac{dv}{v + \frac{mg}{b}} = -\frac{b}{m} \int_0^1 dt$$

$$\ln\left(v + \frac{mg}{b}\right) \int_0^v = -\frac{b}{m}t$$

$$\ln\left(v + \frac{mg}{b}\right) = -\frac{b}{m}t$$

$$v + \frac{mg}{b} = \frac{mg}{b} e^{-\frac{b}{m}t}$$

$$v = -\frac{mg}{b} \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t}\right) \quad (12)$$

กระจายฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลในรูปอนุกรมกำลัง (power series)

$$e^{-\frac{b}{m}t} = 1 - \frac{b}{m}t + \frac{1}{2}\left(\frac{b}{m}t\right)^2 + \dots$$

ดังนั้น

$$v = -gt + \frac{1}{2} \frac{bg}{m} t^2 + \dots \quad (13)$$

สามารถนำสมการ (12) และ (13) มาพิจารณาการเคลื่อนที่ของวัตถุมวล m ตกอย่างอิสระได้ดังนี้

(1) กรณี t มีค่าน้อย $\left(t \ll \frac{m}{b}\right)$ จากสมการ (6) จะได้ว่า

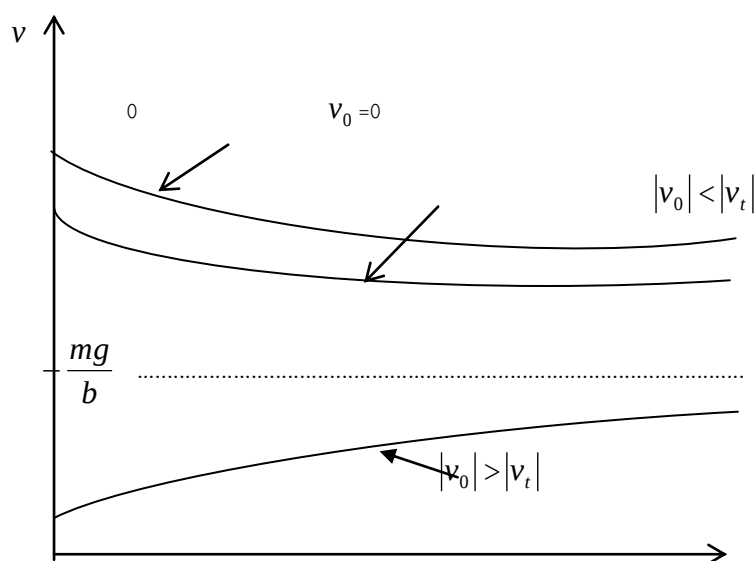
$$v = -gt$$

แสดงว่า แรงต้านการเคลื่อนที่ของอากาศไม่มีผลต่อการตกของวัตถุ วัตถุจะเคลื่อนที่ภายใต้สนามโน้มถ่วง g อย่างเดียว

(2) กรณี t มีค่ามาก $\left(t \gg \frac{m}{b}\right)$ จากสมการ (5) จะได้ว่า

$$v = -\frac{mg}{b} \quad (14)$$

จากสมการ (13) เห็นได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไปนานๆ ความเร็วของวัตถุจะคงที่ ($v = -mg/b$) เรียกความเร็วนี้ว่า ความเร็วปลายของวัตถุ (v_t) การที่ความเร็วของวัตถุคงตัว แสดงว่า ขณะนั้นแรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุเป็นศูนย์ ดังนั้น วัตถุที่ตกอย่างอิสระจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วจากความเร็วต้นไปสู่ความเร็วปลายในลักษณะต่างๆ กันตามกราฟดังรูป



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุที่ตกอย่างอิสระ

จากภาพที่ 2 นำมาอธิบายได้ดังนี้

ถ้าขนาดความเร็วต้นของวัตถุเป็นศูนย์ ($v_0 = 0$ ที่เวลา $t = 0$) วัตถุจะค่อยๆ ถูกเร่งเพื่อให้นิขนาดของความเร็วเพิ่มขึ้น ทำให้ขนาดของแรงต้านการเคลื่อนที่ของอากาศเพิ่มขึ้น จนกระทั่งแรงต้านการเคลื่อนที่มีขนาดเท่ากับแรงโน้มถ่วง แรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุจึงเป็นศูนย์ ซึ่งขณะนั้นความเร็วของวัตถุจะเท่ากับความเร็วปลาย ($v_t = -mg/b$ เครื่องหมายลบ แสดงทิศทางของความเร็ว)

ถ้าขนาดของความเร็วต้นน้อยกว่าขนาดของความเร็วปลาย ($|v_0| < |v_t|$) วัตถุจะค่อยๆ ถูกเร่งจนกระทั่งความเร็วเข้าสู่ v_t

ถ้าขนาดความเร็วต้นมากกว่าขนาดความเร็วปลาย ($|v_0| > |v_t|$) วัตถุจะถูกหน่วงให้ช้าลงทันทีและในที่สุดจะมีความเร็วเข้าสู่ v_t

จากสมการ (14) จะได้ว่า

$$b = \frac{-mg}{v_t} \quad (15)$$

สมการ (15) เป็นสมการที่ใช้ในการหาค่า b ซึ่งเป็นค่าคงตัวของแรงต้านการเคลื่อนที่ของอากาศที่กระทำต่อวัตถุ ในกรณีที่อากาศเป็นของเหลวใดๆค่า b ก็จะเป็นค่าคงตัวของแรงต้านการเคลื่อนที่ของของเหลวที่กระทำต่อวัตถุที่ตกอย่างอิสระในของเหลวนั้นๆ เพราะจากการทดลองสามารถหาค่า v_t ได้

กรณี $\left(t = \frac{m}{b}\right)$ จากสมการ (12) จะได้ว่า

$$v = \frac{-mg}{b} \left(1 - e^{-\frac{b}{m} \frac{m}{b}}\right)$$

$$v = -v_t \left(1 - \frac{1}{e}\right)$$

$$\therefore v = 0.63 v_t$$

นั่นคือ ขนาดของความเร็วของวัตถุจะลดลงเป็น 0.63 เท่าของความเร็วปลาย ถ้าใช้

เวลานานขึ้นเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{m}{b}$ จะได้ว่า

$$\text{ที่ } t = 2m/b; \quad v = v_t (1 - e^{-2})$$

$$\text{ที่ } t = 3m/b; \quad v = v_t (1 - e^{-3})$$

$$\text{ที่ } t = 5m/b; \quad v = v_t (1 - e^{-5})$$

แสดงว่าเมื่อเวลาผ่านไป 5 เท่าของ $\frac{m}{b}$ วัตถุจะมีความเร็วเกือบเท่าความเร็วปลาย ซึ่งถือว่าเท่ากับความเร็วปลายของวัตถุนั่นเอง

2. การตกอิสระของวัตถุภายใต้ของเหลวที่มีความหนืด

เมื่อของไหลมีการเคลื่อนที่ แต่ละโมเลกุลของของไหลจะมีการเคลื่อนที่ชนกันไปมาตลอดเวลาด้วยทิศทางที่ไม่แน่นอน ซึ่งจะส่งผลให้การเคลื่อนที่ของของไหล หรือการเคลื่อนที่ของวัตถุในของไหลทั้งเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ในของเหลว จะเกิดแรงต้านเนื่องจากความหนืดเช่นกัน แรงต้านนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วแต่มีทิศทางตรงกันข้าม

หลักการของความหนืดอาจกล่าวได้อีกประการหนึ่ง คือ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ในของเหลวจะเกิดแรงต้านเนื่องจากความหนืดเช่นกัน แรงต้านนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วแต่มีทิศทางกันข้าม และเป็นไปตามสมการ

$$\bar{R} = -k\eta\bar{v} \quad (16)$$

เมื่อ $\bar{R}$ แทน แรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุ เกิดจากความหนืด

$\bar{v}$ แทน ความเร็วของวัตถุ

η แทน ค่าคงตัวซึ่งขึ้นอยู่กับความหนืด ค่านี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของความหนืด (Coefficient of viscosity)

K แทน ค่าคงตัวซึ่งขึ้นกับรูปร่างของวัตถุ เช่น สำหรับวัตถุทรงกลม รัศมี R ค่า K จะเท่ากับ $6\pi R$

$$\bar{R} = -6\pi\eta R\bar{v} \quad (17)$$

สมการนี้เรียกว่า กฎของสโตกส์ (Stokes law)

เมื่อวัตถุทรงกลมรัศมี R มวล m ตกในของเหลวที่มีความหนืด จะมีแรงต่างๆกระทำต่อวัตถุ คือ น้ำหนัก $\bar{W}$ แรงพยุง $\bar{B}$ และแรงหนืด $\bar{R}$ วัตถุจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง จากกฎการเคลื่อนที่ ข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$\bar{W} + \bar{B} + \bar{R} = m\bar{a} \quad (18)$$

วัตถุเคลื่อนที่ลงให้ทิศลงเป็นบวก จะได้

$$\bar{W} - (\bar{B} + \bar{R}) = m\bar{a} \quad (19)$$

ความเร็วของวัตถุจะเพิ่มขึ้นเป็นผลให้แรงหนืดมีค่ามากขึ้นด้วย แรงหนืดจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด ซึ่งจะทำให้แรงลัพธ์บนวัตถุเท่ากับศูนย์ ขณะนั้นความเร่ง $\vec{a} = 0$ แต่ความเร็วจะมีค่าสูงสุด ซึ่งเรียกว่า ความเร็วปลาย (Terminal Velocity) และจะเขียนสมการได้เป็น

$$\vec{W} - (\vec{B} + \vec{R}) = 0 \quad (20)$$

$$F = 6\pi\eta r v \quad (21)$$

เมื่อ	B แทน	แรงลอยตัว (N)
	V แทน	ปริมาตร (m^3)
	γ แทน	ความตึงผิว (N / m)
	F แทน	แรงตึงผิว (N / m)
	L แทน	ความยาวเส้นผิวของเหลว (m)
	f แทน	แรงหนืด (N)
	η แทน	สัมประสิทธิ์ความหนืด ($N.s/m^2$)
	r แทน	รัศมีทรงกลม (m)
	v แทน	อัตราเร็ว (m /s)

ความหนืดของของเหลวบางชนิดยังขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของ แรงเฉือน (Rate of shear) จะเรียกของเหลวประเภทนี้เป็น non-Newtonian fluid น้ำโคลน แป้งที่ละลาย ตัวอย่างเช่น จารบี ยางมะตอย สีทาบ้าน ยาสีฟัน ethylene โพลีเอธิลีนเหลว พลาสมาในเลือด น้ำ การวัดความหนืดของของเหลวทำได้หลายวิธีที่นิยมใช้กันได้แก่ การให้ของของเหลวไหลผ่านท่อเล็กๆ แล้ววัดอัตราการไหลของของเหลวในท่อ หรือหย่อนวัตถุทรงกลมลงในช่องของเหลว แล้วจับเวลาที่ลูกกลมจมลงในช่วงระยะที่กำหนดให้ในหลอดทดลอง

ในการทดลองวัดความหนืดของของเหลวในที่นี้จะใช้วิธีให้ลูกทรงกลมตกอย่างอิสระในของไหล ลูกกลมเล็กๆ นี้ มีน้ำหนักเบา ทำให้ตกลงในของเหลวอย่างช้าๆ ของเหลวที่อยู่ด้านหน้าของลูกกลมจะไหลอย่างช้าๆ เข้าแทนที่ช่องว่างที่ทรงกลมวิ่งผ่านโดยที่ของเหลวนั้นไม่มีการหมุนวน

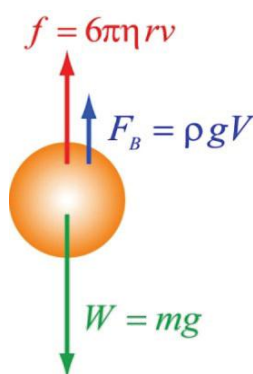
แรงโน้มถ่วงจะทำให้ลูกกลมตกลงมาในทิศพุ่งลง โดยมีแรง 2 แรง คือ แรงลอยตัว (Buoyant Force, F_B) และ แรงต้านเนื่องจากความหนืด (Viscous drag Force, F_V) กระทำต่อทรงกลมในทิศทางพุ่งขึ้น สมการการเคลื่อนที่ของลูกกลม คือ

$$mg - F_B - F_V = ma \quad (22)$$

เมื่อ m แทน มวลของลูกกลม (g)

a แทน ความเร่งของลูกกลมในของเหลว (m/s^2)

ลูกกลมตกลงมาด้วยความเร่ง แรงต้านจากความหนืดและแรงลอยตัวจะหน่วงให้วัตถุเคลื่อนที่ช้าลงจนกระทั่งไม่มีความเร่ง หรือ ลูกกลมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ เรียกความเร็วนี้ว่า ความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) เมื่อความเร่งเป็นศูนย์



ภาพที่ 3 แรงที่กระทำต่อลูกเหล็กขณะที่เคลื่อนที่ในของเหลวที่มีความหนืด

สิ่งที่น่าสนใจคือเมื่อลูกเหล็กเคลื่อนที่ภายในของเหลว ในช่วงแรกอัตราเร็วของลูกเหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้น(เคลื่อนที่ด้วยความเร่งมีทิศเดียวกับทิศความเร็ว) แต่เนื่องจากแรงหนืดมีค่ามากขึ้นตามขนาดของความเร็วที่เพิ่มขึ้นด้วย ในที่สุดแล้วแรงหนืดนี้จะมีขนาดมากพอที่จะทำให้แรงสุทธิในแนวดิ่งมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งย่อมาหมายความว่าวัตถุจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (ความเร่งเป็นศูนย์) ความเร็วนี้เรียกว่า “ความเร็วปลาย”(terminal velocity)

เราสามารถคำนวณหาขนาดของความเร็วปลาย (V_t) ได้โดยอาศัยเงื่อนไขของสมดุลของระบบ เนื่องจากวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ หมายความว่าวัตถุอยู่ในสภาวะสมดุล แรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุมีค่าเป็นศูนย์

ถ้าเรากำหนดให้ทิศขึ้นเป็นบวก จากภาพที่ 2 เราสามารถเขียนสมการ ได้เป็น

$$F_B + f - mg = 0 \quad (23)$$

แทนค่าต่างๆ ตามที่ได้อธิบายไปข้างต้นจะได้เป็น

$$6\pi\eta v_t + \rho_1 g V_0 - \rho_0 g V_0 = 0 \quad (24)$$

สมการให้ขนาดของอัตราเร็วปลายอยู่ทางซ้ายของสมการ จะได้เป็น

$$v_t = \frac{\rho_0 g v_0 - \rho_1 g v_0}{6\pi\eta r} = \frac{(\rho_0 - \rho_1) g V_0}{6\pi\eta r} \quad (25)$$

เราสามารถเขียนปริมาตรของลูกเหล็กทรงกลมให้อยู่ในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม (r) ได้โดยอาศัยสูตรการหาปริมาตรทรงกลม

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi \left[\frac{D}{2} \right]^3 = \frac{1}{4} \pi D^3 \quad (26)$$

เพราะฉะนั้นอัตราเร็วปลายในสมการที่ 18 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็น

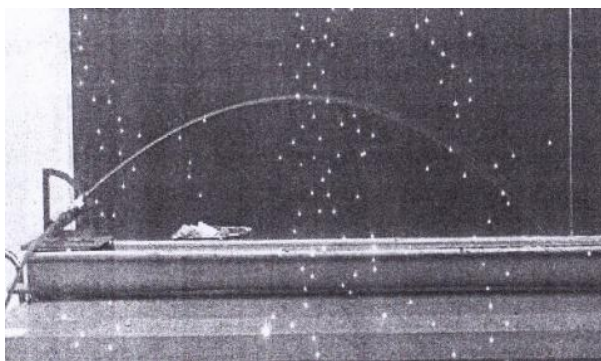
$$v_t = \frac{(\rho_0 - \rho_1) g r^2}{18\eta} \quad (27)$$

ในการทดลองเราสามารถอาศัยความสัมพันธ์ในสมการที่ 27 ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความหนืดของของเหลวที่ทรงกลมเคลื่อนที่ได้อยู่ได้โดยทำการวัดขนาดของความเร็วสุดท้ายของทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนกราฟระหว่างอัตราเร็วปลาย (แนวตั้ง) กับเส้นผ่านศูนย์กลางกำลังสองผลที่ได้ควรจะให้กราฟที่เป็นกราฟเส้นตรงโดยมีความชันเท่ากับ

$$\text{ความชัน} = \frac{(\rho_0 - \rho_1) g}{18\eta} \quad (28)$$

จากความชันที่ได้นี้ก็สามารถบอกค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของของเหลว η ได้

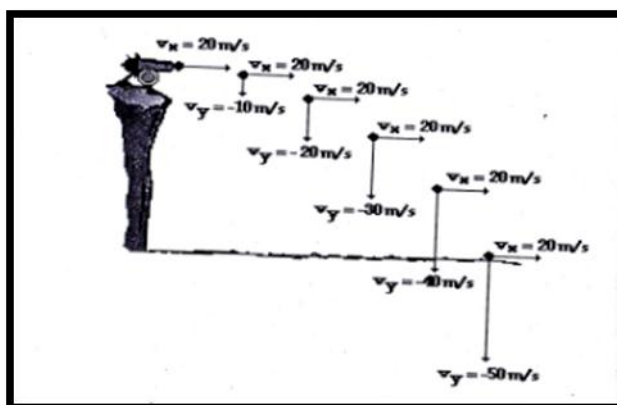
3. การเคลื่อนที่แบบวิถีโค้ง



ภาพที่ 4 การเคลื่อนที่วิถีโค้งของกระแสน้ำ

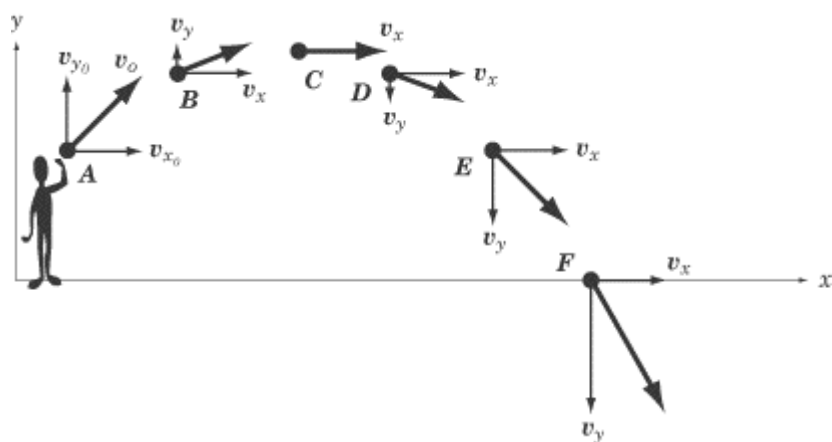
การเคลื่อนที่วิถีโค้งเป็นผลรวมของการเคลื่อนที่ 2 แบบเข้าด้วยกัน คือ

1. การเคลื่อนที่ในแนวราบด้วยความเร็วคงตัว
2. การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งด้วยความเร่งคงตัว

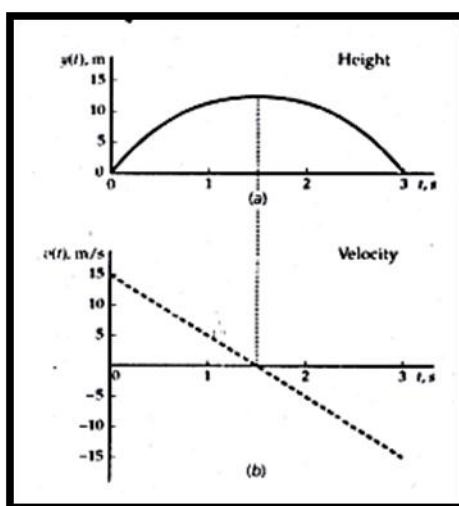


ภาพที่ 5 การเคลื่อนที่แนวราบความเร็วคงตัวและแนวดิ่งด้วยความเร่งคงตัว

ตัวอย่างการเคลื่อนที่แนววิถีโค้ง ได้แก่ การเคลื่อนที่ของลูกฟุตบอล ลูกกอล์ฟ เทนนิส แบดมินตัน เปตอง วอลเลย์บอล การเคลื่อนที่ของลูกปืนใหญ่ ฯลฯ วิธีการเคลื่อนที่วิถีโค้ง จะมีเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งรูปพาราโบลา ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การเคลื่อนที่วิถีโค้ง



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบกราฟ $y - t$ กับ $v - t$

การวิเคราะห์การเคลื่อนที่โดยใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์
จากภาพที่ 6 พิจารณาเวกเตอร์ความเร็วที่จุด A จะเห็นว่า

$$\cos \theta_i = \frac{v_{xi}}{v_i} \quad \text{และ} \quad \sin \theta_i = \frac{v_{yi}}{v_i}$$

จะได้

$$v_{xi} = v_i \cos \theta_i$$

$$v_{yi} = v_i \sin \theta_i$$

(29)

ระยะทางในแนวราบของการเคลื่อนที่วิถีโค้ง หาได้จากสมการ

$$v_f = v_{xi}t$$

ได้

$$v_{yi} = (v_i \cos \theta_i)t$$

ดังนั้น

$$t = \frac{x_f}{v_i \cos \theta_i}$$

และความสูงของการเคลื่อนที่วิถีโค้งหาได้จากสมการ

$$y_f = v_{yi}t + \frac{1}{2}gt^2$$

$$y_f = (v_i \cos \theta_i)t + \frac{1}{2}gt^2$$

$$y = (v_i \sin \theta_i) \left[\frac{x_f}{v_i \cos \theta_i} \right] + \frac{1}{2}(-g) \left[\frac{x_f}{v_i \cos \theta_i} \right]^2$$

$$y = (\tan \theta_i)x \left[\frac{g}{2v_i^2 \cos^2 \theta_i} \right] x^2 \quad (30)$$

สมการ (30) มีรูปเป็น $y = ax - bx^2$ ซึ่งเป็นสมการของเส้นโค้งพาราโบลา ดังนั้นวิธีการเคลื่อนที่จึงเป็นเส้นโค้งพาราโบลาและหาอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ หาได้จากสมการ

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

จากภาพที่ 6 จะได้

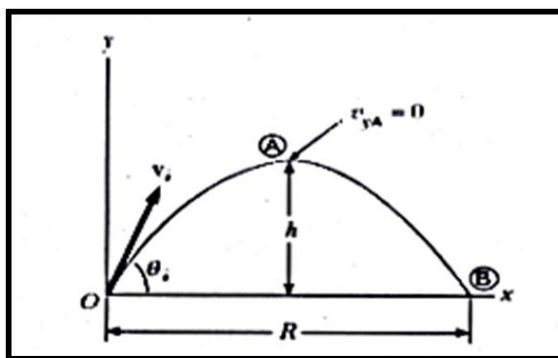
$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x}$$

ดังนั้นมุมที่ความเร็วทำกับแกน x หาได้จากสมการ

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x}$$

ระยะสูงสุดในแนวราบ และแนวตั้งของการเคลื่อนที่วิถีโค้ง

กำหนดให้วัตถุเคลื่อนที่ออกจากจุดกำเนิดด้วยความเร็วต้น v_i และทำมุม θ_i กับแนวระดับ ดังภาพที่ 8 สามารถหาระยะสูงสุดในแนวตั้งและระยะไกลสุดในแนวราบ ได้ดังนี้



ภาพที่ 8 วิธีของการเคลื่อนที่แบบโค้ง

พิจารณาการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวตั้ง

จาก

$$v_{yf} = v_{yi} + a_y t$$

ที่จุดสูงสุด

$$v_y = 0$$

$$0 = v_i \sin \theta_i + (-g)t_A$$

$$t_A = \frac{v_i \sin \theta_i}{g} \quad (31)$$

เมื่อ t_A เป็นเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ถึงจุดสูงสุด (จุด A)

ระยะทางในแนวตั้ง ที่เวลา t ใดๆ หาได้จากสมการ

$$y_f = v_{yi} t + \frac{1}{2} a_y t^2 \quad (32)$$

แทนสมการ (31) ในสมการ (32) ได้

$$\begin{aligned} y_{\max} &= (v_i \sin \theta_i) \left[\frac{v_i \sin \theta_i}{g} \right] + \frac{1}{2} g \left[\frac{v_i \sin \theta_i}{g} \right]^2 \\ y_{\max} &= \frac{v_i^2 \sin^2 \theta_i}{2g} \\ h_{\max} &= \frac{v_i^2 \sin^2 \theta_i}{2g} \end{aligned} \quad (33)$$

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดิเรก บุญธรรม และคณะ (2556) ได้ศึกษาและได้พัฒนาอุปกรณ์การทดลองเรื่องการตกอิสระ ซึ่งมีการศึกษาและนำไปใช้ทดลองสอนกับนักศึกษาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เริ่มจากการนำเทคนิคไมคอนโทรลเลอร์มาใช้คู่กับการออกแบบ โดยใช้ตัวตรวจจับการตกของวัตถุแบบตรวจจับการสั่นสะเทือนแทนการใช้ตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบแสง ซึ่งพบว่าข้อดีของตัวตรวจจับการตกของวัตถุแบบตรวจจับการสั่นสะเทือนดีกว่าตัวตรวจจับแบบแสงในแง่ของความเที่ยงตรงและความแม่นยำของการทดลองนอกจากนี้การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองของนักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพพบว่าอุปกรณ์ที่ได้จากการพัฒนาโดยใช้ตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนชุดใหม่นี้ ง่ายต่อการวัดทำให้ได้ค่าของระยะทางที่มีความผิดพลาดน้อยกว่าอุปกรณ์ที่ใช้ตัวตรวจจับแบบแสง

สุธิตา ต้นสุวรรณ และคณะ (2556) ได้ศึกษาและพัฒนาศักยภาพในการผลิตอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับครุวิทยาการโดยการสร้างอุปกรณ์และทดลองใช้กลุ่มตัวอย่างคือครุวิทยาการระดับช่วงชั้นที่ 3 จำนวน 24 คน ที่ได้มาอย่างเจาะจงจากโรงเรียนจังหวัดปัตตานี ยะลา และนราธิวาส ผลการศึกษาพบว่าครูมีความรู้เพิ่มขึ้น และมีแนวคิดในการนำวัสดุในท้องถิ่นและวัสดุเหลือใช้มาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์วิทยาศาสตร์เพื่อใช้เป็นสื่อการสอน และเป็นวิทยากรจัดการอบรมการผลิตอุปกรณ์ให้กับเพื่อนครูที่อยู่ในโรงเรียนใกล้เคียง

พรรัตน์ วัฒนกลีวิช (2555) การวิเคราะห์วิธีโอ้อัตราเร็วสูงในกลศาสตร์ ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ส่งผลให้กล้องดิจิทัลที่มีฟังก์ชันถ่ายวิดีโออัตราเร็วสูงมีราคาในระดับผู้บริโภค รวมทั้งโปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอหลายโปรแกรมที่พัฒนาโดยนักฟิสิกส์สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองฟิสิกส์ โดยเฉพาะในกลศาสตร์ ปัจจัยเหล่านี้สร้างโอกาสให้ผู้สอนวิชาฟิสิกส์สามารถนำเทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงมาใช้สอนในหัวข้อกลศาสตร์ บทความนี้มีเป้าหมายประสงค์เพื่อเผยแพร่ข้อมูลที่จำเป็นต่อการเริ่มต้นบันทึกและวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง ได้แก่ งานวิจัยที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง กล้องดิจิทัลอัตราเร็วสูง การจัดองค์ประกอบสำหรับบันทึกวิดีโออัตราเร็วสูง โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูง การใช้โปรแกรม Tracker เบื้องต้น ตัวอย่างการวิเคราะห์วิดีโออัตราเร็วสูงในกลศาสตร์ด้วยโปรแกรม Tracker และความคลาดเคลื่อนในการบันทึกวิดีโอ

ขจรศักดิ์ บัวระพันธ์ และคณะ (2548) ได้ศึกษากรณีวัตถุเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงตัว ผสมผสานกับการเคลื่อนที่แบบโปรเจกไทล์ ปรากฏในคำถามที่ใช้ในการสัมภาษณ์ คือลูกบอลเคลื่อนที่บนโต๊ะเรียบและลื่นด้วยอัตราเร็วคงตัว เมื่อให้นักศึกษาระบุแรงที่กระทำต่อลูกบอลที่ถูกผลักให้เคลื่อนที่บนโต๊ะเรียบและลื่นด้วยอัตราเร็วคงตัว พบว่าไม่มีนักศึกษาค้นใดมีแนวคิดทางวิทยาศาสตร์ โดยสามารถระบุแรงสองแรงที่กระทำต่อลูกบอลได้ถูกต้อง คือแรงปฏิกิริยาที่พื้นกระทำต่อลูกบอลและน้ำหนักของลูกบอล และนักศึกษาทุกคนมีแนวคิดคลาดเคลื่อนจากแนวคิดทางวิทยาศาสตร์ สำหรับ

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงจากการผลักและความเร็วนี้มีนักศึกษา อธิบายคลาดเคลื่อนว่าแรงจากการผลักแปรผันตรงกับความเร็ว ดังนี้ แรงผลักจากมือกระทำต่อลูกบอลจะเท่าเดิมตลอดทำให้วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงตัว หรือมีแรงจากการผลักในทิศการผลักเท่าเดิมตลอด แรงนี้แปรผันตรงกับความเร็ว และด้วยคำถาม ลูกบอลเคลื่อนที่พ้นจากขอบโต๊ะ เมื่อให้นักศึกษาระบุแรงที่กระทำต่อลูกบอลเมื่อเคลื่อนที่พ้นจากขอบโต๊ะ พบว่านักศึกษา มีแนวคิดทางวิทยาศาสตร์เพราะระบุแรงหนึ่งแรงที่กระทำต่อลูกบอล และพบว่านักศึกษา มีแนวคิดคลาดเคลื่อนจากแนวคิดทางวิทยาศาสตร์ว่า เมื่อลูกบอลเคลื่อนที่พ้นจากขอบโต๊ะ ยังคงมีแรงจากการผลักกระทำต่อลูกบอล ซึ่งตามแนวคิดทางวิทยาศาสตร์เมื่อลูกบอลเคลื่อนที่พ้นจากมือแล้ว ถือว่าอันตรกิริยาระหว่างมือกับลูกบอลก็สิ้นสุดลงจึงไม่มีแรงจากมือกระทำต่อลูกบอลอีกต่อไป

ขจรศักดิ์ บัวระพันธ์ และคณะ (2549) พัฒนาแนวคิดเรื่องแรงและการเคลื่อนที่ของวัตถุ เก็บข้อมูลโดยการสัมภาษณ์นักศึกษาคณะวิทยาศาสตร์ชั้นปีที่ 3 จำนวน 4 คน จากมหาวิทยาลัยราชภัฏแห่งหนึ่งในกรุงเทพฯ ผลการศึกษาพบว่า ผู้สอนในระดับมัธยมศึกษาและอุดมศึกษาจัดการเรียนรู้เรื่องแรงและการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยใช้การบรรยายเป็นหลัก และมุ่งเน้นการท่องจำสมการต่างๆ มากกว่าความเข้าใจแนวคิดสำคัญและการประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน ทำให้ผู้เรียนขาดความเข้าใจอย่างถ่องแท้และมีเจตคติที่ไม่ดีต่อการเรียน ในขณะที่กิจกรรมการเรียนรู้ในช่วงการแสดงผลแบบอย่างการสอนแบบผวนก้นเหว ช่วยให้นักศึกษาพัฒนาความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับแรงและการเคลื่อนที่ของวัตถุ ตลอดจนการให้เหตุผลได้ดีกว่า ทั้งนี้พบว่ามุมมองที่ยึดตนเองเป็นศูนย์กลางและแนวคิดเกี่ยวกับแรงขับเคลื่อนภายในของวัตถุเป็นอุปสรรคสำคัญในการเรียนรู้แนวคิดเกี่ยวกับแรงและการเคลื่อนที่ของวัตถุ

อนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์ (2550) ได้สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนววิถีโค้ง โดยคิดแรงเสียดทานของอากาศ เมื่อสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Delphi 7 เพื่อติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนววิถีโค้ง โดยคิดแรงเสียดทานของอากาศ จากค่าเริ่มต้นที่กำหนด $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ การคำนวณจะหยุดเมื่อแบ่งเวลา Δt ให้เล็กลงจากเดิม 11 เท่า นั่นคือ Loop = 11 จะได้ $\Delta t = 9.09 \times 10^{-3} \text{ s}$ จนกระทั่งวัตถุตกถึงพื้นอีกครั้งที่ตำแหน่งไกลสุด $x_{\max} = 106.33 \text{ m}$ ซึ่งใช้เวลาในการเคลื่อนที่ไป $t = 4.45 \text{ s}$ ที่ตำแหน่งสูงสุด $y_{\max} = 25.60 \text{ m}$ ซึ่งขณะนั้นระยะทางในแนวระดับ $x = 61.37 \text{ m}$ และใช้เวลาไป $t = 2.05 \text{ s}$ พื้นที่ใต้กราฟที่ได้เท่ากับ $1.79652 \times 10^3 \text{ m}^2$ เมื่อเปรียบเทียบค่าพื้นที่ใต้กราฟในแต่ละรอบ โดยนำมาเขียนกราฟได้ จะเห็นได้ว่า กราฟจะเริ่มคงที่ตั้งแต่รอบที่ 3 แต่ยังไม่น้อยกว่าเงื่อนไขที่กำหนด จนกระทั่งในรอบที่ 11 จึงเข้าสู่เงื่อนไขดังกล่าว นอกจากนี้การเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่ของวัตถุโดยไม่คิดแรงเสียดทานของอากาศโดยใช้เงื่อนไขต่างๆ เหมือนกัน ซึ่งการเคลื่อนที่ทั้งสองกรณี การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถหาค่าตำแหน่ง, ความเร็วและความเร่ง ที่เวลาใดๆ ได้

ไกรวรรณ แสงชมพู (2551) ได้ศึกษาถึงการพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนโดยใช้แบบฝึกการคิดตามกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ของวัตถุ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าเกณฑ์ ที่ตั้งไว้คือ 83.11/86.39 และมีค่าดัชนีประสิทธิผล (IE) เท่ากับ 0.80 หรือคิดเป็นร้อยละ 80.08 ซึ่งนักเรียนที่เรียนโดยใช้แบบฝึกการคิดตามกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ มีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาวิทยาศาสตร์ มีทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ และเจตคติต่อวิชาวิทยาศาสตร์หลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 3 มีความพึงพอใจ ในระดับมากที่สุด จากผลการศึกษาดังกล่าวข้างต้นนี้ แสดงว่านักเรียนที่เรียนรู้โดยใช้แบบฝึกการคิดตามกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เรื่องแรงและการเคลื่อนที่ของวัตถุ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 มีการพัฒนาการเรียนรู้จริง จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ ในการจัดการเรียนรู้ในวิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐาน ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 เรื่อง แรงและการเคลื่อนที่ของวัตถุ

Pagamas Glawtanong and team (2011) ได้วิเคราะห์การเคลื่อนที่โดยใช้กล้องดิจิทัล (Sony Vegas) และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Adobe Photoshop ,Microsoft excel) ประมวลผลตำแหน่งการเคลื่อนที่ของวัตถุทุกๆ 32 m/s และเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับสมการการเคลื่อนที่ทางกลศาสตร์ จากผลการวิจัยพบว่าการตกอย่างอิสระ การกระจัดของวัตถุ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของเวลาและความเร็ว และสำหรับการเคลื่อนที่แบบลูกตุ้มอย่างง่ายพบว่าการเลื่อนตำแหน่งจากจุดกึ่งกลางมีลักษณะเป็นคาบ โดยที่แตกต่างระหว่างผลการทดลองกับค่าทฤษฎีขึ้นอยู่กับความเร่ง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือวัสดุและอุปกรณ์

วัสดุ

1. ขวดน้ำพลาสติก ขนาด 450 cm^3
2. ลูกบอล มวล 0.0008 kg
3. เทปกาแลคซีน
4. น้ำมันถั่วเหลือง ตราอรุณ
5. น้ำมันปาล์ม ตรามรกต
6. น้ำมันมะกอก บริสุทธิ์
7. น้ำมันเครื่อง ออโตเมติก 4T-AT
8. ขวดน้ำอัดลม (PET) 1.25 L
9. แผ่นฟิวเจอร์บอร์ด
10. แผ่นใส
11. เทปกาแลคซีน
12. ดินน้ำมัน
13. ปากกาเคมี

อุปกรณ์

1. กรรไกร
2. มีดคัตเตอร์
3. ไดร์เป่าผม 850 w
4. สายวัด
5. เครื่องปั๊มลม Beto
6. ลูกแก้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11.35 mm
7. หลอดแก้วยาวขนาด 100 cm
8. ปีกเกอร์ ขนาด 500 ml
9. เวอร์เนียดิจิตอล
10. มัลติมิเตอร์
11. ไฮโดรมิเตอร์
12. เต้าไฟฟ้า

13. กล้องดิจิทัล
14. ขาตั้งกล้อง ยี่ห้อ Sony รุ่น VCT-R640
15. โปรแกรม Tracker 4.05

3.2 วิธีการดำเนินการทดลอง

3.2.1 ศึกษาการตกอิสระภายใต้แรงต้านอากาศ

1. การสร้างอุปกรณ์

1. เตรียมอุปกรณ์ ได้แก่ ขวดพลาสติกขนาด 450 cm^3 กรรไกร, มีดคัตเตอร์, กาว
2. นำขวดขนาด 450 cm^3 จำนวน 13 ขวด ตัดปากขวดและกันขวดให้มีความยาวขวดละ

14 cm



ภาพที่ 9 ขวดน้ำ (PET) ขนาด 450 cm^3

3. นำขวดที่ต่อกัน มาครอบโบว์เป่าลม แล้วพันด้วยเทปกาวให้แน่น



ภาพที่ 10 การประกอบขวดทดลอง

2. การทดลอง

1. การตกอย่างอิสระภายใต้สนามโน้มถ่วงของโลก

1.1 นำลูกบอล มวล 0.0008 kg ปล่อยลงในชุดการทดลอง

1.2 บันทึกภาพวิดีโอการเคลื่อนที่ด้วยกล้องถ่ายวิดีโอ



ภาพที่ 11 การนำลูกบอลปล่อยลงในชุดการทดลอง

2. การตกอย่างอิสระภายใต้แรงต้านอากาศ

2.1 เปิดเครื่องชุดการทดลอง ที่มีความเร็วลมเท่ากับ 7.7 m/s

2.2 นำลูกบอล มวล 0.0008 kg ปล่อยลงในชุดการทดลอง

2.3 บันทึกภาพวิดีโอการเคลื่อนที่ด้วยกล้องถ่ายวิดีโอ

3.2.2 ศึกษาการตกอิสระของวัตถุภายใต้ของเหลวที่มีความหนืด

การหาความเร็วปลายของวัตถุทรงกลม

1. นำลูกแก้วที่ต้องการที่จะปล่อยวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง ด้วยเวอร์เนียดิจิตอล 3 ครั้ง

2. เทสารของเหลวใส่ในหลอดแก้วขนาด 100 cm ปล่อยไฮโดรมิเตอร์ในสารของเหลวและ

บันทึกค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมัน



ภาพที่ 12 การวัดความถ่วงจำเพาะของเหลว

3. เทของเหลวมาใส่ในปิกรเกอร์ปริมาณ 260 ml นำไปต้มบนเตาไฟฟ้าให้ได้อุณหภูมิ 30 50 70 และ 90 °C ตามลำดับ
4. ต้มสารของเหลวเดือดตามที่ต้องการแต่ละอุณหภูมิ เอาสารของเหลวที่เดือดนี้ไปใส่ในหลอดแก้วยาวขนาด 100 cm
5. ปลอยลูกแก้วในหลอดแก้วที่ผิวของเหลวและบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัลแต่ละอุณหภูมิ 3 ครั้ง



ภาพที่ 13 การบันทึกภาพศึกษาการตกอิสระของเหลวที่มีความหนืด

3.2.3 ศึกษาการเคลื่อนที่แบบวิถีโค้ง

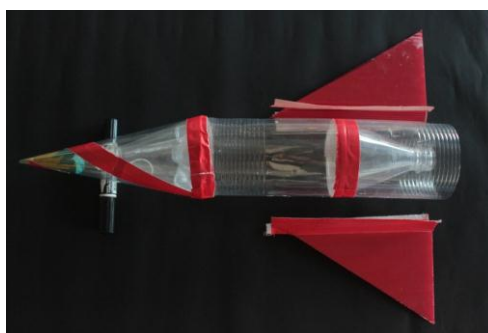
1. สร้างจรวด

1. เตรียมอุปกรณ์ได้แก่ ขวดน้ำอัดลมขนาด (PET) 1.25 L จำนวน 10 ขวด เทปขาว แลคซัน กรรไกรหรือมีดคัตเตอร์ แผ่นฟิวเจอร์บอร์ด แผ่นใส นอกจากนี้อาจใช้ดินน้ำมันเพื่อถ่วงหัวจรวดให้หนักขึ้น และปากกาเคมีเพื่อทำเครื่องหมายบริเวณที่จะตัด (ในการทำจรวดขวดน้ำ 1 ลำ ต้องใช้ขวดน้ำอัดลม (PET) จำนวน 2 ใบ)

2. ใช้ขวด 2 ใบ ใบแรกทำเป็นที่เก็บลม อีกใบตัดเอาส่วนตรงกลางของขวดน้ำอัดลม (PET) ยาว 12 cm เพื่อนำไปต่อกับส่วนที่เป็นที่เก็บลม ซึ่งจะเป็นส่วนหางของจรวด ใช้เทปขาวแลคซันยึดทั้งสองส่วนให้แน่น และตัดเอาส่วนหัวของขวดน้ำอัดลม (PET) ยาว 11 cm ทำเป็นหัวจรวด ใช้เทปขาวแลคซันยึดทั้งสองส่วนให้แน่น และนำแผ่นใสมาทำให้เป็นรูปกรวย ปลายแหลม เพื่อติดเข้ากับส่วนหัวของจรวด

3. นำดินน้ำมันหนัก 38.77 g มาใส่ในแผ่นใสที่ทำเป็นรูปกรวยเพื่อถ่วงหัวจรวดให้หนักขึ้น แล้วติดเข้ากับส่วนหัวของจรวด ใช้เทปขาวแลคซันยึดทั้งสองส่วนให้แน่น

4. ตัดแผ่นฟิวเจอร์บอร์ดเป็นรูปสามเหลี่ยมยาว 19 cm สูง 12.50 cm จำนวน 4 ปีก ต่อจรวด 1 ลำ เพื่อทำเป็นปีกของจรวด นำมีดคัตเตอร์กรีดส่วนปีก กว้าง 1.50 cm แล้วติดเข้ากับส่วนหางของจรวด ระยะห่างของการติดปีกแต่ละอันเท่ากับ 7 cm ใช้เทปขาวแลคซันยึดทั้งสองส่วนให้แน่น



ภาพที่ 14 ส่วนประกอบของจรวด

2. การทดลอง

1. ใส่ น้ำในตัวจรวด 400 ml
2. นำจรวดไปติดตั้งบนฐานยิง



ภาพที่ 15 การติดตั้งจรวดเข้ากับฐานยิงจรวด

3. ใส่แรงดันลม เริ่มต้นที่ 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 bar
4. ทำการยิงจรวดที่มุม 45 องศา

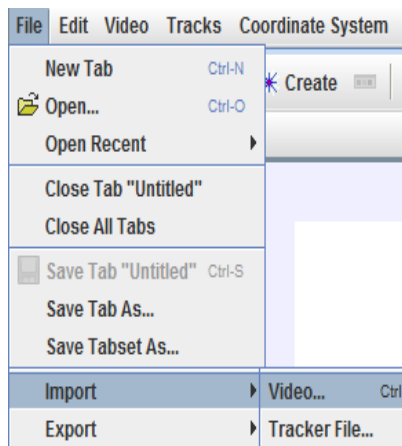


ภาพที่ 16 การยิงจรวดที่มุม 45 องศา

5. บันทึกภาพวิดีโอการเคลื่อนที่ด้วยกล้อง Canon รุ่น EOS 500D ความละเอียด 15.1 MEGA PIXELS โดยวางกล้องห่างจากระนาบการยิงประมาณ 26 m
6. ทำการวัดระยะทาง และบันทึกค่าที่ได้

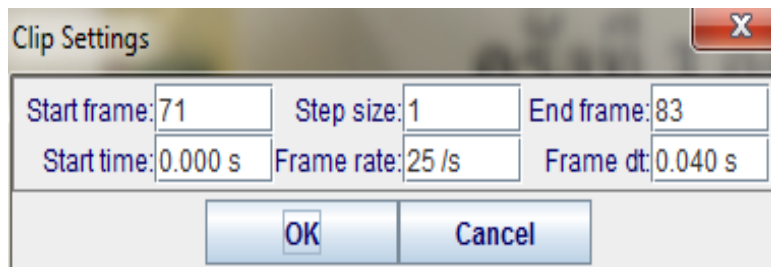
3.3 วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Tracker 4.05

1. นำไฟล์ที่ต้องการวิเคราะห์ไปใส่ในโปรแกรม Tracker 4.05 คลิกที่ File ,Import และ Video



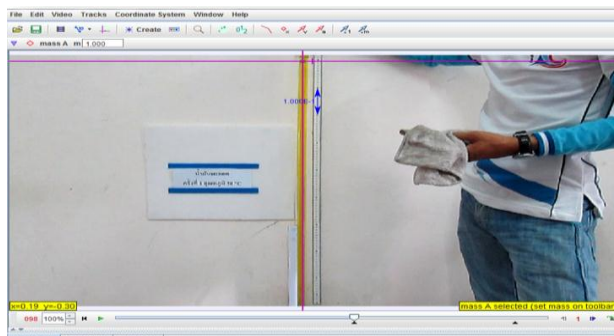
ภาพที่ 17 ไฟล์ที่ต้องการวิเคราะห์

2. เลือกเปิดวิดีโอที่ต้องการวิเคราะห์
3. กำหนดเวลาที่วัตถุเริ่มเคลื่อนที่และวัตถุตกถึงพื้นแล้วคลิก ตกลง



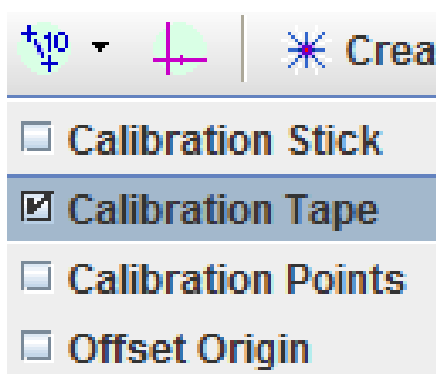
ภาพที่ 18 กำหนดเวลาที่วัตถุเริ่มเคลื่อนที่

4. กำหนดจุดเริ่มต้นที่ต้องการวิเคราะห์แล้วโฟกัสไว้



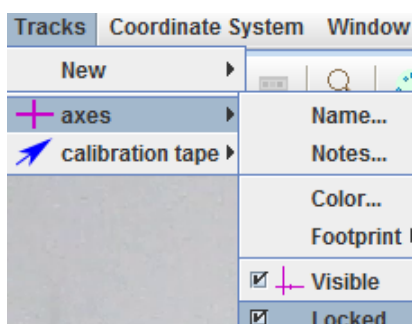
ภาพที่ 19 กำหนดจุดเริ่มต้นที่ต้องการวิเคราะห์

5. กำหนดจุดอ้างอิงความสูง คลิกที่สัญลักษณ์กำหนดความสูง(สีฟ้า)ไปคลิกถูกที่ช่องสี่เหลี่ยมหน้า Calibration Tape



ภาพที่ 20 กำหนดจุดอ้างอิง

6. กำหนดจุดอ้างอิงความสูงที่ใช้ 0.10 cm
7. กำหนดจุดอ้างอิงตั้งค่ามุมตั้งฉากให้ได้ -90.0°
8. กำหนดค่าที่ต้องการเสร็จแล้ว คลิกที่ Tracks เลือก axes และคลิกถูกช่องสี่เหลี่ยมหน้า Locked เพื่อล็อกจุดโฟกัสที่วัตถุเริ่มต้นป้องกันค่าการคลาดเคลื่อน



ภาพที่ 21 การล็อกจุดโฟกัสที่วัตถุเริ่มต้น

9. กำหนดค่าจุดอ้างอิงเสร็จแล้ว คลิกที่ Tracks เลือก axes และคลิกถูกช่องสี่เหลี่ยมหน้า Locked เพื่อล็อกจุดอ้างอิงที่วัตถุเริ่มต้นป้องกันค่าการคลาดเคลื่อน
10. คลิกที่สัญลักษณ์ Create เลือก Point Mass
11. คลิกที่สัญลักษณ์ Mass เลือก Autotrack
12. คลิกจุดโฟกัสที่ต้องการ Autotrack ครอบคลุมวัตถุเพื่อวิเคราะห์ให้ได้ค่าที่เที่ยงตรง
13. จากนั้นคลิก Next จนถึง Search
14. กราฟจากการวิเคราะห์โดยใช้วิธี Autotrack
15. คลิกขวาที่แกน X เลือกแกน Y เพื่อหาความสัมพันธ์ตำแหน่งรูปภาพกับเวลา
16. ปรากฏกราฟที่มีความสัมพันธ์ระหว่างแกน รูปภาพ (y) กับ เวลา (t)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

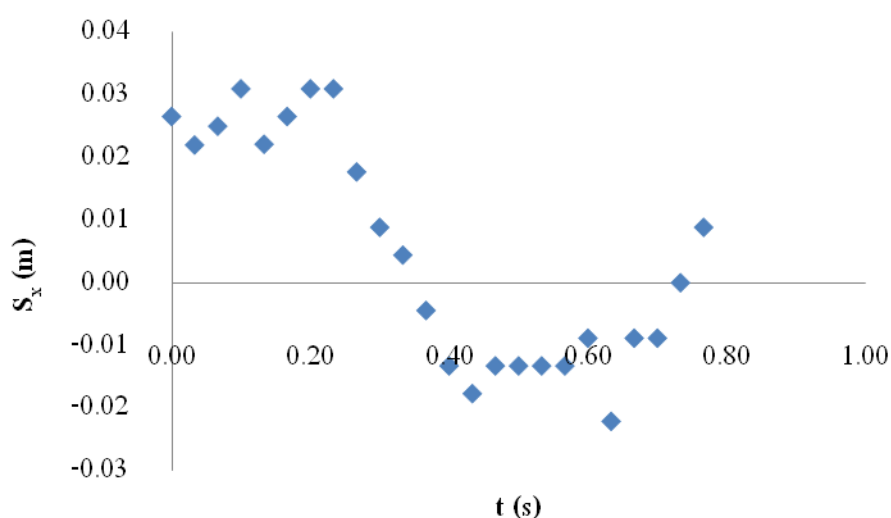
การศึกษาผลของการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้อิทธิพลแรงโน้มถ่วงของโลก จะทำการเก็บข้อมูลออกเป็น 3 ส่วน คือ ศึกษาการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้แรงต้านอากาศ การตกอิสระของวัตถุภายใต้ของเหลวที่มีความหนืด และการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบวิถีโค้ง ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้ภาพถ่าย ด้วยโปรแกรม Tracker 4.05

4.1 ศึกษาการตกอิสระภายใต้แรงต้านอากาศ

การวิเคราะห์ภาพถ่ายวีดีโอ จากการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้แรงต้านอากาศ มีผลการวิจัยแบ่งเป็น 2 กรณีได้แก่ ผลการวิเคราะห์การตกอิสระของวัตถุภายใต้สนามโน้มถ่วงของโลก และผลการวิเคราะห์การตกอิสระของวัตถุโดยคิดแรงต้านอากาศ ด้วยโปรแกรม tracker ซึ่งได้ผลการวิจัยดังนี้

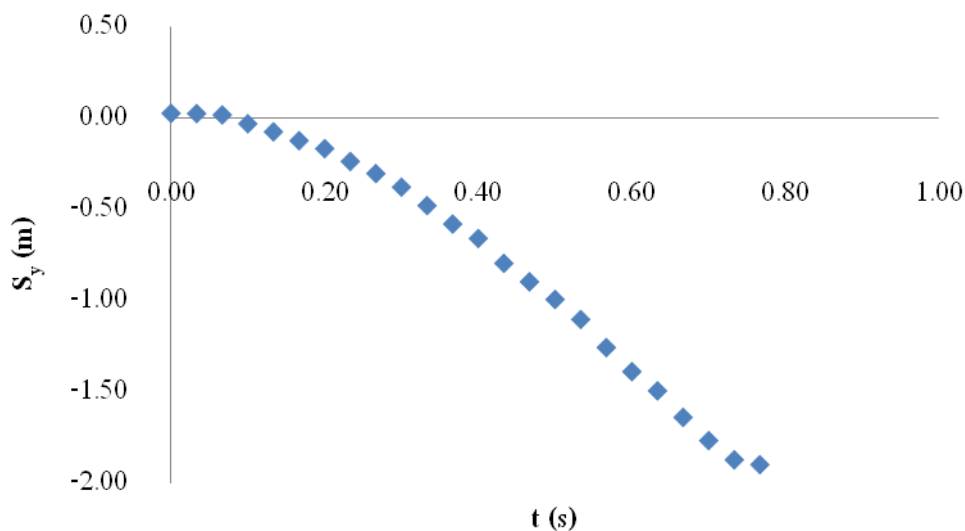
1. ผลการทดลองการตกอย่างอิสระภายใต้สนามโน้มถ่วง

จากผลการปล่อยวัตถุให้ตกอย่างอิสระภายใต้สนามโน้มถ่วงของโลก ด้วยโปรแกรม Tracker 4.05 ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในแนวราบกับเวลา

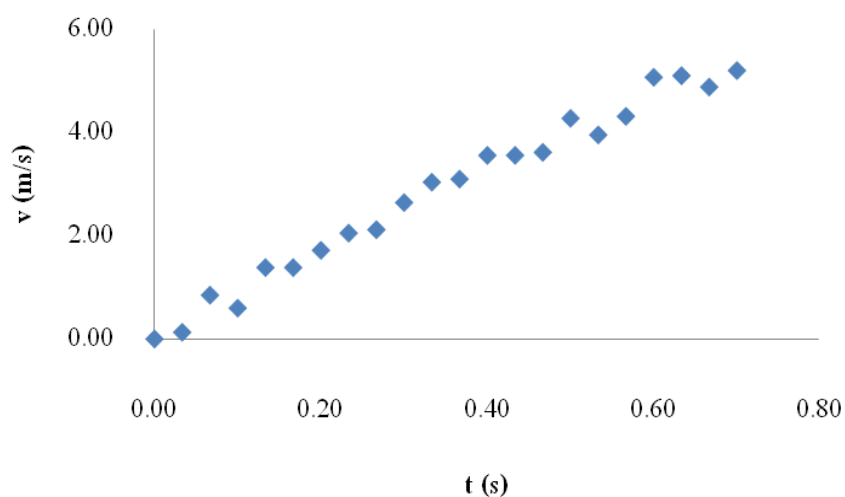
จากภาพที่ 22 เมื่อเวลาผ่านไปวัตถุจะมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน x เพียงเล็กน้อย เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.015 m



ภาพที่ 23 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยการตกอย่างอิสระ

ของวัตถุภายใต้สนามโน้มถ่วง

จากภาพที่ 23 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของวัตถุจากการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้สนามโน้มถ่วงของโลก พบว่า เมื่อปล่อยวัตถุที่มีแรงโน้มถ่วงของโลกกระทำให้ตกลงมาเป็นเส้นตรง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นระยะทางที่ใช้ในการตกจะเพิ่มขึ้นด้วย

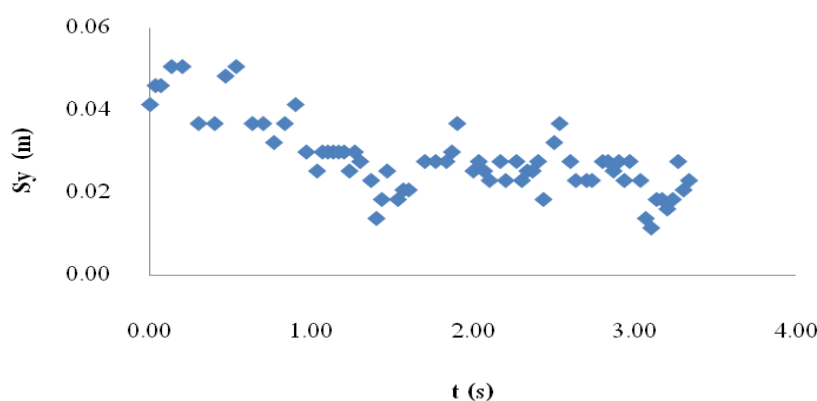


ภาพที่ 24 ความเร็วของการเคลื่อนที่โดยการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้สนามโน้มถ่วง

จากภาพที่ 24 แสดงความเร็วของวัตถุจากการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้สนามโน้มถ่วงของโลก พบว่า เมื่อปล่อยวัตถุให้ตกลงมาด้วยความเร็วต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ วัตถุซึ่งมีแรงโน้มถ่วงกระทำให้ตกลงมาเป็นเส้นตรงและมีความเร่งคงที่ เวลาที่ใช้ในการตกของวัตถุ ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 ทำให้วัตถุมีความเร็วเพิ่มขึ้นจาก 0.60 ถึง 4.29 m/s

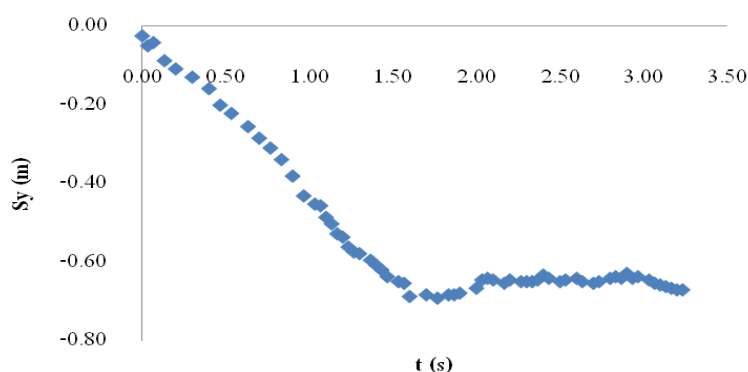
2. ผลการทดลองการตกอย่างอิสระภายใต้แรงต้านอากาศด้วยโปรแกรม tracker

จากผลการปล่อยวัตถุให้ตกอย่างอิสระภายใต้แรงต้านอากาศ ด้วยโปรแกรม Tracker 4.05 โดยมีความเร็วลมเท่ากับ 5.8 m/s เมื่อนำมาวิเคราะห์ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้



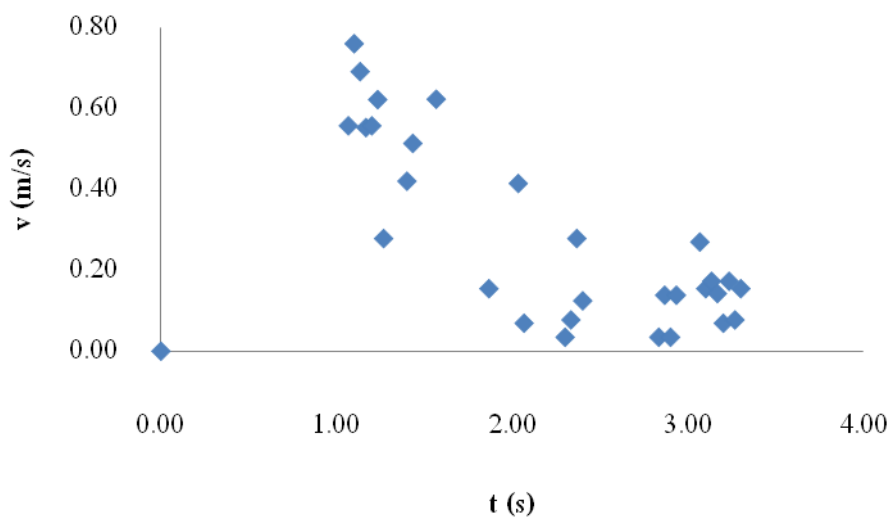
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในแนวราบกับเวลา

จากภาพที่ 25 เมื่อเวลาผ่านไปวัตถุจะมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน x เพียงเล็กน้อย เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.013 m



ภาพที่ 26 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้แรงต้านอากาศ

จากภาพที่ 26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของวัตถุกับเวลา เมื่อเวลาผ่านไป 2 s วัตถุจะมีระยะทางคงที่ที่ 0.642 m



ภาพที่ 27 ความเร็วของการเคลื่อนที่โดยการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้แรงต้านอากาศ

จากภาพที่ 27 แสดงความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัตถุจากการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้แรงต้านอากาศ พบว่า เมื่อวัตถุถูกปล่อยให้ตกลงมาด้วยความเร็วต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ วัตถุจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเร็วของวัตถุมีค่าคงที่เท่ากับ 0.146 m/s และเมื่อนำค่าความเร็วมาคำนวณหาค่าคงตัว $b = 0.053 \text{ kg/s}$

3.การวิเคราะห์ผล

จากการวิเคราะห์ความเร็วการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้สนามโน้มถ่วงของโลก เมื่อนำผลจากการวิเคราะห์ความเร็วจากโปรแกรมและทฤษฎีมาเปรียบเทียบ ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 1 ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ความเร็วจากการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้สนามโน้มถ่วงของโลกเฉลี่ย $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

ระยะที่ วัตถุเคลื่อนที่ (m)	เวลา (s)	ความเร็ว (m/s)		ความคลาดเคลื่อน %
		การวิเคราะห์จาก โปรแกรม	ทฤษฎี	
0.02	0.1	0.60	0.62	3.2
0.16	0.2	1.72	1.77	2.8
0.37	0.3	2.65	2.69	1.4
0.65	0.4	3.57	3.56	0.2
0.99	0.5	4.29	4.40	2.5

จากการวิเคราะห์ความเร็วของวัตถุจากการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้สนามโน้มถ่วงของโลก เมื่อนำผลจากการวิเคราะห์การตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้สนามโน้มถ่วงของโลกด้วยโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับทฤษฎี พบว่า มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.2-3.2%

4.2 ศึกษาการตกอิสระของวัตถุภายใต้ของเหลวที่มีความหนืด

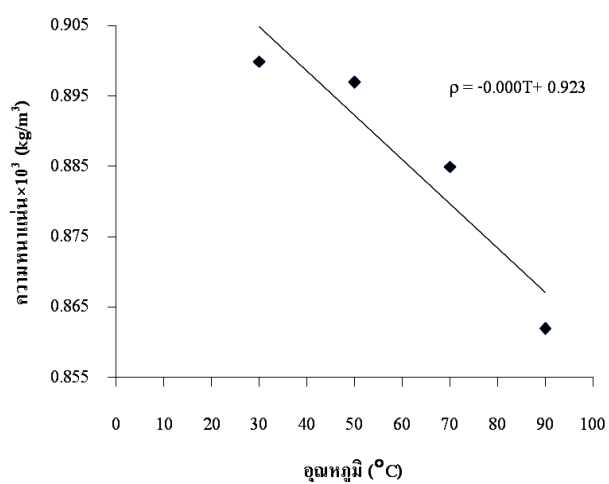
ในการศึกษาการตกอิสระของวัตถุภายใต้ของเหลวที่มีความหนืดได้ทำการศึกษา 3 ส่วน คือ หาความหนาแน่นของน้ำมัน ความเร็วของวัตถุ และสัมประสิทธิ์ความหนืด ดังผลการวิจัยดังนี้

1. ความหนาแน่นของน้ำมัน

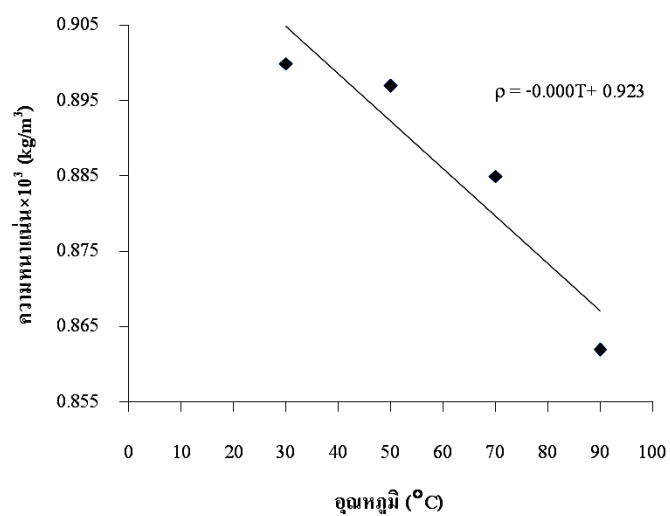
จากทดลองพบว่า การหาความหนาแน่นโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) ได้ค่าความถ่วงจำเพาะและเมื่อนำค่าไปคำนวณหาความหนาแน่นได้ผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นของน้ำมันแต่ละชนิด

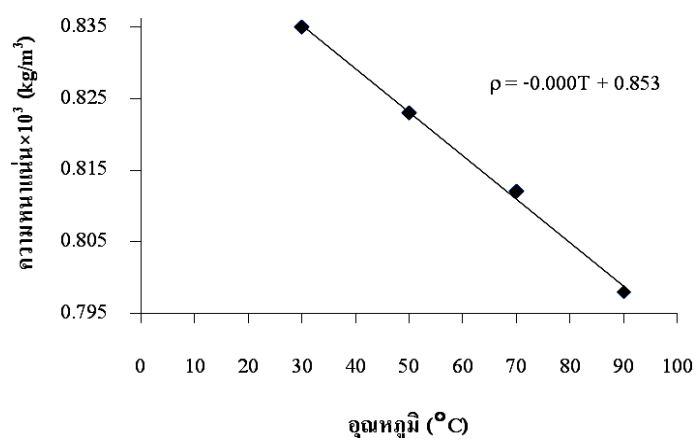
อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (kg/m ³)			
	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันปาล์ม	น้ำมันมะกอก	น้ำมันเครื่อง
30	0.900×10^3	0.900×10^3	0.835×10^3	0.862×10^3
50	0.897×10^3	0.897×10^3	0.823×10^3	0.859×10^3
70	0.885×10^3	0.885×10^3	0.812×10^3	0.847×10^3
90	0.862×10^3	0.862×10^3	0.798×10^3	0.835×10^3



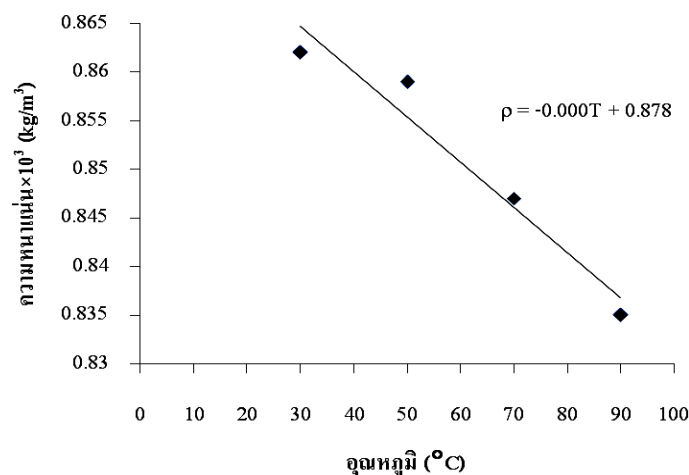
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 28 ค่าความหนาแน่น (ก) น้ำมันถั่วเหลือง (ข) น้ำมันปาล์ม

(ค) น้ำมันมะกอก (ง) น้ำมันเครื่อง

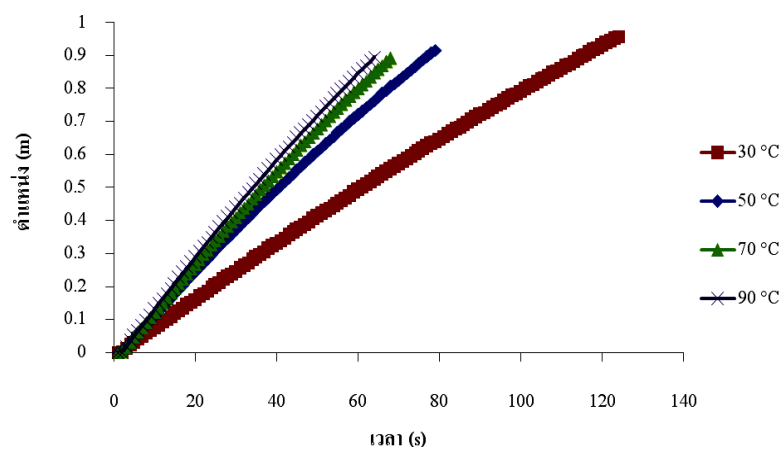
จากการทดลองหาค่าความหนาแน่นของน้ำมันแต่ละชนิดพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนาแน่นจะลดลง เนื่องจากความร้อนที่สูงจะทำให้โมเลกุลของน้ำมันแตกตัวหรือกระจาย และเมื่ออุณหภูมิลดลงความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนน้อยจะทำให้โมเลกุลของน้ำมันเกาะตัวกัน กล่าวได้ว่าอุณหภูมิมิค่าแปรผกผันกับความหนาแน่น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบน้ำมันทั้ง 4 ชนิด พบว่า น้ำมันเครื่องมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำมันชนิดอื่นๆ รองลงมาคือน้ำมันปาล์ม และน้ำมันถั่วเหลือง ตามลำดับ ส่วนน้ำมันที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุดคือ น้ำมันมะกอก

โดยการเคลื่อนที่ของวัตถุจะแปรผกผันกับน้ำมันนั่นคือน้ำมันที่มีความหนาแน่นสูงวัตถุจะเคลื่อนที่ได้ช้า และเมื่อน้ำมันมีความหนาแน่นน้อยวัตถุจะเคลื่อนที่ได้เร็ว เนื่องจากน้ำมันแต่ละชนิดมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน

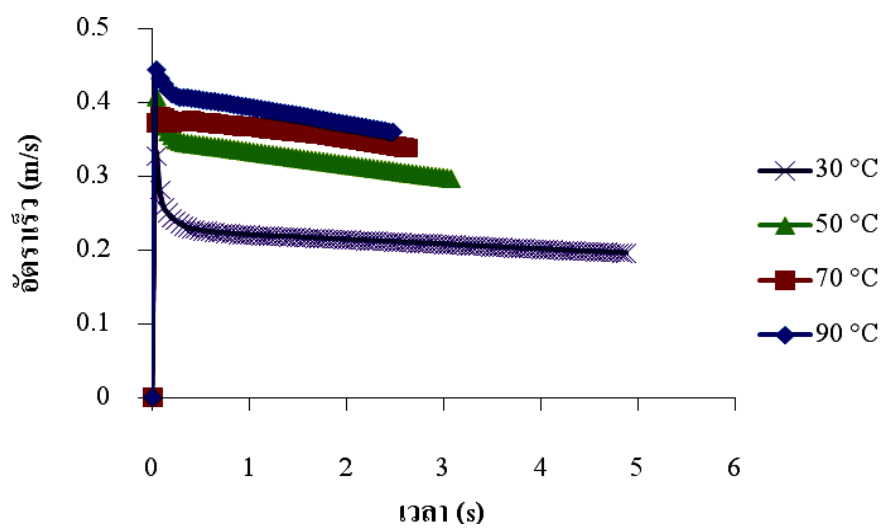
2. ความเร็วของวัตถุ

จากการทดลองปล่อยวัตถุทรงกลมความหนาแน่น $2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ผ่านของเหลวในกระบอกทรงสูงความยาว 100 cm ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะกอก น้ำมันเครื่อง ที่อุณหภูมิ 30 50 70 และ 90°C

การทดลองหาความเร็วของวัตถุทรงกลมความหนาแน่น $2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ เคลื่อนที่ผ่านของเหลวทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะกอก และน้ำมันเครื่อง อุณหภูมิ 30 50 70 และ 90°C ตามลำดับ เทลงในกระบอกทรงสูงความยาวขนาด 100 cm และบันทึกภาพด้วยกล้องดิจิทัลยี่ห้อ Canon รุ่น Power Shot A2300 จากนั้นวิเคราะห์การเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม Tracker 4.05 ได้ผลการทดลองดังนี้



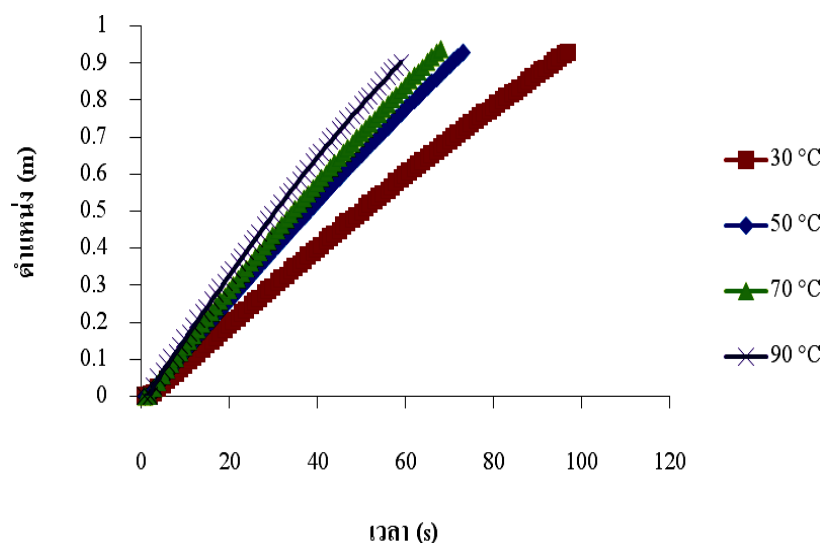
(ก)



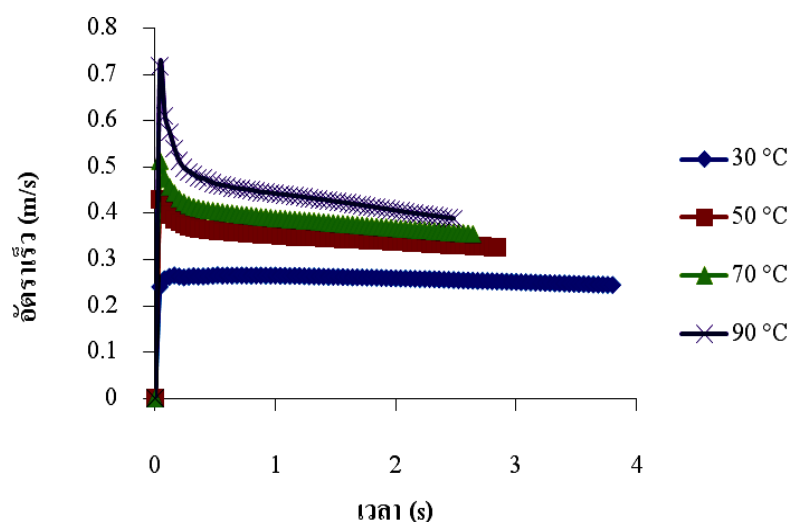
(ข)

ภาพที่ 29 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุตกผ่านน้ำมันปาล์ม

(ก) ตำแหน่งกับเวลา (ข) อัตราเร็วกับเวลา



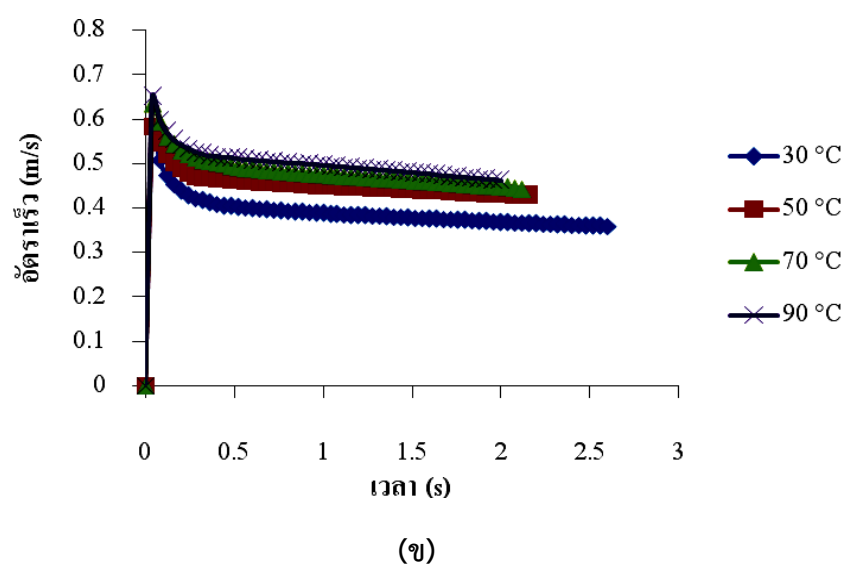
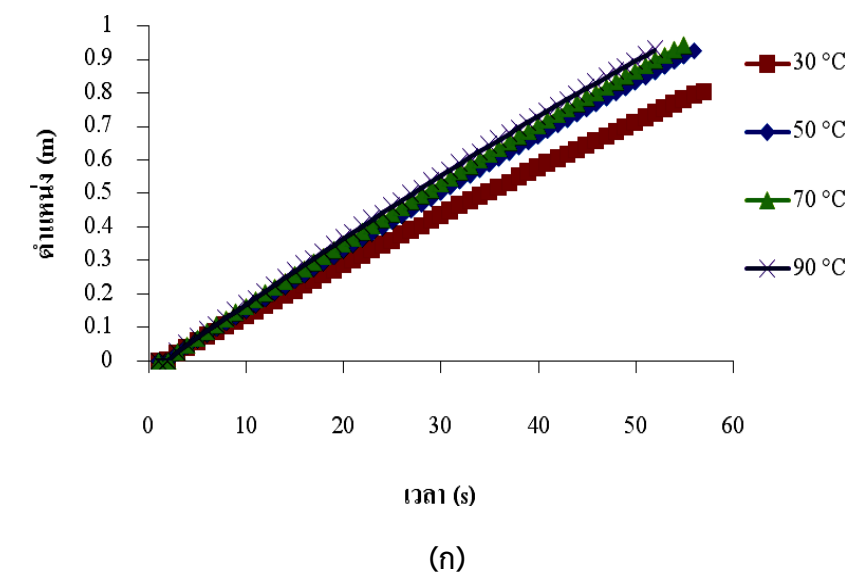
(ก)



(ข)

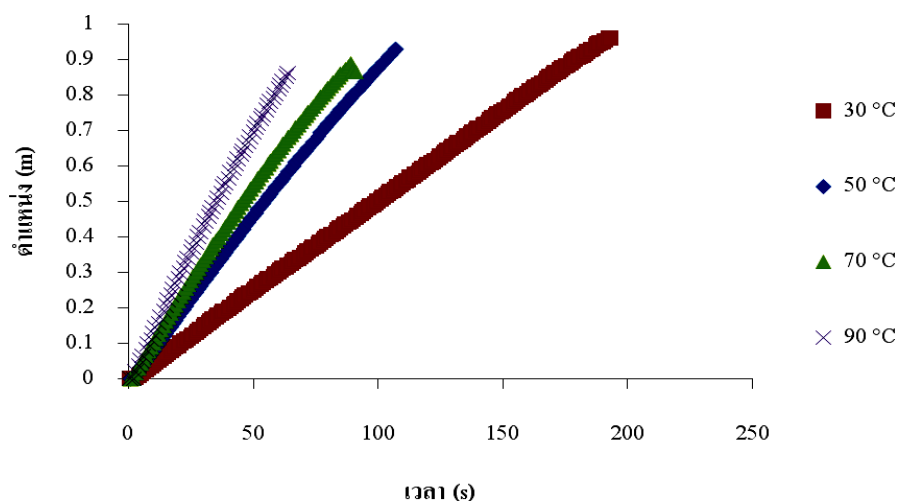
ภาพที่ 30 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านน้ำมันถั่วเหลือง

(ก) ตำแหน่งกับเวลา (ข) อัตราเร็วกับเวลา

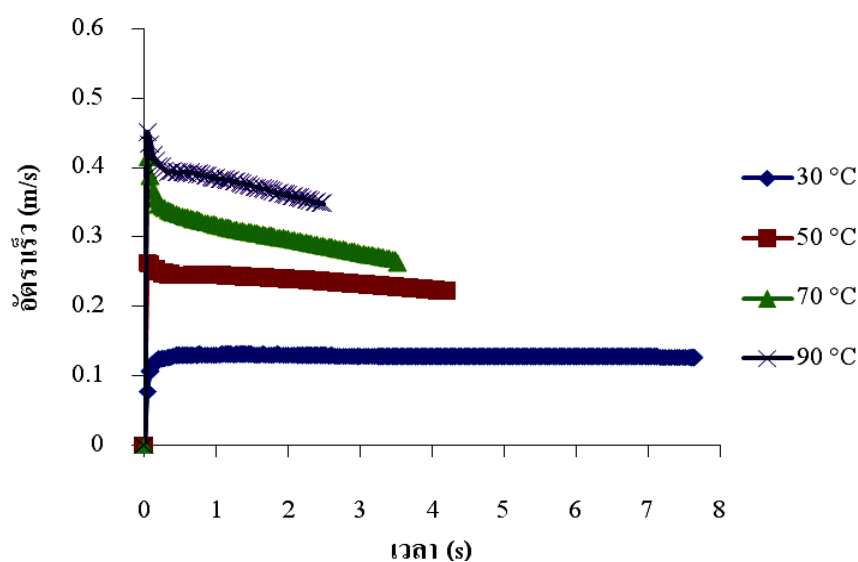


ภาพที่ 31 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุตกผ่านน้ำมันมะกอก

(ก) ตำแหน่งกับเวลา (ข) อัตราเร็วกับเวลา



(ก)



(ข)

ภาพที่ 32 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุตกผ่านน้ำมันปาล์ม

(ก) ตำแหน่งกับเวลา

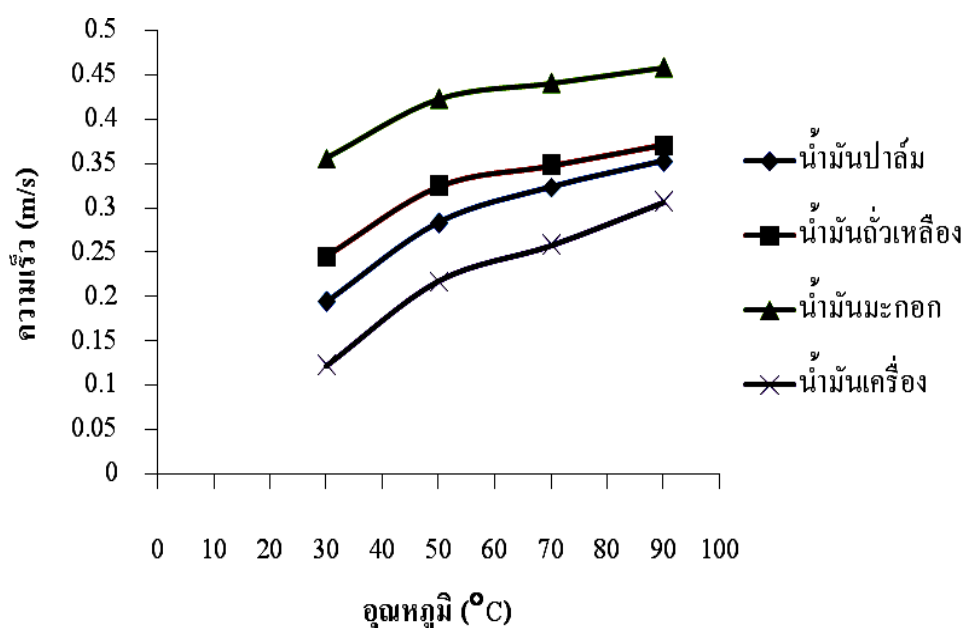
(ข) อัตราเร็วกับเวลา

จากการทดลองหาความเร็วของวัตถุน้ำมันแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 30 50 70 และ 90°C พบว่าเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ภายในของเหลว ในช่วงแรกวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก หลังจากนั้นจะมีความเร็วคงที่เนื่องจากแรงต้านและความหนืด ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดึงดูดของโลกจึงทำให้วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่(เคลื่อนที่ด้วยความเร่งเป็นศูนย์) แต่เนื่องจากแรงหนืดมีค่ามากขึ้นตามขนาดของความเร็วที่เพิ่มขึ้นด้วย ในที่สุดแล้วแรงหนืดนี้จะมีขนาดมากพอที่จะทำให้แรง

สูตรในแนวดิ่งมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งย่อหมายความว่าวัตถุจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่(ความเร่งเป็นศูนย์) ความเร็วนี้เรียกว่า “ความเร็วปลาย”(terminal velocity) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเร็วของวัตถุจะยิ่งมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมันแตกตัวหรือขยายตัวทำให้วัตถุเคลื่อนที่ได้เร็ว เมื่ออุณหภูมิลดลงความเร็วของวัตถุยิ่งน้อยลง เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมันเกาะตัวกันทำให้วัตถุเคลื่อนที่ได้ช้า

เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งของวัตถุที่เวลาต่างๆ ของน้ำมันแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 30 50 70 และ 90°C ความเร็วของวัตถุในการเคลื่อนที่ในของเหลวมีความแตกต่างกัน เนื่องจากน้ำมันที่มีความหนืดมากความเร็วจะมีค่าน้อย น้ำมันที่มีความหนืดน้อยความเร็วจะมีค่ามาก ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าความหนืดของน้ำมันสามารถเปรียบเทียบได้ที่อุณหภูมิต่างๆเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเร็วของวัตถุเคลื่อนที่ผ่านของเหลวเร็วมาก เมื่ออุณหภูมิลดลงวัตถุเคลื่อนที่ผ่านของเหลวช้าลง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งกับเวลาที่ลูกแก้วเคลื่อนที่ผ่านน้ำมันคำนวณหาความชันซึ่งจะได้ค่าความเร็ว โดยแสดงดังภาพที่ 32



ภาพที่ 33 ความเร็วของวัตถุเคลื่อนที่ผ่านของเหลว 4 ชนิด (ความเร็วของวัตถุที่อุณหภูมิต่าง ๆ)

จากภาพที่ 33 ความเร็วของวัตถุเมื่อเคลื่อนที่ผ่านของเหลว 4 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะกอก และน้ำมันเครื่อง พบว่าความเร็วของวัตถุที่ตกผ่านของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของของเหลวมีค่ามาก และเมื่อเปรียบเทียบความเร็วที่อุณหภูมิเดียวกันพบว่า วัตถุจะ

เคลื่อนที่ผ่านด้วยความเร็วมากที่สุดในน้ำมันมะกอก น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม และน้ำมันเครื่อง ตามลำดับ

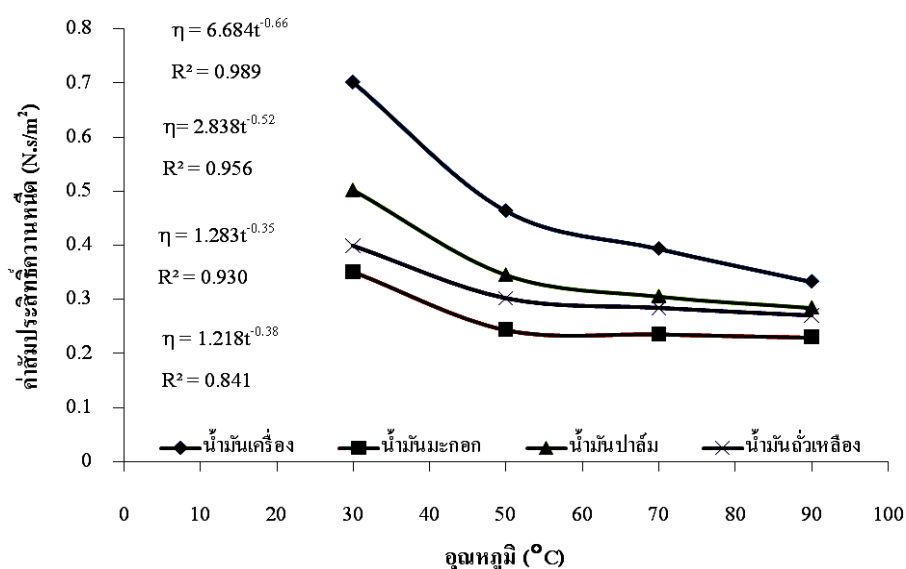
3. สัมประสิทธิ์ความหนืด

จากการหาความเร็วและความหนาแน่นของน้ำมันที่อุณหภูมิต่างๆ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำมันแต่ละชนิดโดยการคำนวณหาค่าเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ตามสมการความหนืดของน้ำมัน

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำมัน 4 ชนิด

อุณหภูมิ (°C)	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด (N.s/m ²)			
	น้ำมันเครื่อง	น้ำมันปาล์ม	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันมะกอก
30	0.702	0.503	0.400	0.351
50	0.464	0.346	0.303	0.244
70	0.394	0.306	0.285	0.236
90	0.333	0.285	0.271	0.230

จากตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์ความหนืดกับอุณหภูมิของเหลวทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะกอก และน้ำมันเครื่อง พบว่าความเร็วของวัตถุขณะตกลงในของเหลวที่อุณหภูมิที่ 30 50 70 และ 90°C ความเร็วของวัตถุที่ตกลงในน้ำมันเครื่องจะมีค่าความหนืดมากที่สุด รองลงมาคือน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะกอก ตามลำดับ



ภาพที่ 34 สัมประสิทธิ์ความหนืดและอุณหภูมิ

ตารางที่ 4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ

ชนิดของน้ำมัน	สมการ	R^2
น้ำมันเครื่อง	$\eta = 6.684t^{-0.66}$	0.989
น้ำมันปาล์ม	$\eta = 2.838t^{-0.52}$	0.956
น้ำมันถั่วเหลือง	$\eta = 1.283t^{-0.35}$	0.956
น้ำมันมะกอก	$\eta = 1.218t^{-0.38}$	0.841

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด (y) กับอุณหภูมิ (x) ของน้ำมันทั้ง 4 ชนิด ได้สมการความสัมพันธ์เชิงยกกำลัง ซึ่งพบว่าความหนืดมีค่าลดลงในช่วงแรกและเริ่มมีค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 50 °C ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 50 °C พลังงานความร้อนมีค่าสูงเพียงพอที่จะทำลายโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมัน จึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และสัมประสิทธิ์ความหนืดของน้ำมันมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

4.3 ศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบวิถีโค้ง

การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำมีผลการวิจัยแบ่งเป็น 3 ตอนได้แก่ การสร้างจรวดขวดน้ำ ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำด้วยโปรแกรม tracker และผลการวิเคราะห์ความแม่นยำของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ซึ่งได้ผลการวิจัยดังนี้

1. จรวดขวดน้ำ

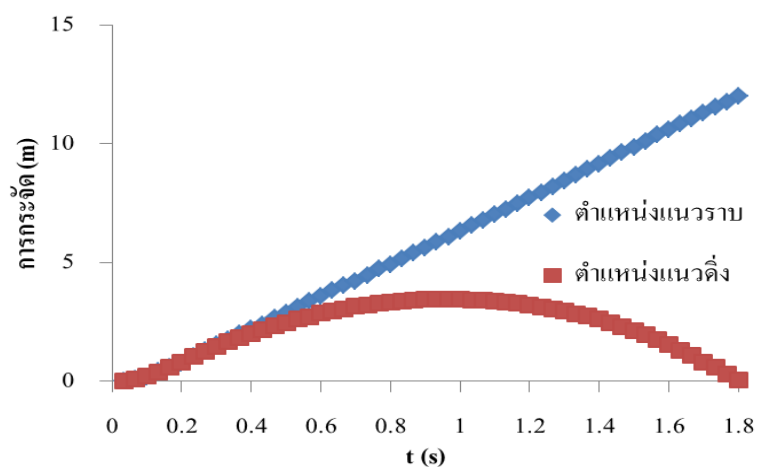


ภาพที่ 35 จรวดขวดน้ำจากขวดน้ำอัดลม (PET)

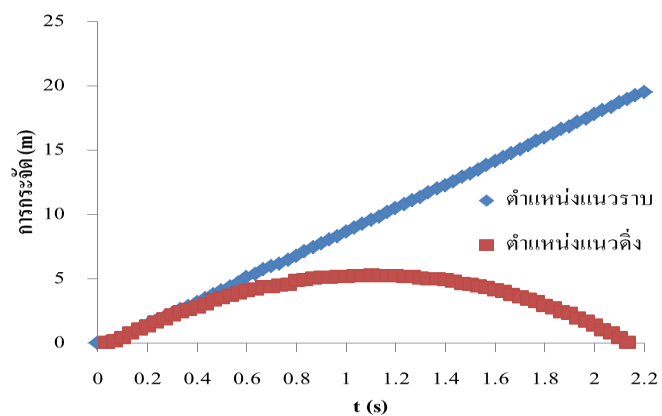
จากภาพที่ 35 จรวดขวดน้ำที่ประดิษฐ์ซึ่งมีความยาว 49 cm มีปีกสี่ทั้งหมด 4 อัน ระยะห่างของการติดปีกแต่ละอันเท่ากับ 7 cm และมีน้ำหนัก 590 g

2. ผลการทดลองวิเคราะห์การเคลื่อนที่

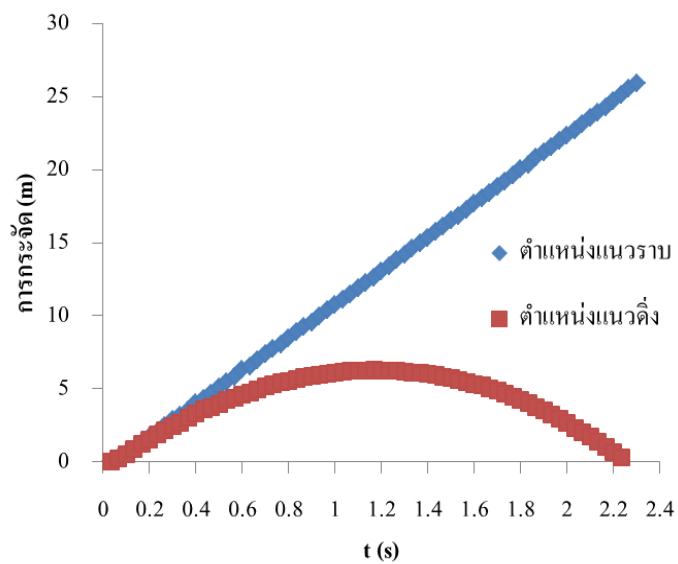
จากผลการยิงจรวดขวดน้ำที่ความดัน 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 bar และบันทึกภาพนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม tracker 4.05 ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้



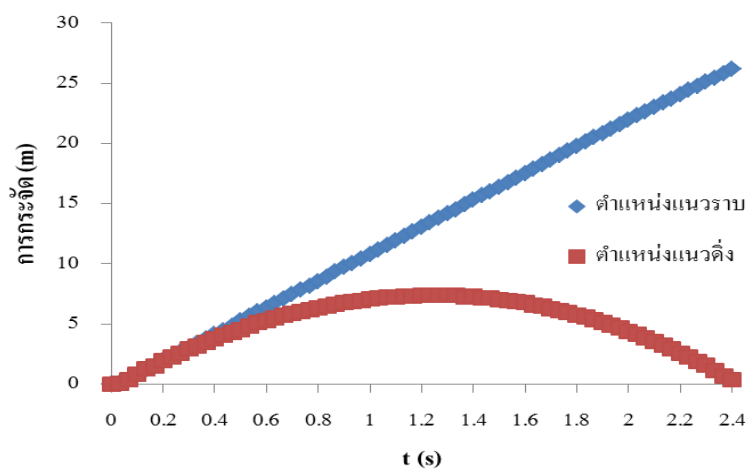
ภาพที่ 36 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำที่แรงดัน 0.25 bar



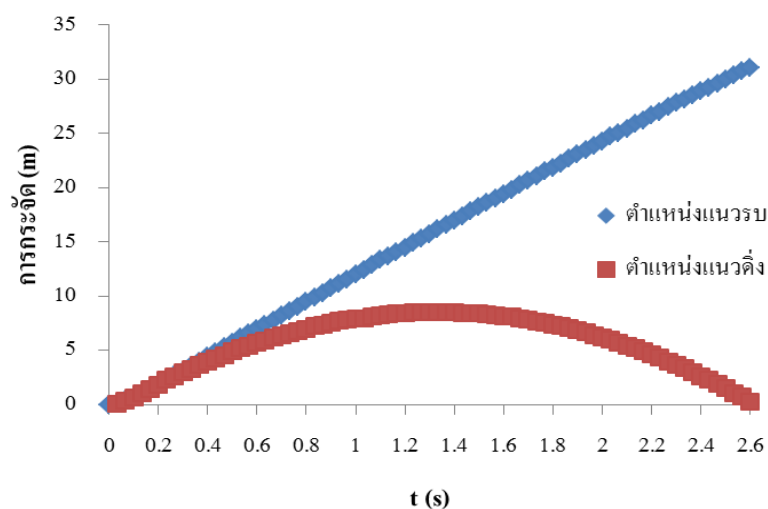
ภาพที่ 37 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำที่แรงดัน 0.50 bar



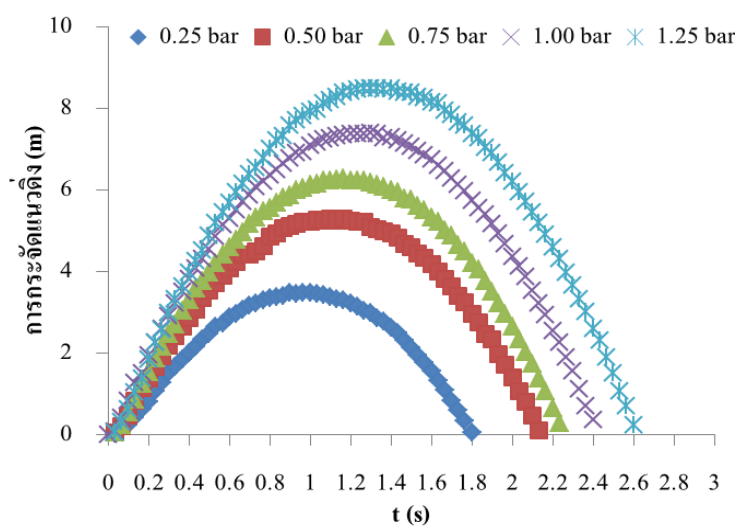
ภาพที่ 38 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำที่แรงดัน 0.75 bar



ภาพที่ 39 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำที่แรงดัน 1.00 bar

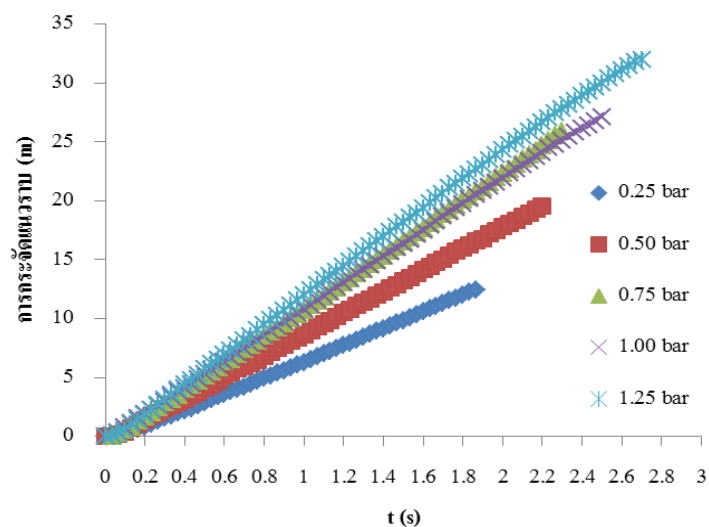


ภาพที่ 40 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำที่แรงดัน 1.25 bar



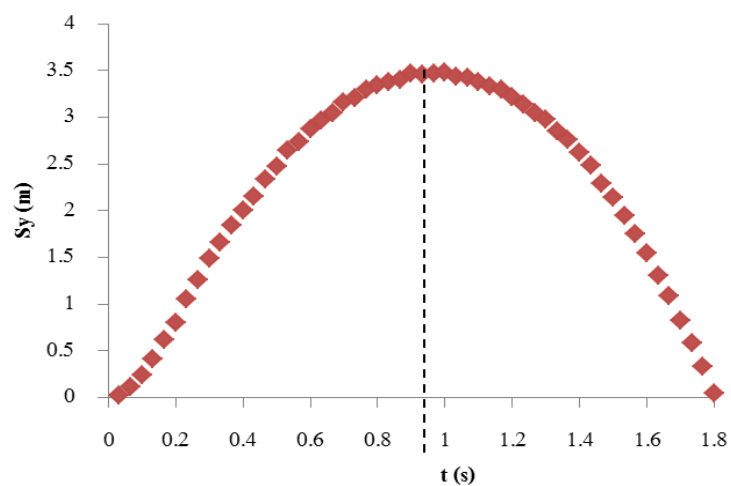
ภาพที่ 41 การกระจัดแนวตั้งของจรวด

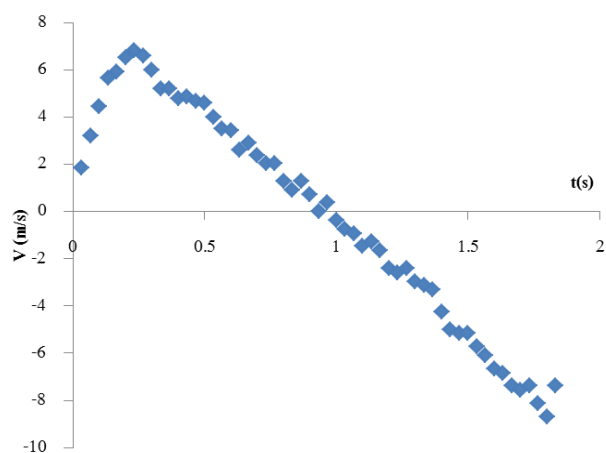
จากภาพที่ 36 -41 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของจรวดที่ความดันการยิง 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 bar ซึ่งพบว่า มีค่าการกระจัดตามแนวตั้งของจรวดจะมีค่าที่เพิ่มขึ้น 3.47 5.30 6.28 7.38 และ 8.49 m สำหรับความดัน 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 bar ตามลำดับ เวลาที่จรวดใช้ในการยิงมีค่า 1.86 2.20 2.30 2.50 และ 2.70 s



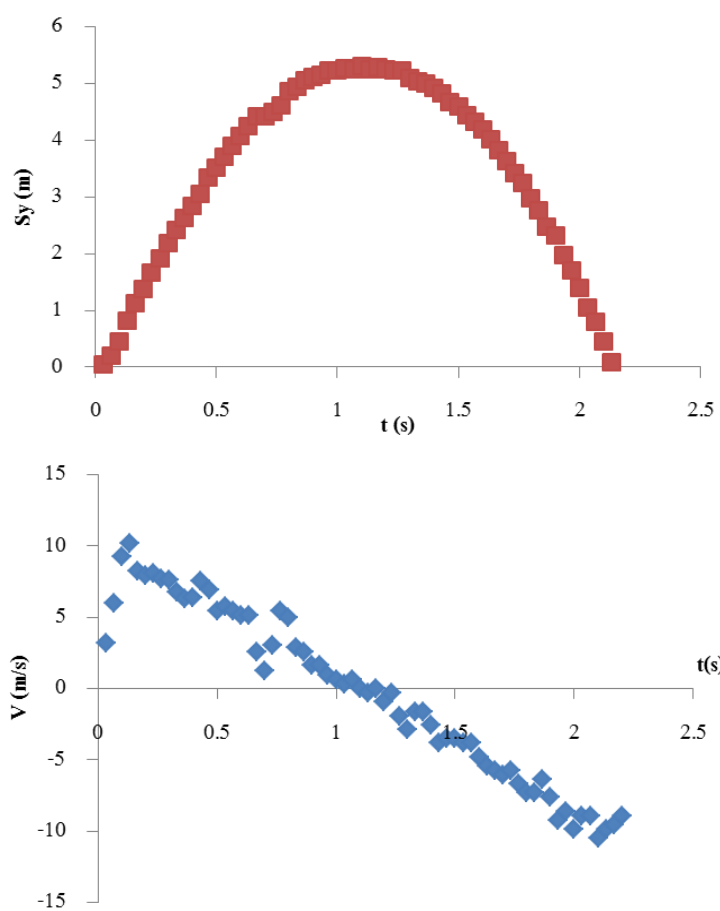
ภาพที่ 42 การเคลื่อนที่ในแนวราบที่ความดันในการยิง 0.25-1.25 bar

จากกราฟแสดงตัวอย่างผลการเคลื่อนที่ในแนวราบที่ความดันในการยิงจะพบว่า เมื่อเพิ่มแรงดันจาก 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 bar จะทำให้ระยะมีค่าเพิ่มเป็น 12.41 19.52 25.88 27.14 32.00 m ตามลำดับ



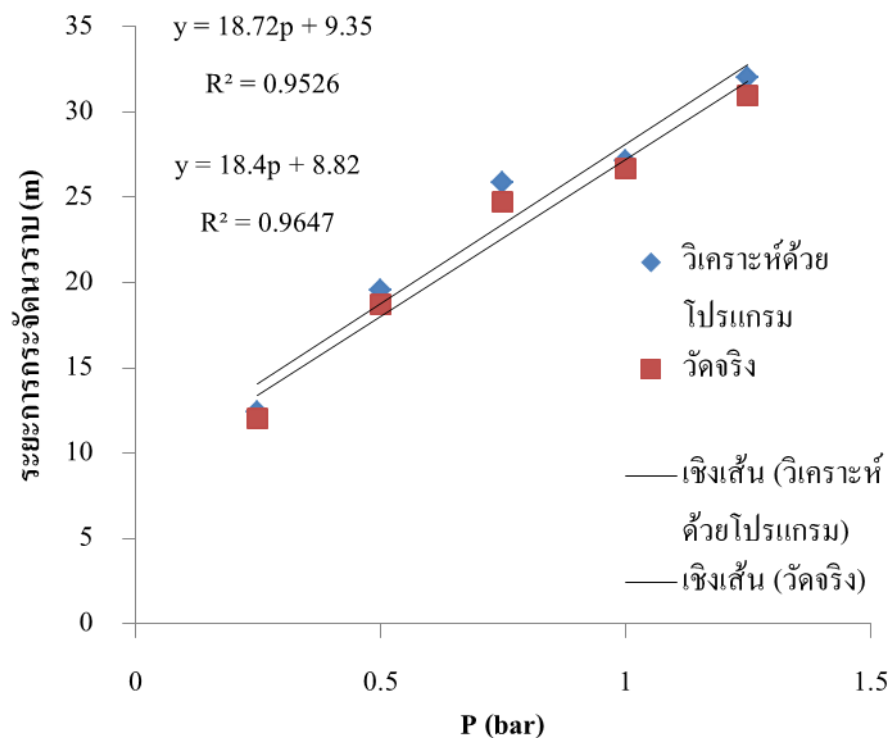


ภาพที่ 43 ความเร็วในแนวดิ่งที่ 0.25 bar



ภาพที่ 44 ความเร็วในแนวดิ่งที่ 0.50 bar

จากภาพที่ 42 – 44 พบว่า ความเร็วในแนวดิ่งมีค่าลดลงและมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อจรวดอยู่ตำแหน่งสูงสุด จากนั้นเมื่อวัตถุเริ่มตกอีกครั้งความเร็วมีค่าลดลง เมื่อตกถึงพื้น



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการยิงในแนวนราบ

เมื่อนำค่าระยะตามแนวนราบที่สัมพันธ์กับความดันที่ใช้ในการยิง พบว่าระยะที่ตกในแนวนราบมีความสัมพันธ์กับความดันที่ใช้ในการยิง โดยเมื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ พบว่าระยะที่จรวดตกตามแนวนราบมีความสัมพันธ์กับแรงดันที่ใช้ยังเป็นตามสมการความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังสมการ

$$y = 18.72p + 9.35$$

3. การวิเคราะห์ผล

วิเคราะห์ความแม่นยำของการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ด้วย การเปรียบเทียบระยะแนวระดับที่ได้จากการวิเคราะห์ กับค่าจริง และวิเคราะห์มุมเทียบกับมุมที่ยิงจริงได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5 ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ระยะทางแนวราบด้วยโปรแกรม tracker

ความดัน (bar)	ระยะทางแนวราบ		ความคลาดเคลื่อน (%)
	การวิเคราะห์ (m)	วัด (m)	
0.25	12.41	12	3.42
0.50	19.52	18.70	4.39
0.75	25.88	24.70	4.78
1.00	27.14	26.70	1.65
1.25	32.00	31.00	3.23

จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างระยะทางแนวราบของจรวดกับความดันการยิงต่างๆพบว่า ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์จากการวัด มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 3.42 4.39 4.78 1.65 และ 3.23 % ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและระยะทางในแนวราบและแนวตั้งจากการวิเคราะห์

ความดัน (bar)	ระยะทาง	
	แนวราบ (m)	แนวตั้ง (m)
0.25	12.41	3.47
0.50	19.52	5.30
0.75	25.88	6.28
1.00	27.14	7.38
1.25	32.00	8.49

ตารางที่ 7 ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์มูมยิง

ความดัน (bar)	มูมยิง		ความคลาดเคลื่อน (%)
	มูมยิงมาตรฐาน (องศา)	การวิเคราะห์ (องศา)	
0.25	45	48	6.64
0.50	45	47	5.78
0.75	45	44	1.93
1.00	45	47	5.06
1.25	45	46	3.64

จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างมูมที่ใช้ยิงของจรวดที่ความดันการยิงต่างๆพบว่า ความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์จากมูมที่ใช้ยิง มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.64 5.78 1.93 5.06 และ 3.64 % ตาม

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้อิทธิพลแรงโน้มถ่วงของโลก โดยใช้โปรแกรม Tracker 4.05 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

การวิเคราะห์ภาพถ่ายของวัตถุที่ตกอย่างอิสระภายใต้สนามโน้มถ่วงของโลกเฉลี่ย $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ โดยมีมวล 0.0008 kg พบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการตกของวัตถุเพิ่มขึ้นจาก 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 s จะทำให้ความเร็วมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.60 1.72 2.65 3.57 และ 4.29 m/s ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมีความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี เป็นร้อยละ 3.2 2.8 1.4 0.2 และ 2.5 ตามลำดับ ซึ่งทั้งหมดมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5 และเมื่อวิเคราะห์ภาพถ่ายจากการตกอย่างอิสระภายใต้แรงต้านอากาศ พบว่าเมื่อวัตถุถูกปล่อยให้ตกลงมาด้วยความเร็วต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ วัตถุจะตกลงมาภายใต้แรงต้านอากาศ จนกระทั่งความเร็วของวัตถุจะคงที่เข้าสู่ความเร็วปลาย เท่ากับ 0.146 m/s และมีค่าคงตัว $b = 0.053 \text{ kg/s}$

จากการทดลอง การหาความหนืดของน้ำมันแต่ละชนิดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอ พบว่าความเร็วของวัตถุทรงกลมขณะตกลงสู่ของเหลวที่เวลาต่างๆ ของน้ำมันแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 30 50 70 และ 90°C ความเร็วของวัตถุทรงกลมขณะการเคลื่อนที่ในของเหลวมีความแตกต่างกัน เนื่องจากน้ำมันที่มีความหนืดมากความเร็วจะมีค่าน้อย น้ำมันที่มีความหนืดน้อยความเร็วจะมีค่ามากตามลำดับ จากการทดลองพบว่าความหนืดของน้ำมันมีความสัมพันธ์กันที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเร็วของวัตถุทรงกลมเคลื่อนที่ผ่านของเหลวได้เร็ว เมื่ออุณหภูมิลดลงวัตถุทรงกลมเคลื่อนที่ผ่านของเหลวได้ช้า ความเร็วของวัตถุทรงกลมขณะตกลงสู่ของเหลวและสัมประสิทธิ์ความหนืดนั้น น้ำมันเครื่องมีความหนืดมากที่สุด รองลงมาน้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะกอกที่มีความหนืดน้อยที่สุด ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองน้ำมันเครื่องที่อุณหภูมิ 30°C มีค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดเท่ากับ 0.702 N.s/m^2 มีค่าใกล้เคียงเท่ากับ 0.596 N.s/m^2 ได้ศึกษาเกี่ยวกับงานวิจัยการเปรียบเทียบค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น 4T แต่ละยี่ห้อ

จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำโดยใช้โปรแกรม Tracker 4.05 ในการวิเคราะห์ภาพถ่าย เลือกใช้แรงดันในการยิงจรวดทั้งหมด 5 ค่าได้แก่ 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 bar สรุปผลการทดลองได้ดังนี้ เมื่อเพิ่มแรงดันจาก 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 bar จะทำให้ระยะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 12.41 19.52 25.88 27.15 และ 32.0 m ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมีความคลาดเคลื่อนจากการวัดจริงที่แรงดัน 0.25 0.50 0.75 1.00 และ 1.25 bar เป็นร้อยละ 3.42

4.39 4.78 1.65 และ 3.23 ตามลำดับ และมุมยังมีค่าความคลาดเคลื่อนเป็นร้อยละ 6.64 5.78 1.93 5.06 และ 3.64 ตามลำดับ ซึ่งทั้งหมดมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5 และสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในแนวระนาบกับ ความดันมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการ $y = 18.72p + 9.35$

5.2 อภิปรายผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้อิทธิพลแรงโน้มถ่วงของโลก โดยใช้โปรแกรม Tracker 4.05 สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้

การวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอ จากการตกอย่างอิสระของวัตถุภายใต้แรงต้านอากาศ สามารถอธิบายผลจากการศึกษาการตกอย่างอิสระภายใต้แรงโน้มถ่วง คือ เมื่อปล่อยวัตถุลงในแนวตั้งให้ตกอย่างอิสระ วัตถุจะมีความเร็วเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของวัตถุจะแปรผันตรงกับความเร็วกว่าคือ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความเร็วก็จะเพิ่มขึ้นด้วย วัตถุจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และจะมีความเร็วมากที่สุดเมื่อวัตถุตกกระทบพื้น และการตกอย่างอิสระภายใต้แรงต้านอากาศ สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อปล่อยวัตถุในแนวตั้งให้ตกอย่างอิสระภายใต้แรงต้านอากาศวัตถุจะมีความเร็วต้นเท่ากับศูนย์ วัตถุจะค่อยๆ ถูกเร่งให้มีขนาดของความเร็วเพิ่มขึ้น วัตถุจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดสมดุลที่แรงโน้มถ่วงและแรงต้านอากาศมีขนาดเท่ากัน จึงทำให้วัตถุมีความเร็วคงที่เข้าสู่ความเร็วปลาย

จากผลการทดลองศึกษาการตกอิสระของวัตถุภายใต้ของเหลวที่มีความหนืด เมื่อน้ำมันมีความหนืดมากวัตถุทรงกลมจะเคลื่อนที่ได้ช้า และเมื่อน้ำมันมีความหนืดน้อยวัตถุทรงกลมจะเคลื่อนที่ได้เร็ว เนื่องจากน้ำมันแต่ละชนิดมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน การหาความหนืดของน้ำมันแต่ละชนิดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอทำให้ทราบว่าชนิดของน้ำมันใดมีความหนืดมากและชนิดใดมีความหนืดน้อย

จากผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำที่ความดันการยิง พบว่า ความดันที่ใช้มีความสัมพันธ์ต่อการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำ โดยระยะที่ตกในแนวราบมีความสัมพันธ์กับแรงดันที่ใช้ยิง การใช้แรงดันเพิ่มขึ้นมีผลทำให้จรวดเคลื่อนที่ได้ไกลขึ้น ความดันที่ใช้กับจรวดขวดน้ำมีผลต่อการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำพิจารณาจากเมื่อความดันเพิ่มขึ้น จรวดขวดน้ำมีระยะการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ พบว่าระยะที่จรวดตกตามแนวราบมีความสัมพันธ์กับแรงดันที่ใช้ยังเป็นตามสมการความสัมพันธ์เชิงเส้น

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ข้างต้นพบว่าการใช้โปรแกรม tracker 4.05 ในการวิเคราะห์ภาพถ่ายการเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้อิทธิพลแรงโน้มถ่วงของโลก ถือว่าสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ให้

เข้าใจและสามารถอธิบายเกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบต่างๆได้ ทั้งยังเป็นโปรแกรมที่ใช้ได้ง่ายและเป็นโปรแกรมฟรีแวร์ไม่มีลิขสิทธิ์ จึงมีความเหมาะสมสำหรับการสอนวิชาฟิสิกส์ทั้งภาคบรรยายและภาคปฏิบัติ

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุ ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอ กรณีศึกษาการเคลื่อนที่ของจรวดขวดน้ำ มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. การเลือกใช้กล้องที่มีความละเอียดสูงจะทำให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำมากขึ้น
2. ควรถ่ายบันทึกภาพในสถานที่ที่มีพื้นหลังสีทึบ เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์
3. ในการวิเคราะห์การตกอิสระภายใต้แรงต้านอากาศควรเลือกใช้เครื่องให้ความเร็วลมที่มีแรงลมที่เหมาะสม เพื่อจำกัดความสูงของอุปกรณ์ในการทดลอง
4. ในการศึกษาการตกอิสระของวัตถุภายใต้ของเหลวที่มีความหนืดควรเลือกวัตถุทรงกลมที่สามารถจะวิเคราะห์ได้เพื่อให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

บรรณานุกรม

ขจรศักดิ์ บัวระพันธ์ เพ็ญจันทร์ ชิงห์ และวรรณทิพา รอดแรงคำ. (2548). การสำรวจแนวคิดของนักศึกษา
ครุวิชาเอกฟิสิกส์ชั้นปีที่ 3 เกี่ยวกับแรงและการเคลื่อนที่. วารสารสงขลานครินทร์ ฉบับสังคมศาสตร์
และมนุษยศาสตร์.ปีที่ 11 (ฉบับพิเศษ) ธันวาคม 2548

ขจรศักดิ์ บัวระพันธ์ เพ็ญจันทร์ ชิงห์ และวรรณทิพา รอดแรงคำ. (2549). การพัฒนาแนวคิด เกี่ยวกับแรง
และ การเคลื่อนที่ของวัตถุของนักศึกษาครุ วิชาเอกฟิสิกส์ชั้นปีที่ 3 ด้วยกิจกรรม การเรียนรู้แบบสร้าง
องค์ความรู้. วารสารสงขลานครินทร์ ฉบับสังคมศาสตร์ และ มนุษยศาสตร์. ปี ที่ 12 (1) มกราคม – มีนาคม
2549

จริยา สุขจันทร์และกามีละห์ หะมะ. (2551). ผลของน้ำมันที่ใช้ทอดต่อคุณภาพของกล้วยหินฉาบ.
วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา, 3 (1), 11-18.

ดิเรก บุญธรรม สันตภาพ สระบัว อภิชาติ พองปลา อุดมเดช ภัคดี และชุติมา อุปถัมภ์. (2556). การ
พัฒนาอุปกรณ์ใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อติดตามการตกอย่างอิสระของวัตถุโดยอาศัยอุปกรณ์เปียโซอิเล็กทริก.
สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ปรัชญา มุขดา กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. (2551). การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ใน
กรณีการวิ่งตามกันของรถบรรทุกเล็ก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่
22 วันที่ 15-17 ตุลาคม พ.ศ. 2551 มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

พิชญ์สุทธิ วิเศษชาติ สิริวิชัย เตชะเจษฎารังษี. (2552). ผลกระทบของความเร็วในการหมุนของลูกสูบ ที่
มีต่ออัตราการตกอย่างอิสระ ของลูกสูบในเครื่องสอบเทียบความดันแบบสมดุลความดัน. การประชุม
วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 4 – 7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2552 จังหวัด
เชียงใหม่

พรรัตน์ วัฒนกลสิวิชัย. (2555). การวิเคราะห์วิถีโอ้อัตราเร็วสูงในกลศาสตร์. วารสารวิทยาศาสตร์ มศว, 28
(2), 212-215

รัชณี รุจิวิโรตม. (2551). กลศาสตร์ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุจิตา ตันสุวรรณ สมภพ อินทสุวรรณ และปิยาภรณ์ ภาชิตกุล. (2556). การพัฒนาศักยภาพด้านการผลิตอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับครูวิทยาศาสตร์. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

อนุสรณ์ ศรีธีระวิโรจน์. 2549). การศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุในของไหลโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 34 (4), 259-264.

เอกพรรณ สวัสดิ์ชิตัง. (2552). ฟิสิกส์ยุคใหม่. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์มูลนิธิสอวน.

อักรพงศ์ วงศ์พัฒน์และสุพจน์ ไวย่างกูร. (2552). การศึกษาแบบจำลองการไหลใน 2 มิติ ของ ของไหลแบบมีความหนืดที่อัดที่อัดตัวไม่ได้โดยใช้โปรแกรม Flex PDE student version 5.1.0. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 37 (4), 482-494.

Pagamas Glawtanong, Suwimol Ritphan, Chitnarong Sirisathikul, Chairote Yaiprasert and Yaowarat Sirisathikul. (2011). Studies of Free Falling Object and Simple Pendulum Using Digital Video Analysis. Walailak J Sci & Tech , 8 (1), 63-69.

ภาคผนวก ก
เครื่องและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพผนวกที่ 1 ขวดน้ำดื่ม (PET)



ภาพผนวกที่ 2 ลูกบอล



ภาพผนวกที่ 3 เทปกาวแลคซีน



ภาพผนวกที่ 4 กรรไกร, มีดคัตเตอร์



ภาพผนวกที่ 5 กาวร้อน



ภาพผนวกที่ 6 ตลับเมตร



ภาพผนวกที่ 7 ไดร์เป่าผม 850 w



ภาพผนวกที่ 8 น้ำมันปาล์ม



ภาพผนวกที่ 9 น้ำมันถั่วเหลือง



ภาพผนวกที่ 10 น้ำมันมะกอก



ภาพผนวกที่ 11 น้ำมันเครื่องอู่โตเบตค



ภาพผนวกที่ 12 หลอดแก้ว



ภาพผนวกที่ 13 ปีกเกอร์



ภาพผนวกที่ 14 เตาไฟฟ้า



ภาพผนวกที่ 15 มัลติมิเตอร์ดิจิตอล



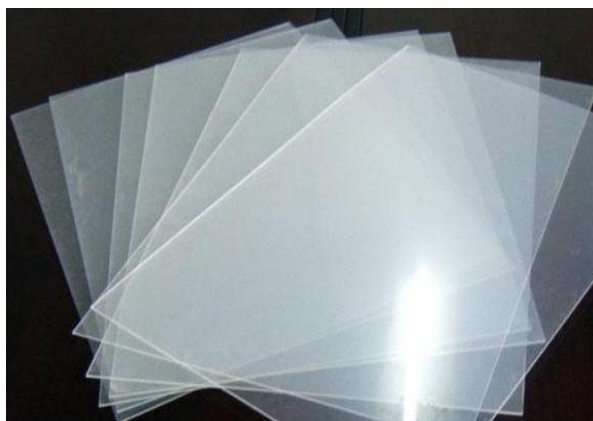
ภาพผนวกที่ 16 ลูกแก้ว



ภาพผนวกที่ 17 ไฮโดรมิเตอร์



ภาพผนวกที่ 18 ขวดน้ำอัดลม (PET)



ภาพผนวกที่ 19 แผ่นใส



ภาพผนวกที่ 20 แผ่นฟิวเจอร์บอร์ด



ภาพผนวกที่ 21 เทปกาวแลคซีน



ภาพผนวกที่ 22 ดินน้ำมัน



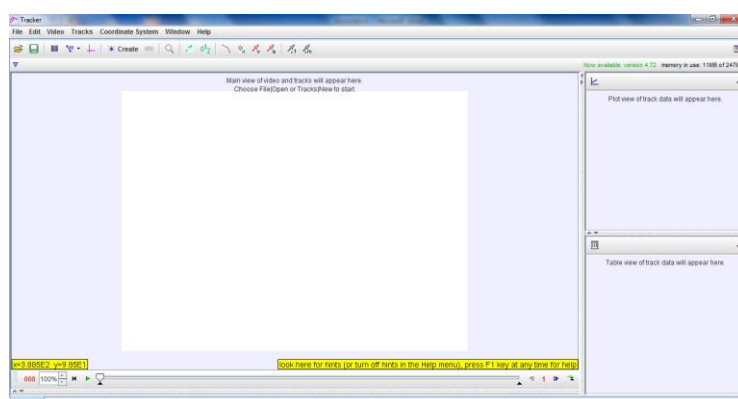
ภาพผนวกที่ 23 กรรไกร มีดคัตเตอร์



ภาพผนวกที่ 24 ฐานยิงจรวดขวดน้ำ



ภาพผนวกที่ 25 ปัมลม ยี่ห้อ BETO



ภาพผนวกที่ 26 Program Tracker 4.05

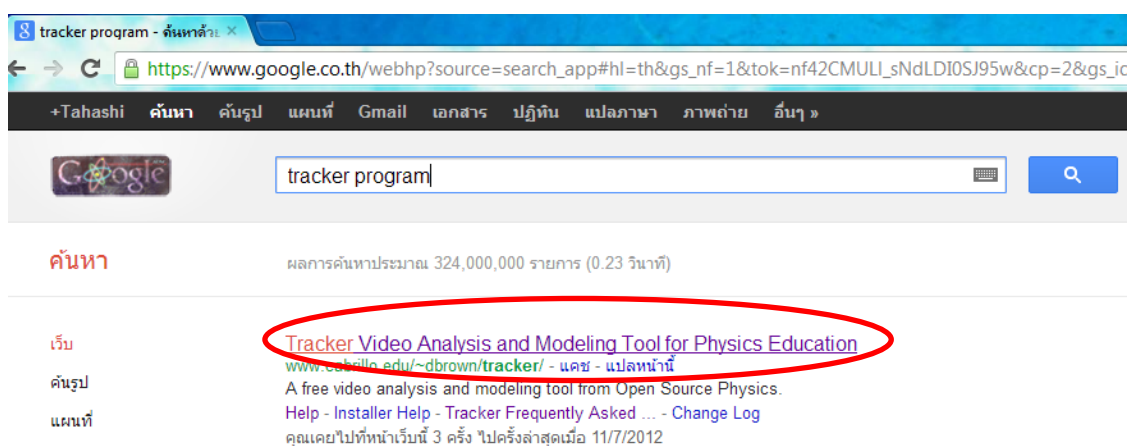


ภาพผนวกที่ 27 กล้อง Canon EOS 500D 15.1 MEGA PIXELS

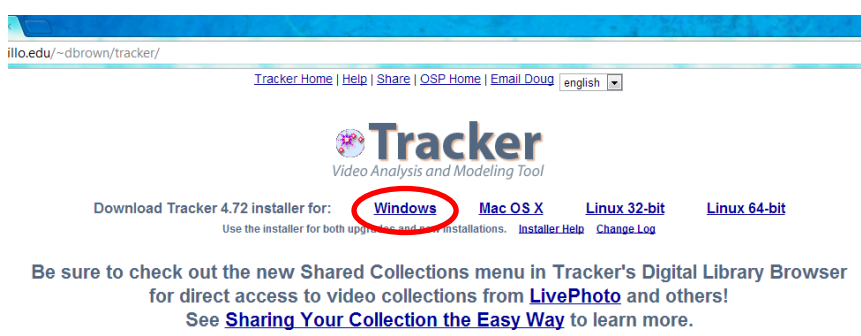


ภาพผนวกที่ 28 ขาตั้งกล้อง Sony VCT-R640

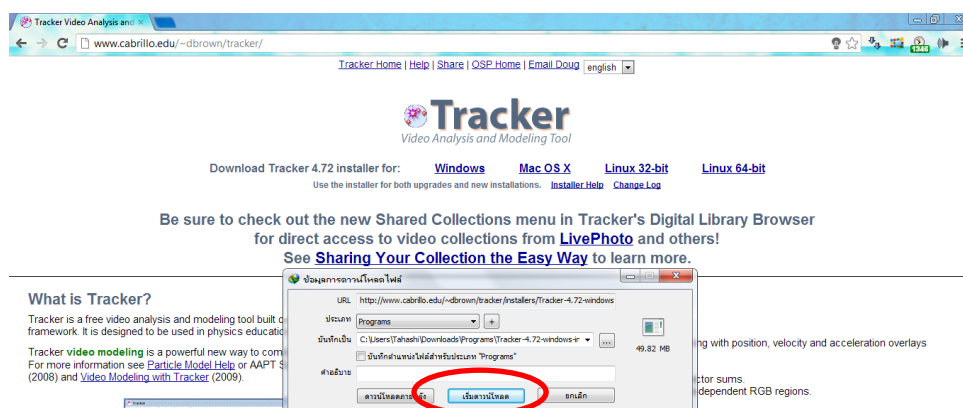
ภาคผนวก ข
การติดตั้งโปรแกรม Tracker



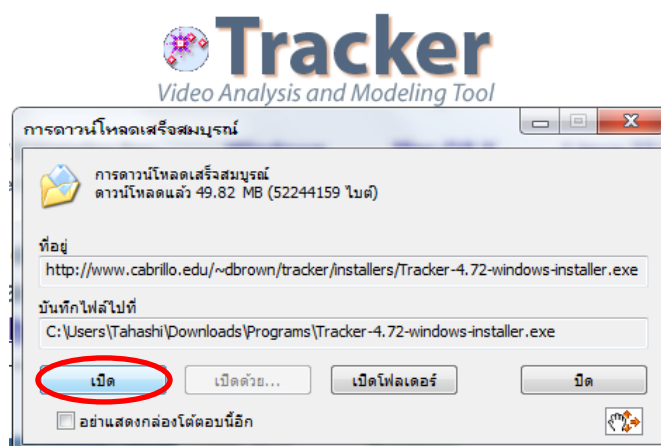
1. ดาวน์โหลดโปรแกรม tracker โดยพิมพ์คำว่า tracker program ใน Google แล้วกดที่ Tracker Video Analysis and Modeling Tool for Physics Education



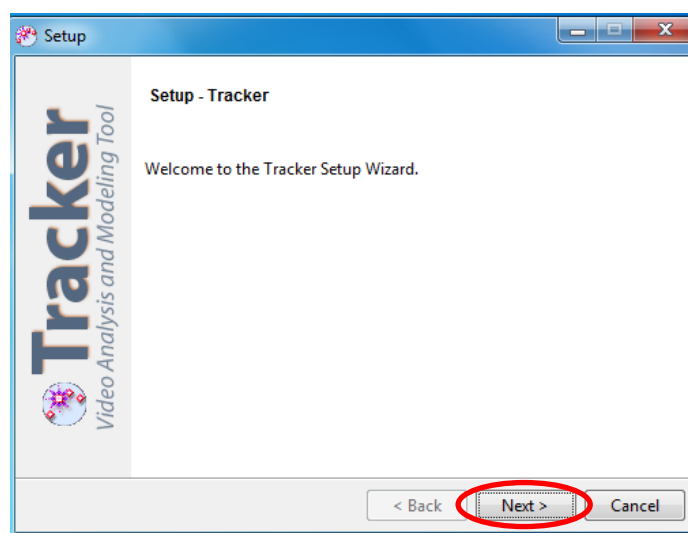
2. เลือกระบบปฏิบัติการที่ต้องการติดตั้งโปรแกรม



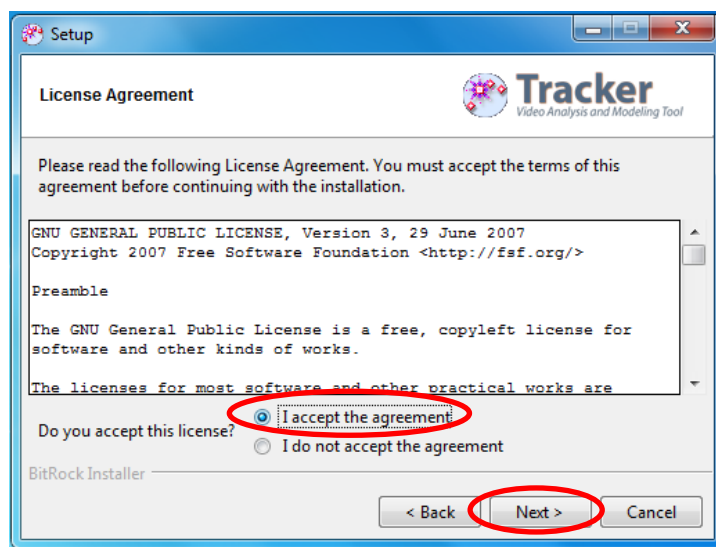
3. เริ่มดาวน์โหลดโปรแกรม tracker



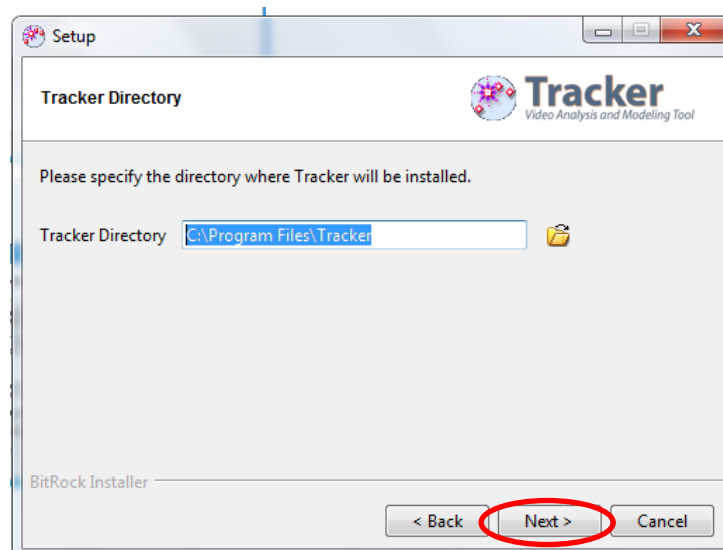
4. เมื่อดาวน์โหลดเสร็จให้กด เปิด เพื่อเริ่มการติดตั้ง



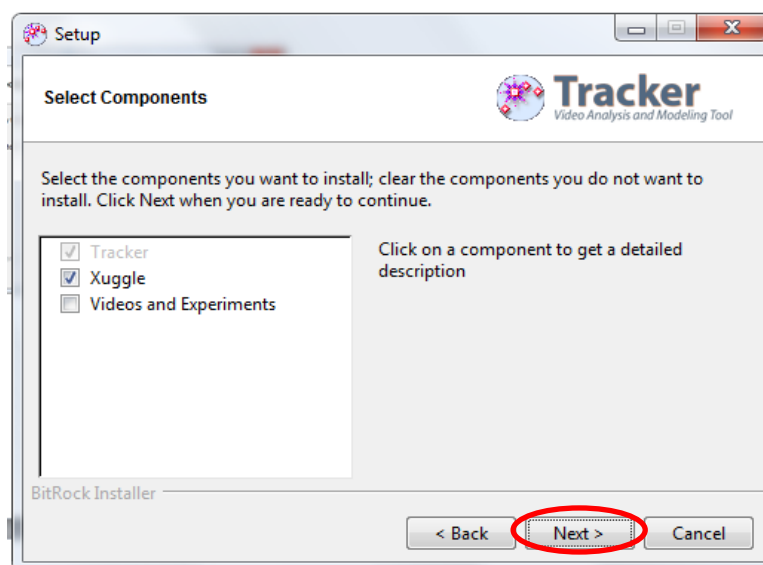
5. คลิก Next



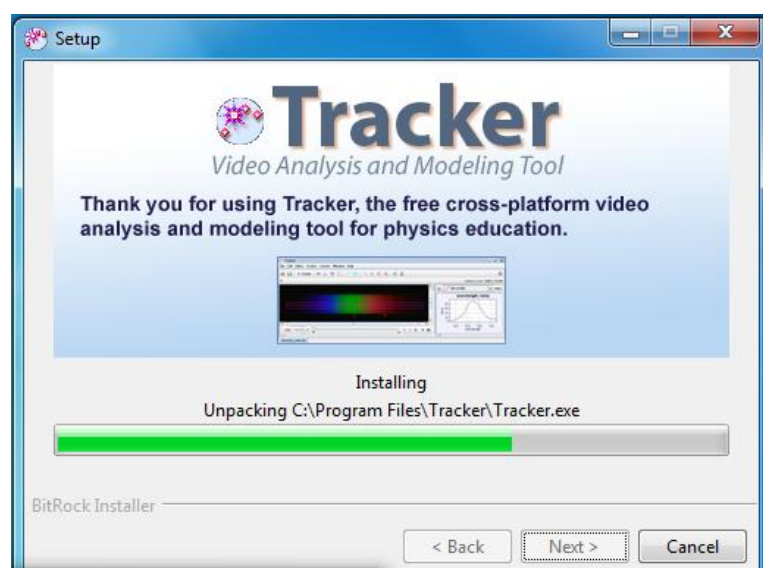
6. เลือก I accept คลิก Next



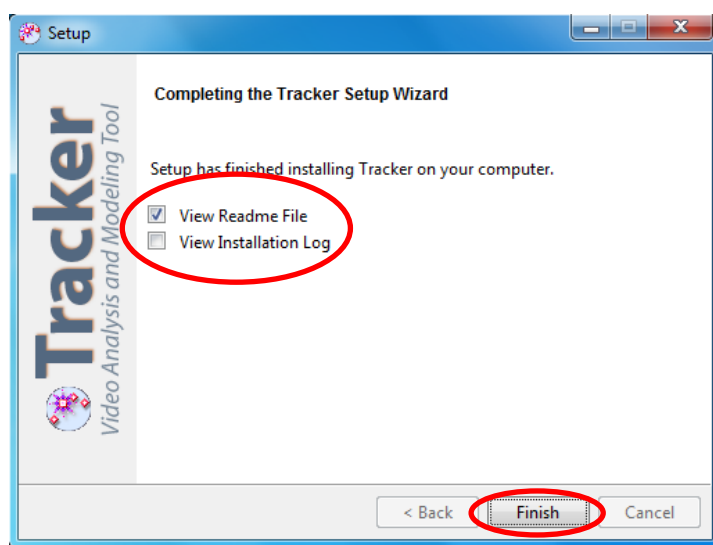
7. คลิก Next



7. คลิก Next



8. รอให้โปรแกรมติดตั้งเองอัตโนมัติ



9. เอาเครื่องหมาย ถูก ออก แล้วคลิก Finish

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นางสาวโรสลีนา ยูโซะ

(ภาษาอังกฤษ) Miss. Roseleena Yusoh

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 1969900014260

3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ (พนักงานมหาวิทยาลัย)

4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ

สาขาวิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร
หมายเลขโทรศัพท์ 081-328-6227 E-mail roseleena.y@yru.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	สถานศึกษา	ปีที่จบการศึกษา
มัธยมศึกษาตอนต้น	ร.ร.นราธิวาส	2542
มัธยมศึกษาตอนปลาย	ร.ร.สาธิตมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2545
ปริญญาตรี (ศษ.บ.ฟิสิกส์)	ม.เกษตรศาสตร์	2550
ปริญญาโท (วท.ม. ฟิสิกส์)	ม.ธรรมศาสตร์	2554

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

International Conference

2010

Yusoh, R., Horprathum, M., Eiamchai, P., Chanyawadee, S. and Aiempanakit, K.”

Determination of the thickness and optical constants of ZrO_2 by spectroscopic ellipsometry and spectrophotometric method”, International Social, Science, Engineering and Energy Conference 2010, December 15-16, 2010, Nakhon Phanom, Thailand.

Nation Conference

2011

Yusoh, R., Horprathum, M., Eiamchai, P., Chindaudom, P., Chanyawadee, S. and Aiempanakit, K., **“Thickness dependent of ZrO₂ films prepared by D.C. reactive magnetron sputtering”** Siam Physics Congress SPC 2011, 23-26 March 2011, Pattaya, Thailand

Yusoh, R., Aiempanakit, K., Horprathum, M., Eiamchai, P. and Chindaudom, P., **“Spectroscopic ellipsometry characterization of ZrO₂ thin films prepared by thermal oxidation and reactive magnetron sputtering”** The 49th Kasetsart University Annual Conference, February 1-4, 2011, Bangkok, Thailand.

Sripodok, W., Uttayan, L., Yusoh, R., Eiamchai, P., Patthanasettakul, V., Horprathum, M. and Aiempanakit, K., **“Influence of plasma treatment on the properties of ITO thin films”** Siam Physics Congress SPC 2011, 23-26 March 2011, Pattaya, Thailand

Wisadsing, T., Worasukkhung, S., Yusoh, R., Eiamchai, P., Phokharatkul, D., Horprathum, M. and Aiempanakit, K., **“Microporous tungsten oxide films were prepared by anodic oxide of sputtered tungsten layer”** Siam Physics Congress SPC 2011, 23-26 March 2011, Pattaya, Thailand

Chananonnawathorn, C., Thanomnim, B., Yusoh, R., Horprathum, M., Limnontakul, P., Eiamchai, P., and Aiempanakit, K., **“Influence of Oxygen Gas Flow Rate on Electrochromic Property of Sputtered WO₃ Films”** Siam Physics Congress SPC 2011, 23-26 March 2011, Pattaya, Thailand

2010

Yusoh, R., Aiampanakit, K., Horprathum, M., Chotirach, M., Kulkralprakan, T.. and Chindaudom, P.,” **Structural and optical properties of ZrO_2 thin films prepared by thermal oxidation**”, The 2nd NPRU Conference Nakhon Pathom Rajabhat University on 15th-17th of June, 2010 in Nakhon Pathom, Thailand