

การเปรียบเทียบการหาความหนืดของของเหลว โดยใช้วิธีการวิเคราะห์
ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา

รัชดา สุขพันธุ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
พฤศจิกายน 2558
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

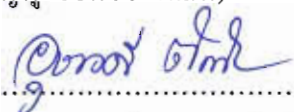
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ รัชดา สุขพันธ์ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

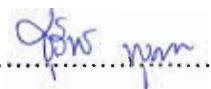

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษาวดี ตันติวานุรักษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธาน
(ดร.วาทัญญู รอดประพัฒน์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษาวดี ตันติวานุรักษ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวิณี ศักดิ์สุนทรศิริ)


..... กรรมการ
(ดร.ชวลีพร พุฒนวล)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพา


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ ศรีสุข)

วันที่ 30 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558

การวิจัยในครั้งนี้ได้รับทุนการศึกษาระดับปริญญาโท
จากสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) กระทรวงศึกษาธิการ
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (สพฐ.)
ประจำปีการศึกษา 2556-2557

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบพระคุณ ดร.วาทัญญ รอดประพัฒน์ ที่ให้ความกรุณามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวิณี ศักดิ์สุนทรศิริ และ ดร.ชุลีพร พุฒนวล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อชาญชัย คุณแม่ نگลักษณ์ ทองศรี และคุณวีระพล สุขพันธุ์ เพื่อนๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแด่ บพภาริ บุรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

รัชดา สุขพันธุ์

56920171: สาขาวิชา: ฟิสิกส์ศึกษา; วท.ม. (ฟิสิกส์ศึกษา)

คำสำคัญ: โหมดภาพยนตร์ / โปรแกรมสำเร็จรูปแทรคเกอร์ / ความหนืดของเหลว

รัชดา สุขพันธุ์ : การเปรียบเทียบการหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา (COMPARISON OF LIQUID VISCOSITY MEASUREMENT BY USING IMAGE DIGITAL VIDEO ANALYSIS AND BY TIMER)

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: อุษาวดี ตันติวานุรักษ์, วท.ค. 70 หน้า. ปี พ.ศ. 2558.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา พบว่า ความหนืดของกลีเซอรินโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลโหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker มีค่าเท่ากับ 0.944 Ns/m^2 และความหนืดของกลีเซอริน โดยวิธีการจับเวลา มีค่าเท่ากับ 0.991 Ns/m^2 เมื่อเทียบกับความหนืดมาตรฐานของกลีเซอริน ที่มีค่า 0.954 Ns/m^2 ทำให้ความหนืดของกลีเซอรินโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลโหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS ใกล้เคียงความหนืดมาตรฐานมากที่สุด มีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.06 ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ สำหรับการหาความหนืดของน้ำมันปาล์มโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลโหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS และวิธีการจับเวลา มีค่าเท่ากับ 0.077 Ns/m^2 และ 0.106 Ns/m^2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับความหนืดมาตรฐานของน้ำมันปาล์ม ที่มีค่า 0.054 Ns/m^2 พบว่าไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการทดลอง และการหาความหนืดของน้ำมันหมูโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลโหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS ไม่สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker ได้ ส่วนความหนืดของน้ำมันหมูโดยวิธีการจับเวลา มีค่าเท่ากับ 0.789 Ns/m^2 เมื่อเทียบกับความหนืดมาตรฐานของน้ำมันหมู ที่มีค่า 0.933 Ns/m^2 พบว่ายังไม่สามารถใช้ในการทดลองได้

56920171: MAJOR: PHYSICS EDUCATION; M.Sc. (PHYSICS EDUCATION)

KEYWORDS: MOVIE MODE / TRAKER / VISCOSITY OF LIQUID

RUTCHADA SUKAPHAN: COMPARISON OF LIQUID VISCOSITY
MEASUREMENT BY USING IMAGE DIGITAL VIDEO ANALYSIS AND BY TIMER.
ADVISORY COMMITTEE: USAVADEE TUNTIWARANURUK, Ph.D. 70 P. 2015.

This research purposes comparison of liquid viscosity measurement by using image digital video analysis and by timer. The viscosity of glycerine obtained by digital video analysis with the high speed value of 480 HS by computer software Tracker is equal to 0.944 Ns/m^2 . The viscosity of glycerine by using timer is equal to 0.991 Ns/m^2 . Compared with the viscosity standards of glycerine is equal to 0.954 Ns/m^2 showed the viscosity of glycerine obtained by digital video analysis with the high speed value of 480 HS is the closest to a viscosity standards is the tolerances of 1.06% , it is acceptable. The viscosity of palm oil obtained by digital video analysis with the high speed value of 480 HS and by timer is equal to 0.077 Ns/m^2 and 0.106 Ns/m^2 respectively. Compared with the viscosity standards of plam oil is equal to 0.054 Ns/m^2 , it is unsuitable for experiments. The viscosity of lard can not analyzed by computer software Tracker. The viscosity of lard by using timer is equal to 0.789 Ns/m^2 then compared with the viscosity standards of lard is equal to 0.933 Ns/m^2 , it can not use for experiments.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
ความหนืดของของเหลว.....	3
ลักษณะการไหลของของไหล.....	6
การวัดความหนืดโดยการตกของโลหะทรงกลมในของเหลว.....	8
การวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป.....	12
กล้องถ่ายภาพวิดีโอ.....	16
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	21
การหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล	21
การหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการจับเวลา	26
การเปรียบเทียบความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล และวิธีการจับเวลา กับค่าความหนืดมาตรฐานของของเหลว.....	27

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย.....	29
การหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล	29
การหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการจับเวลา	34
การเปรียบเทียบความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล และวิธีการจับเวลา กับค่าความหนืดมาตรฐานของของเหลว.....	37
5 อภิปรายและสรุปผล.....	39
อภิปรายผล.....	39
สรุปผลการวิจัย.....	40
ข้อเสนอแนะ.....	41
บรรณานุกรม.....	42
ภาคผนวก.....	44
ภาคผนวก ก	45
ภาคผนวก ข	56
ภาคผนวก ค	63
ภาคผนวก ง	67
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	70

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 หน่วยความหนืดสัมบูรณ์ในระบบต่าง ๆ.....	5
2-2 หน่วยความหนืดจลน์ในระบบต่าง ๆ.....	5
4-1 ความหนืดของกลีเซอริน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอจิต และร้อยละความ คลาดเคลื่อน เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดมาตรฐานของกลีเซอรินที่อุณหภูมิ 25 °C	31
4-2 ความหนืดของของเหลว โดยใช้วิธีการจับเวลา และร้อยละความคลาดเคลื่อน เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดมาตรฐานของของเหลว ที่อุณหภูมิ 25 °C	37
4-3 ร้อยละความคลาดเคลื่อน เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการ วิเคราะห์ภาพวิดีโอจิตและวิธีการจับเวลา กับความหนืดมาตรฐานที่อุณหภูมิ 25 °C ..	38
ก-1 ผลการวิเคราะห์หาระยะทางในแนวตั้งที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ในกลีเซอริน ณ เวลาใด ๆ จากโหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker...	46
ก-2 ผลการวิเคราะห์หาระยะทางในแนวตั้งที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ในกลีเซอริน ณ เวลาใด ๆ จากโหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 720 HS ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker...	48
ก-3 ผลการวิเคราะห์หาระยะทางในแนวตั้งที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ในกลีเซอริน ณ เวลาใด ๆ จากโหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 1080 HS ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker ..	50
ก-4 ผลการทดลองหาอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในกลีเซอริน โดยการวิเคราะห์ภาพวิดีโอจิตัลโหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง	52
ก-5 ผลการวิเคราะห์หาระยะทางในแนวตั้งที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ในน้ำมันปาล์ม ณ เวลาใด ๆ ที่โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker....	53
ก-6 ผลการทดลองหาอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในน้ำมันปาล์ม โดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอจิตัลโหมดภาพยนตร์ที่มีค่าความเร็วสูง 480 HS.....	55
ข-1 ผลการทดลองบันทึกเวลาที่ระยะทางทุกระยะ 10 cm ของโลหะทรงกลม ที่เคลื่อนที่ในกลีเซอริน โดยการจับเวลา.....	57
ข-2 ผลการทดลองหาอัตราเร็วเฉลี่ยที่ระยะทางทุกระยะ 10 cm ของโลหะทรงกลม ที่เคลื่อนที่ในกลีเซอริน โดยการจับเวลา.....	58
ข-3 ผลการทดลองบันทึกเวลาที่ระยะทางทุกระยะ 10 cm ของโลหะทรงกลม ที่เคลื่อนที่ในน้ำมันปาล์ม โดยการจับเวลา.....	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-4 ผลการทดลองหาอัตราเร็วเฉลี่ยและระยะทางทุกระยะ 10 cm ของโลหะทรงกลม ที่เคลื่อนที่ในน้ำมันปาล์ม โดยการจับเวลา.....	60
ข-5 ผลการทดลองบันทึกเวลาที่ระยะทางทุกระยะ 10 cm ของโลหะทรงกลม ที่เคลื่อนที่ในน้ำมันหมู โดยการจับเวลา.....	61
ข-6 ผลการทดลองหาอัตราเร็วเฉลี่ยที่ระยะทางทุกระยะ 10 cm ของโลหะทรงกลม ที่เคลื่อนที่ในน้ำมันหมู โดยการจับเวลา.....	62
ค-1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและมวลของโลหะทรงกลม.....	64
ค-2 มวล ปริมาตรและความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู.....	65
ค-3 ความหนืดของกลีเซอริน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ ความเร็วสูง ที่อุณหภูมิ 25 °C	65
ค-4 ความหนืดของของเหลว โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ ความเร็วสูง 480 HS และวิธีการจับเวลา ที่อุณหภูมิ 25 °C	66
ง-1 ความหนืดของกลีเซอรินที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	68

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 การลดลงของความเร็วเมื่อมีแรงมากระทำในแนวนอนกับพื้นผิวของของไหล.....	4
2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของของไหลแบบต่าง ๆ.....	6
2-3 กราฟการเปลี่ยนแปลงปริมาณที่แสดงคุณสมบัติเป็นของไหล.....	8
2-4 การเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมในของเหลว.....	9
2-5 แรงทั้งหมดที่กระทำต่อทรงกลมขณะตกลงในของเหลว.....	9
2-6 การเข้าสู่ความเร็วปลายของวัตถุทรงกลมในของเหลว.....	11
2-7 การนำเข้าไฟล์วิดีโอ.....	12
2-8 การปรับทิศทางการแสดงไฟล์ภาพวิดีโอ.....	13
2-9 การตั้งค่าระยะของเฟรมภาพวิดีโอ.....	14
2-10 การตั้งค่าตำแหน่งและความยาว.....	14
2-11 การกำหนดตำแหน่งจุดมวล.....	15
2-12 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณต่าง ๆ.....	15
2-13 กล้องถ่ายวิดีโอ.....	16
2-14 ฟังก์ชันการถ่ายภาพยนตร์ของกล้อง Nikon Coolpix s 6900.....	17
2-15 การบิดเบี้ยวแปลงให้จุดที่เคยเรียงตัวเป็นเส้นตรงกลายเป็นเส้นที่โค้งเล็กน้อย.....	19
3-1 กลีเซอรินที่ใช้ในการทดลองหาความหนืด.....	22
3-2 ชุดทดลองหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล.....	22
3-3 โลหะทรงกลม.....	23
3-4 น้ำมันปาล์มและน้ำมันหมูที่ใช้ในการทดลองหาความหนืด.....	23
3-5 การตั้งค่าความยาวแกนแนวตั้งในโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker.....	24
3-6 การกำหนดตำแหน่งจุดมวลของโลหะทรงกลมด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker.....	25
3-7 ชุดทดลองหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการจับเวลา.....	27
4-1 ข้อมูลระยะทางในแนวตั้ง ที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ในกลีเซอริน ณ เวลาใด ๆ จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker.....	30
4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในกลีเซอรินกับ ระยะทางในแนวตั้ง โดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล.....	30

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-3 ข้อมูลระยะทางในแนวดิ่ง (y) ที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ในน้ำมันปาล์ม ณ เวลา (t) จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker.....	32
4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในน้ำมันปาล์มกับระยะทางในแนวดิ่ง โดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล.....	33
4-5 การวิเคราะห์ระยะทางในแนวดิ่งของโลหะทรงกลมในน้ำมันหมูไม่ปรากฏผล.....	34
4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในกลีเซอรินกับระยะทางในแนวดิ่ง โดยวิธีการจับเวลา.....	35
4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในน้ำมันปาล์มกับระยะทางในแนวดิ่ง โดยวิธีการจับเวลา.....	35
4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในน้ำมันหมูกับระยะทางในแนวดิ่ง โดยวิธีการจับเวลา.....	36

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การจัดกระบวนการเรียนรู้ที่ผู้เรียนสำคัญที่สุด เป็นการจัดการเรียนรู้ที่ทำให้ผู้เรียนได้รับประสบการณ์ตรงและสามารถค้นพบองค์ความรู้ได้ด้วยตนเอง ตามสาระสำคัญของหลักสูตร ทำให้การจัดการเรียนรู้ในรายวิชาฟิสิกส์จำเป็นต้องมีการทดลองประกอบการเรียน เนื่องจากว่าการจัดการเรียนโดยใช้การทดลอง ผู้เรียนจะสามารถทำและตรวจสอบผลได้ทันที การเรียนรู้จึงเป็นไปอย่างครบถ้วน ผู้เรียนสามารถที่จะใช้ประสาทสัมผัสทั้ง 5 โดยอาศัยทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ในการค้นหาคำตอบที่สงสัย ด้วยเหตุนี้ไม่ว่าจะเป็นเนื้อหาเรื่องใด วิธีการทดลองจะให้ความสัมพันธ์ผลของการเรียนรู้มากกว่าวิธีอื่นๆ ซึ่งสามารถที่จะทำให้ผู้เรียนสามารถทำความเข้าใจ ทฤษฎีและนำไปใช้ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ (พิสิฐ เมธากัทร และธีระพล เมธิกุล, 2531, หน้า 124) แต่ก็มีข้อจำกัดที่สำคัญในการจัดการเรียนการสอนเกี่ยวกับการทดลองในบางครั้ง ต้องใช้ทรัพยากรมากในการลงทุนเพื่อให้ได้ชุดการทดลองที่ดีและมีความแม่นยำในการวัด

ในการทดลองเรื่องการหาความหนืดของของเหลวที่มีอยู่ในหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมฟิสิกส์ เล่ม 5 โดยอาศัยการตกของโลหะทรงกลมในของเหลวและใช้การจับเวลาเป็นการทดลองหนึ่งที่น่าสนใจทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ และพบความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองเนื่องจากสาเหตุความไม่แม่นยำในการวัดของผู้วัด เมื่อของเหลวมีความหนืดต่ำ ซึ่งจะทำให้วัตถุทรงกลมตกลงเร็วเกินไปจนทำให้จับเวลา โดยใช้สายตาคลาดเคลื่อนไป

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้โหมคภาพยนตร์ความเร็วสูงถ่ายวิดีโอการทดลองและนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ใช้สาธิตในห้องเรียน ที่เรียกว่าโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker เพื่อช่วยทำให้การวิเคราะห์ผลการทดลองทางฟิสิกส์ มีความสะดวกขึ้น และยังทำให้การวัดตำแหน่งของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่ในกรณีที่มีแรงต้านเกิดความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งจะเปรียบเทียบการหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา กับความหนืดมาตรฐานของของเหลว

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา
2. เพื่อเปรียบเทียบความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้วิธีการหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล
2. ได้วิธีที่เหมาะสมในการหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล
3. เป็นแนวทางสำหรับการจัดการเรียน การสอนแบบทดลองเรื่องความหนืดของของเหลว

ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างชุดทดลองในการหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล
2. หาความหนืดของของเหลว ได้แก่ กลีเซอริน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ 3 ค่าความเร็วสูง (Hight Speed) ได้แก่ 480 HS, 720 HS และ 1080 HS ด้วยโปรแกรมจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ใช้สาธิตในห้องเรียนหรือเพิ่มเติมการศึกษาเกี่ยวกับฟิสิกส์ เรียกว่า โปรแกรมสำเร็จรูป Tracker เพื่อวิเคราะห์หาความเร็วของโหมดภาพยนตร์ที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ความหนืดของกลีเซอรินใกล้เคียงความหนืดมาตรฐานมากที่สุด
3. นำความเร็วของโหมดภาพยนตร์ที่มีความเหมาะสมที่สุดมาหาความหนืดของของเหลวอีก 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู
4. หาความหนืดของกลีเซอริน น้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู โดยใช้วิธีการจับเวลา
5. เปรียบเทียบความหนืดของของเหลว คือ กลีเซอริน น้ำมันปาล์ม น้ำมันหมู โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและใช้วิธีการจับเวลา กับความหนืดมาตรฐานของของเหลว

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยเพื่อเปรียบเทียบการหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพ
วิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา มีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

ความหนืดของของเหลว

ความหนืด (viscosity) คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล เมื่อมีแรง
มากระทำ (ของไหล หมายถึง สสารที่สามารถไหลได้ เช่น ก๊าซและของเหลว) ของไหลที่มีความ
ความหนืดสูง จะมีค่าความต้านทานต่อการไหลสูง ของไหลที่มีความหนืดต่ำจะมีค่าความต้านทาน
ต่อการไหลต่ำ ของไหลธรรมดาสามารถที่จะแสดงค่าความหนืดสัมบูรณ์ได้ แต่ในขณะที่ของไหลที่
มีส่วนผสมของสารหลายตัวจะมีลักษณะการไหลที่ซับซ้อนและไม่สามารถแสดงค่าความหนืด
ค่าเดียวได้

การวัดความหนืดทำได้โดยการวัดแรงต้านทานการไหลภายในของของไหล เมื่อมีแรงมา
กระทำในแนวขนานกับพื้นผิว เรียกแรงต้านที่เกิดขึ้นนี้ว่า แรงเฉือน (Shear force) เมื่อพิจารณาถึง
ก้อนของไหล ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโมเลกุลที่ขนานกัน ดังภาพที่ 2-1 ชั้นที่อยู่ล่างสุดของของไหล
จะถูกยึดไว้ ถ้าแผ่นด้านบนของของไหลได้รับแรงกระทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่
แผ่นด้านล่างถดถอยไปจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแผ่นของไหล
ชั้นล่างสุดที่ไม่เคลื่อนที่ ความแตกต่างของความเร็วระหว่างของไหลสองแผ่นกับระยะทางที่
เปลี่ยนไป คือ อัตราเฉือน (shear rate) ที่อยู่ในเทอมของความแตกต่างของความเร็ว ค่าแรงต่อหน่วย
พื้นที่ที่ทำให้เกิดการไหล เรียกว่า แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ (shear stress) ถ้าของไหลมีความหนืด
สูงขึ้น ก็ต้องใช้แรงเฉือนที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้อัตราเฉือนเท่าเดิม ดังนั้นอัตราเฉือนจึงเป็นสัดส่วน
โดยตรงกับแรงเฉือนตามสมการที่ 1 ดังนี้

$$\frac{F}{A} = \mu \left(\frac{dv}{dx} \right) \quad (1)$$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์ของความหนืด (coefficient of viscosity) หรือเรียกง่าย ๆ ว่า
ความหนืด ตามหลักของเซอร์ไอแซกนิวตัน

dv คือ ความแตกต่างของความเร็วระหว่างของไหลสองแผ่น

dx คือ ระยะทางที่เปลี่ยนไป

F คือ แรงเฉือน

A คือ พื้นที่

$\left(\frac{dv}{dx}\right)$ คือ อัตราเฉือน

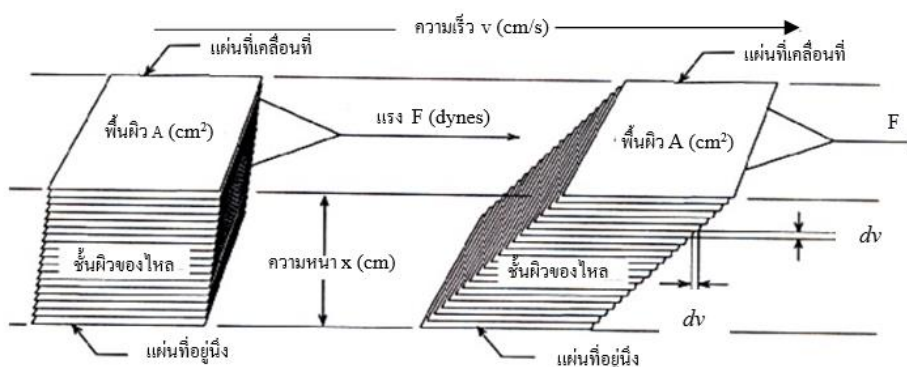
คำจำกัดความของความหนืดสามารถเขียนเป็นสมการ ทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2

$$\mu = \frac{F'}{S} \quad (2)$$

เมื่อ F' คือ แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น dynes/cm²s หรือ Pa
 S คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น s⁻¹

หน่วยของความหนืด คือ พอยส์ (poise) หรือ dyne.s.cm⁻² หรือ gram.cm⁻¹.s⁻¹

1 พอยส์ คือแรงที่ใช้ทำให้ของเหลวที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 cm² หนา 1 cm เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 cm/s



ภาพที่ 2-1 การลดลงของความเร็วเมื่อมีแรงกระทำในแนวนอนกับพื้นผิวของของไหล
 (สายัณฑ์ สุขพงษ์ และวิรัตน์ ปฐมชัยอัมพร, 2549)

หน่วยของความหนืด คือ พอยส์ (P) เป็นหน่วยที่ตั้งเป็นเกียรติแก่ นายแพทย์ชาวฝรั่งเศสชื่อปีวเซย์ (Poiseuille, J.L.) โดย 1 P คือ แรงที่ใช้ทำให้ของเหลวที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 cm² หนา 1 cm เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 cm/s สามารถเขียนหน่วยความหนืดสัมบูรณ์ในระบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 หน่วยความหนืดสัมบูรณ์ในระบบต่าง ๆ (คัดแปลงจาก Mott & Robert, 2000)

ระบบหน่วย	หน่วยของความหนืดสัมบูรณ์
ระบบหน่วยระหว่างประเทศ (International system,SI)	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ or $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
ระบบหน่วยตามความนิยมของสหรัฐ (United state customary system,USCS)	$\text{lb} \cdot \text{s}/\text{ft}^2$ or $\text{slug}/(\text{ft} \cdot \text{s})$
ระบบหน่วยซีจีเอส (Centimrter-gram-second,CGS)	$\text{poise} = \text{dyne} \cdot \text{s}/\text{cm}^2 = \text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}) = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ $\text{centipoise} = \text{poise}/100 = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$

ความหนืด เป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนืดจะลดลงอย่างรวดเร็ว และยังมีความหนืดอีกชนิดหนึ่ง คือ ความหนืดจลน์ (kenetic viscosity) ซึ่งมีค่าเท่ากับ ความหนืดสัมบูรณ์หารด้วยความหนาแน่นของของไหล เขียนเป็นสมการที่ 3 ดังนี้

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

เมื่อ ν คือ ความหนืดจลน์ มีหน่วยเป็น m^2/s

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล มีหน่วยเป็น kg/m^3

สามารถเขียนหน่วยความหนืดจลน์ในระบบต่างๆ ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 หน่วยความหนืดจลน์ในระบบต่าง ๆ (คัดแปลงจาก Mott & Robert , 2000)

ระบบหน่วย	หน่วยของความหนืดสัมบูรณ์
ระบบหน่วยระหว่างประเทศ (International system,SI)	m^2/s
ระบบหน่วยตามความนิยมของสหรัฐ (United state customary system,USCS)	ft^2/s
ระบบหน่วยซีจีเอส (Centimrter-gram-second,CGS)	$\text{stoke} = \text{cm}^2/\text{s} = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ $\text{centistoke} = \text{stoke}/100 = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$

ลักษณะการไหลของของไหล

แบ่งได้ 2 แบบ ดังนี้ (โชคชัย นิเวศน์รังสรรค์, 2549)

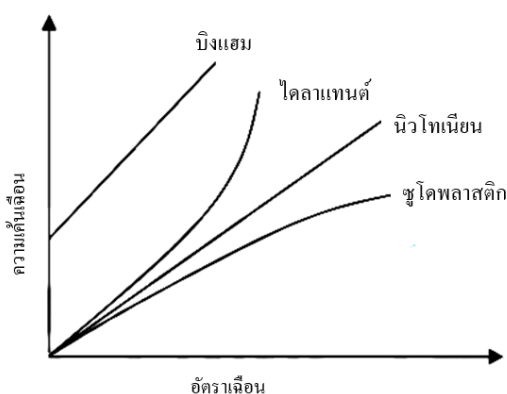
1. ลักษณะการไหลของของไหลนิวโทเนียน (newtonian fluid) เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของไหลจะมีค่าความหนืดเป็นค่าคงที่ อัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนต่ออัตราเฉือนมีค่าคงตัว ตัวอย่างเช่น น้ำ อากาศ เอทานอล และเบนซิน กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนต่ออัตราเฉือนแสดงไว้ตามภาพที่ 2-2 ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง

2. ลักษณะการไหลของของไหลนอนิวโทเนียน (non newtonian fluid) เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของไหลจะมีค่าความหนืดไม่คงที่ อัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนต่ออัตราเฉือนมีค่าไม่คงตัว ลักษณะการไหลแบบนี้แบ่งเป็น 3 แบบ ตามภาพที่ 2-2

2.1 ชูโดพลาสติก (pseudoplastic) เป็นของไหลที่มีค่าความหนืดลดลง เมื่ออัตราเฉือนสูงขึ้น ลักษณะกราฟเป็นเส้นโค้งงอ โดยมีสาเหตุมาจากการคลายตัวของห่วงโซ่โพลิเมอร์ที่พันกัน เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากอัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้น เช่น เลือด โคลน สารละลายพอลิเมอร์ เป็นต้น

2.2 ไดลาแทนต์ (dilatant) เป็นของไหลที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน ลักษณะกราฟเป็นเส้นโค้งงอ โดยมีสาเหตุมาจากห่วงโซ่โพลิเมอร์มีการเกี่ยวพันกัน หรือเมื่อมีแรงมากระทำจะทำให้เกิดการจับตัวแน่นมากขึ้น เช่น สารละลายน้ำตาลเข้มข้น น้ำแป้ง เป็นต้น

2.3 บิงแฮม (bingham) เป็นของไหลที่เกิดการไหลต่อเมื่อมีค่าความเค้นเฉือนสูงเกินค่าหนึ่ง และเมื่อเกิดการไหลแล้วของไหลจะมีลักษณะการไหลแบบนิวโทเนียน เช่น ยาสีฟัน ซ็อกโกแลต ซอสมะเขือเทศ มัสตาร์ด มายองเนส สี เป็นต้น



ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของของไหลแบบต่าง ๆ

(โชคชัย นิเวศน์รังสรรค์, 2549)

การที่จะตัดสินใจว่าของไหลแสดงคุณสมบัติแบบใด และมีค่าความหนืดเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าความหนืดปรากฏ (apparent viscosity, μ) และอัตราเฉือน เครื่องมือสำหรับวัดความหนืด เรียกโดยทั่วไปว่า วิสโคมิเตอร์ (viscometer) ซึ่งมีหลายแบบ

สำหรับมาตรวัดความหนืดชนิดหมุน ตัวอย่าง เช่น มาตรวัดความหนืดบรุคฟิลด์ (brookfield viscometer) การเพิ่มความเร็วของการหมุนของหัวทดสอบ (spindle) หมายถึง การเพิ่มอัตราเฉือน ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดที่ปรากฏ ถ้าการเปลี่ยนความเร็วของการหมุนไม่ทำให้ค่าความหนืดที่ปรากฏเปลี่ยนแปลง (อย่างมีนัยสำคัญ) ถือว่าสารนั้นมีคุณสมบัติเป็นของไหลนิวโทเนียน และสามารถสรุปได้ว่าของไหลมีความหนืดเท่ากับค่าความหนืดที่ปรากฏ แต่ถ้าการเปลี่ยนความเร็วของการหมุนทำให้ค่าความหนืดที่ปรากฏเปลี่ยนแปลง ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในรูปเอกซ์โพเนนเชียล (exponential) ถือว่าของไหลนั้นมีคุณสมบัติเป็นของไหลนอนิวโทเนียน จากภาพที่ 2-3 ของไหลนิวโทเนียนมีความชันคงที่ ซึ่งแสดงว่ามีความหนืดคงที่ ในขณะที่ของไหลโคลาแทนต์และซูโดพลาสติกมีความชันค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลง ซึ่งแสดงว่ามีความหนืดค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2-3 (ก)

ความหนืดของของไหลชนิดต่าง ๆ ที่อัตราเฉือนต่าง ๆ ค่า K และ n คำนวณได้จากเฮอเชล-บัลลี โมเดล ในรูปของความหนืดที่ปรากฏ (μ) และอัตราเฉือน (γ) สามารถเขียนดังสมการที่ 4 และ 5

$$\mu = K\gamma^{n-1} \quad (4)$$

$$\text{Log } \mu = \text{Log } K + (n-1) \text{Log } \gamma \quad (5)$$

เมื่อ K คือ ค่าคงตัว

n คือ ค่าคงตัว

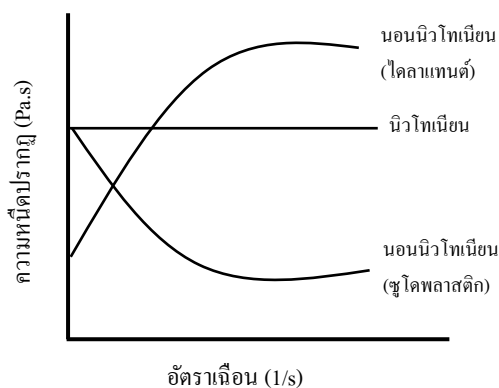
หากเขียนกราฟ Log-Log ระหว่าง $\text{Log } (\mu)$ บนแกน Y และ $\text{Log } (\gamma)$ บนแกน X

$n-1$ คือ ค่าความชัน (Slope)

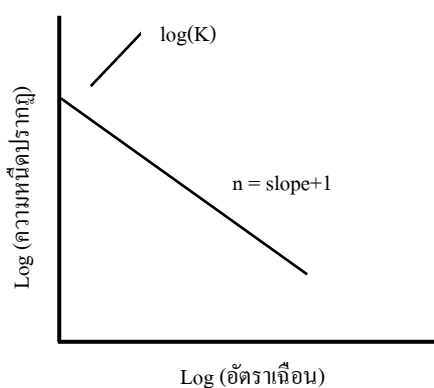
$\text{Log } (K)$ คือ จุดตัดแกน Y ตามภาพที่ 2-3(ข)

จะสังเกตได้ว่าถ้าของไหลมีคุณสมบัติเป็นของไหลนิวโทเนียน ค่า n จะเท่ากับ 1 ทำให้ μ เท่ากับ K และความหนืดของของไหลมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราเฉือนหรือการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการหมุน ส่วนของไหลชนิดซูโดพลาสติกจะมีค่า n มากกว่า 1 และของไหล

ไคลาแทนต์ จะมีค่า n น้อยกว่า 1 ค่า n และ K ที่ได้จากรูป เป็นค่าคงที่เฉพาะตัวของของไหล ซึ่งใช้ในการทำนายความหนืดที่ปรากฏ ณ อัตราเฉือนต่าง ๆ กัน ตามสมการที่ 4



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดปรากฏเทียบกับอัตราเฉือน

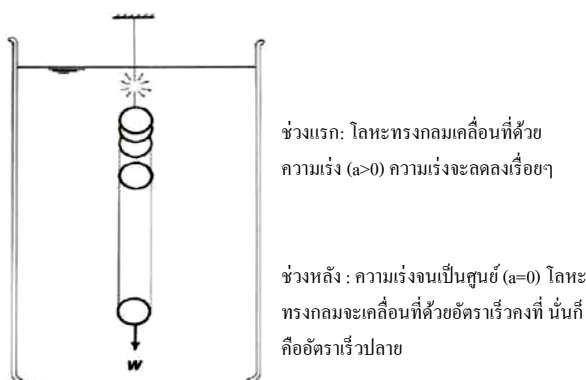


(ข) กราฟระหว่าง Log กับ Log ของความหนืดปรากฏเทียบกับอัตราเฉือน

ภาพที่ 2-3 กราฟการเปลี่ยนแปลงปริมาณที่แสดงคุณสมบัติเป็นของไหล (มณฑล สุกใส , 2551)

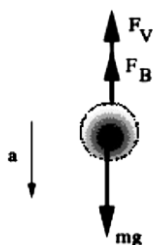
การวัดความหนืดโดยการตกของโลหะทรงกลมในของเหลว

การวัดความหนืดของของเหลวทำได้หลายวิธี ที่นิยมใช้กัน ได้แก่ การให้ของเหลวไหลผ่านท่อเล็กๆ แล้ววัดอัตราการไหลของของเหลวในท่อ หรือหย่อนวัตถุทรงกลมลงในท่อซึ่งบรรจุของเหลวไว้แล้วจับเวลาที่วัตถุทรงกลมตกลงไป ในช่วงระยะที่กำหนดในท่อ ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 การเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมในของเหลว (ดัดแปลงจาก Flow Past a sphere II, 2011)

เมื่อวัตถุทรงกลมตกอย่างอิสระในของเหลว วัตถุทรงกลมนี้จะค่อย ๆ ตกลงในของเหลว โดยของเหลวที่อยู่ด้านหน้าของวัตถุทรงกลมจะไหลเข้าแทนที่ช่องว่างที่วัตถุทรงกลมวิ่งผ่าน โดยที่ของเหลวนั้นไม่มีการหมุนวน แรงโน้มถ่วงจะทำให้วัตถุทรงกลมตกลงมาในทิศพุ่งลง โดยมีแรงสองแรง คือ แรงลอยตัว (bouyant force) และแรงต้านเนื่องจากความหนืด (viscous drag force) กระทำต่อวัตถุทรงกลมในทิศทางพุ่งขึ้น ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 แรงทั้งหมดที่กระทำต่อทรงกลมขณะตกลงในของเหลว (อรุณรัศมี จันทพรหม, 2552)

จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน การเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลม สามารถเขียนดังสมการที่ 6

$$mg - F_B - F_v = ma \quad (6)$$

เมื่อ m คือ มวลของวัตถุทรงกลม มีหน่วยเป็น kg

a คือ ความเร่งของวัตถุทรงกลมในของเหลว มีหน่วยเป็น m/s^2

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีหน่วยเป็น m/s^2

จาก กฎของสโตกส์ (Stoke) แรงต้านจากความหนืดจะแปรผันเป็นเชิงเส้นกับความเร็ว กรณีที่วัตถุมีรูปร่างทรงกลม F_v รูปแบบดังสมการ

$$F_v = 6\pi\eta r v \quad (7)$$

เมื่อ r คือ รัศมีของวัตถุทรงกลม มีหน่วยเป็น m
 v คือ ความเร็วของวัตถุที่เวลาใดๆ มีหน่วยเป็น m/s
 η คือ ความหนืดของของเหลว มีหน่วยเป็น Ns/m²

สำหรับแรงลอยตัว F_B จากกฎของอาร์คิมิดีส (Archimedes) แรงลอยตัวจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุทรงกลม เนื่องจากวัตถุทรงกลมจมอยู่ในของเหลวทั้งหมด นั่นคือสมการที่ 8

$$F_B = \rho' V g = \rho_1 \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) g \quad (8)$$

เมื่อ ρ_1 คือ ความหนาแน่นของของเหลว มีหน่วยเป็น kg/m³
 V คือ ปริมาตรของวัตถุทรงกลม มีหน่วยเป็น m³

ในขณะที่วัตถุทรงกลมตกลงมาด้วยความเร่ง แรงต้านจากความหนืดและแรงลอยตัวจะหน่วงให้วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งที่ลดลงจนกระทั่งไม่มีความเร่ง หรือ วัตถุทรงกลมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ จากสมการที่ 6 เมื่อความเร่งเป็นศูนย์ สมการเขียนได้ใหม่ ดังสมการที่ 9

$$mg - F_B - F_v = 0 \quad (9)$$

แทนค่า F_B และ F_v จากสมการที่ 7 และ 8 ในสมการที่ 9 จะได้สมการที่ 10, 11 และ 12

$$\rho \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) g - \rho_1 \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) g - 6\pi\eta r v_t = 0 \quad (10)$$

$$\text{หรือ} \quad v_t = \frac{2r^2 g (\rho - \rho_1)}{9\eta} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{2r^2 g(\rho - \rho_l)}{9v} \quad (12)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของวัตถุทรงกลม มีหน่วยเป็น kg/m^3

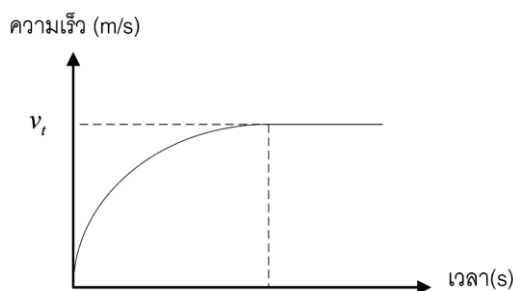
v_t คือ ความเร็วปลายของวัตถุทรงกลม มีหน่วยเป็น m/s

อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ในสมการที่ 12 จะถูกต้องและใช้ได้ก็ต่อเมื่อของเหลวไม่มีขอบเขตจำกัด แต่ในการทดลองของเหลวที่ใส่อยู่ในทรงกระบอกที่มีขนาดจำกัด ดังนั้นการคำนวณหาความหนืด จึงมีเทอมที่เพิ่มเข้ามา คือ $\left(1 + \frac{12r}{5R}\right)$ ทำให้ความสัมพันธ์ เป็นดังสมการที่ 13 เมื่อ r น้อยกว่า R มาก ๆ แล้วเทอมนี้จะเข้าใกล้ 1 ซึ่งก็คือสมการที่ 12 นั่นเอง (ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัย เชียงใหม่, 2557)

$$\eta = \frac{2r^2 g(\rho - \rho_l)}{9v \left(1 + \frac{12r}{5R}\right)} \quad (13)$$

เมื่อ R คือ รัศมีของภาชนะทรงกระบอกที่บรรจุของเหลว มีหน่วยเป็น m

เมื่อทำการแก้มสมการที่ 6 จะสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาได้ดังภาพที่ 2-6 ซึ่งอธิบายการเคลื่อนที่ได้ว่า ในช่วงแรก อัตราเร็วของวัตถุทรงกลมจะมีค่าเพิ่มขึ้น (เคลื่อนที่ด้วยความเร่งมีทิศทางเดียวกับทิศทางของความเร็ว) แต่เนื่องจากแรงต้านเนื่องจากความหนืดมีค่ามากขึ้นตามขนาดของความเร็วที่เพิ่มขึ้น ตามสมการที่ 7 ในที่สุดแล้วแรงหนืดนี้จะมีขนาดมากพอที่จะทำให้แรงสุทธิในแนวตั้งมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งย่อมาหมายความว่า วัตถุจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (ความเร่งเป็นศูนย์) ความเร็วนี้เรียกว่า ความเร็วปลาย (terminal velocity)



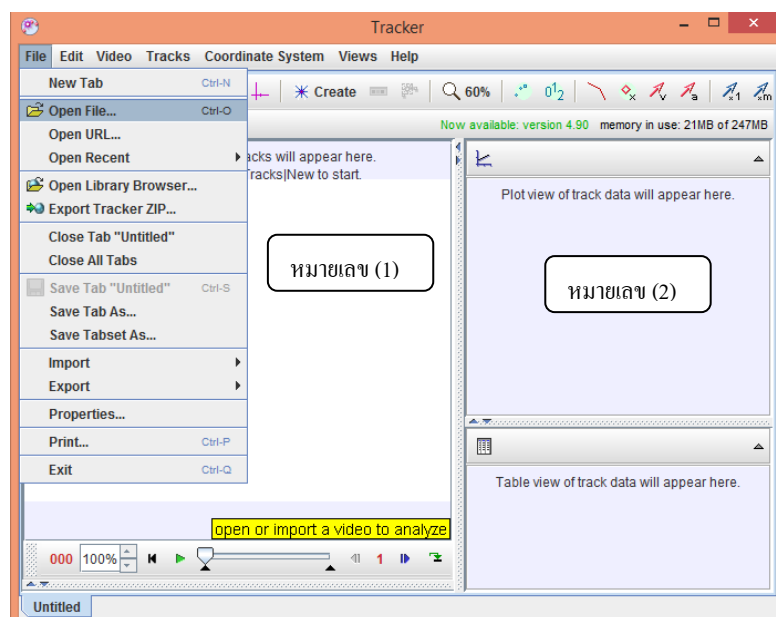
ภาพที่ 2-6 การเข้าสู่ความเร็วปลายของวัตถุทรงกลมในของเหลว (หทัยชนก เพ็ชรมาตศรี, 2555)

การวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

โปรแกรมจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ใช้สาธิตในห้องเรียนหรือเพิ่มเติมการศึกษาเกี่ยวกับฟิสิกส์ เรียกว่าโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอดิจิทัลที่ช่วยทำให้การวิเคราะห์การทดลองฟิสิกส์มีความสะดวกมากยิ่งขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเหมาะสมในการหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอดิจิทัล ซึ่งจะใช้กล้องวิดีโอดิจิทัลถ่ายภาพการทดลองและนำไฟล์ภาพวิดีโอมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker

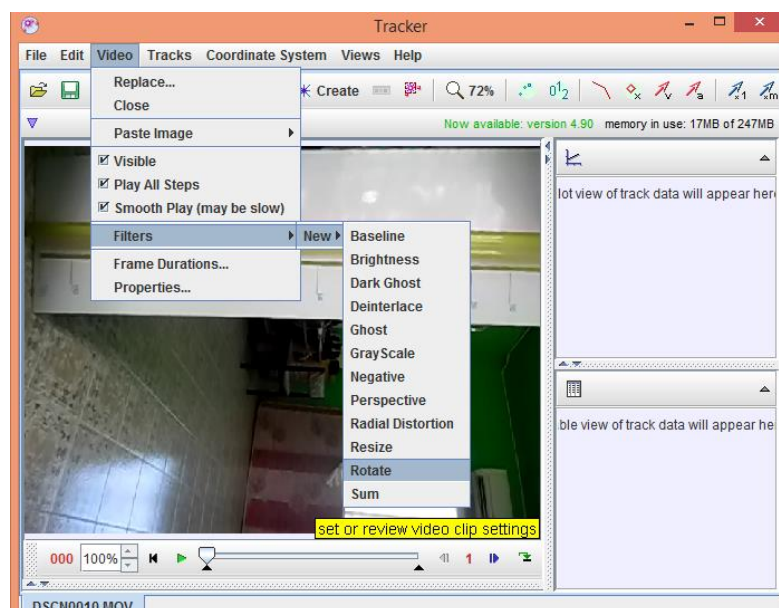
ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker สามารถแบ่งเป็น 6 ขั้นตอนดังนี้ (Brown & Cox, 2009)

ขั้นตอนที่ 1 การนำเข้าไฟล์วิดีโอ เมื่อเข้าสู่โปรแกรมจะปรากฏแถบเครื่องมือการใช้งานต่างๆไว้ด้านบน พื้นที่ด้านซ้ายหมายเลข (1) จะเป็นพื้นที่ในการแสดงภาพถ่ายวิดีโอ ส่วนพื้นที่ด้านขวาหมายเลข (2) จะเป็นพื้นที่แสดงผลในรูปแบบกราฟ ให้เลือกแถบเมนู File และ Open File ตามลำดับ เลือกเปิดไฟล์ภาพวิดีโอที่ได้บันทึกไว้มาวิเคราะห์ ดังภาพที่ 2-7




ภาพที่ 2-7 การนำเข้าไฟล์วิดีโอ

ขั้นตอนที่ 2 การปรับทิศทางการแสดงไฟล์ภาพวิดีโอ เลือกแถบเมนู Video , Fitter , New และ Rotate ตามลำดับ ดังภาพที่ 2-8

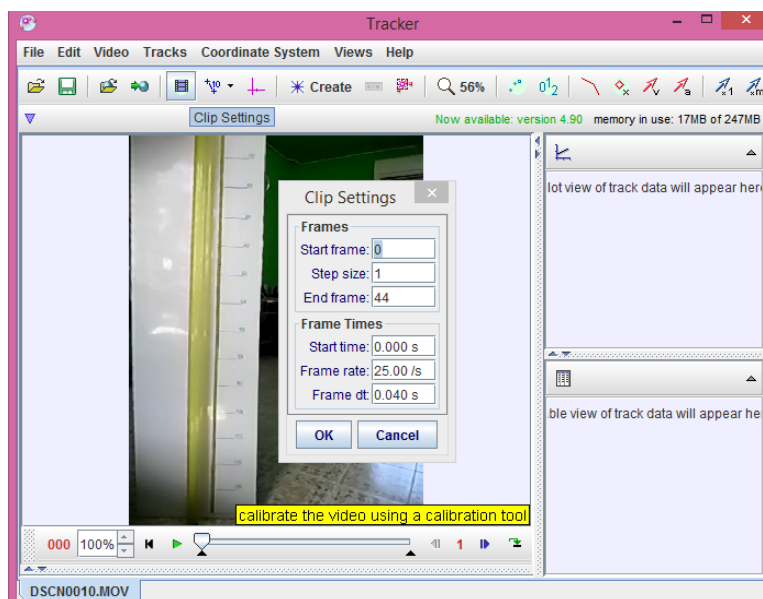


ภาพที่ 2-8 การปรับทิศทางการแสดงไฟล์ภาพวิดีโอ

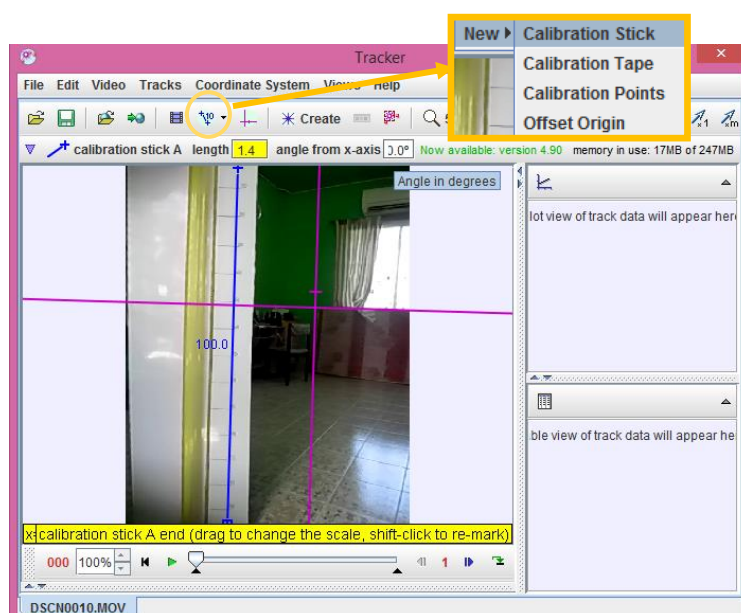
ขั้นตอนที่ 3 การตั้งค่าระยะของเฟรมภาพวิดีโอ หากต้องการทราบจำนวนเฟรมภาพทั้งหมดที่ถ่ายวิดีโอการทดลอง ให้กดปุ่มเล่นไฟล์ภาพวิดีโอ หากต้องการวิเคราะห์ผลทดลองเพียงบางส่วนของไฟล์ภาพวิดีโอก็สามารถตั้งค่าระยะของเฟรมที่ต้องการได้ ตั้งแต่เฟรมแรก (Start frame) ถึงเฟรมสุดท้าย (End frame) ของการทดลอง เลือกแถบเมนู Clip Settings และระบุตัวเลขของเฟรมภาพวิดีโอที่กล่องข้อความ ดังภาพที่ 2-9

ขั้นตอนที่ 4 การตั้งค่าตำแหน่งและความยาวของระยะแกน x และแกน y โดยเลือกแถบเมนู  Calibration Stick ซึ่งสามารถกำหนดความยาวในตำแหน่งที่ต้องการและสามารถระบุหน่วยของความยาวที่ใช้ในการทดลองในช่อง calibration stick length และปรับองศาของแกน x และแกน y ดังภาพที่ 2-10

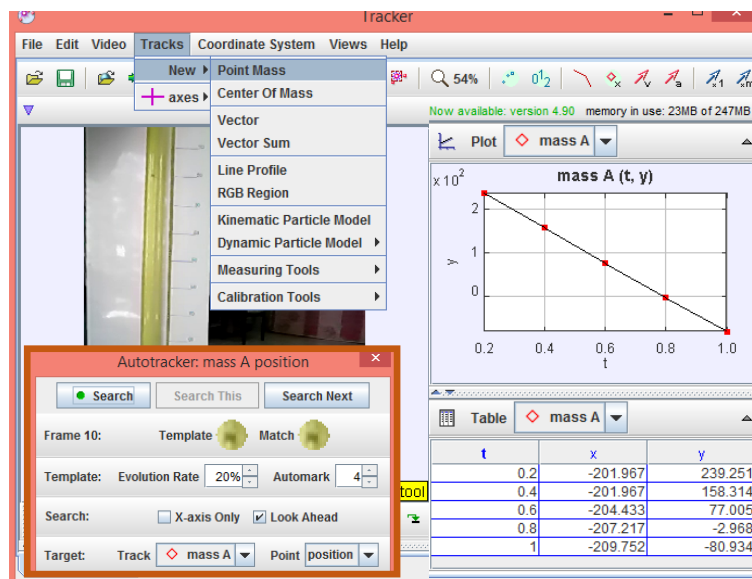
ขั้นตอนที่ 5 การกำหนดตำแหน่งจุดมวล ให้เลือกแถบเมนู Track และ Point mass ตามลำดับ หลังจากนั้นกดปุ่ม CTRL+ SHIFT ค้าง นำเมาส์ไปคลิกที่จุดมวล หากต้องการกำหนดจุดมวลเองที่ละจุดให้เลือกเมนู Search next แล้วทำเช่นนี้ไปทุกๆจุดมวลที่เคลื่อนที่ไปในการทดลอง แต่หากต้องการให้โปรแกรมกำหนดจุดมวล ให้เลือกเมนู Search ขณะกำหนดจุดมวลจะเห็นว่าจะข้อมูลและกราฟปรากฏขึ้นด้านขวา ดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-9 การตั้งค่าระยะของเฟรมภาพวิดีโอ

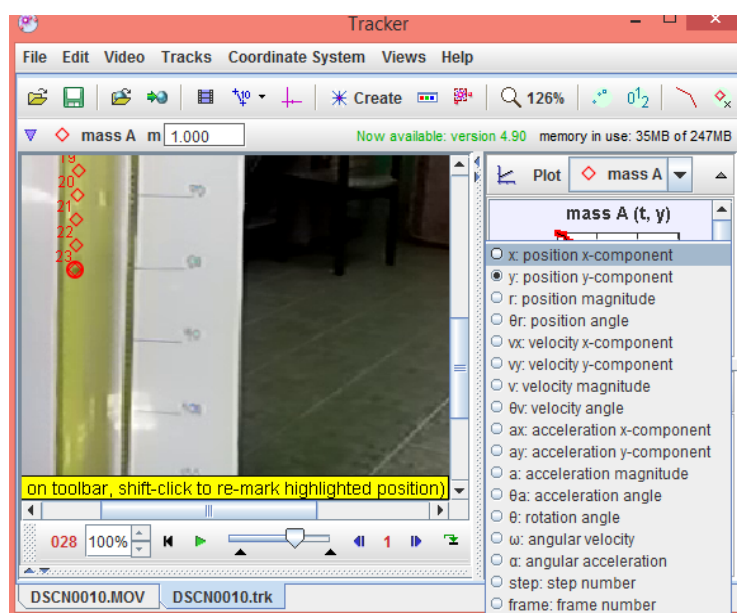


ภาพที่ 2-10 การตั้งค่าตำแหน่งและความยาว



ภาพที่ 2-11 การกำหนดตำแหน่งจุดมวล

ขั้นตอนที่ 6 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าข้อมูลจากการทดลองจะแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆ ในกราฟ และแสดงผลเป็นข้อมูลในตาราง หากต้องการเปลี่ยนปริมาณที่แสดงบนแกน x และ แกน y ทำได้โดยคลิกไปที่แกน x และแกน y จะปรากฏปริมาณต่าง ๆ ขึ้นมา เลือกปริมาณที่ต้องการนำมาวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณต่างๆ

กล้องถ่ายภาพวิดีโอ

กล้องความเร็วสูงในปัจจุบันอาศัยเทคโนโลยี 2 ชนิดคือ Charge-coupled devices (CCD) หรือ Complementary-metal-oxide-semiconductor(CMOS) โดยเทคโนโลยี CMOS มีราคาที่ถูกกว่า และทำงานได้สะดวกกว่า ดังนั้นผู้ผลิตกล้องถ่ายภาพวิดีโอความเร็วสูงในปัจจุบันจึงลงมาแข่งขันกัน ในเทคโนโลยี CMOS กันเป็นจำนวนมาก แต่เซนเซอร์แบบ CCD ก็มีข้อดีคือ สัญญาณรบกวน (noise) ต่ำ และ spatial resolution ที่สูงมาก (เช่น จำนวนพิกเซลมาก) แต่อย่างไรก็ตาม เซนเซอร์แบบ CCD ก็ยังมีกระบวนการในการอ่านข้อมูลช้ากว่าเซนเซอร์แบบ CMOS ดังนั้นทุกวันนี้กล้อง ในระดับกลางและสูงจึงใช้เซนเซอร์แบบ CMOS ส่วนกล้องที่อยู่ในระดับสูงมากจะใช้เซนเซอร์ CCD แบบที่ปรับปรุงแล้ว และบางรุ่นมีการใช้ร่วมกับกระจกหมุน (Rotating mirrors) เช่น กล้อง Shimadzu's HPV2 ซึ่งใช้ชิปเก็บข้อมูลแบบ IS-CCD ทำให้สามารถบันทึกภาพได้ที่อัตราเร็ว 1,000,000 ภาพ/วินาที ที่ความละเอียด 312 x 260 พิกเซล (หทัยชนก เพ็ชรมาตศรี, 2555)

เมื่อใช้ คุณภาพ ข้อกำหนดคุณลักษณะ และราคา มาเป็นเกณฑ์ ทำให้สามารถแบ่ง ประเภทของกล้องความเร็วสูงออกได้ 4 ระดับ คือ ระดับสูงมาก เช่น กล้อง Shimadzu HPV2 ระดับสูง เช่น Vision Research Phantom series ระดับกลาง เช่น NAC Hotshot และ ระดับต่ำ เช่น Casio Exilim F Series และ Nikon Coolpix s 6900 ดังภาพที่ 2-13



(ก) Shimadzu HPV2



(ข) NAC Hotshot



(ค) Nikon Coolpix s 6900

ภาพที่ 2-13 กล้องถ่ายภาพวิดีโอ (หทัยชนก เพ็ชรมาตศรี, 2555)

ในการใช้กล้องวิดีโอบันทึกการทดลอง รายละเอียดสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของ กล้องที่ควรทราบ มีดังนี้

1. อัตราเฟรม

อัตราเฟรม (Frame rate) คือ จำนวนภาพที่ถ่ายได้ในหนึ่งหน่วยเวลา และ integration time คือ เวลาที่ใช้ในการสร้างกระแส photocurrent ซึ่งกระแสไฟฟ้าชนิดนี้จะเป็นตัวสร้างสัญญาณ

ภาพ สำหรับในกล้องวิดีโอที่ราคาไม่แพง integration time คือ ส่วนกลับของ Frame rate ยกตัวอย่าง เช่น Frame rate 25 ภาพต่อวินาที ก็จะมี Integration time คือ $1/25 = 40$ มิลลิวินาที กล้องรุ่น Exilim F series สามารถปรับ integration time เพื่อปรับความสว่างของภาพ ส่วนกล้องที่ดีกว่า (แพงกว่า) สามารถปรับค่า Frame rate และ Integration time ได้ในช่วงที่กว้างและหลากหลายมากขึ้น เช่น กล้อง NAC Hotshot 512 บันทึกภาพที่ 4000 ภาพต่อวินาที จะสามารถปรับค่า integration time ได้ ตั้งแต่ $1/4000$ วินาที ไปจนถึง $1/200,000$ วินาที และเมื่อกำหนดให้ Frame rate เดียวกัน ภาพที่ถ่ายด้วย integration time ที่น้อยกว่า จะมีความคมชัดมากกว่า ในขณะที่ภาพที่ถ่ายด้วย integration time ที่สูงกว่า จะไม่คมชัดโดยการลด integration time ทำได้สองวิธี คือ การปรับเปลี่ยนความสว่างของไฟส่องสว่างหรือการใช้ Frame rate ที่สูงขึ้นขณะเปิดชัตเตอร์

2. โหมดภาพยนตร์

กล้องถ่ายวิดีโอดิจิทัลแต่ละรุ่นจะมีการตั้งค่าความละเอียดในการถ่ายวิดีโอที่ต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กล้อง Nikon Coolpix s 6900 ซึ่งมีฟังก์ชันการถ่ายภาพยนตร์ และความละเอียดของกล้อง ได้แก่ iFrame720/25P , 720/25P , 480/25P , HS480/4x , HS720/2x และ HS1080/0.5x แสดงดังภาพที่ 2-14 ในการศึกษาวิธีการหาความหนืดของของเหลวโดยการถ่ายวิดีโอการทดลอง ในฟังก์ชันโหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 3 ค่าความเร็วสูง (Hight Speed) มีดังนี้



ภาพที่ 2-14 ฟังก์ชันการถ่ายภาพยนตร์ของกล้อง Nikon Coolpix s 6900

HS480/4x หรือ 480/100P การถ่ายวิดีโอโหมดนี้จะแสดงความเร็วของการแสดงภาพวิดีโอเป็น 1 ใน 4 เท่าของความเร็วภาพวิดีโอเดิม แสดงจำนวนภาพ 100 ภาพต่อวินาที

HS720/2x หรือ 720/50P การถ่ายวิดีโอโหมดนี้จะแสดงความเร็วของการแสดงภาพวิดีโอเป็น 1 ใน 2 เท่าของความเร็วภาพวิดีโอเดิม แสดงจำนวนภาพ 50 ภาพต่อวินาที

HS1080/0.5x หรือ 1080/12.5P การถ่ายวิดีโอโหมคนี้จะแสดงความเร็วของการแสดงภาพวิดีโอเป็น 2 เท่าของความเร็วภาพวิดีโอเดิม แสดงจำนวนภาพ 100 ภาพต่อวินาที

3. ขนาดหน่วยความจำ เวลาในการบันทึก และ จำนวนพิกเซล

เมื่อไม่มีการบีบอัดไฟล์ภาพหรือวิดีโอ ขนาดของหน่วยความจำ (MEM, memory size) ในหน่วยไบต์ สามารถหาได้จากสมการ

$$MEM = N_{pix} \times col \times FR \times t_{Rec} \quad (14)$$

เมื่อ N_{pix} คือ จำนวนพิกเซลของตัวตรวจจับ มีหน่วยเป็น pix

col คือ colour depth มีหน่วยเป็น bpp

FR คือ Frame rate มีหน่วยเป็น fps

t_{Rec} คือ เวลาในการบันทึกภาพ มีหน่วยเป็น s

4. ความคลาดเคลื่อนในการถ่ายภาพ

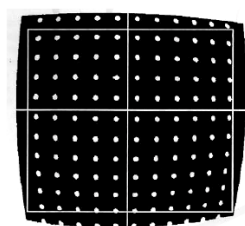
ในการวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอ จะเกิดความคลาดเคลื่อน เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น ความคลาดเคลื่อนในการกำหนดจุดตำแหน่งของภาพ การบิดเบี้ยวของเลนส์ (Lens distortion)

4.1 ความคลาดเคลื่อนในการกำหนดจุดตำแหน่งของภาพ

การกำหนดจุดตำแหน่งที่คลาดเคลื่อน โดยเฉพาะการกำหนดจุด ณ จุดเริ่มต้นก็จะทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนสะสม (Accumulate error) มากขึ้น ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ไม่ได้แก้ไขความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นแต่มีบางงานวิจัยที่ทำการแก้ไขความคลาดเคลื่อนของข้อมูล โดย Cross (2004) ได้ศึกษาฟิสิกส์ของการขวางวัตถุซึ่งในการวิจัยมีการลดความคลาดเคลื่อนของปริมาณต่างๆที่เกิดจากการขวางวัตถุ กล่าวคือ การวิเคราะห์วิดีโอของการขวางวัตถุเพื่อวัดแรงขณะใดขณะหนึ่งของการขวางวัตถุ การเขียนกราฟของระยะ x และ y ของการขวางวัตถุ เพื่อหาความเร็ว v_x และ v_y แล้วนำความเร็วที่ได้ไปหาความเร่ง a_x และ a_y ในระหว่างการวิเคราะห์ข้อมูลนั้น ควรมีความระมัดระวังในเรื่อง ความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัด (x, y) เพราะความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยที่เกิดขึ้น สามารถทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่สูงมากของพิกัด (a_x, a_y) ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งเพียงแค่ 2 หรือ 3 มิลลิเมตร ของ y สามารถทำให้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมากขึ้นหรือน้อยลงเป็น 2 เท่าของค่าที่ยอมรับได้ ความคลาดเคลื่อนในลักษณะนี้สามารถทำให้ลดลงได้ โดยการหาความเร็วและความเร่งแยกกัน

4.2 การบิดเบี้ยวของเลนส์ (Lens distortion)

การบิดเบี้ยวของเลนส์กึ่งวงจะเกิดเมื่อใช้กล้องที่มีราคาถูกหรือเมื่อใช้เลนส์วัตถุ ซึ่งมีระยะโฟกัสน้อย หรือ เป็นเลนส์มุมกว้าง กล้องวิดีโอโดยปกติจะเกิดการบิดเบี้ยวของเลนส์ในระดับที่ไม่สามารถถูกเพิกเฉยได้ ดังภาพที่ 2-14 การลดผลของการบิดเบี้ยวของเลนส์ทำได้โดยจัดเลนส์กึ่งวงให้อยู่ตรงกลางของภาพที่ต้องการถ่ายให้มากที่สุด



ภาพที่ 2-15 การบิดเบี้ยวแปลงให้จุดที่เคยเรียงตัวเป็นเส้นตรงกลายเป็นเส้นที่โค้งเล็กน้อย (หทัยชนก เพ็ชรมาตศรี, 2555)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มณัฐญภัทร ศิริวิวัฒน์พงศ์ (2557) ได้ศึกษาการออกแบบและสร้างชุดทดลองสำหรับหาค่าอัตราเร็วของโลหะกลมในของเหลว อุปกรณ์ประกอบด้วยท่อพลาสติกใสทรงกระบอก ติดสายวัดระยะตามแนวตั้งที่ตัวท่อที่บรรจุกลีเซอรินไว้ภายในท่อในการทดลองเป็นการหาค่าอัตราเร็วท้ายของโลหะกลมรัศมี 2.00 2.50 และ 3.00 mm โดยมีการวิเคราะห์ 1) ทุกระยะ 5 cm จะได้อัตราเร็วท้ายจากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากกฎของสโตกส์ พบว่า มีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 14.29, 0.00 และ 13.33 ตามลำดับ 2) ที่ระยะ 120-170 cm จะได้อัตราเร็วท้ายจากการทดลองโดยใช้กล้องดิจิทัลเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณด้วยกฎของสโตกส์ พบว่า มีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.00, 14.29 และ 6.67 ตามลำดับ 3) ที่ระยะ 120-170 cm จะได้อัตราเร็วท้ายจากการทดลองโดยใช้นาฬิกาจับเวลาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณด้วยกฎของสโตกส์ พบว่า มีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 0.00, 0.00 และ 6.67 ตามลำดับ สรุปได้ว่าอัตราเร็วท้ายของโลหะทรงกลมที่ได้จากการทดลองทั้งสองกรณี เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณตามกฎของสโตกส์มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 15

จักรกฤษณ์ แก้วสุทธิ (2555) ได้พัฒนาชุดทดลองเกี่ยวกับแรงต้านที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอ เพื่อศึกษาแรงต้านอากาศและแรงต้านในของเหลวโดยใช้เทคนิคภาพถ่ายวิดีโอความเร็วสูงและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Tracker และได้ทำการประเมินผลการเรียนรู้ก่อนและหลังเรียนของนักศึกษา โดยการใช้กลุ่มผู้เรียนจำนวน 2 กลุ่ม คือ กลุ่มทดลอง คือ นักศึกษา

ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ชั้นปีที่ 3 ที่ลงกระบวนวิชา 207314 ปีการศึกษา 2555 จำนวน 5 คน และ กลุ่มเปรียบเทียบ คือนักศึกษาภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ชั้นปีที่ 3 ที่ไม่ได้ลง กระบวนวิชา 207314 ปีการศึกษา 2555 จำนวน 5 คน โดยมีการพัฒนาแบบทดสอบเรื่องแรงด้านข้างขึ้นมา ซึ่งประกอบด้วยคำถามปรนัยเกี่ยวกับแรงด้านอากาศและแรงด้านของเหลว จำนวน 25 ข้อ นำผลการทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนมาวิเคราะห์หาค่า Normalized change และเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มผู้เรียนทั้งสองกลุ่มพบว่า Normalized change ของกลุ่มทดลองและกลุ่มเปรียบเทียบมีค่าเท่ากับ 0.41 และ 0.25 ตามลำดับ ผลดังกล่าวมีนัยสำคัญที่แสดงให้เห็นว่า กลุ่มทดลองมีความเข้าใจในเนื้อหาเรื่องแรงด้านข้างได้ดีกว่ากลุ่มเปรียบเทียบและนอกจากกลุ่มเปรียบเทียบมีความพึงพอใจในระดับมากต่อการเรียนรู้ชุดทดลอง

อรุณรัศมี จันทพรหม (2552) ได้ศึกษาผลของรัศมีของลูกปืนกลมต่ออัตราเร็วที่ตกผ่านกลีเซอรินตามกฎของสโตกส์ โดยใช้ท่อสายยางใส่ติดตั้งบนแท่นที่มีสายวัดระยะทาง ทดลองปล่อยลูกปืนกลมตกผ่านกลีเซอรินในแนวตั้ง โดยใช้ลูกปืน 3 ขนาดมีรัศมี 2.00 2.50 และ 3.00 mm ตามลำดับขณะทดลองบันทึกภาพดิจิทัลเป็นแฟ้มภาพเคลื่อนไหว จากนั้นใช้โปรแกรมฉายภาพเคลื่อนไหวมาทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของลูกปืนกลมอ่านค่าระยะทางที่สัมพันธ์กับเวลาที่เคลื่อนที่ จากนั้นวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของอัตราเร็วในแต่ละช่วงการเคลื่อนที่ จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาค่าอัตราเร็วท้ายของการเคลื่อนที่ของลูกปืนกลม โดยวิเคราะห์จาก 1) อัตราเร็วท้ายที่ระยะ 100 cm จากปากท่อบน 2) อัตราเร็วท้ายวัดจากอัตราเร็วเฉลี่ยที่ระยะ 50 cm สุดท้าย พบว่า อัตราเร็วสุดท้ายที่วัดจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราเร็วท้ายของลูกปืนกลมที่คำนวณจากกฎสโตกส์

สมจิตร มาสูงเหลือ้ม (2549) ได้ศึกษาการหาความหนืดของของเหลว โดยใช้วิธีตามกฎของสโตกส์และกฎของปัวเซย์ ซึ่งได้มีการสาธิตการทดลองในชั้นเรียนเพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด พบว่าการทดลองตามกฎของสโตกส์และกฎของปัวเซย์จะเหมาะสมสำหรับของเหลวแต่ละชนิดแตกต่างกัน น้ำเปล่าเหมาะสมกับวิธีการตามกฎของปัวเซย์ น้ำมันเครื่องเหมาะสมกับวิธีการตามกฎของสโตกส์

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาความหนืดของของเหลว พบว่า การทดลองหาความหนืดของเหลวโดยอาศัยการตกของโลหะทรงกลมด้วยวิธีการจับเวลานั้น มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ซึ่งการหาความหนืดของของเหลวมีหลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของของเหลว ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเทคนิคการถ่ายภาพวิดีโอ โหมมภาพยนตร์ความเร็วสูงและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Tracker มาหาความหนืดของของเหลว เพื่อเปรียบเทียบความหนืดของของเหลว โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา กับความหนืดมาตรฐานของของเหลว

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบวิธีการหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา โดยมีการดำเนินงานแบ่งเป็น 3 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 การหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล

ตอนที่ 2 การหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการจับเวลา

ตอนที่ 3 การเปรียบเทียบความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา กับความหนืดมาตรฐานของของเหลว

การหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา จะใช้ของเหลว ได้แก่ กลีเซอริน น้ำมันปาล์ม และน้ำมันหมู โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้กลีเซอริน เป็นของเหลวในการออกแบบและสร้างชุดทดลองหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล เนื่องจากกลีเซอรินเป็นของเหลวมาตรฐานที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ

ตอนที่ 1 การหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล

การหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล จะออกแบบและสร้างชุดทดลอง โดยใช้ของเหลว คือ กลีเซอริน ดังภาพที่ 3-1 ในการหาความหนืดของของเหลว โดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ที่ต่างกัน 3 ค่าความเร็วสูง (Hight Speed) ได้แก่ 480 HS , 720 HS และ 1080 HS

1.1 การออกแบบและสร้างชุดทดลอง

การออกแบบและสร้างชุดทดลอง แสดงดังภาพที่ 3-2 (ก) จะใช้ท่ออะคริลิกทรงกระบอก ขนาดรัศมี 4 cm ยาว 140 cm แล้วปิดปลายท่อด้านล่างด้วยแผ่นพลาสติกอะคริลิก ติดตั้งแผ่นไม้สีขาวไว้ด้านหลังของ ท่ออะคริลิก แล้วติดสายวัดระยะทางความยาว 140 cm ไว้บนแผ่นไม้ด้านข้างของท่ออะคริลิก โดยจะติดตั้งกล้องดิจิทัล Nikon Coolpix s 6900 ดังภาพที่ 3-2 (ข) ที่มีฟังก์ชันการถ่ายภาพวิดีโอในโหมดภาพยนตร์ที่ต่างกัน 3 ค่าความเร็วสูง (Hight Speed) ได้แก่ 480 HS , 720 HS และ 1080 HS ใช้สำหรับการถ่ายภาพวิดีโอการทดลอง ซึ่งจะต้องวางในตำแหน่งที่เหมาะสมสามารถมองเห็นภาพวิดีโอการทดลองหาความหนืดโดยอาศัยการตกของโลหะทรงกลม รัศมี 4 mm ดังภาพที่ 3-3 ได้ชัดเจนเต็มจอภาพ



ภาพที่ 3-1 กลีเซอรินที่ใช้ในการทดลองหาความหนืด



(ก) การติดตั้งชุดการทดลอง (ข) กล้องดิจิทัล Nikon Coolpix s 6900

ภาพที่ 3-2 ชุดทดลองหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล

1.2 การหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล

สำหรับการทดลองหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล การทดลองนี้ ของเหลวที่ใช้ คือ กลีเซอริน ซึ่งจะทำการศึกษาทดลองที่อุณหภูมิ 25 °C โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอโฮมคภาพยนตร์ความเร็วสูง 3 ค่า ได้แก่ 480 HS, 720 HS และ 1080 HS เพื่อวิเคราะห์หาความเร็วของโฮมคภาพยนตร์ที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ความหนืดของกลีเซอรินใกล้เคียงความหนืดมาตรฐานมากที่สุด แล้วนำความเร็วของโฮมคภาพยนตร์ที่มีความเหมาะสมที่สุดมาหาความหนืดของของเหลวอีก 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู ดังภาพที่ 3-4 โดยในการทดลองนี้จะใช้โปรแกรมจำลองปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เรียกว่า โปรแกรมสำเร็จรูป Tracker มาวิเคราะห์หาอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลม และนำมาคำนวณหาความหนืดของเหลวตามกฎของสโตกส์ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

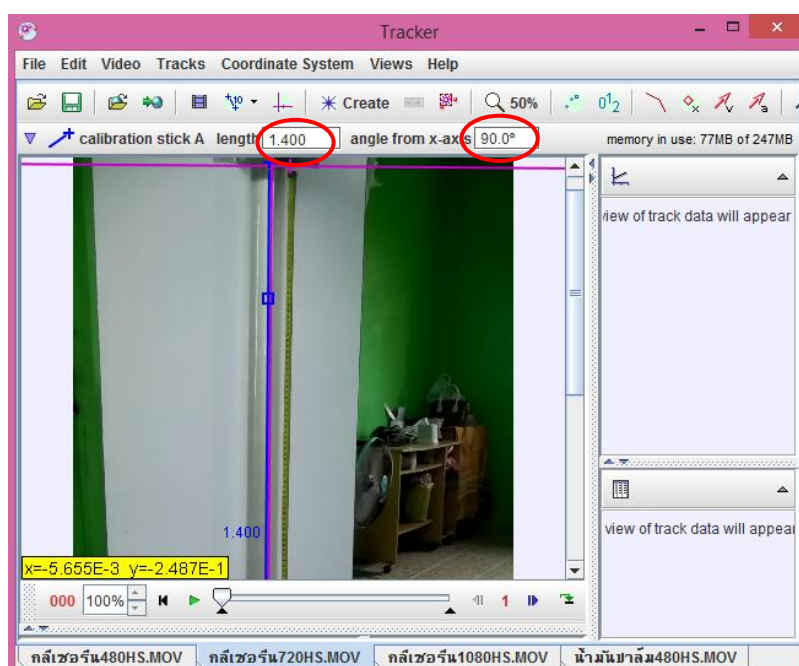


ภาพที่ 3-3 โลหะทรงกลม

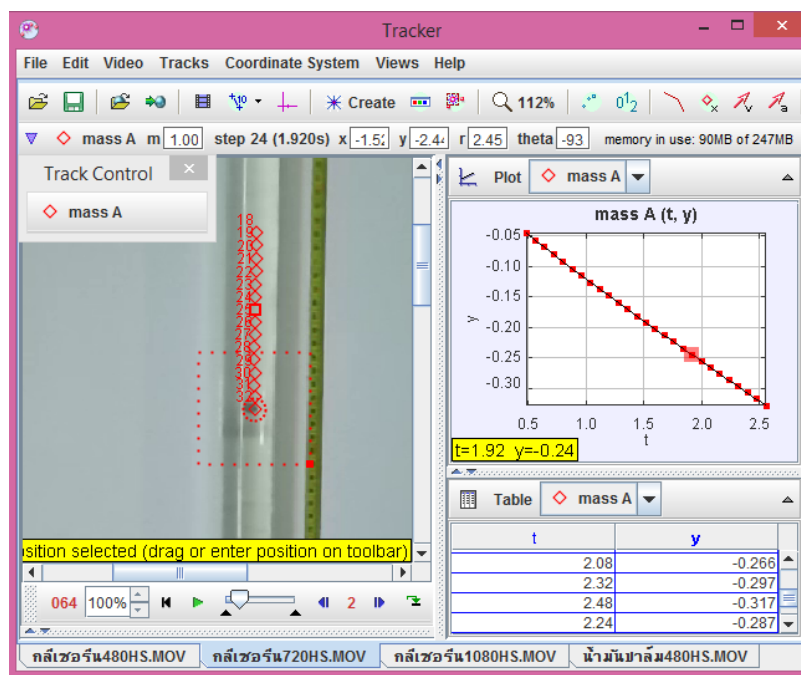


ภาพที่ 3-4 น้ำมันปาล์มและน้ำมันหมูที่ใช้ในการทดลองหาความหนืด

1. เติมของเหลว คือ กลีเซอริน ลงในท่อสำหรับทำการทดลอง และวัดอุณหภูมิ
2. ใช้ปากคีบปลายแหลม คีบโลหะทรงกลม รัศมี 4 mm ปล่อยลงในท่อให้เคลื่อนที่ลงในแนวตั้ง โดยตำแหน่งที่ปล่อยอยู่ที่จุดศูนย์กลางของท่อทรงกระบอก ใช้กล้องถ่ายภาพวิดีโอ โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS บันทึกภาพวิดีโอการเคลื่อนที่ของลูกโลหะทรงกลมตั้งแต่เริ่มปล่อยจนกระทั่งตกลงที่ปลายท่อ โดยติดตั้งกล้องในตำแหน่งที่เหมาะสมสามารถมองเห็นภาพวิดีโอการทดลองได้ชัดเจน ท่ออะคริลิกอยู่ในแนวตั้งฉากและเต็มจอภาพ
3. นำไฟล์ภาพวิดีโอมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker ตามขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมในบทที่ 2 ภาพที่ 2-7 ถึง ภาพที่ 2-9 สำหรับการตั้งค่าความยาวในแนวตั้งในช่วง calibration stick A length เป็นระยะ 1.4 m และตั้งแกนทำมุม 90 องศาในช่อง angle from x-axis ดังภาพที่ 3-5 โดยการวิเคราะห์หาตำแหน่งของโลหะทรงกลมขณะเคลื่อนที่ในของเหลว จะใช้เมนู Track control ในการกำหนดตำแหน่งจุดมวล (mass A) ของโลหะทรงกลม ซึ่งจะวิเคราะห์ซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้ง ทำให้ทราบระยะทางในแนวตั้ง (y) ที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ ณ เวลา (t) ปรากฏขึ้นในโปรแกรมดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-5 การตั้งค่าความยาวแกนแนวตั้งในโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker



ภาพที่ 3-6 การกำหนดตำแหน่งจุดมวลของโลหะทรงกลมด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker

4. นำระยะทางในแนวดิ่ง (y) ที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ ณ เวลา (t) ในโปรแกรมมาหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา และคำนวณหาอัตราเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ 10 cm โดยพิจารณาช่วงการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่มีอัตราเร็วเฉลี่ยคงที่ นำมาเป็นอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลม

5. นำอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลมที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker มาคำนวณหาความหนืดของของเหลวตามกฎของสโตกส์ จากสมการที่ 13

6. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 2-5 โดยเปลี่ยนความเร็วของโหมคภาพยนตร์เป็น 720 HS และ 1080 HS ตามลำดับ

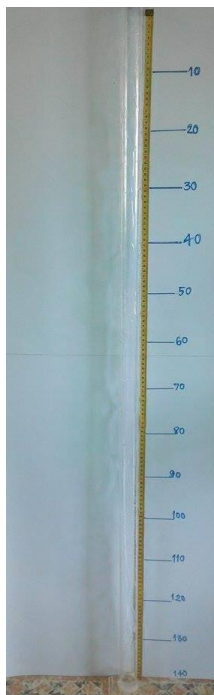
7. วิเคราะห์หาความเร็วของโหมคภาพยนตร์ที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ความหนืดของกลีเซอรินใกล้เคียงความหนืดมาตรฐานมากที่สุด

8. นำความเร็วของโหมคภาพยนตร์ที่มีความเหมาะสมที่สุดมาหาความหนืดของของเหลวอีก 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 1-5 โดยเปลี่ยนของเหลวเป็นน้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู ตามลำดับ

ตอนที่ 2 การหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการจับเวลา

สำหรับการหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการจับเวลา จะใช้ท่ออะคริลิกทรงกระบอกขนาดรัศมี 4 cm ยาว 140 cm แล้วปิดปลายท่อด้านล่างด้วยแผ่นพลาสติกอะคริลิก ติดตั้งแผ่นไม้สีขาวไว้ด้านหลังของท่ออะคริลิก แล้วติดสายวัดระยะทางความยาว 140 cm ไว้บนแผ่นไม้ด้านหลังของท่ออะคริลิก ดังภาพที่ 3-7 (ก) ซึ่งเป็นชุดทดลองเช่นเดียวกับกับวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล แต่ไม่ใช้กล้องถ่ายภาพวิดีโอ แต่จะใช้นาฬิกาจับเวลาในการทดลอง ดังภาพที่ 3-7 (ข) การทดลองนี้จะใช้ของเหลว 3 ชนิด ได้แก่ กลีเซอริน น้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู ซึ่งในการทดลองนี้จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา เพื่อวิเคราะห์หาอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลม และนำมาคำนวณหาความหนืดของของเหลวตามกฎของสโตกส์ โดยมีการทดลองการหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการจับเวลา ดังนี้

1. เต็มของเหลว คือ กลีเซอริน ลงในท่อสำหรับทำการทดลอง และวัดอุณหภูมิ
2. ใช้ปากคีบปลายแหลม คีบโลหะทรงกลม ปล่อยลงในท่อให้เคลื่อนที่ลงในแนวตั้ง โดยตำแหน่งที่ปล่อยอยู่ที่จุดศูนย์กลางของท่อทรงกระบอก
3. ใช้นาฬิกาจับเวลาการเคลื่อนที่ของลูกโลหะทรงกลมเมื่อเคลื่อนที่มายังตำแหน่ง 10, 20, 30, 40, ..., 140 cm บันทึกเวลาที่ได้ตามระยะต่าง ๆ โดยทำการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 10 ครั้ง
4. นำเวลาที่บันทึกได้จากการทดลอง มาหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางเทียบกับเวลา และคำนวณหาอัตราเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่งทุก ๆ 10 เซนติเมตร โดยพิจารณาช่วงการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่มีอัตราเร็วเฉลี่ยคงที่ นำมาเป็นอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลม
5. นำอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลมมาคำนวณหาความหนืดตามกฎของสโตกส์ จากสมการที่ 13
6. ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 1-5 โดยเปลี่ยนของเหลวที่ใช้ทดลองเป็นน้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู ตามลำดับ



(ก) การติดตั้งชุดการทดลอง



(ข) นาฬิกาจับเวลา

ภาพที่ 3-7 ชุดทดลองหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการจับเวลา

ตอนที่ 3 การเปรียบเทียบความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล และวิธีการจับเวลา กับความหนืดมาตรฐานของของเหลว

สำหรับความหนืดมาตรฐานของกลีเซอริน ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นค่าที่อ้างอิงมาจากหนังสือ Viscosity Correlations for Flowmeter Calculations มีค่าเท่ากับ 0.954 Ns/m^2 แสดงดังภาคผนวก ค ตารางที่ ค-1 ส่วนความหนืดมาตรฐานของน้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู เป็นค่าที่ได้จากการส่งตัวอย่างของเหลวปริมาณ 200 cm^3 ไปทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพ หาความหนืดที่อุณหภูมิห้อง 25°C โดยใช้เครื่องมือวัดความหนืด HAAKE VT500 ที่สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สวท.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยความหนืดมาตรฐานของน้ำมันปาล์ม มีค่าเท่ากับ 0.054 Ns/m^2 และความหนืดมาตรฐานของน้ำมันหมู มีค่าเท่ากับ 0.933 Ns/m^2 แสดงดังภาคผนวก ค

ในการเปรียบเทียบความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา กับความหนืดมาตรฐานของของเหลว แสดงเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน (E) หาได้จาก

$$E = \frac{|\eta_1 - \eta_2|}{\eta_2} \times 100$$

- เมื่อ Error คือ ความคลาดเคลื่อน มีหน่วยเป็น %
 η_1 คือ ความหนืดจากการทดลอง (Ns/m^2)
 η_2 คือ ความหนืดมาตรฐาน (Ns/m^2)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

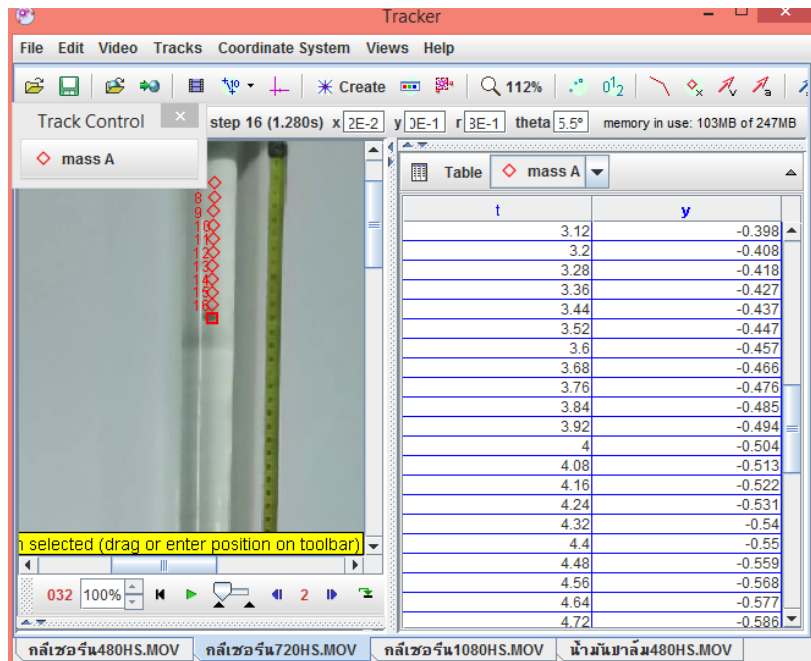
ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา ของเหลวที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ กลีเซอริน น้ำมันปาล์ม และน้ำมันหมู โดยใช้กลีเซอรินเป็นของเหลวในการออกแบบและสร้างชุดทดลองหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล มีผลการดำเนินงานแบ่งเป็น 3 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 การหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล

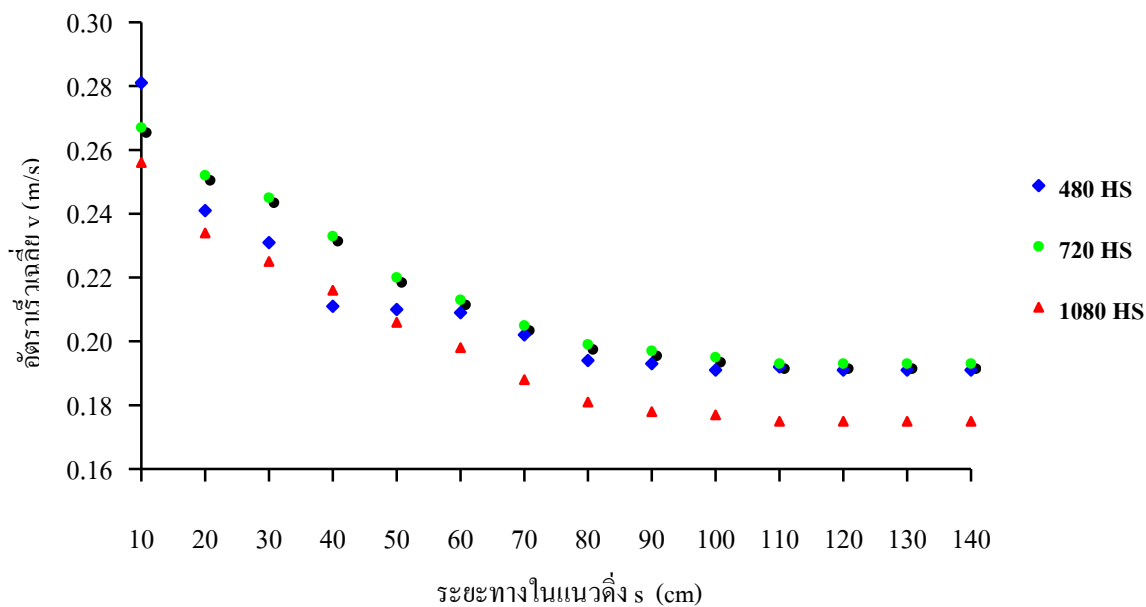
1.1 การหาความหนืดของกลีเซอรินโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล

ในการหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลโหมคภาพยนตร์ความเร็วสูง 3 ค่า High Speed ได้แก่ 480 HS , 720 HS และ 1080 HS ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker จำนวน 3 ครั้ง ทำให้ทราบระยะทางในแนวดิ่ง (y) ที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ ณ เวลา (t) ปรากฏขึ้นใน โปรแกรมดังภาพที่ 4-1 ซึ่งแสดงรายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker ดังภาคผนวก ก ตารางที่ ก-1 ตารางที่ ก-2 และตารางที่ ก-3 นำมาคำนวณหาอัตราเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่งทุกๆ 10 cm แสดงดังภาพที่ 4-2 และข้อมูลของอัตราเร็วเฉลี่ยแต่ละตำแหน่ง แสดงดังภาคผนวก ก ตารางที่ ก-4 พิจารณาช่วงการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่มีอัตราเร็วเฉลี่ยคงที่ นำมาเป็นอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลม และคำนวณหาความหนืดของของเหลวตามกฎของสโตกส์ จากสมการที่ 13

จากภาพที่ 4-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในกลีเซอรินกับระยะทางในแนวดิ่ง พบว่า การหาความหนืดของกลีเซอรินโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลโหมคภาพยนตร์ความเร็ว 480 HS , 720 HS และ 1080 HS โลหะทรงกลมจะเริ่มมีอัตราเร็วเฉลี่ยคงที่ระยะ 110 cm จนถึงระยะ 140 cm ซึ่งอัตราเร็วเฉลี่ยที่คงที่จะเป็นอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลม มีค่าเท่ากับ 0.191 , 0.193 และ 0.175 m/s ตามลำดับ โดยนำมาคำนวณหาความหนืดของกลีเซอรินตามกฎของสโตกส์จากสมการที่ 13 และเปรียบเทียบกับความหนืดมาตรฐานของกลีเซอริน ที่มีค่า 0.954 Ns/m^2 แสดงดังตารางที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 ข้อมูลระยะทางในแนวดิ่ง (y) ที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ในกลีเซอริน ณ เวลา (t) จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker



ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในกลีเซอรินกับระยะทางในแนวดิ่ง โดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล

ตารางที่ 4-1 ความหนืดของกลีเซอริน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล และร้อยละความคลาดเคลื่อน เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดมาตรฐานของกลีเซอริน ที่อุณหภูมิ 25 °C

วิธีการวิเคราะห์	ความหนืดของกลีเซอริน (Ns/m ²)	ความคลาดเคลื่อน (%)
โหมคภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS	0.944	1.06
โหมคภาพยนตร์ความเร็วสูง 720 HS	0.938	1.64
โหมคภาพยนตร์ความเร็วสูง 1080 HS	1.035	8.48

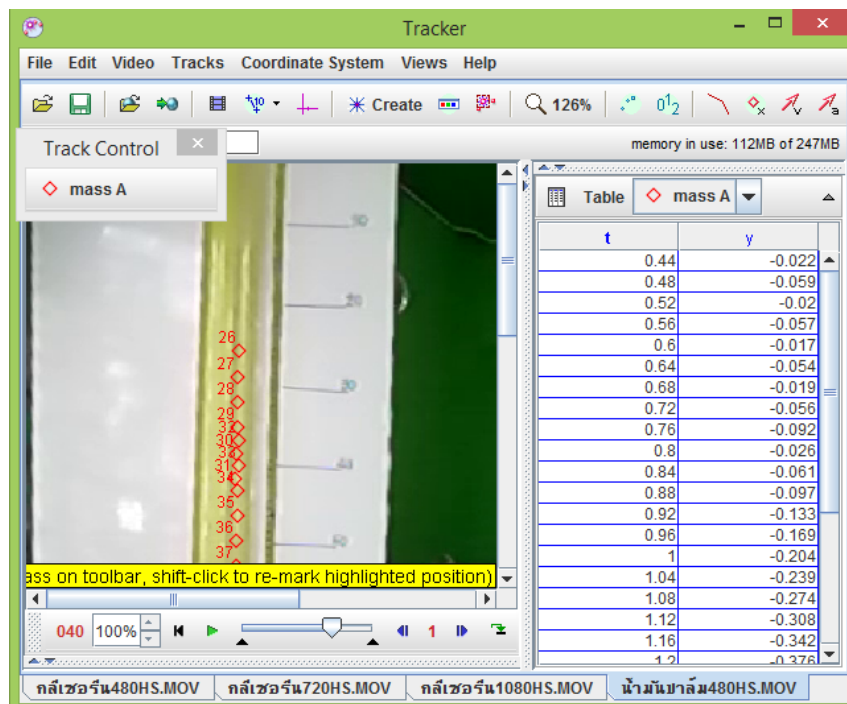
การวิเคราะห์หาความเร็วของโหมคภาพยนตร์ที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้ความหนืดของกลีเซอรินใกล้เคียงความหนืดมาตรฐานมากที่สุด โดยจะเปรียบเทียบความหนืดของกลีเซอรินที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมคภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS 720 HS และ 1080 HS ที่มีค่า 0.944 , 0.938 และ 1.035 Ns/m² ตามลำดับ กับความหนืดมาตรฐานของกลีเซอริน ที่อุณหภูมิ 25 °C ที่มีค่าเท่ากับ 0.954 Ns/m² มีร้อยละความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 1.06, 1.64 และ 8.48 ตามลำดับ พบว่า โหมคภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS ทำให้ความหนืดของกลีเซอรินใกล้เคียงความหนืดมาตรฐานมากที่สุด

เนื่องจากการใช้ความเร็วของโหมคภาพยนตร์ที่มีค่าต่างกันในการทดลอง จะทำให้จำนวนภาพถ่ายวิดีโอต่อหนึ่งหน่วยเวลาและความเร็วของวิดีโอที่แสดงต่างกัน ซึ่งโหมคภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS จะแสดงจำนวนภาพการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลม 100 ภาพต่อวินาที (Frame rate) และความเร็วของวิดีโอช้ากว่าโหมคภาพยนตร์ความเร็วสูง 720 HS และ 1080 HS เมื่อวิเคราะห์หาระยะทางในแนวดิ่ง (y) ที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ ณ เวลา (t) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker จะได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น และเมื่อคำนวณหาอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมได้ค่าที่ละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้การคำนวณหาความหนืดของของเหลวตามกฎของสโตกส์ได้ค่าใกล้เคียงกับความหนืดมาตรฐาน

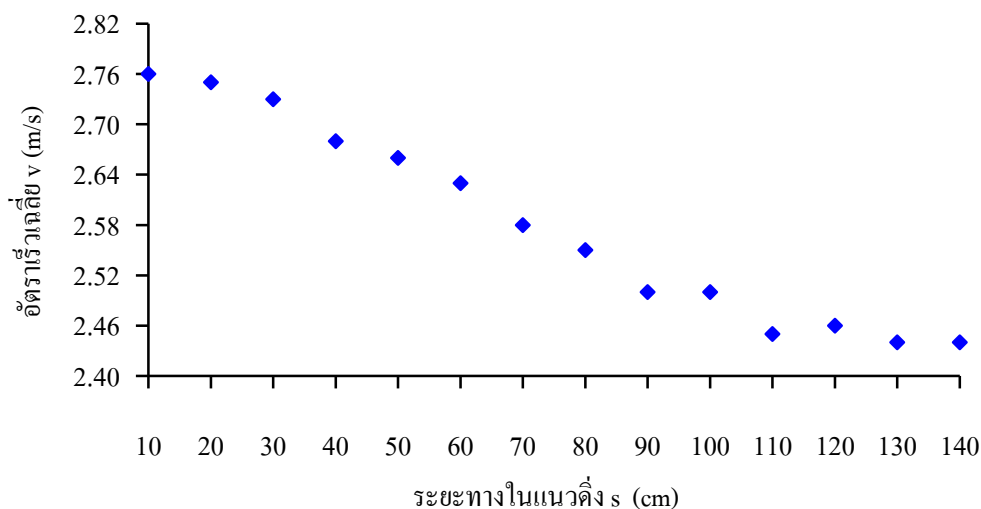
ดังนั้นทำให้ได้ความเร็วของโหมคภาพยนตร์ที่จะนำมาวิเคราะห์หาความหนืดของเหลวอีก 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู

1.2 หาความหนืดของน้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู่วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล

ในการหาความหนืดของน้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู่วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker จำนวน 3 ครั้ง ทำให้ทราบระยะทางในแนวดิ่ง (y) ที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ ณ เวลา (t) ปรากฏขึ้นในโปรแกรมดังภาพที่ 4-3 ซึ่งแสดงรายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker ดังภาคผนวก ก ตารางที่ ก-5 นำมาคำนวณหาอัตราเร็วเฉลี่ยที่ตำแหน่งทุกๆ 10 cm แสดงดังภาพที่ 4-4 และข้อมูลของอัตราเร็วเฉลี่ยแต่ละตำแหน่ง แสดงดังภาคผนวก ก ตารางที่ ก-6 และพิจารณาช่วงการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่มีอัตราเร็วเฉลี่ยคงที่ นำมาเป็นอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลม และนำมาคำนวณหาความหนืดของของเหลวตามกฎของสโตกส์ จากสมการที่ 13



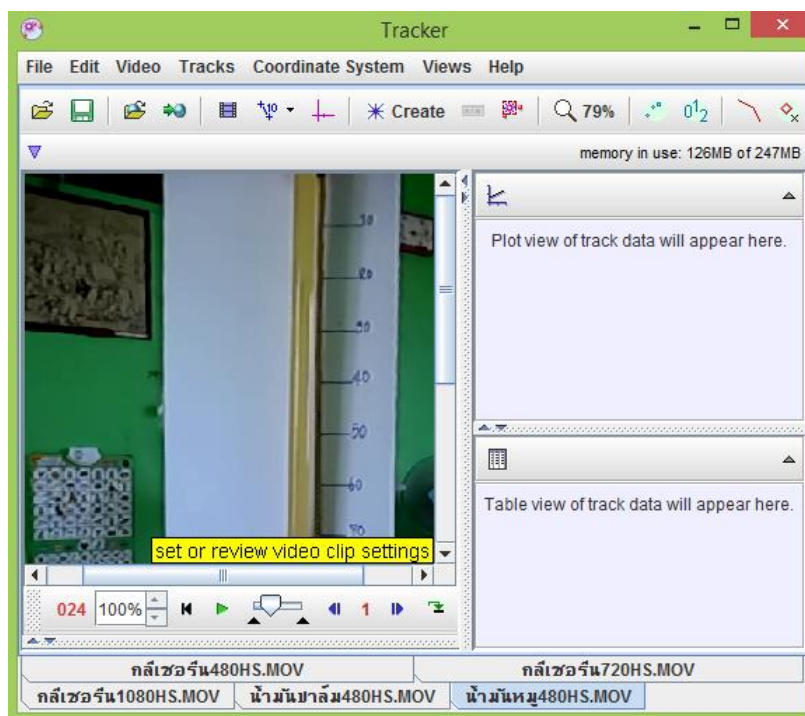
ภาพที่ 4-3 ข้อมูลระยะทางในแนวดิ่ง (y) ที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ในน้ำมันพืช ณ เวลา (t) จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker



ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในน้ำมันปาล์มกับ ระยะทางในแนวดิ่ง โดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล

จากภาพที่ 4-4 จะเห็นได้ว่า ช่วงที่อัตราเร็วเฉลี่ยคงที่เป็นช่วงที่สั้นมาก ซึ่งอาจเป็นอัตราเร็วปลายที่มีค่าคลาดเคลื่อนได้ หากพิจารณาแล้ว พบว่า โลหะทรงกลมเริ่มมีอัตราเร็วเฉลี่ยคงที่ ระยะ 130 cm ถึงระยะ 140 cm ซึ่งอัตราเร็วเฉลี่ยที่คงที่จะเป็นอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลม มีค่าเท่ากับ 0.244 m/s และนำมาคำนวณหาความหนืดตามกฎของสโตกส์ จะได้ความหนืดของน้ำมันปาล์ม เท่ากับ 0.077 Ns/m^2

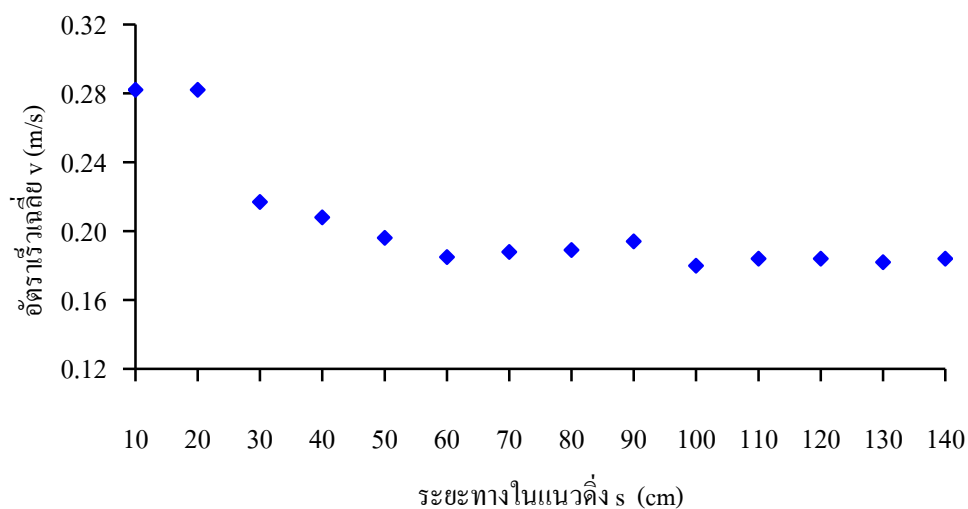
สำหรับผลการทดลองหาความหนืดของน้ำมันหมู โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอ ดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker ไม่สามารถวิเคราะห์ ผลการทดลองได้ เนื่องจากภาพวิดีโอดิจิทัลของการทดลองมองเห็นโลหะทรงกลมขณะเคลื่อนที่ใน น้ำมันหมู ไม่ชัดเจน เป็นเพราะน้ำมันหมูมีลักษณะเป็นของเหลวที่มีสีขาวขุ่น ทึบแสง แสดงดัง ภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4-5 การวิเคราะห์ระยะทางในแนวตั้งของโลหะทรงกลมในน้ำมันหมู่มิปรากฏผล

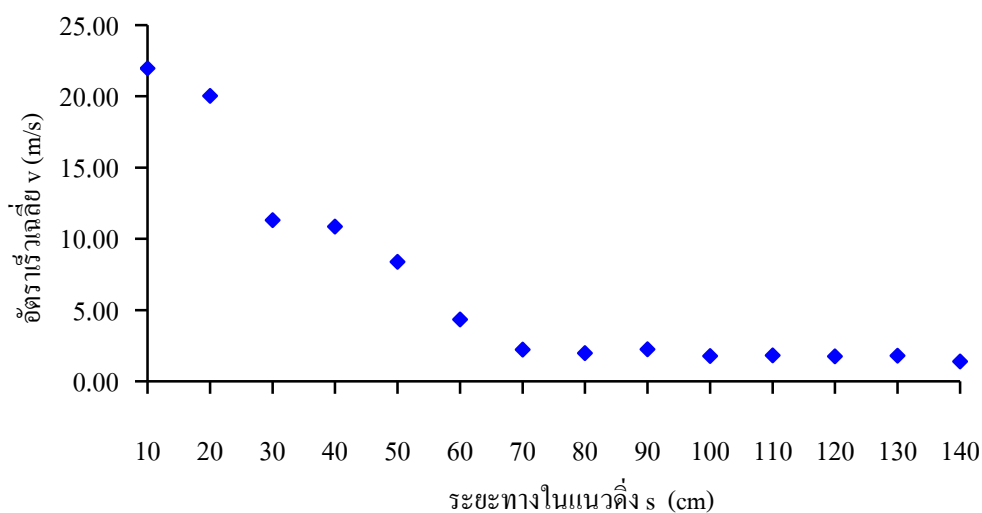
ตอนที่ 2 การหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการจับเวลา

ผลการทดลองหาความหนืดของของกลีเซอริน น้ำมันปาล์ม และน้ำมันหมู โดยใช้วิธีการจับเวลา ซึ่งทดลองจำนวน 10 ครั้ง จะนำเวลาที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ทุกๆระยะ 10 เซนติเมตร มาหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา เพื่อคำนวณอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในกลีเซอริน แสดงดังภาคผนวก ข และวิเคราะห์หาอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลมนำมาคำนวณหาความหนืดของของเหลวตามกฎของสโตกส์จากสมการที่ 13 ผลการทดลองในภาคผนวก ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางในแนวตั้งกับอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในกลีเซอริน น้ำมันปาล์ม และน้ำมันหมู แสดงดังภาพที่ 4-6 ภาพที่ 4-7 และ ภาพที่ 4-8 ตามลำดับ



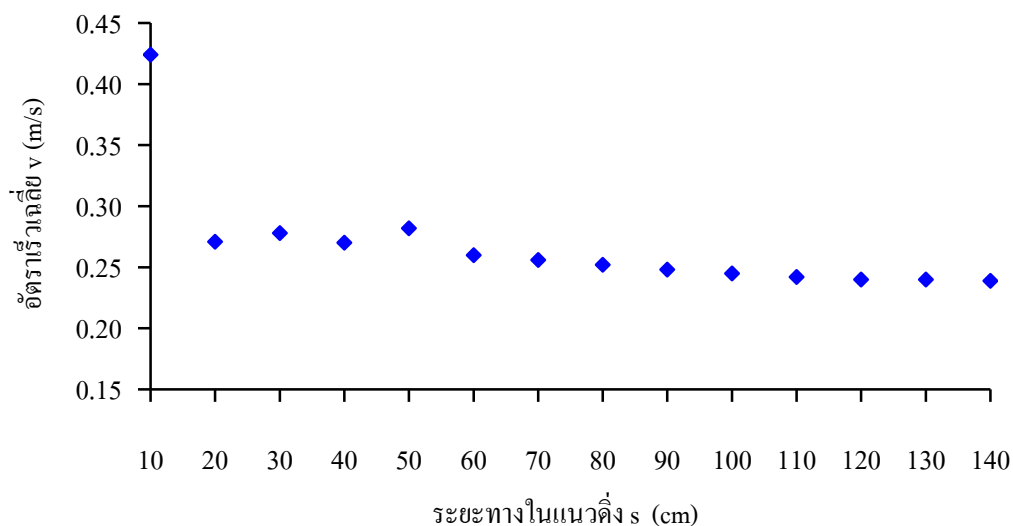
ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในกลีเซอรินกับ ระยะทางในแนวดิ่ง โดยวิธีการจับเวลา

จากภาพที่ 4-6 เมื่อพิจารณาอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในกลีเซอรินตาม ระยะในแนวดิ่ง โดยวิธีการจับเวลา พบว่า โลหะทรงกลมเริ่มมีอัตราเร็วเฉลี่ยคงที่ระยะ 110 cm ถึง ระยะ 140 cm ซึ่งอัตราเร็วเฉลี่ยที่คงที่จะเป็นอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลม มีค่าเท่ากับ 0.1835 m/s



ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในน้ำมันปาล์มกับ ระยะทางในแนวดิ่ง โดยวิธีการจับเวลา

จากภาพที่ 4-7 เมื่อพิจารณาอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในน้ำมันปาล์มตามระยะในแนวดิ่ง โดยวิธีการจับเวลา พบว่า โลหะทรงกลมเริ่มมีอัตราเร็วเฉลี่ยคงที่ระยะ 100 cm ถึงระยะ 130 cm ซึ่งอัตราเร็วเฉลี่ยที่คงที่จะเป็นอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลม มีค่าเท่ากับ 1.785 m/s



ภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในน้ำมันหมุกกับระยะทางในแนวดิ่ง โดยวิธีการจับเวลา

จากภาพที่ 4-8 เมื่อพิจารณาอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในน้ำมันหมุกตามระยะในแนวดิ่ง โดยวิธีการจับเวลา พบว่า โลหะทรงกลมเริ่มมีอัตราเร็วเฉลี่ยคงที่ระยะ 120 cm ถึงระยะ 140 cm ซึ่งอัตราเร็วเฉลี่ยที่คงที่จะเป็นอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลม มีค่าเท่ากับ 0.240 m/s

เมื่อพิจารณาอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในของเหลวจากภาพที่ 4-6 ภาพที่ 4-7 และภาพที่ 4-8 แล้วนำมาคำนวณหาความหนืดตามกฎของสโตกส์ ด้วยสมการที่ 13 จะได้ความหนืดของกลีเซอริน น้ำมันปาล์ม และน้ำมันหมุก โดยวิธีการจับเวลา เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดมาตรฐานของของเหลว แสดงดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ความหนืดของของเหลว โดยใช้วิธีการจับเวลา และร้อยละความคลาดเคลื่อน
เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดมาตรฐานของของเหลว ที่อุณหภูมิ 25 °C

ของเหลว	ความหนืด มาตรฐาน(Ns/m ²)	ความหนืดของ ของเหลว (Ns/m ²)	ความคลาดเคลื่อน (%)
กลีเซอริน	0.954	0.991	3.85
น้ำมันปาล์ม	0.054	0.106	96.30
น้ำมันหมู	0.933	0.789	15.43

ตอนที่ 3 การเปรียบเทียบความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล และวิธีการจับเวลา กับความหนืดมาตรฐานของของเหลว

สำหรับความหนืดมาตรฐานของกลีเซอริน ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นค่าที่อ้างอิงมาจากหนังสือ Viscosity Correlations for Flowmeter Calculations มีค่าเท่ากับ 0.954 Ns/m² ความหนืดมาตรฐานของน้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู เป็นค่าที่ได้จากการส่งตัวอย่างของเหลวปริมาณ 200 cm³ ไปทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพหาความหนืดที่อุณหภูมิ 25 °C โดยใช้เครื่องมือวัดความหนืด HAAKE VT500 ที่สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สวท.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยความหนืดมาตรฐานของน้ำมันปาล์ม มีค่าเท่ากับ 0.054 Ns/m² และความหนืดมาตรฐานของน้ำมันหมู มีค่าเท่ากับ 0.933 Ns/m²

ในการเปรียบเทียบความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS และวิธีการจับเวลา กับความหนืดมาตรฐานของของเหลว แสดงเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อน แสดงดังตารางที่ 4-3

จากตารางที่ 4-3 ผลการเปรียบเทียบความหนืดของกลีเซอริน น้ำมันปาล์ม โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS กับความหนืดมาตรฐานของของเหลว มีร้อยละความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 1.06 และ 42.59 ตามลำดับ และผลการเปรียบเทียบความหนืดของกลีเซอริน น้ำมันปาล์ม น้ำมันหมู โดยใช้วิธีการจับเวลา กับความหนืดมาตรฐานของของเหลว มีร้อยละความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 3.85 , 96.30 และ 15.43 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความหนืดของกลีเซอรินโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล ที่มีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.06 ใกล้เคียงความหนืดมาตรฐานมากที่สุด และมีความแม่นยำมากกว่าวิธีการจับเวลา

ตารางที่ 4-3 ร้อยละความคลาดเคลื่อน เมื่อเปรียบเทียบความหนืดของของเหลว โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา กับความหนืดมาตรฐานที่อุณหภูมิ 25 °C

ของเหลว	ความหนืด มาตรฐาน (Ns/m ²)	วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล		วิธีการจับเวลา	
		ความหนืด (Ns/m ²)	ร้อยละความ คลาดเคลื่อน (%)	ความหนืด (Ns/m ²)	ร้อยละความ คลาดเคลื่อน (%)
กลีเซอริน	0.954	0.944	1.06	0.991	3.85
น้ำมันปาล์ม	0.054	0.077	42.59	0.106	96.30
น้ำมันหมู	0.933	-	-	0.789	15.43

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการหาความหนืดของของเหลว ได้แก่ กลีเซอริน น้ำมันปาล์ม และน้ำมันหมู โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา และนำมาเปรียบเทียบกับความหนืดมาตรฐานของของเหลว

อภิปรายผล

การหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล เพื่อวิเคราะห์หาความเร็วของโหมคภาพยนตร์ที่เหมาะสมที่สุด พบว่า โหมคภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS ทำให้ความหนืดของกลีเซอรินใกล้เคียงความหนืดมาตรฐานมากที่สุด มีร้อยละความคลาดเคลื่อน 1.06 เนื่องจากการใช้ความเร็วของโหมคภาพยนตร์ที่มีค่าต่างกันในการทดลอง จะทำให้จำนวนภาพถ่ายวิดีโอต่อหนึ่งหน่วยเวลาและความเร็วของวิดีโอที่แสดงต่างกัน ซึ่งโหมคภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS จะแสดงจำนวนภาพการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลม 100 ภาพต่อวินาที (Frame rate) และความเร็วของวิดีโอช้ากว่าโหมคภาพยนตร์ความเร็วสูง 720 HS และ 1080 HS เมื่อวิเคราะห์หาระยะทางในแนวตั้ง (y) ที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ ณ เวลา (t) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker จะได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น และเมื่อคำนวณหาอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมได้ค่าที่ละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้การคำนวณหาความหนืดของของเหลวตามกฎของสโตกส์ได้ค่าใกล้เคียงกับความหนืดมาตรฐาน

จากการทดลองหาความหนืดของของเหลว โดยวิธีการจับเวลา พบว่า ความหนืดของกลีเซอริน น้ำมันปาล์ม น้ำมันหมู โดยใช้วิธีการจับเวลา เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดมาตรฐานของของเหลว พบว่า ร้อยละความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 3.85 , 96.30 และ 15.43 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าความหนืดของกลีเซอรินใกล้เคียงความหนืดมาตรฐานมากที่สุด ส่วนความหนืดของน้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดมาตรฐาน มีร้อยละความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากการหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการจับเวลา เมื่อของเหลวมีความหนืดน้อย จะทำให้โลหะทรงกลมเคลื่อนที่เร็วมาก ทำให้ผู้ทดลองจับเวลาขณะที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งต่างๆ ผิดพลาดไป และหากท่อทรงกระบอกมีความยาวน้อยเกินไป จะทำให้อัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลมจากการทดลองมีค่าผิดพลาดได้

เมื่อเปรียบเทียบการหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS และวิธีการจับเวลา พบว่า ความหนืดของกลีเซอรินโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล ใกล้เคียงความหนืดมาตรฐานมากที่สุด และมีความแม่นยำมากกว่าวิธีการจับเวลา แสดงว่า กลีเซอรินเป็นของเหลวที่เหมาะสมในการทดลองหาความหนืดของของเหลวโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker ซึ่งเป็นของเหลวที่มีความหนืดมากและมีสีใส

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการวัดความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล และวิธีการจับเวลา เพื่อให้ได้วิธีการวัดความหนืดของของเหลวที่เหมาะสม เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดมาตรฐานของของเหลว สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การหาความหนืดของกลีเซอริน โดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS , 720 HS และ 1080 HS มีค่าเท่ากับ 0.944 , 0.938 และ 1.035 Ns/m² ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดมาตรฐาน มีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 1.06 , 1.64 และ 8.48 ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าความหนืดของกลีเซอรินที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS มีค่าใกล้เคียงความหนืดมาตรฐานมากที่สุด

2. การหาความหนืดของน้ำมันปาล์ม และน้ำมันหมู โดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS พบว่า ความหนืดของน้ำมันปาล์ม มีค่าเท่ากับ 0.077 Ns/m² เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดมาตรฐาน มีร้อยละความคลาดเคลื่อนสูง ส่วนความหนืดของน้ำมันหมู ไม่สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ แสดงว่า การหาความหนืดโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS จากชุดทดลองนี้ไม่เหมาะสมกับน้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู

3. การหาความหนืดของกลีเซอริน น้ำมันปาล์ม และน้ำมันหมู โดยวิธีการจับเวลา มีค่าเท่ากับ 0.991 , 0.106 และ 0.789 Ns/m² ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดมาตรฐาน พบว่าความหนืดของกลีเซอริน มีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 3.85 ส่วนน้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู มีร้อยละความคลาดเคลื่อนสูง ทำให้ทราบว่าความหนืดของกลีเซอรินที่ได้จากวิธีการจับเวลา มีค่าใกล้เคียงความหนืดมาตรฐานมากที่สุด

4. การเปรียบเทียบการหาความหนืดของกลีเซอรินโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS และวิธีการจับเวลา กับความหนืดมาตรฐาน มีความ

คลาดเคลื่อนร้อยละ 1.06 และ 3.85 ตามลำดับ สรุปได้ว่า ความหนืดของกาลีเซอรินโดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล ใกล้เคียงความหนืดมาตรฐานมากที่สุด มีแม่นยำมากกว่าวิธีการจับเวลา

5. จากการศึกษาวิธีการหาความหนืดของกาลีเซอริน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล ทำให้ได้วิธีการหาความหนืดของของเหลวที่เหมาะสม ด้วยโหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS ร่วมกับการวิเคราะห์โปรแกรมสำเร็จรูป Tracker

ข้อเสนอแนะ

1. วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล สามารถใช้หาความหนืดของของเหลวที่มีความหนืดมากและมีลักษณะใสชนิดอื่นได้ แต่จะต้องออกแบบชุดการทดลองที่มีความยาวท่อทรงกระบอกที่เหมาะสม เพราะหากใช้ท่อทรงกระบอกที่มีความยาวที่ลดลง จะทำให้มองเห็นภาพถ่ายวิดีโอการทดลองชัดเจนมากขึ้น และสามารถวิเคราะห์หาอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในของเหลวได้แม่นยำขึ้น

2. วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล หากต้องการทดลองหาความหนืดของของเหลวที่มีความหนืดน้อย สามารถเปลี่ยนกล้องวิดีโอดิจิทัลรุ่นอื่นได้ ที่สามารถปรับค่าอัตราเฟรมให้สูงมากขึ้นได้ จะทำให้เพิ่มจำนวนภาพที่ถ่ายได้ในหนึ่งหน่วยเวลา และภาพการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมมีความคมชัดเพิ่มขึ้น

บรรณานุกรม

- ก่องกัญจน์ ภัทราภาณจน์ และชนาภาณจน์ ภัทราภาณจน์. (2544). *ฟิสิกส์มหาวิทยาลัย เล่ม 1* (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
เข้าถึงได้จาก http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_9_2549_viscosity.pdf
- จักรกฤษณ์ แก้วสุทธิ. (2555). *การพัฒนาชุดทดลองเกี่ยวกับแรงต้านที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายวิดีโอ*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการสอนฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- โชคชัย นิเวศน์รังสรรค์. (2549). *ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการสูญเสียความดันในงานฉีด*. เข้าถึงได้จาก <http://www.gits.kmutnb.ac.th/ethesis/data/4610280036.pdf>
- พิสิฐ เมธาภัทร และธีระพล เมธิกุล. (2531). *เทคนิควิธีการเรียนการสอนวิชาเทคนิค*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ.
- ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2539). *ฟิสิกส์ 1* (พิมพ์ครั้งที่ 13). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2557). *คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐาน*. การทดลองที่ 10.
- มณัฐญภัทร ศิริวัฒน์พงศ์. (2557). *การออกแบบและสร้างชุดทดลองสำหรับหาค่าอัตราเร็วของโลหะทรงกลมในของเหลว*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- มณฑล สุกใส. (2551). *ความหนืดและพฤติกรรมการไหลของไหล*. เข้าถึงได้จาก <http://www.thifoodscience.com/ความหนืดและพฤติกรรมการไหลของไหล.html>
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงศึกษาธิการ. (2555). *หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 5*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ สกสศ.
- สมจิตร มาสงเหลือ้ม. (2549). *การหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีตามกฎของสโตกส์และกฎของปัวเซย์*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- สมาน เจริญกิจพูลผล และมนตรี พิรุณเกษตร. (2533). *กลศาสตร์ของของไหล*. กรุงเทพฯ: เอช-เอนการพิมพ์.

สายัณห์ สุขพงษ์ และวิรัตน์ ปฐมชัยอำพร. (2549). ความหนืดคุณลักษณะเฉพาะของของไหล.

หทัยชนก เพ็ชรมาตศรี. (2555). เทคนิคการวัดความหนืด โดยอาศัยการตกของวัตถุทรงกลม :

บทบาทของอิทธิพลของผนังหลอด. ปรินูญานิพนธ์ศึกษาศาสตรมหาบัณฑิต,

สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะศึกษาศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

อรุณรัศมี จันทพรม. (2552). ศึกษาผลของรัศมีต่ออัตราเร็วท้ายของลูกปืนกลมที่ตกผ่านกลีเซอริน

ตามกฎของสโตกส์. งานนิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ศึกษา,

คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

Brown, D., & Cox, A.J. (2009). Innovative Uses of Video Analysis. *The Physics Teacher*, 47, 145-150.

Flow Past a sphere II : Stokes's Law, The Bernoulli equation, Turbulence, Boundary Layers, Flow

Separation. (n.d.). Retrieved from [http://ocw.mit.edu/courses/earth-atmospheric-and-](http://ocw.mit.edu/courses/earth-atmospheric-and-planetary-sciences/12-090-special-topics-an-introduction-to-fluid-motion-sediment-transport-and-current-generated-sedimentary-structures-fall-2006/lecture-notes/ch3.pdf)

[planetary-sciences/12-090-special-topics-an-introduction-to-fluid-motion-sediment-](http://ocw.mit.edu/courses/earth-atmospheric-and-planetary-sciences/12-090-special-topics-an-introduction-to-fluid-motion-sediment-transport-and-current-generated-sedimentary-structures-fall-2006/lecture-notes/ch3.pdf)

[transport-and-current-generated-sedimentary-structures-fall-2006/lecture-notes/ch3.pdf](http://ocw.mit.edu/courses/earth-atmospheric-and-planetary-sciences/12-090-special-topics-an-introduction-to-fluid-motion-sediment-transport-and-current-generated-sedimentary-structures-fall-2006/lecture-notes/ch3.pdf)

Gilmont, R. (2002). Liquid Viscosity Correlations for Flowmeter Calculations. *Chemical*

engineering progress, 98(10), 36-41.

Mott, Robert L. (2000). *Applied Fluid Mechanics* (5th ed.). New Jersey: Prentice-Hall.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองหาระยะทางในแนวดิ่ง อัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ใน
ของเหลว โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker

ตารางที่ ก-1 ผลการวิเคราะห์หาระยะทางในแนวตั้งที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ในกสิเซอริน ณ เวลาใด ๆ จากโหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker

เวลาในโปรแกรม (s)	เวลาจริง (s)	ระยะในแนวตั้ง (m)		
		y_1	y_2	y_3
0.0	0.00	0.00000	0.00000	0.00000
0.4	0.11	0.04482	0.03750	0.46659
0.8	0.22	0.07394	0.06764	0.48924
1.2	0.33	0.10214	0.09397	0.51084
1.6	0.44	0.14930	0.12102	0.53406
2	0.55	0.17660	0.14862	0.55731
2.4	0.66	0.20205	0.17433	0.58054
2.8	0.77	0.22764	0.20009	0.60368
3.2	0.88	0.25337	0.22621	0.62469
3.6	0.99	0.27864	0.25158	0.64714
4	1.1	0.30351	0.27642	0.66654
4.4	1.21	0.32753	0.30204	0.68941
4.8	1.32	0.34958	0.32507	0.71074
5.2	1.43	0.37298	0.34872	0.73244
5.6	1.54	0.39632	0.37207	0.75374
6	1.65	0.41938	0.39524	0.77121
6.4	1.76	0.44193	0.41798	0.78739
6.8	1.87	0.46538	0.44150	0.80132
7.2	1.98	0.48814	0.46447	0.46659
7.6	2.09	0.51086	0.48725	0.48924
8	2.2	0.53225	0.50890	0.51084
8.4	2.31	0.55520	0.53214	0.53406
8.8	2.42	0.57825	0.55541	0.55731
9.2	2.53	0.60130	0.57867	0.58054
9.6	2.64	0.62424	0.60183	0.60368
10	2.75	0.64496	0.62282	0.62469
10.4	2.86	0.66728	0.64530	0.64714
10.8	2.97	0.68697	0.66523	0.66654
11.2	3.08	0.70959	0.68794	0.68941
11.6	3.19	0.73071	0.70924	0.71074
12	3.3	0.75208	0.73098	0.73244
12.4	3.41	0.77328	0.75237	0.75374
12.8	3.52	0.78890	0.76958	0.77121
13.2	3.63	0.80523	0.78607	0.78739

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

เวลาในโปรแกรม (s)	เวลาจริง (s)	ระยะในแนวตั้ง (m)		
		y ₁	y ₂	y ₃
13.6	3.74	0.81922	0.80194	0.80132
14	3.85	0.84020	0.82313	0.82115
14.4	3.96	0.86143	0.84483	0.84268
14.8	4.07	0.87552	0.86101	0.85830
15.2	4.18	0.89326	0.87888	0.87562
15.6	4.29	0.91555	0.90136	0.89600
16	4.4	0.93575	0.92078	0.91051
16.4	4.51	0.95091	0.93727	0.92686
16.8	4.62	0.97140	0.95585	0.94741
17.2	4.73	0.99131	0.97638	0.96746
17.6	4.84	1.01112	0.99711	0.98902
18	4.95	1.03255	1.01956	1.02608
18.4	5.06	1.05326	1.04069	1.04683
18.8	5.17	1.06865	1.05388	1.06064
19.2	5.28	1.08998	1.06817	1.07558
19.6	5.39	1.10625	1.08486	1.08777
20	5.5	1.12736	1.08761	1.10161
20.4	5.61	1.14825	1.10412	1.12271
20.8	5.72	1.16935	1.12221	1.14825
21.2	5.83	1.19059	1.14190	1.16935
21.6	5.94	1.21161	1.15502	1.18953
22	6.05	1.23271	1.17743	1.19059
22.4	6.16	1.25372	1.19311	1.21161
22.8	6.27	1.27486	1.21411	1.23271
23.2	6.38	1.29587	1.23420	1.25383
23.6	6.49	1.31697	1.25522	1.27476
24	6.6	1.33778	1.27723	1.29565
24.4	6.71	1.35897	1.29729	1.31675
24.8	6.82	1.37958	1.31839	1.33764
25.2	6.93	1.40068	1.33945	1.35769
25.6	7.04	1.40965	1.37958	1.37777
26	7.15	1.40972	1.40039	1.39847

ตารางที่ ก-2 ผลการวิเคราะห์หาระยะทางในแนวดิ่งที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ในกสิเซอริน ณ เวลาใด ๆ จากโหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 720 HS ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker

เวลาในโปรแกรม (s)	เวลาจริง (s)	ระยะในแนวดิ่ง (m)		
		y_1	y_2	y_3
0.00	0.000	0.00000	0.00000	0.00000
0.20	0.108	0.01573	0.02795	0.03863
0.40	0.216	0.04227	0.05717	0.06922
0.60	0.324	0.07155	0.08549	0.09861
0.80	0.432	0.09982	0.11339	0.10254
1.00	0.54	0.12755	0.12723	0.12743
1.20	0.648	0.15474	0.13806	0.13021
1.40	0.756	0.18134	0.14071	0.14128
1.60	0.864	0.20760	0.16729	0.15586
1.80	0.972	0.23411	0.19331	0.18350
2.00	1.08	0.26050	0.21972	0.21084
2.20	1.188	0.28604	0.24614	0.23802
2.40	1.296	0.31125	0.27165	0.24812
2.60	1.404	0.33650	0.29700	0.26509
2.80	1.512	0.36106	0.32220	0.29178
3.00	1.62	0.38607	0.34697	0.31808
3.20	1.728	0.41039	0.37195	0.34390
3.40	1.836	0.43457	0.39650	0.36954
3.60	1.944	0.45790	0.42048	0.39478
3.80	2.052	0.48084	0.44405	0.41999
4.00	2.16	0.50383	0.46710	0.44464
4.20	2.268	0.52678	0.49013	0.46886
4.40	2.376	0.54964	0.51308	0.49288
4.60	2.484	0.55216	0.53600	0.51656
4.80	2.592	0.57182	0.55817	0.53995
5.00	2.7	0.59416	0.58030	0.56338
5.20	2.808	0.61670	0.60292	0.58672
5.40	2.916	0.63830	0.62442	0.60960
5.60	3.024	0.66010	0.64613	0.63240
5.80	3.132	0.68107	0.66702	0.65491
6.00	3.24	0.70286	0.68897	0.67725
6.20	3.348	0.72425	0.71073	0.69975
6.40	3.456	0.74558	0.73216	0.72192
6.60	3.564	0.76698	0.75373	0.74411
6.80	3.672	0.78807	0.77508	0.76607

ตารางที่ ก-2 (ต่อ)

เวลาในโปรแกรม (s)	เวลาจริง (s)	ระยะในแนวตั้ง (m)		
		y ₁	y ₂	y ₃
7.00	3.78	0.80779	0.79468	0.78852
7.20	3.888	0.82946	0.81648	0.79214
7.40	3.996	0.84978	0.83728	0.80982
7.60	4.104	0.85721	0.85927	0.83192
7.80	4.212	0.87154	0.87915	0.85337
8.00	4.32	0.89060	0.90064	0.87505
8.20	4.428	0.91170	0.92161	0.89654
8.40	4.536	0.93316	0.94183	0.91839
8.60	4.644	0.95374	0.95985	0.93958
8.80	4.752	0.97297	0.98062	0.94012
9.00	4.86	0.99435	1.00018	0.96099
9.20	4.968	1.01360	1.02122	0.98232
9.40	5.076	1.03452	1.03976	1.02477
9.60	5.184	1.05491	1.05972	1.04557
9.80	5.292	1.07454	1.07771	1.06614
10.00	5.4	1.09299	1.09774	1.08693
10.20	5.508	1.11249	1.11841	1.10721
10.40	5.616	1.13322	1.13912	1.12788
10.60	5.724	1.15362	1.15983	1.14858
10.80	5.832	1.16012	1.16433	1.16927
11.00	5.94	1.18083	1.18051	1.19000
11.20	6.048	1.20154	1.20061	1.20314
11.40	6.156	1.22222	1.22122	1.21074
11.60	6.264	1.24291	1.24196	1.23148
11.80	6.372	1.26362	1.26271	1.25215
12.00	6.48	1.28428	1.28312	1.27271
12.20	6.588	1.30498	1.30386	1.29344
12.40	6.696	1.32544	1.32458	1.31417
12.60	6.804	1.34606	1.34533	1.33489
12.80	6.912	1.36672	1.36607	1.35555
13.00	7.02	1.38739	1.38674	1.37629
13.20	7.128	1.40806	1.40740	1.39692

ตารางที่ ก-3 ผลการวิเคราะห์หาระยะทางในแนวตั้งที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ในกสิเซอริน ณ เวลาใด ๆ จากโหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 1080 HS ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker

เวลาในโปรแกรม (s)	เวลาจริง (s)	ระยะในแนวตั้ง (m)		
		y_1	y_2	y_3
0.00	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
0.12	0.0943	0.00794	0.00956	0.02290
0.16	0.1886	0.03379	0.03519	0.05023
0.20	0.2829	0.05830	0.05951	0.07457
0.24	0.3772	0.08162	0.08251	0.09745
0.28	0.4715	0.10472	0.10550	0.12012
0.32	0.5658	0.12723	0.12773	0.14222
0.36	0.6601	0.14968	0.14997	0.16418
0.40	0.7544	0.17180	0.17190	0.18593
0.44	0.8487	0.19380	0.19371	0.20747
0.48	0.943	0.21556	0.21541	0.22875
0.52	1.0373	0.23679	0.23628	0.24957
0.56	1.1316	0.25837	0.25765	0.27063
0.60	1.2259	0.27896	0.27809	0.29081
0.64	1.3202	0.30022	0.29914	0.31171
0.68	1.4145	0.32040	0.31915	0.33139
0.72	1.5088	0.34109	0.33991	0.35177
0.76	1.6031	0.36148	0.36004	0.37176
0.80	1.6974	0.38192	0.38065	0.39168
0.84	1.7917	0.40153	0.40008	0.41097
0.88	1.886	0.42154	0.43951	0.43066
0.92	1.9803	0.44123	0.45837	0.44999
0.96	2.0746	0.46011	0.47763	0.46847
1.00	2.1689	0.47956	0.50808	0.48760
1.04	2.2632	0.49809	0.52319	0.50577
1.08	2.3575	0.51710	0.54385	0.52404
1.12	2.4518	0.52074	0.56051	0.53896
1.16	2.5461	0.54955	0.57754	0.55937
1.20	2.6404	0.56852	0.59469	0.57837
1.24	2.7347	0.58735	0.61268	0.59599
1.28	2.829	0.60531	0.62650	0.61323
1.32	2.9233	0.62315	0.64666	0.63156
1.36	3.0176	0.64165	0.66368	0.64950
1.40	3.1119	0.65922	0.68033	0.66696
1.44	3.2062	0.67598	0.69579	0.68338
1.48	3.3005	0.69323	0.71477	0.70046
1.52	3.3948	0.71043	0.73155	0.71747
1.56	3.4891	0.72853	0.74876	0.73476

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)

เวลาในโปรแกรม (s)	เวลาจริง (s)	ระยะในแนวตั้ง (m)		
		y ₁	y ₂	y ₃
1.60	3.5834	0.74229	0.76442	0.74876
1.64	3.6777	0.76230	0.78098	0.76854
1.68	3.772	0.77917	0.79791	0.78518
1.72	3.8663	0.79549	0.81497	0.80132
1.76	3.9606	0.80216	0.83192	0.81809
1.80	4.0549	0.82879	0.84920	0.83490
1.84	4.1492	0.84744	0.86486	0.85166
1.88	4.2435	0.86448	0.88157	0.86841
1.92	4.3378	0.88210	0.89739	0.88516
1.96	4.4321	0.89799	0.91417	0.90218
2.00	4.5264	0.91511	0.93091	0.91887
2.04	4.6207	0.93222	0.94769	0.93552
2.08	4.715	0.94941	0.96448	0.95231
2.12	4.8093	0.96640	0.98125	0.96902
2.16	4.9036	0.98440	0.99800	0.98574
2.20	4.9979	0.98441	1.01468	1.00244
2.24	5.0922	1.03340	1.03137	1.01895
2.28	5.1865	1.05010	1.04801	1.03543
2.32	5.2808	1.06678	1.06469	1.05191
2.36	5.3751	1.08347	1.08140	1.06841
2.40	5.4694	1.10012	1.09806	1.08490
2.44	5.5637	1.11661	1.11471	1.10138
2.48	5.658	1.13311	1.13122	1.11788
2.52	5.7523	1.14960	1.14774	1.13440
2.56	5.8466	1.16602	1.16425	1.15091
2.60	5.9409	1.18262	1.18075	1.16743
2.64	6.0352	1.19910	1.19723	1.18391
2.68	6.1295	1.21553	1.21375	1.20042
2.72	6.2238	1.23213	1.23025	1.21691
2.76	6.3181	1.24861	1.24673	1.23340
2.80	6.4124	1.26512	1.26320	1.24993
2.84	6.5067	1.28161	1.27971	1.26640
2.88	6.601	1.29808	1.29617	1.28292
2.92	6.6953	1.31470	1.31269	1.29943
2.96	6.7896	1.33116	1.32919	1.31591
3.00	6.8839	1.34763	1.34572	1.33245
3.04	6.9782	1.36417	1.36221	1.34905
3.08	7.0725	1.38048	1.37873	1.36552
3.12	7.1668	1.39696	1.39520	1.38204

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองหาอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในกลีเซอริน โดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง

ระยะทาง S (cm)	โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS				โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 720 HS				โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 1080 HS			
	V ₁	V ₂	V ₃	V _{เฉลี่ย}	V ₁	V ₂	V ₃	V _{เฉลี่ย}	V ₁	V ₂	V ₃	V _{เฉลี่ย}
	10	0.2848	0.2610	0.2978	0.281	0.260	0.264	0.278	0.267	0.2583	0.2544	0.2566
20	0.2412	0.2419	0.2411	0.241	0.250	0.247	0.260	0.252	0.2333	0.2338	0.2362	0.234
30	0.2317	0.2321	0.2287	0.231	0.242	0.246	0.248	0.245	0.2232	0.2253	0.2275	0.225
40	0.2118	0.2105	0.2101	0.211	0.230	0.230	0.238	0.233	0.2139	0.2161	0.2166	0.216
50	0.2098	0.2099	0.2098	0.210	0.216	0.217	0.228	0.220	0.2034	0.2057	0.2088	0.206
60	0.2112	0.2092	0.2081	0.209	0.209	0.211	0.217	0.213	0.1960	0.1976	0.1994	0.198
70	0.2006	0.2057	0.2010	0.202	0.201	0.205	0.209	0.205	0.1881	0.1844	0.1905	0.188
80	0.1952	0.1930	0.1949	0.194	0.194	0.199	0.204	0.199	0.1801	0.1789	0.1841	0.181
90	0.1981	0.1919	0.1905	0.193	0.192	0.199	0.201	0.197	0.1743	0.1803	0.1802	0.178
100	0.1930	0.1908	0.1884	0.191	0.192	0.193	0.198	0.195	0.1751	0.1773	0.1784	0.177
110	0.1921	0.1923	0.1931	0.192	0.193	0.192	0.193	0.193	0.1749	0.1786	0.1717	0.175
120	0.1916	0.1909	0.1915	0.191	0.193	0.193	0.192	0.193	0.1751	0.1767	0.1721	0.175
130	0.1908	0.1911	0.1918	0.191	0.193	0.193	0.192	0.193	0.1749	0.1775	0.1719	0.175
140	0.1910	0.1908	0.1911	0.191	0.193	0.193	0.192	0.193	0.1747	0.1771	0.1721	0.175

ตารางที่ ก-5 ผลการวิเคราะห์หาระยะทางในแนวตั้งที่โลหะทรงกลมเคลื่อนที่ในน้ำมันปาล์ม
ณ เวลาใด ๆ ที่โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker

เวลาในโปรแกรม (s)	เวลาจริง (s)	ระยะในแนวตั้ง (m)		
		y_1	y_2	y_3
0.00	0.0000	0.00000	0.00000	0.00000
0.04	0.0132	0.03009	0.05516	0.03209
0.08	0.0264	0.03119	0.06778	0.06818
0.12	0.0396	0.10172	0.10249	0.09703
0.16	0.0528	0.13842	0.13953	0.13358
0.20	0.066	0.17483	0.17823	0.17575
0.24	0.0792	0.21028	0.21423	0.21137
0.28	0.0924	0.24658	0.25116	0.24797
0.32	0.1056	0.28224	0.28737	0.28382
0.36	0.1188	0.31771	0.32345	0.31964
0.40	0.132	0.35298	0.35931	0.35512
0.44	0.1452	0.38811	0.39504	0.39051
0.48	0.1584	0.42357	0.43098	0.42616
0.52	0.1716	0.45814	0.46623	0.46108
0.56	0.1848	0.49289	0.50157	0.49605
0.60	0.198	0.52777	0.53703	0.53119
0.64	0.2112	0.56197	0.57177	0.56559
0.68	0.2244	0.5966	0.60705	0.60053
0.72	0.2376	0.63072	0.6418	0.63497
0.76	0.2508	0.66502	0.67666	0.66952
0.80	0.264	0.69887	0.71101	0.70353
0.84	0.2772	0.73259	0.74527	0.73759
0.88	0.2904	0.76643	0.80146	0.7716
0.92	0.3036	0.79984	0.81566	0.80353
0.96	0.3168	0.82936	0.84951	0.83706

ตารางที่ ก-5 (ต่อ)

เวลาในโปรแกรม (s)	เวลาจริง (s)	ระยะในแนวดิ่ง (m)		
		y_1	y_2	y_3
1.00	0.33	0.86225	0.88086	0.87013
1.04	0.3432	0.89515	0.91595	0.90308
1.08	0.3564	0.92804	0.9494	0.9362
1.12	0.3696	0.96088	0.9828	0.96926
1.16	0.3828	0.99821	1.0334	1.00156
1.20	0.396	1.02606	1.07758	1.03772
1.24	0.4092	1.06609	1.07779	1.06724
1.28	0.4224	1.11832	1.14542	1.12037
1.32	0.4356	1.12876	1.14542	1.12431
1.36	0.4488	1.16358	1.1754	1.163
1.40	0.462	1.19491	1.21012	1.19711
1.44	0.4752	1.21754	1.24009	1.22845
1.48	0.4884	1.25236	1.30636	1.26124
1.52	0.5016	1.28195	1.33482	1.25225
1.56	0.5148	1.342	1.37045	1.356

ตารางที่ ก-6 ผลการทดลองหาอัตราเร็วเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในน้ำมันปาล์ม
โดยวิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS

ระยะทาง S (cm)	อัตราเร็วเฉลี่ย (m/s)			
	v_1	v_2	v_3	$v_{เฉลี่ย}$
10	2.569	2.986	2.734	2.76
20	2.742	2.767	2.744	2.75
30	2.713	2.771	2.694	2.73
40	2.667	2.719	2.665	2.68
50	2.646	2.690	2.638	2.66
60	2.619	2.664	2.601	2.63
70	2.583	2.625	2.525	2.58
80	2.550	2.599	2.514	2.55
90	2.492	2.532	2.487	2.50
100	2.490	2.532	2.488	2.50
110	2.469	2.399	2.480	2.45
120	2.506	2.450	2.429	2.46
130	2.440	2.450	2.429	2.44
140	2.418	2.428	2.479	2.44

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองหาอัตราเร็วปลายของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในของเหลว
โดยใช้วิธีการจับเวลา

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองบันทึกเวลาที่ระยะทางทุกระยะ 10 cm ของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในกลีเซอริน โดยใช้วิธีการจับเวลา

ระยะทาง S (cm)	เวลา t (s)										
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	t ₉	t ₁₀	t _{เฉลี่ย}
10	0.35	0.33	0.37	0.35	0.39	0.36	0.39	0.35	0.34	0.33	0.356
20	0.78	0.76	0.75	0.78	0.77	0.79	0.77	0.78	0.8	0.76	0.774
30	1.26	1.25	1.28	1.22	1.18	1.21	1.25	1.21	1.27	1.25	1.238
40	1.75	1.72	1.77	1.71	1.7	1.69	1.72	1.74	1.72	1.69	1.721
50	2.21	2.23	2.22	2.19	2.26	2.3	2.18	2.25	2.3	2.22	2.236
60	2.76	2.78	2.79	2.77	2.75	2.76	2.8	2.81	2.78	2.8	2.78
70	3.31	3.34	3.35	3.3	3.28	3.29	3.34	3.3	3.29	3.33	3.257
80	3.78	3.85	3.87	3.84	3.8	3.86	3.88	3.87	3.85	3.85	3.794
90	4.39	4.37	4.39	4.35	4.35	4.36	4.39	4.3	4.38	4.35	4.311
100	4.89	4.88	4.87	4.95	4.99	4.97	4.88	4.89	4.91	5.03	4.875
110	5.46	5.49	5.49	5.41	5.44	5.49	5.5	5.49	5.48	5.52	5.416
120	6.02	6.01	5.99	6.02	6.05	6.01	6.01	6.03	6.05	6.05	5.972
130	6.52	6.58	6.61	6.68	6.54	6.55	6.52	6.64	6.59	6.55	6.521
140	7.08	7.14	7.11	7.15	7.15	7.08	7.11	7.14	7.12	7.17	7.069

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองหาอัตราเร็วเฉลี่ยที่ระยะทางทุกระยะ 10 cm ของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในกลีเซอริน โดยใช้วิธีการจับเวลา

ระยะทาง S (cm)	อัตราเร็วเฉลี่ย (m/s)										
	v ₁	v ₂	v ₃	v ₄	v ₅	v ₆	v ₇	v ₈	v ₉	v ₁₀	v _{เฉลี่ย}
10	0.286	0.303	0.270	0.286	0.256	0.278	0.256	0.286	0.294	0.303	0.282
20	0.233	0.233	0.263	0.233	0.263	0.233	0.263	0.233	0.217	0.233	0.240
30	0.208	0.204	0.189	0.227	0.244	0.238	0.208	0.233	0.213	0.204	0.217
40	0.204	0.213	0.204	0.204	0.192	0.208	0.213	0.189	0.222	0.227	0.208
50	0.217	0.196	0.222	0.208	0.179	0.164	0.217	0.196	0.172	0.189	0.196
60	0.182	0.182	0.175	0.172	0.204	0.217	0.161	0.179	0.208	0.172	0.185
70	0.182	0.179	0.179	0.189	0.189	0.189	0.185	0.204	0.196	0.189	0.188
80	0.213	0.196	0.192	0.185	0.192	0.175	0.185	0.175	0.179	0.192	0.189
90	0.164	0.192	0.192	0.196	0.182	0.200	0.196	0.233	0.189	0.200	0.194
100	0.200	0.196	0.208	0.167	0.156	0.164	0.204	0.169	0.189	0.147	0.180
110	0.175	0.164	0.161	0.217	0.222	0.192	0.161	0.167	0.175	0.204	0.184
120	0.179	0.192	0.200	0.164	0.164	0.192	0.196	0.185	0.175	0.189	0.184
130	0.200	0.175	0.161	0.152	0.204	0.185	0.196	0.164	0.185	0.200	0.182
140	0.179	0.179	0.200	0.213	0.164	0.189	0.169	0.200	0.189	0.161	0.184

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองบันทึกเวลาที่ระยะทางทุกระยะ 10 cm ของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในน้ำมันปาล์ม โดยใช้วิธีการจับเวลา

ระยะทาง S (cm)	เวลา t (s)										
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	t ₉	t ₁₀	t _{เฉลี่ย}
10	0.004	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.005	0.005	0.005
20	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.008	0.008	0.010	0.008	0.009	0.009
30	0.019	0.018	0.017	0.018	0.017	0.017	0.018	0.017	0.018	0.019	0.018
40	0.028	0.027	0.026	0.026	0.026	0.026	0.027	0.027	0.028	0.028	0.027
50	0.040	0.038	0.038	0.038	0.039	0.039	0.039	0.039	0.040	0.039	0.039
60	0.061	0.062	0.061	0.062	0.061	0.063	0.064	0.063	0.061	0.062	0.062
70	0.107	0.108	0.107	0.106	0.107	0.110	0.107	0.108	0.106	0.106	0.107
80	0.157	0.160	0.158	0.162	0.162	0.158	0.160	0.158	0.151	0.151	0.158
90	0.202	0.202	0.211	0.208	0.200	0.200	0.202	0.210	0.195	0.200	0.203
100	0.264	0.260	0.291	0.252	0.267	0.261	0.260	0.261	0.265	0.238	0.262
110	0.330	0.314	0.317	0.321	0.312	0.326	0.324	0.331	0.332	0.322	0.323
120	0.394	0.385	0.372	0.391	0.390	0.370	0.368	0.392	0.374	0.392	0.382
130	0.448	0.469	0.432	0.431	0.460	0.431	0.451	0.441	0.422	0.433	0.442
140	0.527	0.530	0.521	0.503	0.512	0.509	0.510	0.510	0.521	0.511	0.515

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองหาอัตราเร็วเฉลี่ยที่ระยะทางทุกระยะ 10 cm ของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในน้ำมันปาล์ม โดยใช้วิธีการจับเวลา

ระยะทาง S (cm)	อัตราเร็วเฉลี่ย (m/s)										
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₈	V ₉	V ₁₀	V _{เฉลี่ย}
10	22.73	23.81	21.74	20.83	21.74	21.28	22.22	22.73	21.74	20.83	21.96
20	19.23	21.28	24.39	26.32	24.39	34.48	26.32	19.61	27.78	22.73	20.04
30	10.99	11.24	12.20	11.24	11.76	10.87	10.75	12.82	10.53	10.64	11.30
40	10.87	11.11	11.11	11.24	11.63	10.75	10.64	10.53	10.10	10.53	10.85
50	8.40	8.77	8.00	8.70	7.87	7.52	8.62	8.13	8.40	9.43	8.39
60	4.67	4.27	4.41	4.10	4.46	4.29	3.92	4.13	4.72	4.31	4.33
70	2.19	2.16	2.18	2.30	2.19	2.14	2.35	2.25	2.19	2.29	2.22
80	2.01	1.91	1.96	1.77	1.80	2.07	1.87	1.98	2.24	2.22	1.98
90	2.21	2.38	1.88	2.19	2.67	2.36	2.43	1.92	2.30	2.02	2.24
100	1.61	1.74	1.26	2.28	1.48	1.64	1.72	1.98	1.42	2.65	1.78
110	1.53	1.83	3.86	1.45	2.24	1.54	1.55	1.42	1.49	1.19	1.81
120	1.56	1.42	1.82	1.43	1.27	2.28	2.29	1.66	2.38	1.43	1.75
130	1.84	1.19	1.66	2.50	1.44	1.63	1.20	2.01	2.11	2.42	1.80
140	1.26	1.63	1.12	1.39	1.92	1.28	1.69	1.45	1.01	1.28	1.40

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองบันทึกเวลาที่ระยะทางทุกระยะ 10 cm ของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในน้ำมันหนืด โดยใช้วิธีการจับเวลา

ระยะทาง S (cm)	เวลา t (s)										
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	t ₉	t ₁₀	t _{เฉลี่ย}
10	0.13	0.30	0.11	0.47	0.62	0.23	0.30	0.64	0.37	0.16	0.33
20	0.64	0.66	0.47	0.82	0.97	0.60	0.66	0.98	0.72	0.53	0.69
30	0.97	1.04	0.85	1.18	1.32	0.97	1.02	1.33	1.08	0.90	1.06
40	1.26	1.41	1.39	1.55	1.69	1.35	1.39	1.68	1.45	1.28	1.43
50	1.66	1.80	1.63	1.93	2.06	1.73	1.76	2.04	1.82	1.66	1.81
60	2.06	2.19	2.01	2.31	2.44	2.13	2.14	2.39	2.20	2.05	2.19
70	2.47	2.59	2.41	2.69	2.81	2.53	2.53	2.76	2.59	2.45	2.54
80	2.89	2.99	2.82	3.08	3.20	2.94	2.92	3.13	2.99	2.85	2.94
90	3.32	3.40	3.23	3.48	3.58	3.35	3.32	3.50	3.40	3.26	3.34
100	3.74	3.83	3.65	3.89	3.97	3.77	3.72	3.89	3.81	3.68	3.75
110	4.16	4.25	4.07	4.31	4.38	4.18	4.13	4.28	4.22	4.10	4.17
120	4.58	4.67	4.50	4.73	4.79	4.59	4.55	4.69	4.64	4.52	4.58
130	5.00	5.09	4.92	5.16	5.20	5.01	4.97	5.10	5.05	4.94	5.00
140	5.42	5.51	5.34	5.57	5.61	5.42	5.39	5.51	5.48	5.36	5.42

ตารางที่ ข-6 ผลการทดลองหาอัตราเร็วเฉลี่ยที่ระยะทางทุกระยะ 10 cm ของโลหะทรงกลม
ที่เคลื่อนที่ในน้ำมันหนืด โดยใช้วิธีการจับเวลา

ระยะทาง S (cm)	อัตราเร็วเฉลี่ย (m/s)										
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₈	V ₉	V ₁₀	V _{เฉลี่ย}
10	0.781	0.338	0.952	0.213	0.162	0.427	0.334	0.156	0.268	0.610	0.424
20	0.195	0.272	0.272	0.282	0.287	0.272	0.278	0.290	0.285	0.272	0.271
30	0.303	0.266	0.267	0.278	0.280	0.270	0.277	0.287	0.281	0.269	0.278
40	0.341	0.267	0.184	0.271	0.271	0.265	0.271	0.285	0.274	0.266	0.270
50	0.251	0.260	0.426	0.267	0.270	0.262	0.267	0.284	0.269	0.262	0.282
60	0.248	0.253	0.258	0.264	0.266	0.253	0.263	0.279	0.261	0.256	0.260
70	0.244	0.251	0.253	0.260	0.267	0.246	0.259	0.275	0.254	0.253	0.256
80	0.238	0.249	0.244	0.256	0.262	0.248	0.256	0.267	0.251	0.248	0.252
90	0.237	0.243	0.241	0.250	0.262	0.242	0.249	0.270	0.246	0.242	0.248
100	0.238	0.235	0.238	0.243	0.255	0.240	0.251	0.260	0.244	0.241	0.245
110	0.238	0.235	0.239	0.238	0.246	0.244	0.243	0.253	0.244	0.239	0.242
120	0.238	0.239	0.234	0.239	0.243	0.240	0.240	0.246	0.239	0.238	0.240
130	0.238	0.240	0.238	0.237	0.245	0.240	0.238	0.244	0.240	0.237	0.240
140	0.237	0.237	0.239	0.241	0.241	0.244	0.238	0.243	0.235	0.238	0.239

ภาคผนวก ค

การคำนวณหาความหนืดของกลีเซอริน น้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู โดยวิธีการวิเคราะห์
ภาพวิดีโอดิจิทัลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker และวิธีการจับเวลา

สำหรับการคำนวณหาความหนืดของกลีเซอริน น้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล และวิธีการจับเวลา จะต้องมีกรเตรียมข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผล ดังนี้

1. ใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะทรงกลม โดยทำการวัดเป็นจำนวน 3 ครั้ง แล้วคำนวณหารัศมีเฉลี่ย (r) และคำนวณหาปริมาตรของโลหะทรงกลม (V) ด้วยสมการ $V = \frac{4}{3} \pi r^3$

2. นำโลหะทรงกลมและของเหลว ได้แก่ น้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู ซึ่งหาค่ามวล โดยทำการชั่งด้วยเครื่องชั่ง เป็นจำนวน 3 ครั้งแล้วหาค่ามวลเฉลี่ย (m) นำมวลและปริมาตร (V) ที่ได้จากข้อ 1 คำนวณหาความหนาแน่นของโลหะทรงกลมและความหนาแน่นของของเหลว (ρ) ด้วยสมการ $\rho = \frac{m}{V}$

3. ในการคำนวณหาความหนืดของกลีเซอริน จะกำหนดให้ความหนาแน่นของกลีเซอรินที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 1258 kg/m^3 และความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก มีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2

ตารางที่ ค-1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและมวลของโลหะทรงกลม

ครั้งที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	รัศมี (mm)	มวล (g)
1	7.76	3.88	1.97
2	7.80	3.90	1.99
3	7.80	3.90	1.98
เฉลี่ย	7.79	3.89	1.98

คำนวณหาปริมาตรของโลหะทรงกลม มีค่าเท่ากับ $2.466 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ และความหนาแน่นของโลหะทรงกลม มีค่าเท่ากับ 8029.2 kg/m^3

ตารางที่ ค-2 มวล ปริมาตร และความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู

ครั้งที่	น้ำมันปาล์ม		น้ำมันหมู	
	มวล(g)	ปริมาตร (cm ³)	มวล(g)	ปริมาตร (cm ³)
1	190.0	200	173.7	200
2	190.1	200	173.7	200
3	190.0	200	173.6	200
เฉลี่ย	190.03	200	173.67	200
ความหนาแน่นของของเหลว	950.17 kg/m ³		868.33 kg/m ³	

การหาความหนืดของกลีเซอริน น้ำมันปาล์ม และน้ำมันหมู โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Tracker และใช้วิธีการจับเวลา

จากสมการที่ 13 คำนวณหาความหนืดได้ดังตารางที่ ค-3 โดยกำหนดให้

ค่ารัศมีของท่อ (R) มีค่าเท่ากับ 4 cm

ค่ารัศมีของโลหะทรงกลม (r) มีค่าเท่ากับ 3.89 mm

ค่าความหนาแน่นของโลหะทรงกลม (ρ) มีค่าเท่ากับ 8,029.2 kg/m³

ค่าความหนาแน่นของกลีเซอริน (ρ_1) ที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าเท่ากับ 1258 kg/m³

ค่าความหนาแน่นของน้ำมันปาล์ม (ρ_1) ที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าเท่ากับ 950.17 kg/m³

ค่าความหนาแน่นของน้ำมันหมู (ρ_1) ที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าเท่ากับ 868.33 kg/m³

ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (g) มีค่าเท่ากับ 9.81 m/s²

ตารางที่ ค-3 ความหนืดของกลีเซอริน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ ความเร็วสูง ที่อุณหภูมิ 25 °C

วิธีการวิเคราะห์	ความหนืดของกลีเซอริน (Ns/m ²)
โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS	0.944
โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 720 HS	0.938
โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 1080 HS	1.035

ตารางที่ ค-4 ความหนืดของของเหลว โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์
ความเร็วสูง 480 HS และวิธีการจับเวลา ที่อุณหภูมิ 25 °C

ของเหลว	ความหนืด (Ns/m ²)	
	วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล โหมดภาพยนตร์ความเร็วสูง 480 HS	วิธีการจับเวลา
กลีเซอริน	0.944	0.991
น้ำมันปาล์ม	0.077	0.106
น้ำมันหมู	-	0.789

ภาคผนวก ง

ความหนืดมาตรฐานของกลีเซอริน และ ผลการวิเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะทาง
กายภาพของตัวอย่างน้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู ที่อุณหภูมิ 25°C

ตารางที่ ง-1 ความหนืดของกลีเซอรินที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Gilmont, 2002)

อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	ความหนืด ($\times 10^{-3} \text{Ns/m}^2$)
0	12,100
6	6,260
15	2,330
20	1,490
25	954
30	629

จากตารางที่ ง-1 เป็นความหนืดมาตรฐานของกลีเซอริน ที่อ้างอิงมาจากหนังสือ Viscosity Correlations for Flowmeter Calculations ส่วนความหนืดมาตรฐานของน้ำมันปาล์มและน้ำมันหมู เป็นค่าที่ได้จากการส่งตัวอย่างของเหลวปริมาณ 200 cm^3 ไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพหาความหนืดที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เครื่องมือวัดความหนืด HAAKE VT500 ที่สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สวท.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยความหนืดมาตรฐานของน้ำมันปาล์ม มีค่าเท่ากับ 0.054 Ns/m^2 และ ความหนืดมาตรฐานของน้ำมันหมู มีค่าเท่ากับ 0.933 Ns/m^2



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
โทรศัพท์ 0-2470-9671-3, 0-2470-9664-7 โทรสาร 0-2428-3374 <http://www.kmutt.ac.th>

ที่ ศธ 5810/5858609

13 สิงหาคม 2558

เรื่อง แจ้งผลการวิเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำมันปาล์มและน้ำมันจากสัตว์จำนวน 2 ตัวอย่าง


เรียน คุณรัชดา สุขพันธุ์ (โรงเรียนระโนดวิทยา จังหวัดสงขลา)


สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ทำการวิเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำมันปาล์มและน้ำมันจากสัตว์ จำนวน 2 ตัวอย่าง เสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยทำการวิเคราะห์/ทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D 445 ดังรายงานผลใน เอกสารแนบท้าย

ลำดับที่	รายการวิเคราะห์และทดสอบ	หน่วย	ผลการทดสอบ
1.	น้ำมันปาล์ม ตราไฮโย	N*s/m ²	0.054
2.	น้ำมันจากสัตว์ (หมู)	N*s/m ²	0.933


จึงเรียนมาเพื่อทราบ

ขอแสดงความนับถือ


(น.ส.ปณิชา สุทธิชัยจรต)
ผู้วิเคราะห์/นักวิทยาศาสตร์


(ผศ.นิตี บุรณจันทร์)
ผู้อำนวยการ

สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี


(นายอ่อนสา นนท์พะละ)
หัวหน้าห้องปฏิบัติการทดสอบ