

การพัฒนากระบวนการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองเรื่องความหนืดของน้ำมันปาล์ม

วิชชุดา สุขนัย และ รัชนิวรรณ ศิริ*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

*อีเมลของผู้ประพันธ์บทความ: ratchaneewan.s@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการทดลองและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับศึกษาความหนืดของน้ำมันปาล์ม โดยพิจารณาปัจจัยด้านอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าความหนืด รวมถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในการวิเคราะห์ผลการทดลองผ่านเทคนิควิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลองกับอุณหภูมิ เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความหนืด ณ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง การดำเนินการทดลองประกอบด้วยการศึกษาผลของความหนืดต่อการไหลของน้ำมันปาล์มและการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมในของเหลว โดยใช้สองวิธีในการหาค่าความหนืดของน้ำมันปาล์ม ได้แก่ (1) การวิเคราะห์การไหลของน้ำมันปาล์มผ่านหลอดแก้ว และ (2) การศึกษาการจมของวัตถุทรงกลมในน้ำมันปาล์ม ผลการวิจัยพบว่า กระบวนการทดลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้หาค่าความหนืดของน้ำมันปาล์มได้อย่างแม่นยำ สะท้อนให้เห็นว่ากระบวนการทดลองและการวิเคราะห์ผลที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนปฏิบัติการฟิสิกส์ได้

คำสำคัญ: ความหนืด, น้ำมันปาล์ม, โปรแกรม Tracker, การทดลอง

Development of Experimental Processes and Data Analysis Methods for Investigating Palm Oil Viscosity

Vitchuda Suknui and Ratchaneewan Siri*

*Division of Physical Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University,
Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand*

*Corresponding author's e-mail: ratchaneewan.s@psu.ac.th

Abstract

This study aims to develop an experimental process and analysis method for investigating the viscosity of palm oil, focusing on the effect of temperature. The research integrates technology into data analysis by employing video analysis techniques using the Tracker program. The researcher examines the relationship between the viscosity of palm oil and temperature to determine the viscosity at the specific experimental temperature and compare it with the experimental results. The experiment investigates the influence of viscosity on fluid flow and the motion of spherical objects in palm oil. Additionally, the viscosity of palm oil was determined using two methods: (1) analyzing the palm oil flow through a glass tube and (2) observing the terminal velocity of a sinking spherical object in the palm oil. The results demonstrate that the developed experimental method accurately determines the viscosity of palm oil. This indicates that the developed experimental and analytical methods are suitable and can be applied in a physics laboratory.

Keywords: Viscosity, Palm oil, Tracker, Experiment

บทนำ

คุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญของของไหลคือ ความหนืด ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการศึกษาฟิสิกส์ของของไหลสำหรับนักศึกษา ความหนืดของของไหลมีประโยชน์หลายด้าน เช่น การหล่อลื่นในเครื่องจักร การผลิตอาหารและเครื่องดื่ม การควบคุมการไหลของของเหลวในระบบต่างๆ เครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์ดูแลร่างกาย การขนส่งน้ำมันและก๊าซ อุตสาหกรรมยา การควบคุมการไหลของเลือดในร่างกาย การออกแบบผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการศึกษาเรื่องความหนืดของของไหลจึงมีประโยชน์ทั้งในด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ และความหนืดของของเหลวมีความสำคัญอย่างยิ่งในชีวิตประจำวัน ซึ่งการดำเนินการเกี่ยวกับกระบวนการจัดการเรียนการสอนเพื่อให้บรรลุเป้าหมายให้ผู้เรียนได้เกิดความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีและหลักการ การทดลองในห้องปฏิบัติการ (laboratory experiment) นับเป็นกิจกรรมการเรียนรู้ที่มีความสำคัญและขาดไม่ได้เพราะเป็นกิจกรรมที่ทำให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้อย่างมากขึ้น ฝึกทักษะการใช้เครื่องมือ ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ และเข้าใจธรรมชาติการเรียนรู้ทางวิทยาศาสตร์มากขึ้น ในการปรับปรุงบทเรียนการทดลองในห้องปฏิบัติการนั้นสามารถทำได้ 2 ส่วนหลักๆ คือ การปรับปรุงตัวกิจกรรมให้มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิม ส่วนที่สอง คือ การปรับปรุงเนื้อหาให้มีความทันสมัยใช้เทคโนโลยีใหม่ๆ มาประยุกต์ใช้ในกิจกรรมเรียนรู้และเลือกใช้อุปกรณ์หรือสื่อที่อยู่ในชีวิตประจำวันมาใช้ในการทดลอง การนำสิ่งที่อยู่รอบตัวมาใช้ในการจัดการเรียนรู้นั้นมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่จะทำให้ผู้เรียนสนใจและเห็นความสำคัญของการเรียนวิทยาศาสตร์ (ภิรมย์ เชนประโคน, 2561)

หลักสูตรฟิสิกส์ สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ มีการจัดการเรียนการสอนรายวิชาปฏิบัติการกลศาสตร์และแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 ซึ่งในรายวิชานี้ได้กำหนดผลการเรียนรู้ที่คาดหวังของหัวข้อความหนืดของของเหลว โดยวัตถุประสงค์ให้นักศึกษา ศึกษาผลของความหนืดที่มีต่อการไหลของของเหลว การเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมในของเหลว และหาความหนืดของน้ำมันปาล์ม การที่จะให้นักศึกษามีความเข้าใจผลของความหนืดที่มีต่อการไหลของของเหลว การหาค่าความหนืดของน้ำมันปาล์มและทำให้การจัดการเรียนการสอนบรรลุวัตถุประสงค์นั้นจำเป็นต้องมีกระบวนการทดลองทางวิทยาศาสตร์ที่ดี ที่ทำให้นักศึกษาเข้าใจทฤษฎี หลักการ มีทักษะกระบวนการปฏิบัติการฟิสิกส์ที่ดีขึ้น การนำเทคโนโลยีมาช่วยในการเรียนการสอนเพื่อช่วยพัฒนาคุณภาพการศึกษาและการจัดการเรียนการสอนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ผู้เรียนสามารถเรียนรู้ได้อย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงขึ้นกว่าเดิม ตอบสนองต่อเป้าหมายของการจัดการศึกษาเป็นตัวเลือกหนึ่งในการเพิ่มผลการเรียนรู้ในการเรียนฟิสิกส์

ในการเรียนรายวิชาปฏิบัติการกลศาสตร์และแม่เหล็กไฟฟ้า ประเด็นที่สำคัญของการทดลองเรื่องความหนืดของของเหลวกระบวนการทดลองก่อนหน้านี้มีปัญหาการหาค่าความหนืดของน้ำมันปาล์มมาเปรียบเทียบเนื่องจากความหนืดของน้ำมันปาล์มแต่ละยี่ห้อีค่าต่างกัน ที่หลากหลายไม่มีค่าระบุไว้ และตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความหนืด คือ อุณหภูมิ (Temperature) ของเหลวที่มีอุณหภูมิสูงความหนืดลดลง เพราะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลลดลง เนื่องจากอุณหภูมิซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อของเหลว (สุนทร สุทธิบาท, 2563) ทำให้มีจุดบกพร่องในการวิเคราะห์ผลการทดลอง และคำนึงถึงการนำเทคโนโลยีมาช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลองได้แม่นยำขึ้น ในการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์เทคนิคการวิเคราะห์วิดีโอใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งโปรแกรม Tracker เป็นโปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอที่นิยมใช้ในการทดลองฟิสิกส์ สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุ คำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง

วาดกราฟการเคลื่อนที่ ในงานวิจัยเรื่องการพัฒนา รูปแบบการเรียนการสอนปฏิบัติการการเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์ โดยใช้รูปแบบห้องเรียนกลับด้านในชีวิตวิถีใหม่ สำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ใช้เทคนิควิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker ในการเรียนการสอนปฏิบัติการฟิสิกส์ พบว่าความก้าวหน้าทางการเรียนของนักศึกษาอยู่ในระดับกลาง (วิชชุดา สุขนัย และ รัชนิวรรณ ศิริ, 2566) และในงานวิจัยเรื่องการศึกษาการชนกันของวัตถุในของเหลวด้วยโปรแกรม Tracker สำหรับการสอนวิชาฟิสิกส์ในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย พบว่า ความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ก่อนและหลังชนของลูกเหล็กในน้ำเชื่อมและน้ำมันปาล์มแปรผันตรงกับค่าความหนืดเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและกฎการอนุรักษ์พลังงาน (จันจิรา มีภิปราย และคณะ, 2566) งานวิจัยนี้ผู้วิจัยพัฒนากระบวนการทดลองและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับศึกษาความหนืดของของเหลว โดยพิจารณาปัจจัยด้านอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าความหนืด รวมถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในการวิเคราะห์ผลการทดลองผ่านเทคนิควิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker เพื่อให้นักศึกษาเรียนรู้และทดลองวิเคราะห์ผลการทดลองอย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อพัฒนากระบวนการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองเรื่องความหนืดของน้ำมันปาล์ม สามารถนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ได้

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนากระบวนการทดลอง และพัฒนาการวิเคราะห์ข้อมูล โดยนำเทคนิควิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker โดยแบ่งออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 หาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆจากการไหลของของเหลวผ่านหลอดแก้ว

ตอนที่ 2 การหาความหนืดจากการจมของวัตถุทรงกลมในของเหลว

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

การไหลของของเหลวผ่านหลอดแก้ว

การไหลของของเหลวผ่านหลอดแก้ว เป็นผลมาจากความดันที่ต่างกันระหว่างปลายหลอดแก้ว ความดันที่ปลายด้านในของหลอดมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศรวมกับความดันเนื่องจากมวลของของเหลว ในขณะที่ความดันปลายหลอดแก้วมีเพียงความดันบรรยากาศ ผลต่างของความดันระหว่างปลายทั้งสอง (ΔP) และสำหรับการไหลของของเหลวผ่านหลอดแก้วที่มีรัศมี (r) น้อยกว่าความยาวของหลอดแก้ว (l) มากๆ ของเหลวที่ไหลผ่านหลอดจะมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร ($Q = dV/dt$) ซึ่งคือปริมาตรของของเหลวที่ไหลผ่านหลอดไปในหนึ่งหน่วยเวลา เป็นไปตามสมการฮาเกน-ปัวเซิลเย (Hagen-Poiseuille equation) ดังสมการ

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8\eta l} \quad (1)$$

เมื่อ η คือ ความหนืดของของเหลว มีหน่วยเป็น นิวตัน.วินาทีต่อตารางเมตร (N.s/m²) หรือพาสคาล.วินาที (Pa.s) (ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, 2563) และแทนค่า $\Delta P = \rho gh$ ลงในสมการที่ 1 ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q = \frac{\pi \rho g r^4 h}{8\eta l} \quad (2)$$

การจมของวัตถุในของเหลว

เมื่อปล่อยให้วัตถุทรงกลมเคลื่อนที่ในของเหลวภายใต้แรงดึงดูดของโลก วัตถุจะเคลื่อนที่ตกลงมา โดยมีแรงที่กระทำต่อวัตถุ 3 แรง คือ แรง/น้ำหนักของวัตถุ ($F_g = mg$) แรงลอยตัว ($F_b = \rho' V g$) และแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลว ($F_v = kv$) กรณีที่วัตถุเป็นทรงกลมเคลื่อนที่ในของเหลว ค่า $k = 6\pi\eta r$ จะได้แรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุตามกฎของสโตกส์ (Stokes law) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$F_v = 6\pi\eta r v \quad (3)$$

เมื่อ η คือ ความหนืดของของเหลว และ r รัศมีของวัตถุทรงกลม มีหน่วยเป็น เมตร (m)

ในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ในของเหลว วัตถุทรงกลมจะเคลื่อนที่ตกลงมาด้วยความเร่ง ตามสมการที่ (4) ต่อมาแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดความเร็วที่เพิ่มขึ้นจนทำให้ความเร่งลดลงเป็นศูนย์ นั่นคือ วัตถุทรงกลมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ที่เรียกว่า ความเร็วปลาย (v_t) เมื่อแทนค่า F_g, F_b, F_v สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (5)

$$F_g - F_b - F_v = ma \quad (4)$$

$$v_t = \frac{2(\rho - \rho')g}{9\eta} r^2 \quad (5)$$

เมื่อ ρ, ρ' คือ ความหนาแน่นของวัตถุทรงกลมและความหนาแน่นของของเหลว ตามลำดับ มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m³) (อภินิหารรัตน์ ชันแก้ว และคณะ, 2565) จากความสัมพันธ์สมการข้างต้น ใช้ได้ก็ต่อเมื่อของเหลวไม่มีขอบเขตจำกัด แต่ในการทดลองของเหลวที่ใช้อยู่ในกระบอกตวงที่มีขนาดจำกัด ดังนั้นการคำนวณความหนืดใหม่ จึงจำเป็นต้องมีรัศมีของกระบอกตวง (R) ที่ใช้ในการทดลองเพิ่มเข้ามา (รัชดา สุขพันธุ์, 2558) ค่าความหนืดที่ปรับแก้ (η') สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta' = \eta \left[1 - 2.104 \left(\frac{r}{R} \right) + 2.09 \left(\frac{r}{R} \right)^3 - 0.95 \left(\frac{r}{R} \right)^5 \right] \quad (6)$$

ในกรณีที่ภาชนะไม่ได้มีขนาดเป็นอนันต์ ผลของการมีผนังหลอดจะทำให้เกิดแรงต่อวัตถุทรงกลมในทิศสวนทางกับการเคลื่อนที่ ซึ่งจะเป็เหตุให้วัตถุทรงกลมตกด้วยอัตราเร็วที่น้อยลง แรงเนื่องจากผนังหลอดสามารถรวมกับแรงต้านเนื่องจากความหนืดได้ โดยคิดเสมือนว่าไม่มีผนังหลอด แต่ของเหลวมีความหนืดเพิ่มขึ้น $k(\lambda)$ เท่า ซึ่งเรียกว่าความหนืดยังผล (η_{eff}) แรงต้านเนื่องจากความหนืดยังผลมีค่าเป็น $F_v^{(w)} = 6\pi\eta_{eff}rv$ เมื่อ $\eta_{eff} = k(\lambda)\eta$, $k(\lambda)$ คือ พจน์ที่แสดงถึงอิทธิพลของผนังหลอดซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วน $\lambda = \frac{r}{R} = \frac{d}{D}$ ($0 < \frac{r}{R} < 1$) เมื่อ d และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมและภาชนะทรงกระบอก (หทัยชนก เพ็ชรมาตศรี และคณะ, 2556) ตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$k(\lambda) = \left[\frac{1 - 2.105\lambda + 2.0865\lambda^3 - 1.7068\lambda^5 + 0.72603\lambda^6}{1 - 0.75857\lambda^5} \right]^{-1} \quad (7)$$

อุปกรณ์และโปรแกรมในการทําวิจัย

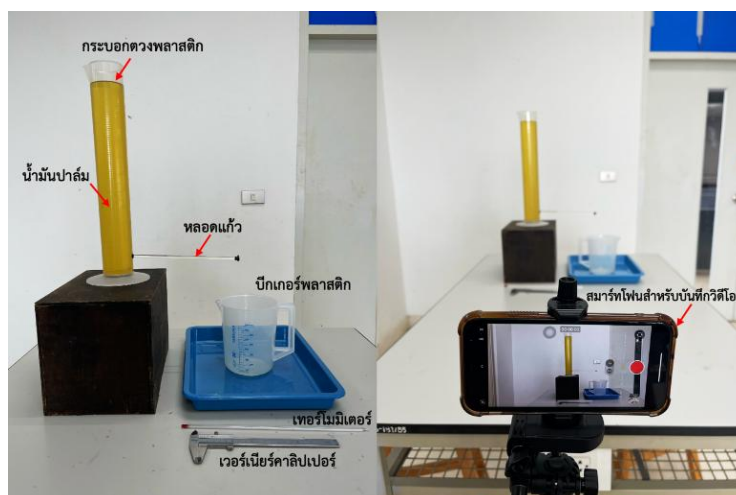
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ กระจกบอทวงพลาสติก หลอดแก้ว ปีกเกอร์พลาสติก กระจกบอทวงแก้ว น้ำมันปาล์มตราโบน์ส ลูกบิดพลาสติกทรงกลม เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ เทอร์โมมิเตอร์ ฉากสีทึบ ปากคีบ สมาร์ทโฟนสำหรับบันทึกวิดีโอ และโปรแกรม Tracker

ตอนที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆจากการไหลของของเหลวผ่านหลอดแก้ว

ตอนที่ 1.1 หาสมการถดถอยแบบพหุนามของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆ

ผู้วิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำมันปาล์มกับอุณหภูมิ โดยทดลองหาความหนืดที่อุณหภูมิ 21.0, 23.0, 25.5, 27.0, 30.0 องศาเซลเซียส โดยการนำน้ำมันปาล์มวางไว้ในห้องปฏิบัติการ ขณะไม่เปิดเครื่องปรับอากาศ อุณหภูมิของน้ำมันปาล์มสูงขึ้นตามอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มขณะทำการทดลองทุกๆ 10 นาทีและหาค่าเฉลี่ย หลังจากนั้นเปิดเครื่องปรับอากาศจนอุณหภูมิน้ำมันปาล์มลดลงตามอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ขั้นแรกหาความหนาแน่นของน้ำมันปาล์ม ซึ่งน้ำหนักกระจกบอทวงเปล่า เติมน้ำมันปาล์มลงในกระจกบอทวงให้ได้ปริมาตรที่แน่นอน ซึ่งน้ำหนักกระจกบอทวงพร้อมน้ำมันปาล์มและคำนวณหาความหนาแน่นของน้ำมันปาล์ม จากนั้นหาความหนืดของน้ำมันปาล์มจากการไหลของของเหลวผ่านหลอดแก้ว ใช้วิธีการปล่อยให้ของเหลวไหลออกจากหลอดแก้วอย่างต่อเนื่อง บันทึกเวลาขณะผิวของของเหลวผ่านที่ระดับความสูงต่างๆ พิจารณาปริมาตรของของเหลวที่ไหลผ่านหลอดเมื่อเวลาผ่านไป $V = A(h - h_0)$ เมื่อ h_0 เป็นความสูงเริ่มต้นของของเหลว จากสมการอัตราการไหลเชิงปริมาตร และสมการที่ (2) จะได้ $Q = \frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt} [A(h - h_0)] = \frac{\pi r^4 h}{8\eta l}$ จัดรูปสมการใหม่ $\frac{dh}{dt} = -\frac{\pi r^4 h}{8\eta l A}$ ให้พจน์ $\frac{\pi r^4}{8\eta l A} = \gamma$ ได้สมการ $\frac{dh}{dt} = -\gamma h$ อินทิเกรตหาสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งได้ความสัมพันธ์ระหว่างความสูง h กับเวลา t เป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล $h = h_0 e^{-\gamma t}$ จัดสมการให้อยู่ในรูปล็อกฐาน

e จะได้ $\ln h = -\gamma t + \ln h_0$ ในงานวิจัยนี้ใช้สมการข้างต้นในการวิเคราะห์ผลการทดลองหาค่าความหนืดของของเหลว ในการทดลองใช้กระบอกตวงพลาสติกขนาด 1,000 mL เจาะรูสำหรับใส่หลอดแก้วบนกระบอกตวงพลาสติก อุดปลายหลอดแก้ว แล้วค่อยๆ เทน้ำมันปาล์มลงในกระบอกตวงปริมาตร 1,000 mL พร้อมทั้งใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มภายในกระบอกตวง ทำการทดลองเริ่มจากดึงจุกที่ปลายหลอดแก้วให้น้ำมันปาล์มไหลออก แล้วรอจนผิวด้านบนของน้ำมันปาล์มลดลงอยู่ในระดับความสูงที่ต้องการ บันทึกภาพเคลื่อนไหวของน้ำมันปาล์มด้วยสมาร์ตโฟน วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Tracker ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ หาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงของผิวน้ำมันปาล์มกับเวลา นำสมการความสัมพันธ์วิเคราะห์หาค่าความหนืด หลังจากได้ค่าความหนืดที่อุณหภูมิต่างๆ นำข้อมูลที่ได้นำมาสมการถดถอยแบบพหุนามของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ชุดการทดลองการหาความหนืดจากการไหลของของเหลวผ่านหลอดแก้ว

ตอนที่ 1.2 ทดสอบสมการถดถอยแบบพหุนามของน้ำมันปาล์ม

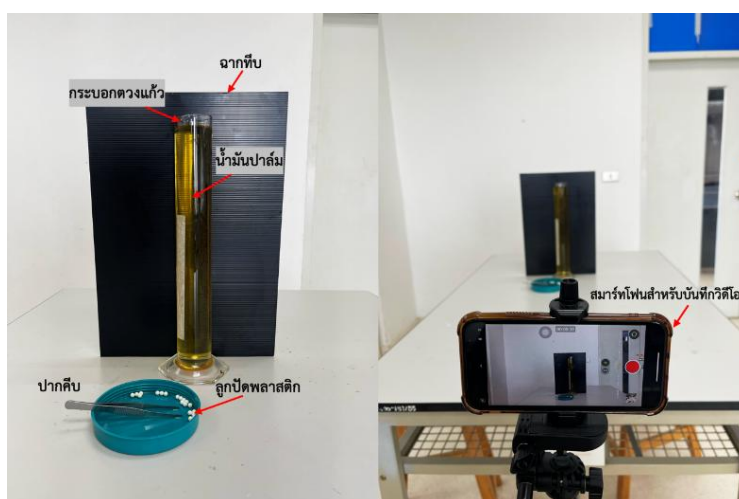
บันทึกอุณหภูมิ ณ วันทำการทดลอง นำอุณหภูมิแทนค่าในสมการถดถอยแบบพหุนามของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อหาค่าความหนืด ณ วันทำการทดลอง จากนั้นทำการทดลองเหมือนตอนที่ 1 หาค่าความหนืดจากการไหลของของเหลวผ่านหลอดแก้ว และเปรียบเทียบกับค่าความหนืดที่ได้จากสมการถดถอย

ตอนที่ 2 การหาความหนืดจากการจมของวัตถุทรงกลมขนาดต่างๆในของเหลว

ในการทดลองนี้หาความหนืดของน้ำมันปาล์มจากการจมของลูกปัดพลาสติกทรงกลม จากความเร็วปลายของลูกปัดพลาสติกทรงกลมขณะจมลงในของเหลว พิจารณาการเคลื่อนที่ของลูกปัดพลาสติกทรงกลมในของเหลวตามกฎข้อที่สองของนิวตัน ตามสมการที่ (4) แทนค่า $F_g, F_b, F_v, m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$ และ $a = \frac{dv}{dt}$ ลงในสมการ จัดรูปได้สมการ $\frac{dv}{dt} = \left(\frac{\rho - \rho'}{\rho}\right)g - \frac{9\eta}{2\rho r^2}v$ ให้ $\alpha = \left(\frac{\rho - \rho'}{\rho}\right)g, \beta = \frac{9\eta}{2\rho r^2}$ ดังนั้นสมการความเร่งของลูกปัดพลาสติกทรงกลมเป็น $\frac{dv}{dt} = \alpha - \beta v$ อินทิเกรตหาสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งได้ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว v กับเวลา t เป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล $v = \frac{\alpha}{\beta}(1 - e^{-\beta t})$ และ $v_t = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{2(\rho - \rho')gr^2}{9\eta}$ จะได้ $v = v_t(1 - e^{-\beta t})$ จัดรูป

$v = \frac{ds}{dt} = v_t(1 - e^{-\beta t})$ อินทิเกรตหาสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งได้ ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง s กับเวลา t จะได้ $s = v_t t - \frac{v_t}{\beta}(1 - e^{-\beta t})$ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นพจน์ $e^{-\beta t}$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่าง s กับ t เป็นสมการเส้นตรง $s = v_t t - \frac{v_t}{\beta}$ ความชันของกราฟคือความเร็วปลาย ในงานวิจัยนี้ใช้สมการข้างต้นในการวิเคราะห์ผลการทดลองหาค่าความหนืดของของเหลว

ในการทดลองทำการบันทึกภาพเคลื่อนไหวของลูกปัดพลาสติกทรงกลมขณะจมลงด้วยสมาร์ทโฟน หาดำแหน่งของลูกปัดพลาสติกทรงกลมที่เวลาต่างๆด้วยโปรแกรม Tracker หลังจากทราบตำแหน่งของลูกปัดพลาสติกทรงกลมที่เวลาต่างๆ หาระยะทางจากจุดปล่อย พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา หลังจากเริ่มปล่อย ชุดการทดลองแสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งหาความหนืด จากการวิเคราะห์หาความเร็วปลายของลูกปัดพลาสติกทรงกลม คำนวณค่าความหนืดที่ทดลองได้ จากสมการ $s = v_t t - \frac{v_t}{\beta}$ และ $\beta = \frac{9\eta}{2\rho r^2}$ ปรับแก้ความหนืดด้วยสมการที่ (6) วิเคราะห์ขนาดลูกปัดพลาสติกทรงกลมและอิทธิพลของผนังหลอดที่มีผลต่อการหาความหนืดโดยพิจารณาค่า λ ในการทดลองบันทึกอุณหภูมิของน้ำมันปาล์ม ณ วันทำการทดลอง



ภาพที่ 2 ชุดการทดลองการหาความหนืดจากการจมของวัตถุในของเหลว

ผลการวิจัย

ตอนที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆจากการไหลของของเหลวผ่านหลอดแก้ว

ตอนที่ 1.1 หาสมการถดถอยแบบพหุนามของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆ

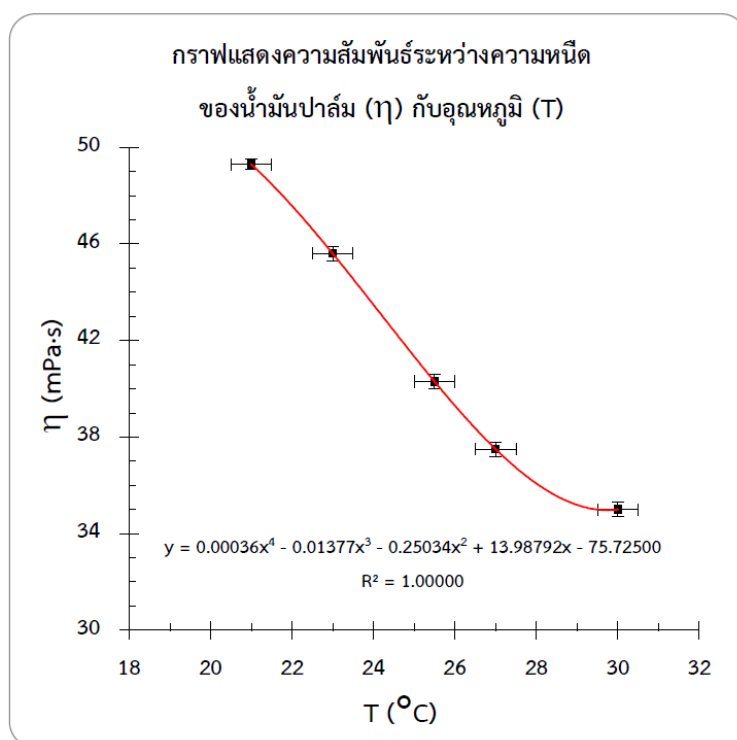
ผู้วิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำมันปาล์มกับอุณหภูมิ โดยทดลองหาความหนืดที่อุณหภูมิต่างๆ จากวิดีโอการไหลของน้ำมันปาล์มผ่านหลอดแก้ว วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Tracker ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความสูง h กับเวลา t เป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln h$ กับเวลา t เทียบสมการเส้นตรง $\ln h = -\gamma t + \ln h_0$ นำค่าความชัน (ความชัน = $-\gamma$) จากกราฟที่อุณหภูมิ 21.0, 23.0, 25.5, 27.0, 30.0 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นน้ำมันปาล์ม $912 \pm 2, 909 \pm 2, 906 \pm 2, 903 \pm 2, 899 \pm 2 \text{ kg/m}^3$ ตามลำดับเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกตวง 6.30 cm พื้นที่หน้าตัดกระบอกตวง 31.17 cm^2 เส้นผ่านศูนย์กลาง

หลอดแก้ว 3.45 mm และความยาวหลอดแก้ว 21.20 cm แทนในสมการ $\gamma = \frac{\pi \rho r^4}{8\eta LA}$ คำนวณค่าความหนืดได้ข้อมูลดังตารางที่ 1 หาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำมันปาล์มกับอุณหภูมิ ทำได้โดยฟิตข้อมูล ด้วยการถดถอยแบบพหุนาม (polynomial regression) แสดงดังสมการ

$$\eta = 0.00036T^4 - 0.01377T^3 - 0.25034T^2 + 13.98792T - 75.72500 \quad (8)$$

ตารางที่ 1 ความหนืดของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆ

T (°C)	η (mPa.s)
30.0 ± 0.5	35.0 ± 0.2
27.0 ± 0.5	37.5 ± 0.3
25.5 ± 0.5	40.3 ± 0.3
23.0 ± 0.5	45.6 ± 0.3
21.0 ± 0.5	49.3 ± 0.3

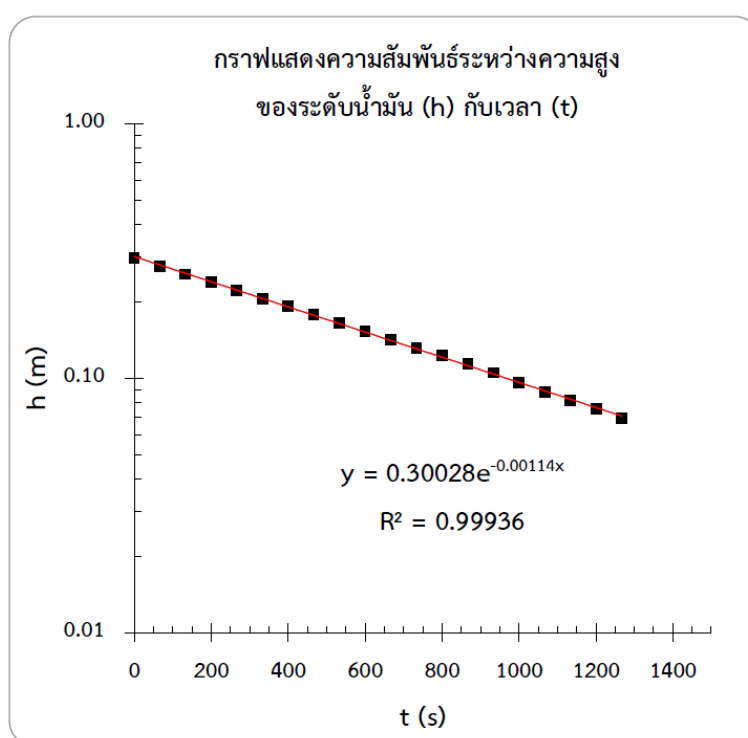


ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำมันปาล์มกับอุณหภูมิ

จากสมการที่ (8) แสดงให้เห็นว่า สามารถหาความหนืดของน้ำมันปาล์ม ณ อุณหภูมิ วันทำการทดลองได้ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับความหนืดที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1.2 และ ตอนที่ 2

ตอนที่ 1.2 ทดสอบสมการถดถอยแบบพหุนามของน้ำมันปาล์ม

อุณหภูมิของน้ำมันปาล์ม ณ วันทำการทดลอง เท่ากับ 25.5 องศาเซลเซียส เมื่อแทนในสมการที่ (8) ค่าความหนืดเท่ากับ 40.3 ± 0.3 mPa·s เพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าความหนืดที่ได้จากการทดลองจริง



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของระดับน้ำมันกับเวลา

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln h$ กับเวลา t ความชันจากกราฟมีค่าเท่ากับ -0.00114 m/s คำนวณค่าความหนืดได้เท่ากับ 41.0 ± 0.3 mPa·s ซึ่งความหนืดที่ทดลองได้ มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 1.7 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทดลองที่ปรับปรุงขึ้นทำให้การวิเคราะห์ผลการทดลองมีประสิทธิภาพ และค่าความหนืดที่ได้จากการทดลองมีความแม่นยำ

ตอนที่ 2 การหาความหนืดจากการจมของวัตถุทรงกลมในของเหลว

อุณหภูมิของน้ำมันปาล์ม ณ วันทำการทดลอง เท่ากับ 25.5 องศาเซลเซียส ในการทดลองทำการบันทึกภาพเคลื่อนไหวของลูกบิดพลาสติกทรงกลมขณะจมลงด้วยสมาร์ตโฟน หาดำแหน่งของลูกบิดพลาสติกทรงกลมที่เวลาต่างๆ ด้วยโปรแกรม Tracker พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง s กับ t ตามสมการ $s = v_t t - \frac{v_t}{\beta}$ ความชันของกราฟคือความเร็วปลาย วิเคราะห์หาความเร็วปลายของลูกบิดพลาสติกทรงกลมและคำนวณค่าความหนืด ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความหนืดของน้ำมันปาล์มจากการจมของลูกบิดพลาสติกทรงกลมขนาดต่างๆ

ลูกที่	d (mm)	v (m/s ²)	η (mPa.s)	η' (mPa.s)	%diff	$\frac{r}{R}$
1	2.81 ± 0.01	0.00805 ± 0.00002	46 ± 20	46 ± 20	13.2	0.1603
2	3.92 ± 0.01	0.01455 ± 0.00001	44 ± 3	44 ± 3	8.8	0.1196
3	4.84 ± 0.01	0.01964 ± 0.00001	49 ± 4	39 ± 3	3.3	0.1002
4	5.77 ± 0.01	0.02737 ± 0.00003	41 ± 1	41 ± 1	1.7	0.0812
5	7.74 ± 0.01	0.03935 ± 0.0004	45.0 ± 0.9	30.2 ± 0.6	29.3	0.0581

อภิปรายผล

งานวิจัยนี้พัฒนากระบวนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลปฏิบัติการเรื่องความหนืด ผู้วิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆจากการไหลของของเหลวผ่านหลอดแก้ว และจากการจมของวัตถุทรงกลมขนาดต่างๆในของเหลว

การทดลองหาความหนืดที่อุณหภูมิต่างๆ จากวิดีโอการไหลของน้ำมันปาล์มผ่านหลอดแก้ว วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Tracker ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความสูง h กับเวลา t สามารถวิเคราะห์หาค่าความหนืดของน้ำมันปาล์มได้ แสดงผลดังตารางที่ 1 และการทดลองหาความหนืดของน้ำมันปาล์มจากการจมของลูกบิดพลาสติกทรงกลม หาดำแหน่งของลูกบิดพลาสติกทรงกลมที่เวลาต่างๆด้วยโปรแกรม Tracker พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา หลังจากเริ่มปล่อย ซึ่งหาความหนืดจากการวิเคราะห์หาความเร็วปลายของลูกบิดพลาสติกทรงกลมสามารถคำนวณค่าความหนืดได้ ผลดังตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเทคนิควิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนปฏิบัติการเรื่องความหนืดของน้ำมันปาล์มได้ โดยโปรแกรม Tracker สามารถติดตามตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่งของวัตถุในวิดีโอและสามารถส่งออกข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ต่อด้วย Microsoft Excel ช่วยให้การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากวิดีโอได้ง่ายขึ้น ข้อจำกัดในการใช้โปรแกรม Tracker ของเหลวหรือวัตถุที่ใช้ในการทดลองต้องมีสีที่แตกต่างกันเพื่อให้โปรแกรม Tracker ติดตามวัตถุได้ง่ายและแม่นยำ สอดคล้องกับ (นภารัตน์ จิวาลักษณ์ และ วิไลพร ลักษณะิวนิชย์, 2565) ใช้การบันทึกภาพวิดีโอความเร็วสูงด้วยโทรศัพท์เคลื่อนที่และโปรแกรม Tracker ติดตามการผิวน้ำของจุดบนเส้นด้ายกัญชงที่มีความยาวเริ่มต้นต่างกันภายใต้แรงดึงทางเดียว พบว่า สามารถวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของเส้นด้ายได้อย่างชัดเจน

และมีความแม่นยำ และจากความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำมันปาล์มกับอุณหภูมิต่างๆ ได้สมการถดถอยแบบพหุนามตามสมการที่ (8) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความหนืดของน้ำมันปาล์ม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนืดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ (นักสิทธิ์ ปัญญาใหญ่, 2566) งานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ความหนืดและพฤติกรรมการไหลของอาหารแปรรูปไทย พบว่า อาหารแปรรูปไทย 27 ชนิด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียนและนอนนิวโตเนียนทำให้ความหนืดลดลง และสมการถดถอยแบบพหุนาม ใช้หาค่าความหนืดที่อุณหภูมิต่างๆ ทำให้แก้ปัญหาค่าความหนืดของน้ำมันปาล์มที่ใช้เปรียบเทียบในกระบวนการทดลองได้

การหาความหนืดจากการจมของวัตถุทรงกลมขนาดต่างๆ ในของเหลวหาตำแหน่งของลูกบิดพลาสติกทรงกลมที่เวลาต่างๆ วิเคราะห์หาความเร็วปลายของลูกบิดพลาสติกทรงกลมและคำนวณค่าความหนืด ความหนืดที่ปรับแก้แสดงผลดังตารางที่ 2 พิจารณารูปขนาดของลูกบิดพลาสติกทรงกลม ถ้าลูกบิดมีขนาดเล็กเกินไปทำให้ค่าความหนืดที่ได้สูงเกินจริง เนื่องจากมีแรงลอยตัวและแรงต้านผนังมาก แต่สำหรับลูกบิดที่มีขนาดใหญ่เกินไปทำให้ค่าความหนืดที่ได้ต่ำเกินจริง อิทธิพลของผนังลดลงขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนระหว่างรัศมีของลูกบิดพลาสติกทรงกลมกับรัศมีของกระบอกตวงที่ใช้ในการทดลองมีผลโดยตรงต่อความแม่นยำของการคำนวณค่าความหนืด ถ้ารัศมีของลูกบิดพลาสติกทรงกลมเล็กเกินไปทำให้ค่าความหนืดมากเกินจริง ดังข้อมูลของลูกบิดพลาสติกทรงกลม ลูกที่ 1 ถ้ารัศมีของลูกบิดพลาสติกทรงกลมใกล้เคียงกับรัศมีกระบอกตวงมากเกินไปส่งผลให้แรงต้านจากผนังมากมีผลต่อความเร็วปลายทำให้ค่าความหนืดที่ได้สูงเกินจริง แต่ลูกบิดพลาสติกทรงกลมลูกที่ 5 ในตารางที่ 2 มีค่าความหนืดต่ำ สาเหตุอาจเกิดจากลูกบิดตกเร็วเกินจริงและอาจไม่ใช่การไหลแบบลามินาร์ตามกฎของสโตกส์ อัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้ค่าความหนืดที่คำนวณได้มีความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ (หทัยชนก เพ็ชรมาตศรี และคณะ, 2556) ทดลองการตกของวัตถุทรงกลมในของเหลวชนิดนิวโตเนียน ใช้วัตถุทรงกลมและหลอดรูปทรงกระบอกหลายๆ ขนาด พบว่าปัจจัยของอิทธิพลของผนังหลอดมีความสอดคล้องกับหลักการของ ฮาเบอร์แมนและเชรี และจากตารางที่ 2 เมื่อขนาดของลูกบิดพลาสติกทรงกลมมีขนาดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเร็วปลายเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ (อภิสิทธิ์รัตน์ ชันแก้ว และคณะ, 2565) ศึกษาการวัดความเร็วปลายในการตกของโลหะทรงกลมรัศมีแตกต่างกัน 6 ขนาด ในกลีเซอรินโดยใช้ตัวตรวจจับเวลาที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่าความเร็วปลายของโลหะมีค่าเพิ่มขึ้นตามรัศมีของโลหะทรงกลมที่เพิ่มขึ้น วิธีที่เหมาะสมในการหาความหนืดของน้ำมันปาล์มเพื่อให้ได้ค่าแม่นยำ น้ำมันปาล์มที่มีความหนืดต่ำ วิธีที่เหมาะสมสำหรับการหาความหนืดคือการไหลของของเหลวผ่านหลอดแก้ว และสำหรับน้ำมันปาล์มที่มีความหนืดสูงวิธีที่เหมาะสมสำหรับการหาความหนืดคือการจมของวัตถุทรงกลมในของเหลว

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้ จากการพัฒนากระบวนการทดลองและวิเคราะห์ผลในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆ จากการไหลของของเหลวผ่านหลอดแก้ว ได้สมการถดถอยแบบพหุนามของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิต่างๆ แทนค่าอุณหภูมิในสมการถดถอยสามารถหาค่าความหนืด ณ วันทำการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง กระบวนการทดลองที่ปรับปรุงพัฒนาขึ้น โดยคำนึงถึงอุณหภูมิที่ส่งผลต่อความหนืด การนำเทคโนโลยีมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิควิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker สามารถใช้ในการศึกษาความหนืดของของเหลวได้มีความแม่นยำ

ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการทดลองและกระบวนการทดลองที่พัฒนาปรับปรุงขึ้น มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้ในการเรียนการสอนปฏิบัติการฟิสิกส์ได้ จากการพัฒนากระบวนการทดลองและวิเคราะห์ผลการหาความหนืดจากการจมของวัตถุทรงกลมขนาดต่างๆในของเหลว วิเคราะห์หาความเร็วปลายของลูกปัดด้วยเทคนิควิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรม Tracker สามารถคำนวณค่าความหนืดได้ และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนืด

ข้อเสนอแนะการวิจัย

สามารถใช้เทคนิควิเคราะห์วิดีโอความเร็วสูงในการศึกษาการทดลองฟิสิกส์ในหัวข้ออื่นได้ ในการทดลองหาค่าความหนืดควรพิจารณาอุณหภูมิ ณ วันทำการทดลอง กรณีหาความหนืดจากการจมของวัตถุทรงกลมควรพิจารณาอัตราส่วนระหว่างรัศมีของวัตถุทรงกลมกับรัศมีของกระบอกตวงให้เหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา รวิวิวัฒนา ที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และคอยสนับสนุนในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- จันจิรา มีภิปราย, พิชชาภา ทองเสวตร, วิศัลย์ยา นาสะคร, และ สรายุทธ์ พานเทียน. (2566). การศึกษาการชนกันของวัตถุในของเหลวด้วยโปรแกรมแทรคเกอร์สำหรับการสอนวิชาฟิสิกส์ในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย. *วารสาร มรภ.กพ. วิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ และเทคโนโลยี*, 2(2), 143-153.
- นภารัตน์ จิวาลักษณ์ และ วิไลพร ลักษณะมีวานิชย์. (2565). การทดสอบภายใต้แรงดึงทางเดียวด้วยการติดตามภาพวิดีโอบนโทรศัพท์เคลื่อนที่: กรณีศึกษาการผิดรูปของเส้นด้ายกัญชง. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 45(2), 235-245.
- นักสิทธิ์ ปัญโญใหญ่. (2566). การวิเคราะห์ความหนืดและพฤติกรรมการไหลของอาหารแปรรูปไทย. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 28(3), 1600-1619.
- ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์. (2563). *การทดลองเรื่องความหนืดของของเหลว* (น. 35-38). ใน ภาควิชาฟิสิกส์ (บ.ก.). คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐานและฟิสิกส์ชีวภาพ. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ภิรมย์ เชนประโคน. (2561). *พัฒนาการสอนในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ให้ทันสมัยและมีประสิทธิภาพ*. สืบค้นจาก <https://il.mahidol.ac.th/th/newsletter52-article3>
- รัชดา สุขพันธุ์. (2558). *การเปรียบเทียบการหาความหนืดของของเหลว โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัล และวิธีการจับเวลา* (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต). คณะวิทยาศาสตร์: มหาวิทยาลัยบูรพา.
- วิชุดา สุขนุ้ย และ รัชนิวรรณ ศิริ. (2566). *การพัฒนารูปแบบการเรียนการสอนปฏิบัติการการเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์โดยใช้รูปแบบห้องเรียนกลับด้านในชีวิตวิถีใหม่ สำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์* (น. 1045-1056). รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ สำหรับบุคลากรสายสนับสนุนวิชาการในสถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 15. อุดรธานี: มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี.

- สุนทร สุทธิบาก. (2563). *กลศาสตร์ของไหล*. อุตรธานี: คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรธานี.
- หทัยชนก เพ็ชรมาตศรี, ธีณพ นิลกำจร, และ สุพิชญ์ แคมมณี. (2556). เทคนิคการวัดความหนืดโดยอาศัยการตกของวัตถุทรงกลม: บทบาทของอิทธิพลของผนังหลอด. *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 29(2), 131-148.
- อภินิรรัตน์ ชันแก้ว, มนูญชัย ไชยเพชร, วิทยา หลังหลี่, และ พิษญา ทิพย์ศรี. (2565). การวัดความเร็วปลายในการตกของโลหะทรงกลมรัศมีแตกต่างกันในก๊ลิเซอรินโดยใช้ตัวตรวจจับเวลาที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์. *วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 41(2), 1-15.