

การวัดความเร็วปลายในการตกของโลหะทรงกลมรัศมีแตกต่างกันในกลีเซอริน โดยใช้ตัวตรวจจับเวลาที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

Measurement of Terminal Velocity of Various Falling Spherical Metal Balls in Glycerin Using Timer Detectors Controlled by Computer

อภินทรรัตน์ ขันแก้ว^{1*} มนูญชัย ไชยเพศ¹ วิทยา หลั่งหลี่¹ และพิชญา ทิพย์ศรี¹
Aphinrat Khanklaeo^{1*} Mananchai Chaipet¹ Wiraya Langlee¹ and Pitchaya Thipsee¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายถ้อยเสมือนกับรัศมียกกำลังสองของโลหะทรงกลมที่ตกลงในกลีเซอริน โดยตรวจวัดความเร็วจากตัวตรวจจับเวลาที่ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลม เมื่อโลหะทรงกลมเคลื่อนที่ผ่านตัวตรวจจับเวลา สัญญาณจะถูกส่งไปประมวลผลและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ จากการทดลองปล่อยโลหะทรงกลมขนาดต่าง ๆ กัน 6 ขนาด พบว่าความเร็วปลายของโลหะทรงกลมมีค่าเพิ่มขึ้นตามรัศมีของโลหะทรงกลมที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อนำความเร็วปลายไปคำนวณหาค่าความเร็วปลายถ้อยเสมือน แล้วนำความเร็วปลายถ้อยเสมือนไปหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายถ้อยเสมือนกับรัศมีกำลังสองเป็นไปตามสมการ $v_{exp} = 11159.4r^2 + 0.554615$ และ $R^2 = 0.997702$ ซึ่งสอดคล้องกับสมการภายใต้กฎของสโตกส์ $v_t = 2(\rho - \rho')gr^2 / 9\eta$ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า วิธีการวัดความเร็วปลายของการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมในกลีเซอรินเป็นแนวทางในการศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลวทั่วไปได้

คำสำคัญ: การเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมในของเหลว ความเร็วปลาย กฎของสโตกส์ วงจรตรวจจับแสงอินฟราเรดด้วยโฟโต้ทานซิสเตอร์ เลขเรย์โนลด์

¹ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

* Corresponding author e-mail: aphinrat_kha@nstru.ac.th

Received: 1 March 2022, Revised: 20 May 2022, Accepted: 8 June 2022

Abstract

This research investigated the relationship between terminal velocity and radius squared of a free falling spherical metal in glycerin. The timer detectors were set along the moving path of the falling ball and sent the signals to the computer for evaluation and display output. Each sphere metal of 6 different radii was dropped in a rectangular storage container filled with glycerin. The terminal velocity of the spherical metal increases with the increasing radius of the spherical metal when taking the terminal velocity to calculate the expected velocity then take the expected velocity to find the relationship between the expected velocity and the radius squared according to the equation $v_{exp} = 11159.4r^2 + 0.554615$ and $R^2 = 0.997702$ which corresponds to the equation under Stokes' law. $v_t = 2(\rho - \rho')gr^2 / 9\eta$ This result shows that this technique can be an alternative way to measure terminal velocity in glycerin for studying the motion of spherical metal balls in liquid.

Keywords: Motion of falling spherical metal balls in a fluid, Terminal velocity, Stokes law, Infrared phototransistor circuit, Reynolds number

บทนำ

ปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับฟิสิกส์บางปรากฏการณ์มีความซับซ้อนและเข้าใจยาก ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ในลักษณะต่าง ๆ โดยเฉพาะการเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลว ต้องใช้ความรู้เรื่องกลศาสตร์ของไหล (fluid mechanics) ซึ่งเป็นศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของของไหลในสภาวะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เนื่องจากแรงที่ของไหลกระทำต่อผิวของวัตถุที่สัมผัสหรือกระทำต่อสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีผลต่อของไหลในสภาวะที่หยุดนิ่งและสภาวะที่เคลื่อนที่ของไหลดังกล่าวนี้หมายถึงของเหลวและก๊าซ (สุนทร, 2563) การศึกษาในสาขานี้มีความซับซ้อนที่สุดของกลศาสตร์ การวิเคราะห์สถานการณ์ต่าง ๆ ทำได้จากการสร้างแบบจำลองอุดมคติง่าย ๆ กับกฎของนิวตันและกฎการคงตัวพลังงาน (Young and Freedman, 2016) ความรู้ทางฟิสิกส์ดังกล่าวนี้นำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมหลายด้าน โดยเฉพาะวิศวกรรมเครื่องกลและโยธา เพื่อการประยุกต์ใช้ให้เข้ากับการทำงานและสามารถแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้ (ชัยสวัสดิ์, ม.ป.ป.)

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของสิ่งต่าง ๆ ในของไหลหลายงานวิจัย เช่น งานวิจัยของสุรัตน์ (2562) ศึกษากลไกการขับเคลื่อนของฟองอากาศในของไหลที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของความหนืด โดยใช้วิธีการส่องของภาชนะที่บรรจุของเหลวในแนวตั้ง พบว่าของไหลที่มีความหนืดน้อย ฟองอากาศใช้เวลาในการเคลื่อนที่น้อยกว่าของไหลที่มีความหนืดมาก และงานวิจัยของ Ali *et al.* (2019) ศึกษาหาความหนืดของของเหลวโดยการตกของวัตถุทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน 4 ขนาด ซึ่งใช้วิธีการประมวลผลภาพเพื่อหาความเร็วปลายของวัตถุทรงกลมที่ตกลงไปในท่อ

ทรงกระบอกที่บรรจุของเหลว ต่อมาได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของความหนืด โดยงานวิจัยของ Border *et al.* (2020) อธิบายการตกของลูกกลมทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน 3 ขนาด แล้วปล่อยให้วัตถุตกลงในของเหลวที่มีความหนืดโดยใช้สารละลายผสมกลีเซอรอลและน้ำที่มีความเข้มข้นต่างกัน งานวิจัยดังกล่าวนี้ใช้สำหรับการเรียนการสอนเกี่ยวกับกลศาสตร์ของไหลที่มีความซับซ้อน

ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายกับรัศมียกกำลังสองของโลหะทรงกลมที่ตกลงในกลีเซอรินโดยใช้โลหะทรงกลมที่มีรัศมีแตกต่างกัน 6 ขนาด ซึ่งได้ดัดแปลงชุดทดลองจากชุดทดลองที่มีอยู่แล้วของปานจิต (2558) เป็นชุดทดลองการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ตกแบบเสรี มีการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งชุดทดลองนี้ใช้วงจรตรวจจับแสงอินฟราเรดด้วยโฟโตทรานซิสเตอร์เป็นตัวตรวจวัดเวลาการเคลื่อนที่ของวัตถุ พร้อมทั้งเขียนโปรแกรม Arduino ควบคุมการทำงานของชุดทดลองและโปรแกรม Processing แสดงกราฟการเคลื่อนที่ไปพร้อมกับวัตถุบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ทำให้เห็นภาพลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุได้จริง แต่วงจรที่อยู่ในชุดทดลองนี้ไม่สามารถตรวจวัดเวลาการเคลื่อนที่ของวัตถุที่เป็นทรงกลมได้ ผู้วิจัยจึงนำไปดัดแปลงเพื่อให้สามารถตรวจวัดเวลาการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมได้ โดยปรับระยะห่างระหว่างวงจรภาคส่งแสงอินฟราเรดกับวงจรภาครับแสงอินฟราเรด ด้วยการสร้างแบบจำลองเซ็นเซอร์จากช่วงความเข้มของการแผ่รังสีกับการกระจายเชิงมุมของ LED อินฟราเรดเพื่อให้ภาคส่งแสงอินฟราเรดสามารถส่งสัญญาณไปยังภาครับแสงอินฟราเรด ทำให้ตรวจวัดเวลาการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลม สามารถหาความเร็วปลายของโลหะทรงกลม และหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายกับรัศมียกกำลังสองของโลหะทรงกลมได้ พร้อมทั้งปรับหัวจับวัตถุแบบแม่เหล็กไฟฟ้าให้ยาวขึ้น เพื่อให้วัตถุมีจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่อยู่ในกลีเซอริน ซึ่งถูกบรรจุไว้ในภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีผิวเรียบใสเพื่อให้ลำแสงขนานไปตกกระทบพื้นที่ผิวหน้าวัตถุแล้วสามารถทะลุผ่านภาชนะไปได้

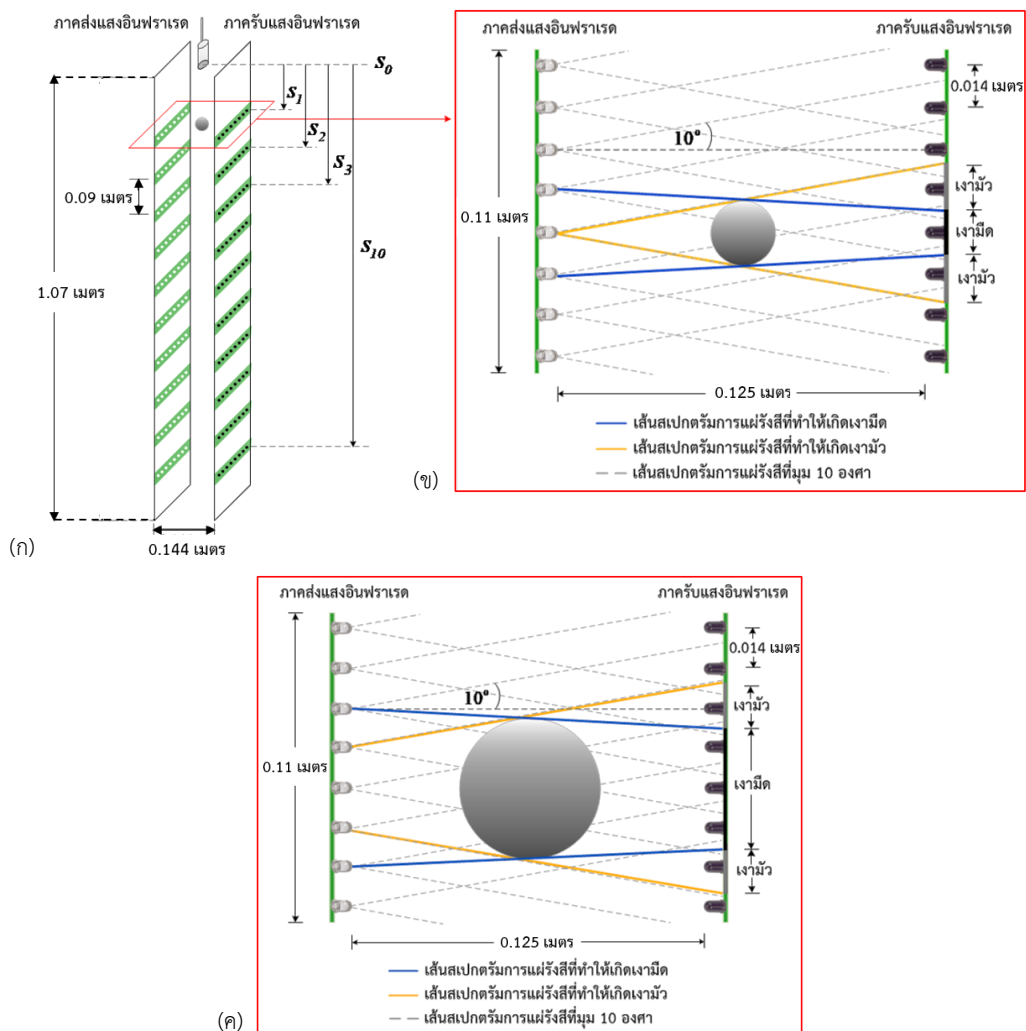
จากการดัดแปลงชุดทดลองดังกล่าวนี้เป็นการนำนวัตกรรมที่มีอยู่แล้วไปใช้ประโยชน์ให้คุ้มค่าสามารถนำไปทดลองได้ 2 เรื่อง ในชุดทดลองเดียวกัน คือ การเคลื่อนที่ของวัตถุที่ตกแบบเสรีและการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่ตกในกลีเซอริน โดยการทดลองการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ตกแบบเสรีได้ปรากฏอยู่ในบทความวิจัยของปานจิต (2558) ส่วนงานวิจัยนี้ทดลองการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่ตกในกลีเซอรินเท่านั้น ซึ่งการดัดแปลงช่วยลดการนำเข้าชุดทดลองจากต่างประเทศ อีกทั้งยังสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาไปใช้ในการเรียนกลศาสตร์ของไหลและเป็นหลักการพื้นฐานสำหรับการออกแบบต่าง ๆ ในงานวิศวกรรมได้

วิธีดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยนำชุดทดลองการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ตกแบบเสรีในงานวิจัยเรื่องการพัฒนาชุดทดลองฟิสิกส์โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมสำหรับการสอนฟิสิกส์ (ปานจิต, 2558) มาดัดแปลงเพื่อให้สามารถนำไปทดลองการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่ตกในกลีเซอรินได้ โดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังต่อไปนี้

1. การดัดแปลงชุดทดลองการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ตกแบบเสรีเพื่อให้สามารถนำไปทดลองการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่ตกในกลีเซอริน

1.1 ออกแบบเพื่อให้วงจรตรวจจับแสงอินฟราเรดด้วยโฟโตทรานซิสเตอร์สามารถตรวจวัดเวลาการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมได้ เนื่องจาก LED อินฟราเรดแผ่รังสีโดยให้รังสีที่มีความเข้มของการแผ่รังสีสัมพันธ์กับการกระจัดเชิงมุม ซึ่งความเข้มของการแผ่รังสีสูงสุดที่ 0 องศา และลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ที่ 10 องศา (Everlight Electronics Company Limited, 2005) ผู้วิจัยจึงปรับระยะห่างระหว่าง LED อินฟราเรดกับโฟโตทรานซิสเตอร์ที่วางในแนวขนานกัน พิจารณาภาพที่ 1 ใช้ความเข้มของการแผ่รังสีกับการกระจัดเชิงมุมในการสร้างแบบจำลอง โดยมีช่วงการแผ่รังสีที่การกระจัดเชิงมุมเท่ากับ 10 องศา ใช้โลหะทรงกลมที่มีรัศมีอยู่ในช่วงที่ต้องการ ในการสร้างแบบจำลอง ผู้วิจัยใช้โลหะทรงกลมที่มีรัศมี 0.01100-0.02500 เมตร ให้ตกกึ่งกลางของวงจรตรวจจับแสงอินฟราเรดด้วยโฟโตทรานซิสเตอร์ และปรับระยะห่างระหว่าง LED อินฟราเรดกับโฟโตทรานซิสเตอร์จนเกิดเป็นเงามืดบนโฟโตทรานซิสเตอร์อย่างน้อย 1 ตัว ซึ่งระยะห่างของวงจรจากชุดทดลองเดิมเท่ากับ 0.200 เมตร และระยะห่างใหม่ที่เกิดขึ้นเงามืดเท่ากับ 0.125 เมตร ทำให้ภาคส่งแสงอินฟราเรดสามารถส่งสัญญาณไปยังภาครับแสงอินฟราเรดได้ ส่วนที่เป็นเงามืดจะไม่สามารถทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับรังสีอินฟราเรดได้ จึงไม่สามารถตรวจวัดเวลาการเคลื่อนที่ของทรงกลมได้ ผู้วิจัยจึงเลือกโลหะทรงกลมขนาดต่าง ๆ ที่สามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด โดยมีรัศมีเท่ากับ 0.01587 0.01662 0.01746 0.01905 0.02059 และ 0.02221 เมตร ตามลำดับ เพื่อให้วงจรตรวจจับแสงอินฟราเรดด้วยโฟโตทรานซิสเตอร์สามารถตรวจวัดเวลาการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมได้

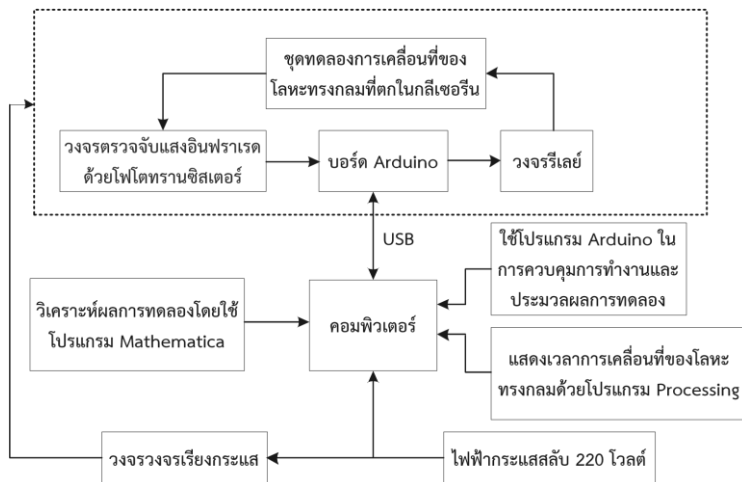


ภาพที่ 1 แบบจำลองวงจรตรวจจับแสงอินฟราเรดด้วยโฟโตทรานซิสเตอร์ มองจากด้านข้าง (ก) มองจากด้านบน โดยโลหะทรงกลมมีรัศมี 0.01100 เมตร (ข) และมองจากด้านบน โดยโลหะทรงกลมมีรัศมี 0.02500 เมตร (ค)

1.2 ออกแบบภาชนะที่ใช้บรรจุกลีเซอรินเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด $0.10 \times 0.10 \times 1.17$ ลูกบาศก์เมตร ผิวเรียบใสทำมาจากแผ่นอะคริลิก เมื่อลำแสงอินฟราเรดตกกระทบกับพื้นผิวหน้าของแผ่นอะคริลิกแบบตั้งฉาก แสงจะสามารถทะลุผ่านไปได้ตกกระทบบนโฟโตทรานซิสเตอร์ได้ ถ้าหากเป็นภาชนะรูปทรงกระบอกจะไม่สามารถตรวจวัดเวลาการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมได้

1.3 ออกแบบหัวจับวัตถุแบบแม่เหล็กไฟฟ้าให้ส่วนปลายด้านหนึ่งของหัวจับจมอยู่ในกลีเซอริน เพื่อให้จุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมอยู่ในกลีเซอริน และครอบหัวจับด้วยพลาสติกใสเพื่อป้องกันไม่ให้กลีเซอรินสัมผัสกับหัวจับวัตถุแบบแม่เหล็กไฟฟ้า

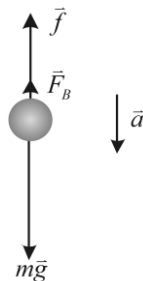
1.4 การทดลองถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์โดยมีแผนภาพการทำงาน ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภาพการทำงานของชุดทดลองการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่ตกในกลีเซอรินโดยควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
ที่มา: ดัดแปลงจากปานจิต (2558)

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อปล่อยให้วัตถุทรงกลมเคลื่อนที่ในของเหลวภายใต้แรงดึงดูดของโลก วัตถุจะเคลื่อนที่ตกลงมา โดยมีแรงที่กระทำต่อวัตถุ 3 แรง คือ แรง $m\vec{g}$ มีทิศพุ่งลง แรงลอยตัว ($\vec{F}_B$) และแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลว ($\vec{f}$) มีทิศพุ่งขึ้น ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แรงทั้งหมดที่กระทำต่อวัตถุทรงกลมขณะตกลงในของเหลวซึ่งบรรจุในภาชนะที่ไม่มีขอบเขตจำกัด

ที่มา: อนันตสิน และคณะ (2558)

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน สามารถเขียนสมการ (1) การเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมได้ดังนี้

$$mg - F_B - f = ma \quad (1)$$

เมื่อ m คือ มวลของวัตถุทรงกลม มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg)

a คือ ความเร่งของวัตถุทรงกลม มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาทีกำลังสอง (m/s^2)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาทีกำลังสอง

โดยทั่วไปวัตถุทรงกลมที่เคลื่อนที่ตกลงในของเหลวภายใต้แรงดึงดูดของโลก จะเกิดแรงต้านที่กระทำต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุซึ่งเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับขนาดของความเร็วของวัตถุ (v) และมีทิศทางข้ามกับความเร็วของวัตถุ สามารถเขียนสมการ (2) ได้ดังนี้

$$\vec{f} = -k\vec{v} \quad (2)$$

เมื่อ f คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุ มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

v คือ ความเร็วของวัตถุ ณ เวลาใด ๆ มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที (m/s)

k คือ ค่าคงที่ (ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางและรูปร่างของวัตถุ)

ในกรณีที่วัตถุเป็นทรงกลมเคลื่อนที่ในของเหลว ค่า $k = 6\pi\eta r$ ดังนั้นสมการ (2) สามารถเขียนเป็นสมการ (3) ได้ดังนี้

$$\vec{f} = -6\pi\eta r\vec{v} \quad (3)$$

สมการ (3) เรียกว่า กฎของสโตกส์ (Stokes law) โดย η คือ ความหนืดของของเหลว มีหน่วยเป็น นิวตัน·วินาทีต่อตารางเมตร ($N \cdot s/m^2$) และ r คือ รัศมีของวัตถุทรงกลม มีหน่วยเป็น เมตร (m)

ในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ในของเหลว วัตถุทรงกลมจะเคลื่อนที่ตกลงมาด้วยความเร่ง ต่อมาแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมที่มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามขนาดของความเร็วที่เพิ่มขึ้นจนทำให้ความเร่งลดลงเป็นศูนย์ นั่นคือ วัตถุทรงกลมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่เรียกว่า “ความเร็วปลาย” (terminal velocity: v_t) ซึ่งในขณะนั้นวัตถุทรงกลมอยู่ในสภาวะสมดุลจึงทำให้แรงลัพธ์ทั้งหมดที่กระทำต่อวัตถุทรงกลมมีค่าเป็นศูนย์ (หทัยชนก และคณะ, 2556) ดังนั้นจากสมการ (1) จึงได้ว่า

$$mg - F_B - f = 0$$

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

$$v_t = \frac{2(\rho - \rho')g}{9\eta} r^2 \quad (4)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของวัตถุทรงกลม มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3)

ρ' คือ ความหนาแน่นของของเหลว มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากสมการ (4) พบว่าความเร็วปลายแปรผันตรงกับรัศมีกำลังสองของวัตถุทรงกลม สำหรับการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมในของเหลวที่ไหลเร็วโนลต่ำ อันเนื่องมาจากอัตราส่วนของขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลมต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทรงกระบอกที่ใช้เป็นภาชนะที่บรรจุของเหลว สามารถใช้ความเร็วปลายถือเสมือน (expected velocity: v_{exp}) ซึ่งเป็นความเร็วปลายที่เสมือนว่าวัตถุทรงกลมนั้นเคลื่อนที่ในของเหลวที่อยู่ในภาชนะที่มีขนาดไม่จำกัดแทนความเร็วปลายของวัตถุทรงกลมที่เคลื่อนที่ในของเหลวในภาชนะที่มีขนาดจำกัด (Owen and Ryu, 2005) โดยความเร็วปลายถือเสมือนสามารถหาได้จากสมการ (5)

$$v_{exp} = \frac{v_t}{1 - 2.104(d/D) + 2.089(d/D)^3} \quad (5)$$

เมื่อ v_t คือ ความเร็วปลาย มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุทรงกลม มีหน่วยเป็น เมตร

D คือ ความยาวของหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีหน่วยเป็น เมตร

จะได้สมการ (4) เป็น

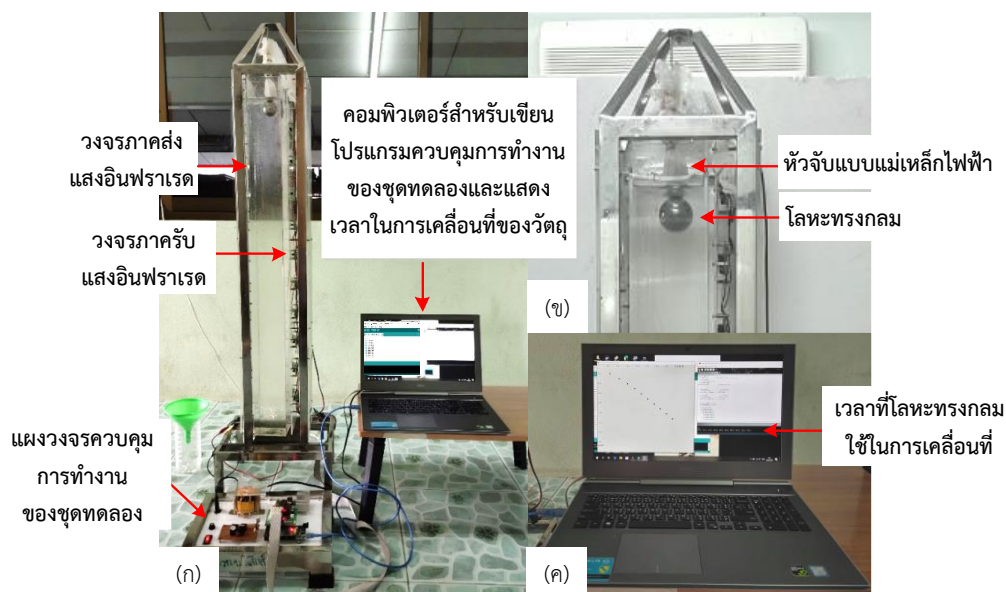
$$v_{exp} = \frac{2(\rho - \rho')g}{9\eta} r^2 \quad (6)$$

จากสมการ (6) จะพบว่า v_{exp} และ r^2 มีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นโดยมีความชัน คือ $\frac{2(\rho - \rho')g}{9\eta}$ ซึ่งสามารถนำไปหาความหนืดของของเหลวได้จากค่าที่ใกล้เคียงค่าความหนืดของของเหลวที่แท้จริง

3. วิธีการทดลองเพื่อหาความเร็วปลายของโลหะทรงกลมและหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายกับรัศมียกกำลังสองของโลหะทรงกลม

3.1 เตรียมชุดทดลองการตกของโลหะทรงกลมในกลีเซอรินดังภาพที่ 4 (ก) พร้อมกับบรรจุกลีเซอรินลงในภาชนะทรงสี่เหลี่ยมปริมาตร 9.072 ลิตร ปรับเครื่องปรับอากาศภายในห้องให้มีอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส แล้วรองนกว่ากลีเซอรินมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับอุณหภูมิห้อง จึงเริ่มการทดลอง

3.2 สั่งให้โปรแกรม Arduino และโปรแกรม Processing ทำงานเพื่อควบคุมการทำงานของชุดทดลองและแสดงผลการทดลอง ในขณะเดียวกันเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดทดลอง วงจรรีเลย์จึงทำงาน โดยหัวจับแบบแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถดูดและปล่อยให้โลหะทรงกลมตกลงในกลีเซอรินแบบอัตโนมัติที่ตำแหน่งกึ่งกลางของภาชนะ โดยติดโลหะทรงกลมที่มีรัศมี 0.01587 เมตร ที่บริเวณหัวจับแบบแม่เหล็กไฟฟ้า หลังจากนั้นโปรแกรม Processing กราฟการเคลื่อนที่ไปพร้อมกับวัตถุบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งแสดงเวลาการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่ผ่านเซ็นเซอร์จำนวน 10 ตำแหน่ง แล้วบันทึกเวลาของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ผ่านเซ็นเซอร์ทั้งหมด



ภาพที่ 4 ชุดทดลองการตกของโลหะทรงกลมในกลีเซอริน (ก) หัวจับแบบแม่เหล็กไฟฟ้าดูดโลหะทรงกลมก่อนปล่อยให้เคลื่อนที่ (ข) และหน้าจอคอมพิวเตอร์แสดงเวลาที่โลหะทรงกลมใช้ในการเคลื่อนที่จากหัวจับไปยังเซ็นเซอร์ทั้ง 10 ตำแหน่ง (ค)

3.3 ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 3.1-3.2 โดยเปลี่ยนรัศมีของโลหะทรงกลมเป็น 0.01662 0.01746 0.01905 0.02059 และ 0.02221 เมตร ตามลำดับ และทำการทดลอง 30 ครั้งต่อโลหะทรงกลม 1 ขนาด แล้วหาเวลาเฉลี่ยทุกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมแต่ละขนาด

3.4 พิจารณาช่วงการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่มีความเร็วคงที่ แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลา เพื่อนำไปคำนวณหาความเร็วปลายและความเร็วปลายถ้อยเสมือนของโลหะทรงกลมแต่ละขนาด

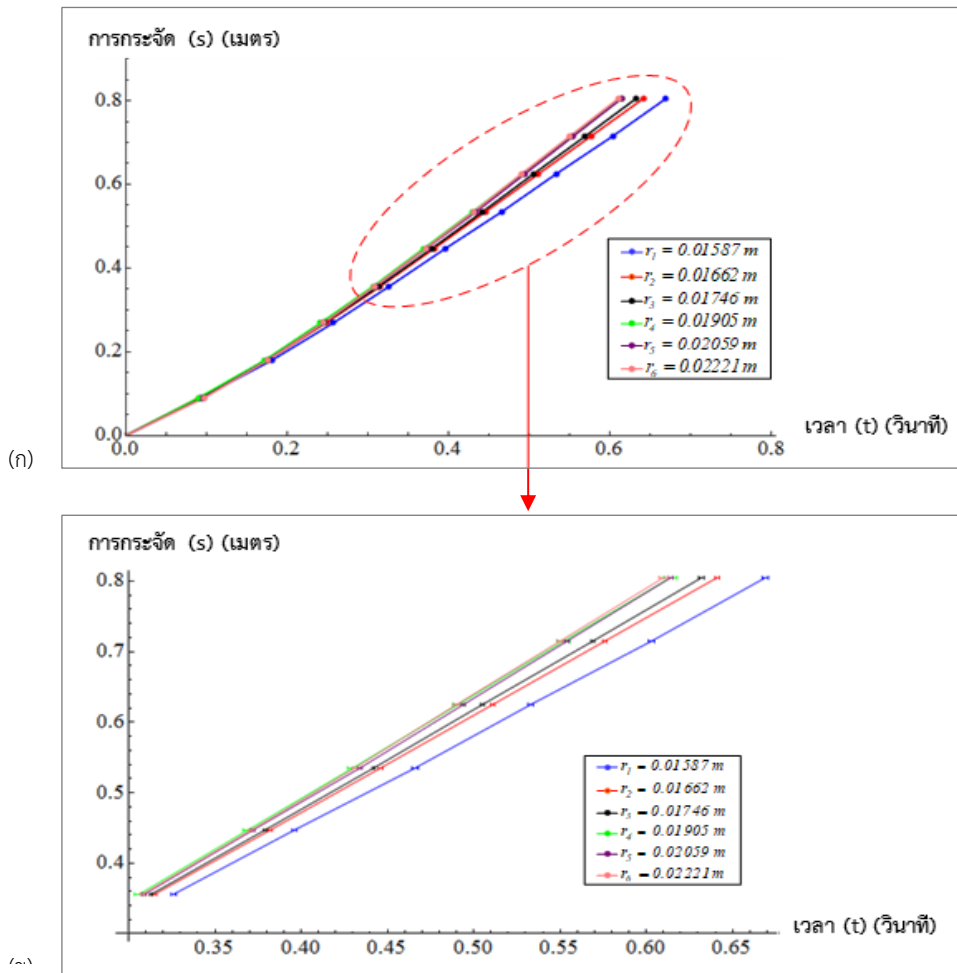
3.5 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเร็วปลายถ้อยเสมือนกับลอการิทึมของรัศมีของโลหะทรงกลม เพื่อนำความชันไปใช้พิจารณาความเหมาะสมในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ด้วยกฎของสโตกส์ (Owen and Ryu, 2005)

3.6 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายถ้อยเสมือนกับรัศมียกกำลังสองของโลหะทรงกลม เพื่อนำความชันของกราฟไปคำนวณหาความหนืดเทียบกับค่าความหนืดจริง

ผลการวิจัย

เมื่อปล่อยโลหะทรงกลมที่มีรัศมีแตกต่างกัน 6 ขนาด ให้ตกลงในภาชนะที่บรรจุกลีเซอรินแบบอัตโนมัติโดยควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ แล้วนำข้อมูลจากการทดลองมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาเฉลี่ยของโลหะทรงกลมแต่ละขนาด ซึ่งแสดงผลการทดลองดังภาพที่ 5 (ก)

การหาความเร็วปลายจากช่วงการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่มีความเร็วคงที่ ทำได้โดยวิธีการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาเฉลี่ยของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งพิจารณาจากลักษณะการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมแต่ละขนาดในช่วงของกราฟที่เป็นเส้นตรง แสดงดังภาพที่ 5 (ข) หลังจากนั้นหาความเร็วปลายของโลหะทรงกลมแต่ละขนาดจากความชันของกราฟที่เป็นไปตามสมการเส้นตรงคือ $s = mt + b$ โดย m คือ ความชันของกราฟ มีค่าเท่ากับความเร็วปลาย และ b คือ ค่าจุดตัดบนแกน s โดยได้แสดงความเร็วปลายไว้ดังตารางที่ 1

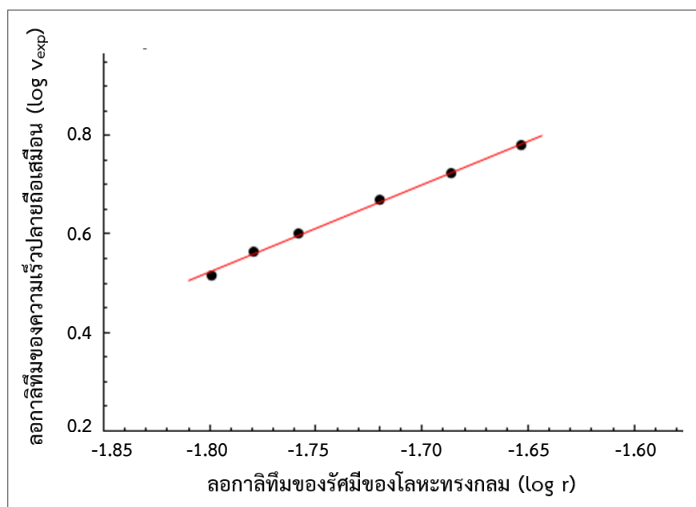


ภาพที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาเฉลี่ยของโลหะทรงกลมแต่ละขนาด เมื่อวัตถุเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่ง (ก) และวัตถุเริ่มเคลื่อนเข้าสู่ความเร็วปลาย (ข)

ตารางที่ 1 ผลการทดลองความเร็วปลายของโลหะทรงกลมแต่ละขนาด

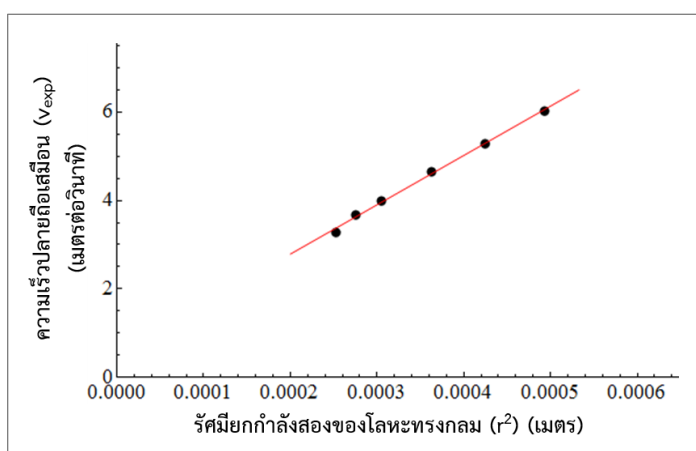
รัศมีของ โลหะทรงกลม (เมตร)	ความเร็วปลาย ถือเสมือน (เมตรต่อวินาที)	ลอการิธึม ของรัศมีของ โลหะทรงกลม	ลอการิธึม ของความเร็วปลาย ถือเสมือน
0.01587	3.2866 ± 0.0071	-1.79942	0.51675 ± 0.00093
0.01662	3.6658 ± 0.0080	-1.77937	0.56417 ± 0.00095
0.01746	3.9872 ± 0.0170	-1.75796	0.60067 ± 0.00185
0.01905	4.6590 ± 0.0389	-1.72011	0.66828 ± 0.00366
0.02059	5.2884 ± 0.0189	-1.68634	0.72332 ± 0.00155
0.02221	6.0205 ± 0.0298	-1.65345	0.77963 ± 0.00216

นำข้อมูลจากตารางที่ 1 มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเร็วปลายถือเสมือนกับลอการิทึมของรัศมีของโลหะทรงกลม แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเร็วปลายถือเสมือนกับลอการิทึมของรัศมีของโลหะทรงกลม

จากภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเร็วปลายถือเสมือนกับลอการิทึมของรัศมีของโลหะทรงกลม โดยหาค่าความชันได้เท่ากับ 1.76848 ซึ่งใกล้เคียงค่า 2 ซึ่งเหมาะที่จะใช้กฎของสโตกส์ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ (Owen and Ryu, 2005) ดังนั้นจึงสามารถหาค่าความหนืดตามสมการ (6) ได้ โดยนำข้อมูลจากตารางที่ 1 มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายถือเสมือนกับรัศมียกกำลังสองของโลหะทรงกลม แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายถือเสมือนกับรัศมียกกำลังสองของโลหะทรงกลม

จากภาพที่ 7 พบว่าเมื่อโลหะทรงกลมมีขนาดใหญ่ขึ้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วปลายถึอเสมือนที่เพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการ $v_t = 11159.4r^2 + 0.554615$ มีค่า $R^2 = 0.997702$ และเมื่อนำความชันที่ได้จากกราฟไปหาค่าความหนืดของกลีเซอรินตามสมการ (6) ได้ค่าความหนืดของกลีเซอรินเท่ากับ 1.364 นิวตัน·เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ($N \cdot m/s^2$) ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความหนืดมาตรฐานของกลีเซอรินที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่มีค่าเท่ากับ 0.954 นิวตัน·เมตรต่อวินาทีกำลังสอง (รัชดา, 2558) พบว่ามีค่าความหนืดของกลีเซอรินที่ได้จากการทดลองเป็น 1.43 เท่า ของค่าความหนืดมาตรฐานของกลีเซอริน

การอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีกับความเร็วปลายของโลหะทรงกลมที่ตกลงในกลีเซอรินโดยใช้ตัวตรวจจับเวลาที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งในการทดลองใช้โลหะทรงกลมที่มีขนาดแตกต่างกัน 6 ขนาด เมื่อพิจารณาภาพที่ 4 พบว่าแรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงดึงดูดของโลกคือ แรงต้านการเคลื่อนที่ของโลหะในของเหลว (f) และแรงลอยตัว (F_b) โดยที่แรงต้านการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมในของเหลวจะเป็นศูนย์และค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้โลหะทรงกลมเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งด้วยความเร่งในช่วงเริ่มต้น แล้วค่อย ๆ เพิ่มความเร็วขึ้นจนมีความเร็วคงที่ เรียกว่า ความเร็วปลาย (อนันตสิน และคณะ, 2558) ซึ่งรัศมีของโลหะทรงกลมเป็นบทบาทสำคัญของการเคลื่อนที่ที่ทำให้ได้ค่าความเร็วปลายที่แตกต่างกัน สำหรับกราฟการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่มีรัศมีแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่าลักษณะการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่มีขนาดเล็กที่สุด คือ 0.01587 เมตร จะเข้าสู่ช่วงที่มีความเร็วคงที่ได้เร็วที่สุด รองลงมา คือ โลหะทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ 0.01662 0.01746 0.01905 0.02059 และ 0.02221 เมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความชันของกราฟในช่วงที่มีความเร็วคงที่ดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่าโลหะทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ 0.02221 เมตร มีความเร็วปลายมากที่สุด รองลงมา คือ โลหะทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ 0.02059 0.01905 0.01746 0.01662 และ 0.01587 เมตร ตามลำดับ โดยโลหะทรงกลมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในการทดลองนี้จะเข้าสู่ช่วงที่มีความเร็วคงที่ได้ช้าที่สุดแต่มีความเร็วปลายมากที่สุดเมื่อเทียบกับโลหะทรงกลมขนาดอื่น ๆ ดังนั้นเมื่อเพิ่มโลหะทรงกลมให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ความเร็วปลายจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นแบบเส้นตรงที่สอดคล้องกับสมการ $v_t = 2(\rho - \rho')gr^2/9\eta$ แต่เนื่องจากการทดลองหาความเร็วปลายของโลหะทรงกลมตามสมการดังกล่าวนี้ใช้ได้ในกรณีที่ภาชนะบรรจุของเหลวมีขนาดเป็นอนันต์หรือไม่มีขอบเขตจำกัด ซึ่งการทดลองนี้ของเหลวถูกบรรจุอยู่ในภาชนะทรงสี่เหลี่ยมที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.10×0.10 เมตร จะเห็นได้ว่าพื้นที่หน้าตัดของภาชนะมีความยาวของด้านยาวกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะทรงกลมไม่มาก ดังนั้นภาชนะจึงส่งผลกับการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลม จึงเปลี่ยนความเร็วปลายเป็นความเร็วปลายถึอเสมือน ซึ่งเป็นความเร็วที่เสมือนว่าวัตถุทรงกลมนี้เคลื่อนที่ในของเหลวที่บรรจุอยู่ในภาชนะที่มีขอบเขตไม่จำกัด เมื่อนำความเร็วปลายถึอเสมือนไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเร็วปลายถึอเสมือนกับลอการิทึมของรัศมีของโลหะทรงกลมจะได้เป็นกราฟเส้นตรงที่มีความชันที่อยู่ในช่วงที่สามารถพิจารณาการเคลื่อนที่ด้วยกฎของสโตกส์ และเมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายถึอเสมือนกับรัศมียกกำลังสอง

ของโลหะทรงกลมได้เป็นกราฟเส้นตรงที่สอดคล้องกับสมการ $v_t = 11159.4r^2 + 0.554615$ มีค่า $R^2 = 0.997702$ ซึ่งสามารถนำความชันของกราฟมาหาความหนืดของของเหลวโดยใช้สมการ (6) ได้ค่าความหนืดมาตรฐานของกลีเซอริน

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการดัดแปลงชุดทดลองจากชุดทดลองเดิมที่มีอยู่แล้วของปานจิต (2558) เพื่อให้สามารถนำไปทดลองเพิ่มอีก 1 เรื่อง คือ การตกของโลหะทรงกลมในกลีเซอริน เมื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมที่เคลื่อนที่ในของเหลวที่มีความหนืดภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก พบว่าวัตถุจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งในช่วงแรกซึ่งเป็นช่วงสั้น ๆ และหลังจากนั้นวัตถุก็จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่เรียกว่าความเร็วปลาย โดยความเร็วปลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อโลหะทรงกลมมีรัศมีเพิ่มขึ้น สำหรับการทดลองนี้ ความกว้างของท่อสี่เหลี่ยมที่ใช้บรรจุกลีเซอรินมีขนาดโตกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะทรงกลมไม่มากนัก ทำให้อัตราส่วนของความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความกว้างของหน้าตัดของภาชนะที่บรรจุกลีเซอรินมีผลต่อขนาดของความเร็วปลายจึงเปลี่ยนไปใช้ความเร็วปลายที่เหมือนในกรณีวิเคราะห์การเคลื่อนที่แทน จากการวิเคราะห์กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความเร็วปลายที่เหมือนกับลอการิทึมของรัศมีของโลหะทรงกลม พบว่าการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมในงานวิจัยนี้เหมาะสมที่จะใช้กฎของสโตกส์จึงใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ (6) ได้ และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายที่เหมือนกับรัศมียกกำลังสองจะได้กราฟเส้นตรงที่สอดคล้องกับสมการ $v_t = 11159.4r^2 + 0.554615$ มีค่า $R^2 = 0.997702$ และเมื่อนำไปหาความหนืดของกลีเซอรินจะได้ค่าความหนืดของกลีเซอรินเป็น 1.43 เท่าของค่าความหนืดมาตรฐานของกลีเซอริน

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาเพื่อศึกษาอิทธิพลของผนังภาชนะรูปทรงต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลวได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปานจิต มุสิก ที่เอื้อเฟื้อชุดทดลองการตกแบบเสรีของวัตถุทรงกลมสำหรับใช้ในการพัฒนาชุดทดลองการตกของโลหะทรงกลมในกลีเซอริน จนทำให้การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์. (ม.ป.ป.). *กลศาสตร์ของไหล*. กรุงเทพฯ: ก.วิวรรณ.
- ปานจิต มุสิก. (2558). การพัฒนาชุดทดลองฟิสิกส์โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมสำหรับการสอนฟิสิกส์. *การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ “ราชภัฏวิจัย ครั้งที่ 3”*. นครศรีธรรมราช.

- รัชดา สุขพันธุ์. (2558). การเปรียบเทียบการหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพ วิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี.
- สุนทร สิทธิปาก. (2563). *กลศาสตร์ของไหล*. สืบค้นเมื่อ 14 มกราคม 2565, จาก: <http://technology.udru.ac.th/book/suntorn/กลศาสตร์ของไหล/กลศาสตร์ของไหล.pdf>.
- สุรัตน์ กาบทุม. (2562). การเคลื่อนที่ของฟองอากาศภายใต้อิทธิพลของความหนืดของของไหลและการสั่นสะเทือนสำหรับการสอนฟิสิกส์ในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- หทัยชนก เพ็ชรมาตศรี ธัญญพ นิลกำจร และสุพิชญ์ แวมมณี. (2556). เทคนิคการวัดความหนืดโดยอาศัยการตกของวัตถุทรงกลม: บทบาทของอิทธิพลของผนังหลอด. *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว*, 29(2), 131-148.
- อนันตสิน เตชะกำพุช พิศิษฐ์ รัตนวรารักษ์ และพรชัย พชรินทร์ตะกุล. (2558). *ฟิสิกส์ 1*. (พิมพ์ครั้งที่ 18). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Ali, S.H., Al-Zuky, A.A.D., Al-Saleh, A.H. and Mohamad, H.J. (2019). Measure liquid viscosity by tracking falling ball automatically depending on image processing algorithm. *Journal of Physics*, 1294(2), doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1294/2/022002>.
- Border, N.S., Reilly, A., Miller, A., Jamali, S. and Newaz, A. (2020). *A high precision falling-ball viscometer using a fast camera*. Retrieved 8 December 2021, from: https://www.researchgate.net/publication/342587666_A_high_precision_falling-ball_viscometer_using_a_fast_camera.
- Everlight Electronics Company Limited. (2005). *Technical data sheet 5 mm infrared LED T-1 3/4*. Retrieved 10 December 2021, from: <http://www.scrpdf.com/pdf/Optoelectronic/Opto%20Isolator%20%26%20interruptor/IR383.pdf>.
- Owen, J.P. and Ryu, W.S. (2005). The effects of linear and quadratic drag on falling spheres: An undergraduate laboratory. *European Journal of Physics*, doi: <https://doi.org/10.1088/0143-0807/26/6/016>.
- Young, H.D. and Freedman, R.A. (2016). *Sears & zemansky's university physics with modern physics*. (4thed). Harlow: Pearson.