

<http://journal.rmutp.ac.th/>

จุดหลอมเหลวและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ของซีฟิ่งพาราฟิน

อาจารย์ ทองอ่อน เพ็ญศรี ประมุขกุล และ วิไลพร ลักษมีวานิชย์*

ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
เลขที่ 202 ถนนช้างเผือก ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

รับบทความ 3 มิถุนายน 2562 แก้ไขบทความ 3 พฤศจิกายน 2562 ตอรับบทความ 27 พฤศจิกายน 2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการหลอมเหลวของพาราฟินแข็ง และหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของแท่งพาราฟินแข็ง พาราฟินที่ใช้มีสองเกรดได้แก่ซีฟิ่งสีขาวเกรดทางการค้าและซีฟิ่งสีเหลืองเกรดการตลาด ขึ้นตัวอย่างบรรจุในหลอดทดลองกันแบบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันสามค่า คือ 1.5, 2.0 และ 2.5 เซนติเมตร มีการศึกษาอิทธิพลความสูงของขึ้นตัวอย่างที่ 5, 7 และ 10 เซนติเมตร ผลการวิจัยพบว่าจุดหลอมเหลวเฉลี่ยของพาราฟินทั้งสองเกรดมีค่าอยู่ระหว่าง 44–77 องศาเซลเซียส และเมื่อใช้วิธีทางตัวเลขศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของพาราฟินที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 50 องศาเซลเซียส ขณะเย็นตัวลง ณ อุณหภูมิห้องประมาณ 30 องศาเซลเซียส พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของพาราฟินแข็งกับอากาศโดยรอบมีค่าอยู่ระหว่าง 3–9 วัตต์ต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวของพาราฟินไม่ขึ้นกับปริมาณมวลสาร แต่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติมีค่าลดลง สอดคล้องกับอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ช้าลง เมื่อขึ้นตัวอย่างมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : ซีฟิ่งพาราฟิน; สมบัติทางความร้อน; ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ; จุดหลอมเหลว

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 9755 7503, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: vilaiporn_luk@cmru.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Melting Point and Natural Convective Heat Transfer Coefficient of Paraffin Wax

Arjaree Thongon Pensri Pramukkul and Vilaiporn Luksameevanish*

Department of Physics and General Science, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University

202 Chang Puak road, Tambon Chang Puak, Maung, Chiangmai 50300

Received 3 June 2019; Revised 3 November 2019 ; Accepted 27 November 2019

Abstract

This research was aimed to study melting behavior of paraffin wax and to evaluate the natural heat convection coefficient of solid cylinder paraffin wax. Two grades of solid paraffin wax; white commercial grade and yellow market grade were studied. Three sizes of flat test tube in diameter 1.5, 2.0 and 2.5 centimeters were used. Three different amounts of paraffin, indicated from samples' heights of 5, 7 and 10 centimeters, were set. The results found the average melting point of both grade paraffin ranged from 44-77 °C. Based on the numerical analysis, heat behavior of solid cylinder paraffin at the initial temperature of 50°C to room temperature of about 30°C found that natural convection coefficients was ranged from 3 to 9 W/m²°C. Melting point temperature was found mass independent property while natural convection coefficient declined as the sample's diameter size inclined.

Keywords : Paraffin Wax; Thermal Properties; Convective Heat Transfer Coefficient; Melting Point

* Corresponding Author. Tel.: +668 9755 7503, E-mail Address: vilaiporn_luk@cmru.ac.th

1. บทนำ

พาราฟินหรือขี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin or Paraffin Wax) เป็นไขมันที่ได้จากการกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม เป็นสารเคมีในกลุ่ม Alkane Hydrocarbon จัดอยู่จำพวก Petroleum Wax มีสูตรโครงสร้างเป็น $C_n H_{2n+2}$ เมื่อ n เป็นเลขจำนวนเต็มที่มีค่าอยู่ระหว่าง 18-50 พาราฟินเป็นของแข็งที่มีสีเหลืองอ่อนจนถึงขาว มีจุดหลอมเหลวในช่วงอุณหภูมิ 48-68 องศาเซลเซียส ขี้ผึ้งพาราฟินไม่ละลายในน้ำแต่สามารถละลายได้ใน Ether Benzene และ Ester บางชนิดได้ ขี้ผึ้งพาราฟินบริสุทธิ์มีสมบัติเป็นฉนวนที่มีค่าสภาพการนำความร้อนระหว่าง 0.148–0.358 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส [1]-[3] การใช้งานหรือประโยชน์ของขี้ผึ้งแบ่งตามสถานะ เช่น กรณีอยู่ในสถานะก๊าซ ใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง หากเป็นของเหลวนิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงยารักษาโรค และใช้ในการทำครีว ส่วนพาราฟินแข็งในรูปของขี้ผึ้งนิยมนำมาใช้ทำเทียน ใช้เป็นสารเคลือบกระดาษ ใช้เป็นส่วนผสมของยาหม่อง ใช้ทาปากหรือทาผิวเพื่อลดความหยาบกร้านหรือเพิ่มความชุ่มชื้น นอกจากนี้ยังเป็นที่ประจักษ์ว่ามีการรักษาโรคข้ออักเสบบางส่วนด้วยขี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin Wax for Arthritis) ด้วยการแช่ขั้วกระดูกส่วนที่ต้องการรักษา เช่น มือ เท้า ศอก แขน หรือขาในพาราฟินเหลวหรือขี้ผึ้งพาราฟิน กระบวนการนี้นิยมใช้ในผู้ป่วยที่ปวดข้อเรื้อรังเช่นโรครูมาตอยด์ หรือโรคข้ออักเสบ เป็นต้น กลไกการถ่ายโอนความร้อนจากขี้ผึ้งพาราฟินร้อน จะถ่ายเทไปถึงผิวรอบ ๆ ข้อ ส่งผลให้การไหลเวียนโลหิตดีขึ้น ลดการสะสมของกรดยูริกที่อยู่ตามข้อ ทำให้อาการปวดจากการที่มีกรดยูริกคั่งค้างลดลง [3]-[4] และจากค่าสภาพการฉนวนความร้อนที่มีค่าความจุความร้อนสูงถึงประมาณ 2,000 จูลต่อกิโลกรัม-องศาเซลเซียส จึงมีการพัฒนาการใช้ขี้ผึ้งพาราฟินในการกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ [4]-[5]

ขี้ผึ้งพาราฟินมีบทบาทกับสังคมไทยเพราะถูกนำมาใช้เป็นสื่อทางพุทธศาสตร์ ด้วยการนำมาทำเป็น “เทียน

พรรษา” ในประเพณี “หล่อเทียนพรรษา” ตามวิถีปฏิบัติของชาวไทยพุทธมาเป็นเวลานาน แต่การรวบรวมองค์ความรู้ด้านนี้กับปรากฏการณ์ทางความร้อนยังไม่ปรากฏเป็นผลงานวิจัยที่เด่นชัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งสืบเสาะหาความรู้เพื่อทำความเข้าใจพฤติกรรมการหลอมละลายและการแข็งตัวของขี้ผึ้งพาราฟิน และการถ่ายโอนความร้อนของแท่งพาราฟินทรงกระบอกคล้ายการขึ้นรูปเทียนพรรษามาตามวิถีพุทธ โดยศึกษาพฤติกรรมของขี้ผึ้งพาราฟิน 2 เกรด ได้แก่ 1) เกรดทางการค้า (Commercial Grade) ที่หมายถึงขี้ผึ้งที่ผลิตสำหรับเป็นสารตั้งต้นของการนำมาใช้งานแบบต่าง ๆ จัดจำหน่ายโดยตัวแทนของร้านขายวัสดุทางเคมี และ 2) ขี้ผึ้งเกรดการตลาด (Market Grade) ที่หมายถึงขี้ผึ้งที่มีขายในท้องตลาด ไม่ทราบส่วนผสมที่แท้จริง ชาวบ้านนิยมซื้อไปใช้ในการทำเทียน

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์และชิ้นตัวอย่าง

1) เตรียมตัวอย่างขี้ผึ้งพาราฟินเกรดทางการค้าและเกรดการตลาด ในหลอดทดลองกันแบน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ 1.5, 2.0 และ 2.5 เซนติเมตร แต่ละหลอดบรรจุขี้ผึ้งสูงต่างกัน 3 ขนาด คือ 5, 7 และ 10 เซนติเมตร จำนวนชิ้นตัวอย่างของขี้ผึ้งพาราฟินแต่ละเกรดที่ใช้ในการทดลองมีจำนวน 27 ตัวอย่าง

2) เตรียมน้ำปริมาตรประมาณ 800 มิลลิลิตรบรรจุในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร วางบนเตาไฟฟ้าขนาด 1.5 กิโลวัตต์

3) ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (K-type Thermocouple) ที่มีความละเอียดของการวัดอุณหภูมิ 0.001 องศาเซลเซียส ต่อเชื่อมกับดาต้าล็อกเกอร์ (Data Logger: Agilent Technologies 34972A) ที่สามารถบันทึกข้อมูลทุก ๆ 10 วินาที

2.2 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเพื่อหาจุดหลอมเหลวของ

ซีฟิ่งพาราฟิน โดยการสังเกตตำแหน่งอุณหภูมิที่ซีฟิ่งเริ่มละลายจนได้รับความร้อนในบีกเกอร์น้ำร้อนจนซีฟิ่งละลายจนหมด และสังเกตตำแหน่งอุณหภูมิที่ซีฟิ่งเหลวเริ่มแข็งตัวขณะถ่ายโอนความร้อนแก่อากาศในห้องจนซีฟิ่งแข็งตัวจนหมด โดย

1) นำชิ้นตัวอย่างซีฟิ่งแข็งที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 2.1 แช่ในน้ำที่ได้รับความร้อนจากเตาไฟฟ้าอย่างช้า ๆ ด้วยอัตราประมาณ 0.150 วัตต์ (หรือ 1/10 เท่าของกำลังไฟฟ้าของเตา) จากนั้นจึงบันทึกอุณหภูมิที่ซีฟิ่งเริ่มหลอมละลาย (สังเกตจากการเริ่มปรากฏของเหลวใสขึ้น) และอุณหภูมิที่ซีฟิ่งละลายจนหมด กำหนดสัญลักษณ์ของอุณหภูมิตำแหน่งทั้งสองเป็น SL1 และ SL2 ตามลำดับ (อักษร S และ L ย่อมาจาก Solid และ Liquid แทนสถานะของแข็งและของเหลว ตามลำดับ)

2) นำหลอดซีฟิ่งพาราฟินเหลวออกจากบีกเกอร์น้ำร้อน แล้วนำมาวางบนแผ่นโฟม ที่วางอยู่ในห้องเพื่อให้ซีฟิ่งถ่ายโอนความร้อนกับอากาศโดยรอบ สังเกตพฤติกรรมของการแข็งตัวของซีฟิ่งในหลอดทดลอง แล้วบันทึกตำแหน่งอุณหภูมิที่ซีฟิ่งเหลวเริ่มแข็งตัว (เริ่มปรากฏซีฟิ่งสีขาวขุ่น หรือเหลืองขุ่นเกิดขึ้น) และแข็งตัวจนหมด (ไม่ปรากฏของเหลวใส) กำหนดสัญลักษณ์ของอุณหภูมิตำแหน่งทั้งสองเป็น LS1 และ LS2 ตามลำดับ

3) บันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของซีฟิ่งในหลอดทดลอง (T_p) ร่วมกับอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของหลอดทดลอง (T_g) และอุณหภูมิของอากาศในห้องที่ล้อมรอบหลอดทดลอง (T_A) ต่อเนื่องจนอุณหภูมิของซีฟิ่งประมาณเท่ากับอุณหภูมิห้อง

4) นำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่บันทึกด้วยดาต้าลอจเกอร์มาวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยกระดานคำนวณ Excel เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติระหว่างซีฟิ่งแข็งกับอากาศที่ล้อมรอบ โดยใช้หลักการสมดุลของพลังงานภายในที่ลดลงของซีฟิ่งกับการส่งผ่านความร้อนจากซีฟิ่งแข็งไปยังอากาศที่ล้อมรอบ ภายใต้สมมติฐานว่าอัตรา

การแผ่รังสีร้อนมีค่าน้อยมากจนไม่นำมาพิจารณา ตามที่ M. Vollmer [6] และ R. Conti et al. [7] ได้เสนอไว้ นั่นคือเมื่อพิจารณาวัตถุมวล m ที่มีค่าความจุความร้อนจำเพาะ c มีอุณหภูมิเปลี่ยนไป ΔT แสดงว่าวัตถุนั้นได้รับหรือสูญเสียความร้อนในปริมาณ Q เท่ากับ $mc \Delta T$ หรือ $\delta Q = mc dT$ เมื่อ δQ คือปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนไปน้อย ๆ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ dT หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนที่เวลา t ใด ๆ มีค่าเป็น $\frac{\delta Q}{dt} = mc \frac{dT}{dt}$

ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนที่มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของซีฟิ่งแข็ง (จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์) มีค่าเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อนด้วยการพาแบบธรรมชาติที่มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1) เมื่อ T คืออุณหภูมิของซีฟิ่งในหลอดทดลอง ซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของผิวด้านนอกของหลอดทดลอง ส่วน T_A คืออุณหภูมิของอากาศโดยรอบ

สมการที่ (1) สามารถจัดใหม่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) ที่แสดงในสมการที่ (2) หรือ (3) สมการนี้มีคำตอบทั่วไป (General Solution) ดังสมการที่ (4) [8] เมื่อค่า τ คือ ค่าคงตัวเชิงความร้อนของเวลา (Thermal Time Constant) มีหน่วยเป็นวินาที และมีค่าเท่ากับ mc/hA

$$mc \frac{dT}{dt} = hA(T - T_A) \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} - \frac{h}{\tau}(T - T_A) = 0 \quad (2)$$

หรือ

$$\frac{d(T - T_A)}{dt} - \frac{h}{\tau}(T - T_A) = 0 \quad (3)$$

$$\Delta T = \Delta T_0 \exp(-t/\tau) \quad (4)$$

ΔT และ ΔT_0 คือความแตกต่างของอุณหภูมิพาราฟินกับอากาศ, $(T - T_A)$ ที่เวลา t ใด ๆ และ ที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$ วินาที) ตามลำดับ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้บันทึกการเปลี่ยนแปลงของ T_p , T_B และ T_A ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของพาราฟินในหลอดทดลอง อุณหภูมิที่ข้างหลอดทดลองภายนอก และอุณหภูมิของอากาศในห้อง ที่สามารถนำไปวิเคราะห์หาค่า ΔT ที่เวลาใด และใช้วิธีการทางตัวเลขมาหาสมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์หาค่า τ เพื่อนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่อไป

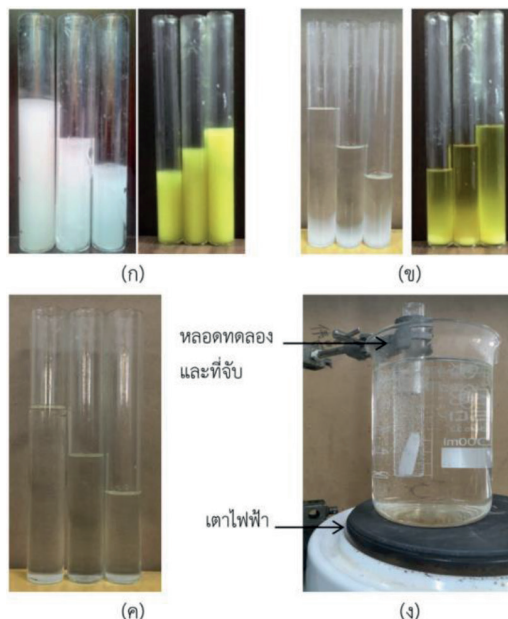
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมการหลอมเหลวของขี้ผึ้งพาราฟิน

ขึ้นตัวอย่างขี้ผึ้งพาราฟินที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการหลอมเหลวด้วยการหาจุดหลอมละลายและแข็งตัวของตัวอย่างขี้ผึ้งพาราฟินในหลอดทดลองกันแบนแสดงในรูปที่ 1 อุณหภูมิเฉลี่ย ($\bar{T}$) และร้อยละของความแปรปรวน ($\%C_V$) ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละของอัตราส่วนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่อค่าเฉลี่ย ขณะที่ขี้ผึ้งพาราฟินเริ่มหลอมละลาย (SL1) หลอมละลายจนหมด (SL2) เมื่อได้รับความร้อนอย่างช้า ๆ ผ่านน้ำในภาชนะ และอุณหภูมิที่พาราฟินเริ่มแข็งตัว (LS1) และแข็งตัวจนหมด (LS2) ขณะที่พาราฟินเหลวถ่ายโอนความร้อนให้แก่อากาศในห้อง

ผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิทั้งสี่ตำแหน่งที่สังเกตได้กรณีขี้ผึ้งที่บรรจุในหลอดทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน และมีความสูงไม่เท่ากัน มีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังแสดงด้วยตัวอย่างแผนภูมิอุณหภูมิในรูปที่ 2 (กรณีขี้ผึ้งเกรดการตลาด) ดังนั้นจึงมีการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ไม่ขึ้นกับความสูงของขึ้นตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่สังเกตจากการทดลองในหลอดทดลอง 1 ขนาด ๆ ละ 3 ขี้ และแปรปริมาณขี้ผึ้ง 3 ระดับเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยจากข้อมูลดิบ 9 ค่า มีค่า

ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าร้อยละของความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 4

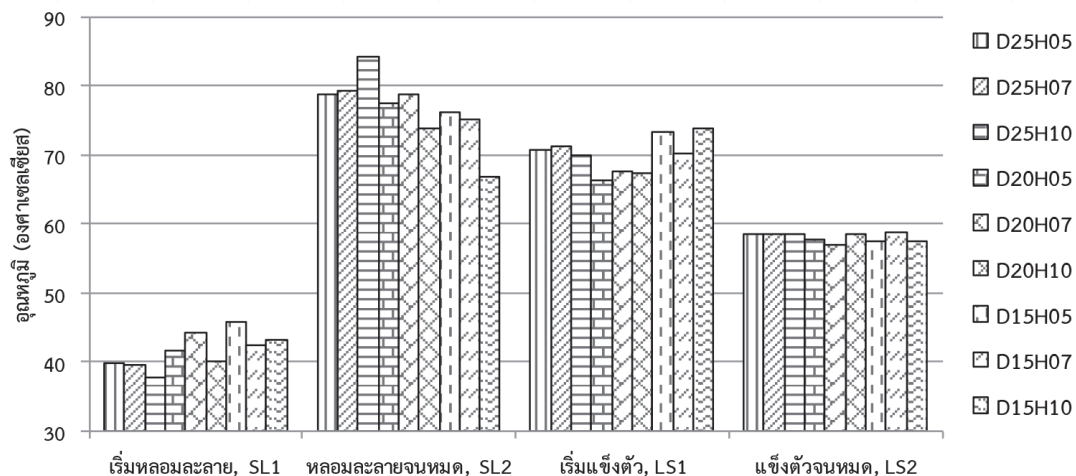


รูปที่ 1 ขี้ผึ้งพาราฟินสีขาว (เกรดทางการค้า) และสีเหลือง (เกรดการตลาด) ในหลอดทดลองกันแบน
ขณะอยู่ในสถานะ (ก) ของแข็ง
(ข) ของแข็งและของเหลว (ค) ของเหลว และ
(ง) ขณะได้รับความร้อนผ่านน้ำ

ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยดังกล่าวของขี้ผึ้งเกรดทางการค้าและเกรดการตลาดถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลแผนภูมิแท่งที่แสดงในรูปที่ 3 พบว่าแนวโน้มช่วงอุณหภูมิของขี้ผึ้งเกรดการตลาดมีช่วงการเปลี่ยนแปลงกว้างกว่า ขี้ผึ้งเกรดนี้นิยมผสมสารเคมีที่เพิ่มกลิ่น สีหรือลดแรงตึงผิว [9]-[10] นอกจากนั้นยังพบว่าความคาดเคลื่อนของการสังเกตตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะด้วยสายตา เกิดขึ้นได้ง่ายกว่ากรณีของหลอดทดลองที่มีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะการสังเกตตำแหน่งที่คาดว่าขี้ผึ้งแข็งตัวจนหมด อย่างไรก็ตาม ข้อมูลแต่ละตำแหน่งดังกล่าวจัดว่าเป็นข้อมูลที่มาจากการสังเกตด้วยตาที่มีการแก้ไขความผิดพลาดจากความ

รู้สึกของผู้สังเกตจำนวนหลายครั้ง และสามารถสรุปพฤติกรรมได้ว่าอุณหภูมิขณะขึ้นเริ่มหลอมละลายมีค่าต่ำสุดในช่วง 40–47 องศาเซลเซียส ค่าที่ได้ต่ำกว่าอุณหภูมิขณะสังเกตการแข็งตัวจนหมดที่มีค่าอุณหภูมิในช่วง 53–59 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดพบขณะขึ้นเริ่มหลอมละลายจนหมดในช่วงอุณหภูมิ 70–83 องศาเซลเซียส จัดเป็นการเปลี่ยนแปลงช่วงที่กว้างที่สุด ช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยสุดคือช่วงที่ขึ้นเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ได้แก่ ช่วง 66–72 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเมื่อนำเอาข้อมูลแต่ละตำแหน่งมาเฉลี่ยอีกครั้งก็พบว่าค่าดังกล่าวจัด

เป็นตัวแทนของการสังเกตพฤติกรรมที่ตำแหน่งนั้น ๆ ได้ดี โดยมีค่าร้อยละของความแปรปรวนต่ำกว่าร้อยละ 7 (ร้อยละความแปรปรวนดังกล่าวไม่ควรมากกว่าร้อยละ 10) จึงสามารถกล่าวได้ว่าขึ้นพาราฟินทั้งสองเกรดมีจุดหลอมเหลวในช่วง 44–77 องศาเซลเซียส ข้อมูลนี้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ปรากฏในการศึกษาของ N. Ukrainczyk et al. [1] ที่ระบุว่า ขึ้นพาราฟินชนิดที่มีจำนวนคาร์บอนเป็นองค์ประกอบช่วง 19–36 อะตอม มีจุดหลอมเหลวช่วงอุณหภูมิ 48–68 องศาเซลเซียส



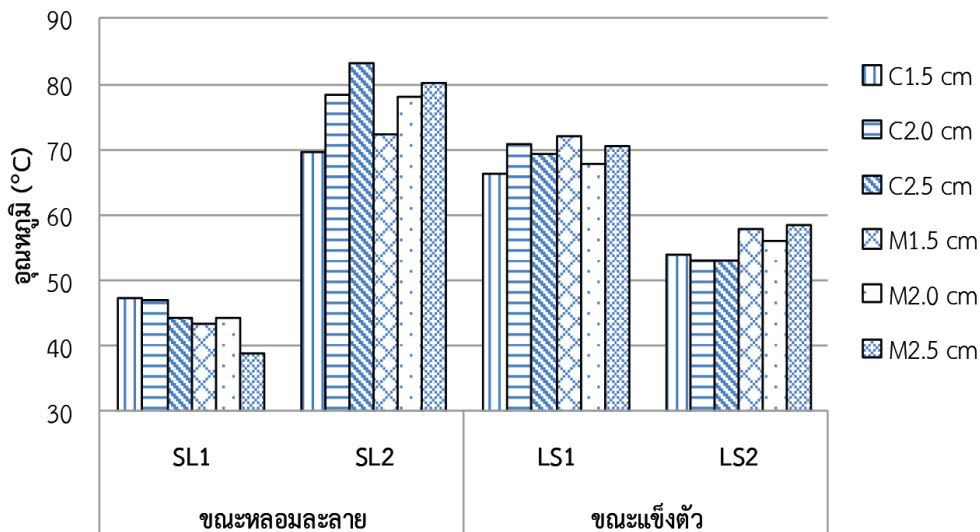
รูปที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยขณะพาราฟินเริ่มหลอมละลายจนกระทั่งแข็งตัวจนหมด

ในหลอดทดลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5, 2.0 และ 2.5 เซนติเมตร และมีความสูง 5, 7 และ 10 เซนติเมตร:
กรณีตัวอย่างขึ้นเกรดการตลาด

ตารางที่ 1 อุณหภูมิเฉลี่ยซีฟิ่งพาราฟิน* (เกรดทางการค้าและเกรดการตลาด) ขณะหลอมละลายและแข็งตัว ที่ความสูง 5.0, 7.0 และ 10.0 เซนติเมตร ในหลอดทดลองกันแบนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.5, 2.0 และ 2.5 เซนติเมตร

เกรดของ ซีฟิ่ง	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	พฤติกรรมขณะหลอมละลาย				พฤติกรรมขณะแข็งตัว			
		SL1 (°C)	%C _v	SL2(°C)	%C _v	LS1(°C)	%C _v	LS2(°C)	%C _v
เกรด ทางการ ค้า	1.5	47.25	0.99	69.50	1.21	66.22	1.32	53.96	0.30
	2.0	46.96	0.19	78.46	3.28	70.81	0.69	52.90	3.72
	2.5	44.19	1.73	83.35	1.76	69.32	2.41	53.15	0.68
เกรดการ ตลาด	1.5	43.24	2.23	72.49	3.64	71.92	2.56	57.90	1.32
	2.0	44.19	3.46	77.98	0.97	67.97	3.28	56.20	3.13
	2.5	38.89	2.78	80.31	3.11	70.56	0.94	58.50	0.06
ค่าเฉลี่ย $\pm$ %C (ของ 6 ค่าข้างต้น)		44.12 $\pm$ 6.87		77.02 $\pm$ 6.65		69.47 $\pm$ 3.01		55.44 $\pm$ 4.41	

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 9 ครั้ง เช่น กรณีหลอดทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ทำการทดลองกรณีซีฟิ่งใน หลอดทดลองสูง 5.0, 7.0 และ 10.0 เซนติเมตร กรณีละ 3 ครั้ง



รูปที่ 3 อุณหภูมิขณะซีฟิ่งมีพฤติกรรมหลอมละลายและแข็งตัว

หมายเหตุ C และ M แทน commercial และ market ตามลำดับ ตัวเลข เช่น 1.5 cm แทนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดทดลอง

3.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

การทดลองเพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของซีฟิ่งพาราฟินแข็งที่บรรจุในหลอดทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน 3 ขนาดและมีความสูงหรือปริมาตรซีฟิ่งต่างกัน 3 ค่า เป็นการทดลองต่อเนื่องจากการสังเกตพฤติกรรมการหลอมละลายของซีฟิ่ง โดยนำค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของซีฟิ่ง อุณหภูมิที่ผนังหลอดทดลองด้านนอก และอุณหภูมิของอากาศโดยรอบมาวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากสมมติฐานที่อัตราการลดลงของพลังงานภายในของซีฟิ่งเท่ากับอัตราการถ่ายพาความร้อนจากซีฟิ่งสู่อากาศโดยรอบ ตามความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการที่ (1) ถึง (3) และทำให้ได้มาซึ่งคำตอบของความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4) ดังนั้นผลการทดลองเชิงตัวเลขดังกล่าวจึงถูกนำมาหาความสัมพันธ์ของ ΔT กับเวลา t ที่มีความสัมพันธ์แบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential

Relation) บนกระดานคำนวณ Excel สมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดประเมินจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r) ของค่า ΔT ที่ได้จากการทดลอง (Experimental Data) กับค่า ΔT ที่ได้จากสมการที่จัดหา (Fitted Data) โดยค่าสหสัมพันธ์ที่ได้ควรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.8 จึงสามารถนำมาทำนายพฤติกรรมได้ นอกจากค่าสหสัมพันธ์แล้วการตัดสินใจเลือกใช้สมการที่วิเคราะห์ได้ (Fitted Equation) ดังกล่าวแล้ว ยังพิจารณาความแตกต่างรวม (Summation of Residual) ของค่า experimental ΔT และ fitted ΔT ให้มีค่าน้อยที่สุด ตัวอย่างการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการถ่ายโอนความร้อนจากซีฟิ่งพาราฟินที่บรรจุในหลอดทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร แสดงได้ดังข้อมูลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลจากการวัดอุณหภูมิ T_P , T_B และ T_A ที่เปลี่ยนแปลงทุก ๆ 10 วินาที และการวิเคราะห์หาค่าผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยของซีฟิ่งและผนังหลอดทดลองกับอุณหภูมิห้อง ($T_{PB} - T_A$), ΔT_{Fitted} และ residual ที่เปลี่ยนแปลงทุก ๆ 10 วินาที : กรณีซีฟิ่งเกรดทางการค้า

t (sec)	T_P (°C)	T_B (°C)	T_A (°C)	$(T_{PB} - T_A)$	ΔT_{Fitted}	Residual
10	51.331	44.727	31.907	16.153	17.846	-1.693
20	51.258	44.412	32.045	15.959	17.693	-1.734
30	51.18	44.067	32.203	15.748	17.541	-1.794
40	51.09	44.289	32.285	15.814	17.391	-1.577
2920	33.978	33.383	31.664	1.805	1.459	0.346
2930	33.975	33.463	31.33	1.843	1.446	0.397
2940	33.964	33.475	31.457	1.844	1.434	0.410
2950	33.959	33.428	31.775	1.818	1.421	0.396
2960	33.953	33.486	32.092	1.844	1.409	0.434

หมายเหตุ กรณีหลอดทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ซีฟิ่งสูง 10 เซนติเมตร และ $\Delta T_{Fitted} = \Delta T_0 \exp(-t/\tau)$

ข้อมูลในตารางแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิภายในของซีฟิ่งพาราฟิน (T_p) สูงกว่าอุณหภูมิที่ผนังภาชนะ (T_B) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสภาพความเป็นฉนวนความร้อนของซีฟิ่งพาราฟินที่มีค่าสภาพการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.15-0.25 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส ขึ้นกับสถานะของเหลวหรือของแข็ง [1] และหากเปลี่ยนตัวอย่างในหลอดทดลองเป็นน้ำที่มีค่าสภาพการนำความร้อนประมาณ 0.60 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส [11] กลับพบว่าอุณหภูมิที่ผนังภาชนะเท่ากับอุณหภูมิในหลอดทดลอง เช่นเดียวกับผลการวิจัยของ M. Vollmer [6]

ดังนั้นในการวิเคราะห์หาสมการการแลกเปลี่ยนความร้อนตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (4) จึงใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิซีฟิ่งกับผนังภาชนะ (ใช้สัญลักษณ์เป็น T_{PB}) ดังนั้นค่า ΔT ที่เวลาใดในสมการดังกล่าวจึงหมายถึง $(T_{PB} - T_A)$ ที่เวลานั้น ๆ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งที่ได้จากการทดลองและค่าที่ประเมินได้ แสดงในรูปที่ 4

จากแผนภาพในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่า fitted ΔT มีค่าใกล้เคียงกับ Experimental ΔT ตามค่า ΔT_0 และ τ ที่เหมาะสม จากนั้นจึงนำค่าคงที่ของเวลา τ ดังกล่าวไปวิเคราะห์หาค่า h ข้อมูลการวิเคราะห์หาค่า h จากการทดลองทั้งหมด 18 เงื่อนไข กรณีซีฟิ่งพาราฟินเกรตทางการค้า และเกรตการตลาด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน 3 ค่า และความสูงหรือปริมาณที่ต่างกัน 3 ค่า สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 3

ผลการวิจัยพบว่าสำหรับซีฟิ่งแต่ละชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่น้อยลงหรือใช้เวลาในการเย็นตัวลงมากกว่ากรณีของชิ้นตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนดังกล่าวไม่ขึ้นกับความสูงของเนื้อพาราฟิน เมื่อพิจารณากรณีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเดียวกัน ดังนั้นจึงนำค่า h ดังกล่าวมาเฉลี่ยเป็นค่าเฉพาะของกรณีชิ้นตัวอย่างที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 1.5, 2.0 และ 2.5 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ยที่ได้ถูกนำ

มาเปรียบเทียบในแผนภาพรูปที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของซีฟิ่งเกรตทางการค้ามีค่าต่ำกว่ากรณีของเกรตการตลาดอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเคมีที่ผสมเพิ่ม เช่น สารเพิ่มสี เพิ่มกลิ่น หรือลดแรงตึงผิว ที่ไม่ทราบส่วนผสมที่ชัดเจน และหากไม่คำนึงถึงอิทธิพลของปริมาณสารในหลอดทดลองก็สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของซีฟิ่งพาราฟินเกรตทางการค้าให้มีความอยู่ระหว่าง 2.9-4.3 วัตต์ต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส ในขณะที่ซีฟิ่งเกรตการตลาดมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าในช่วง 4.3-8.9 วัตต์ต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส

4. สรุป

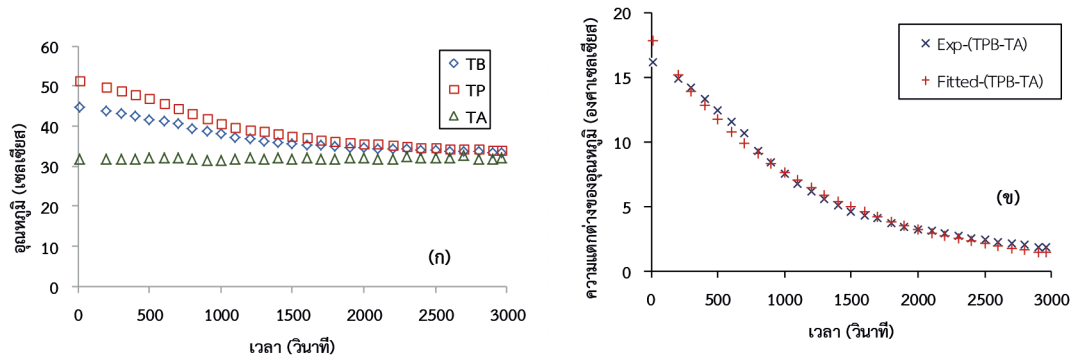
ซีฟิ่งพาราฟินเกรตทางการค้า และการตลาดที่ไม่ทราบองค์ประกอบจำนวนโมเลกุลมีจุดหลอมเหลวในช่วงอุณหภูมิ 44-77 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาศึกษาพฤติกรรมการเย็นตัวของอุณหภูมิห้องประมาณ 30 องศาเซลเซียส พบความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยของพาราฟินกับอุณหภูมิอากาศเป็นแบบเอ็กซีโพเนนเชียล $\Delta T = (T_{PB} - T_A) = \Delta T_0 \exp(-t/\tau)$ ที่สามารถวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์เชิงตัวเลข ได้ค่าคงที่ ΔT_0 และค่า τ ที่นำไปสู่การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติที่มีประมาณ 2.9-8.9 วัตต์ต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนดังกล่าวไม่ขึ้นกับความสูงของมวลสารที่บรรจุในหลอดทดลอง แต่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าลดลงเมื่อชิ้นตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับอัตราการเย็นตัวที่ช้าลง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 จากกองทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ และได้รับความร่วมมือในการเก็บรวบรวม

ข้อมูลจากนายธนากร สวีสระอาด นางสาวชนิสรา
จอมนาสวน และนางสาวญานิกา ธีัญญาผล นักศึกษา

หลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป
และสาขาวิชาฟิสิกส์

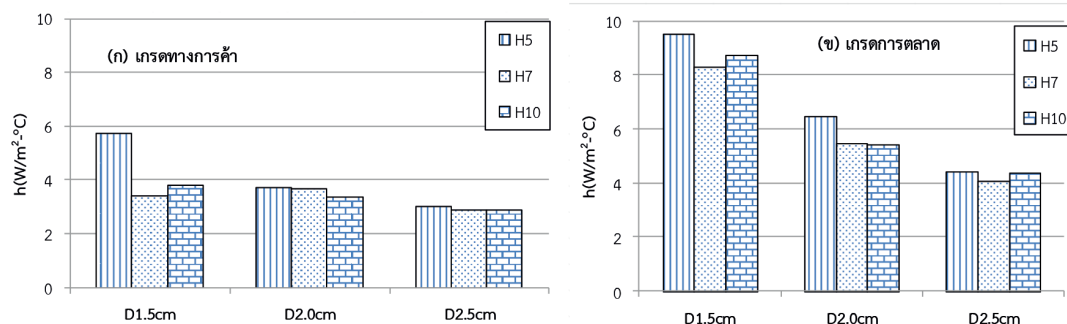


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของกับเวลาของ (ก) T_P , T_B และ T_A และ (ข) $(T_{PB} - T_A)$ ที่ได้จากการทดลอง
และจากการประมาณด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากขีฟุ้งพาราฟินแข็งเกรดทางการค้า และเกรดการตลาดที่บรรจุ
ในหลอดทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5, 2.0 และ 2.5 เซนติเมตร ที่ความสูง 5, 7 และ 10 เซนติเมตร
จาก Fitted Equation ของ $\Delta T_{Fitted} = \Delta T_0 \exp(-t/\tau)$

parameters	D1.5H5	D1.5H7	D1.5H10	D2.0H5	D2.0H7	D2.0H10	D2.5H05	D2.5H07	D2.5H10
(n) Commercial Grade									
ΔT_0 (°C)	32.0	35.0	31.5	26.0	26.0	34.0	31.0	30.0	31.0
τ (min)	12.6	17.0	17.6	34.7	34.4	37.8	77.4	77.9	75.6
Correlation (r)	0.977	0.933	0.984	0.975	0.978	0.882	0.972	0.927	0.981
mc/A (J/m ² °C)	4,351.08	3,448.05	4,005.61	7,749.78	7,576.38	7,614.40	13,865.58	13,392.05	13,039.25
m (g)	4.6	5.0	8.6	8.3	11.4	15.0	14.8	20.0	27.9
h (W/m ² °C)	5.740	3.380	3.800	3.726	3.669	3.354	2.987	2.865	2.875
	$h_{1.5-av}$ (W/m ² °C)		4.307	$h_{2.0-av}$ (W/m ² °C)		3.583	$h_{2.5-av}$ (W/m ² °C)		2.909
(u) Market Grade									
ΔT_0 (°C)	20.0	24.0	24.5	18.0	22.0	26.0	21.0	23.5	24.0
τ (min)	15.3	17.5	16.6	30.0	35.6	35.7	55.0	59.8	55.8
Correlation (r)	0.991	0.981	0.988	0.998	0.986	0.990	0.977	0.988	0.990
mc/A (J/m ² °C)	8,738.21	8,738.21	8,738.21	11,650.95	11,650.95	11,650.95	14,563.69	14,563.69	14,563.69
m (g)	7.1	10.0	14.2	12.6	17.7	25.2	19.7	27.6	39.4
h (W/m ² °C)	9.529	8.306	8.765	6.473	5.457	5.432	4.413	4.057	4.354
	$h_{1.5-av}$ (W/m ² °C)		8.867	$h_{2.0-av}$ (W/m ² °C)		5.787	$h_{2.5-av}$ (W/m ² °C)		4.275

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ เช่น D1.5H5 หมายถึงกรณีหลอดทดลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร พาราฟินสูง
5 เซนติเมตร และ $h_{1.5-av}$ หมายถึงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยจากกรณีหลอดทดลองที่มี
เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร



รูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากขี้ผึ้งพาราฟิน (ก) การเดินทางการค้า และ (ข) การตลาด แยกตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และความสูงของขี้ผึ้งในหลอดทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Ukrainczyk, S. Kurajica and J. Sipusic, "Thermophysical Comparison of Five Commercial Paraffin Waxes as Latent Heat Storage Materials," *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, vol. 24, no. 2, pp. 129-137, Jul. 2010.
- [2] B. Viswanathan, *Energy Sources: Fundamental of Chemical Conversion Processes and Application*, 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [3] D. Berit and W. I. B. Anders, "Effect of Active Hand Exercise and Wax Bath Treatment in Rheumatoid Arthritis Patients," *Arthritis Care and Research*, vol. 5, no. 2, pp. 87-92, Jun. 1992.
- [4] J. Zmywaczyk, P. Zbinkowski, H. Smogor, A. Olejnik and P. Koniorczyk, "Cooling of High-Power LED Lamp Using a Commercial Paraffin Wax," *International Journal Thermophysics*, vol. 38, no. 3, pp. 45, Mar. 2017.
- [5] M. El-Kotb, A. El-Sharkawy, M. N. El Chazly, N.M. Khattab and S. El-Deeb, "Thermal Characteristics of Paraffin Wax for Solar Energy," *Energy Sources*, vol. 20, no. 12, pp. 1113-1126, Sep. 2006.
- [6] M. Vollmer, "Newton's law of cooling revisited," *European Journal of Physics*, vol. 30, pp. 1063-1084, Jul. 2009.
- [7] R. Conti, A. A. Gallitto and E. Fiordilino (2014, January 1). Measurement of the convective heat-transfer coefficient. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1401.0270.pdf>
- [8] B.R. Kusse and E.A. Westwig, *Mathematical Physics: Applied Mathematics for Scientists and Engineers*, 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 2006.
- [9] B. Sherman, *Candle Making*, New York: M. Evans and Company, 2002.
- [10] D. Fisher. (2019, September 30). Paraffin Wax for Making Candles. [Online]. Available: <https://www.thesprucecrafts.com/paraffin-wax-for-making-candles-517274>
- [11] D. Ewen, N. Shurter and P.E. Gundersen, *Applied Physics*, 10th ed. Boston: Prentice Hall, 2012.