

Received: November 3, 2022; Revised: January 24, 2023; Accepted: February 7, 2023

การเปลี่ยนแปลงสีและองค์ประกอบของน้ำสกัดใบชาที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษา

Changing colors and compositions of aqueous chaya leaf extract in relations to temperatures and storage time

ศศิมล มุ่งหมาย¹ วีรเวทย์ อุทโช¹ วัชรพงษ์ วัฒนกุล² ทिता สุนทรวิภาต^{2*} และอดุลย์ อภินันท์³
Sasimon Mungmai¹, Weerawate Utto¹, Watcharapong Wattanakul²,
Thita Soonthornvipat^{2*} and Adul Apinan³

¹คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี

¹Faculty of Agriculture, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani Province

²คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่

²Faculty of Agricultural Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai Province

³สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์

³Research and Development Institute, Buriram Rajabhat University, Buriram Province

*Corresponding Author E-mail Address: thita_soo@cmru.ac.th

บทคัดย่อ

น้ำสกัดจากใบชาเป็นสารเติมแต่งส่วนของอาหารเพื่อเพิ่มรสชาติและสีเขียว ซึ่งมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษา งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีและองค์ประกอบบางประการของน้ำสกัดใบชาที่อุณหภูมิระหว่าง 5-25°C เป็นเวลา 10 วัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าสี a* ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด และกรดแอสคอร์บิกของน้ำสกัดลดลงจากค่าเริ่มต้นอย่างต่อเนื่องตลอดอายุการเก็บรักษา และเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เร็วขึ้นเมื่อเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงขึ้น น้ำสกัดที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C มีอายุการเก็บรักษาเพียง 3 วัน เนื่องจากการเน่าเสียของน้ำสกัด ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มและการตกตะกอน ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางคุณภาพข้างต้น พบว่า การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ในระหว่างการเก็บรักษาของแต่ละอุณหภูมิเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 และสามารถทำนายได้ดีด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ First-order fractional conversion (FOFC) โดยมีค่า R² 0.63-0.99 และค่า Root mean square of error (RMSE) <2 ยกเว้นค่า RMSE ของการเปลี่ยนแปลงค่าสี a* ที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C ซึ่งมีค่าสูงกว่า 2 อัตราเร็วของจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการประมาณโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ FOFC มีค่าเพิ่มขึ้นที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิแบบเอกซ์โปเนนเชียล ความสัมพันธ์ดังกล่าวทำนายได้ดีด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์อาร์เรเนียส (Arrhenius) มีค่า R² 0.76-0.99 และ RMSE <2

คำสำคัญ : ใบชา น้ำสกัดใบชา จลนพลศาสตร์ คลอโรฟิลล์ทั้งหมด กรดแอสคอร์บิก

Abstract

Aqueous chaya leaf extract has been used as food additive for improving taste and color of which the latter tends to change during storage. This research aim to study color changes and some components of the chaya extract kept between 5-25°C for 10 days. The results showed that a* values as well as amounts of the total chlorophyll, and ascorbic acid continuously decreased from their initial values throughout the storage period especially when it storage in the high temperatures. The chaya extract kept at 25°C had only 3 days of self-life. The appearance of spoilage was observed from changing color to dark-brown color and precipitation. The results of kinetic studies on the quality attributed aforementioned found that the kinetic changes of those during the storage in individual temperatures were 1st order kinetic reactions. These were well predicted by the first-order fractional conversion (FOFC) mathematical model given values of R² 0.63-0.99 and root mean square of error (RMSE) <2, except the RMSE of a* values estimated at 10 and 25°C which were higher than 2. Rates of the kinetic changes estimated using the FOFC model exponentially increased in relations with temperatures increased. The relationships were well predicted by the Arrhenius mathematical model of which the values of R² and RMSE were 0.76-0.99 and RMSE <2, respectively.

Keywords: Chaya leaf, Chaya leaf extract, Kinetic, Total chlorophyll, Ascorbic acid

บทนำ

ในปัจจุบันผู้บริโภคได้ให้ความสำคัญของการบริโภคอาหารโดยหลีกเลี่ยงอาหารที่มีส่วนประกอบซึ่งอาจส่งผลเสียต่อสุขภาพโดยเฉพาะสารเติมแต่งอาหารสังเคราะห์ที่อาจเป็นสารก่อมะเร็ง (Sezgin and Ayyildiz, 2017) จากความต้องการของผู้บริโภคดังกล่าวประกอบกับแนวความคิดของเศรษฐกิจหมุนเวียนสีเขียว (Bio-circular and Green economy หรือ BCG) ได้ส่งผลให้เกิดการใช้สารเติมแต่งอาหารจากวัตถุดิบทางธรรมชาติมากขึ้น (สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ, 2563) ในการวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจในสีผสมอาหาร (Food colorant) เนื่องจากสีเป็นลักษณะปรากฏที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์อาหารของผู้บริโภค (สุรวิทย์ และคณะ, 2559; Martins et al., 2016) สารสกัดจากพืชเพื่อใช้เป็นสารเติมแต่งสีได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากรงควัตถุที่ให้สี เช่น สารประกอบแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ให้สีแดง น้ำเงิน และม่วง ในขณะที่สารประกอบคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ให้สีเขียว (Ghosh et al., 2022) ผักไชยา หรือ ผักชายา หรือ ค่น้ำเม็กซีโก (*Cnidocolus chayamansa* McVaugh) มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะวิตามินซี (335.50 mg/100 g) และเจริญได้ดีในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ศศิมล และคณะ, 2565) ใบของผักไชยามีสีเขียวนิยมนำมารับประทานในรูปแบบลูกน้ำร้อนร่วมกับน้ำพริก อีกทั้งนำมาเป็นส่วนประกอบอาหารต่าง ๆ เพื่อเพิ่มรสชาติเนื่องจากมีส่วนประกอบของกรดกลูตามิก (Glutamic acid) ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของผงชูรส (Monosodium glutamate) (Ramirez-Rodrigues et al., 2021)

ใบไชยาได้ถูกใช้เป็นสารเติมแต่งสีเขียวของอาหารโดยผ่านการคั้นใบไชยาสดในน้ำสะอาดแล้วทำการกรองและนำไปผสมกับอาหาร ทั้งนี้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสีและองค์ประกอบอื่น ๆ ของน้ำสกัดใบไชยาในระหว่างการเก็บรักษายังไม่ได้มีการรายงานในเอกสารอ้างอิงหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของน้ำสกัดใบไชยาในด้านสีเขียว คลอโรฟิลล์ และกรดแอสคอร์บิก (วิตามินซี) โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่าง ๆ

ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์ที่สามารถประยุกต์ใช้ในการวางแผนกิจกรรมโลจิสติกส์ของน้ำสกัดใบไผ่ได้ในอนาคต ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการประยุกต์แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับเป็นเครื่องมือสำคัญในการสร้างความเข้าใจต่อจลนพลศาสตร์ (Kinetic) ของการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่ศึกษาของน้ำสกัดใบไผ่ในระหว่างการเก็บรักษา

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. การเตรียมน้ำสกัดจากใบไผ่สด

ใบไผ่ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้นำมาจากหมู่บ้านหนองแก ตำบลแจระแม อำเภอมือง จังหวัดอุบลราชธานี โดยควบคุมความสม่ำเสมอของอายุของต้นไผ่และพื้นที่ปลูกของต้นที่ทำกรสูมเก็บใบ ทั้งนี้ใบไผ่ที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็นใบที่เก็บจากระดับกลาง (Middle) ของต้น โดยการเลือกดังกล่าวเป็นผลจากการศึกษาเบื้องต้น ความสัมพันธ์ของลำดับใบต่อปริมาณสารสำคัญ ซึ่งพบว่า ใบระดับกลางต้น (เป็นใบลำดับที่ 5-8 นับจากยอดของต้น) มีปริมาณวิตามินซีและคลอโรฟิลล์ $335.50 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ และ $4,011.24 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณสูงกว่า ใบส่วนยอด (ปริมาณวิตามินซี $270.56 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ และปริมาณคลอโรฟิลล์ $2,749.24 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) หรือใบระดับที่ต่ำกว่า (ปริมาณวิตามินซี $267.62 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ และปริมาณคลอโรฟิลล์ $3,721.48 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) เมื่อเก็บใบไผ่มาแล้ว ได้นำใบไผ่ไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Thai Poly Chemicals Co., Ltd., Thailand) ความเข้มข้น 150 mg L^{-1} เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อทำลายจุลินทรีย์เบื้องต้น ทิ้งไว้ให้แห้งบนตะแกรงที่สะอาดเพื่อนำสกัดร่วมกับน้ำ และทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำสกัดใบไผ่ต่อไป

วิธีการเตรียมน้ำสกัดจากใบไผ่สดสามารถสรุปโดยสังเขปดังต่อไปนี้ นำใบไผ่มาหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ $3 \times 6 \text{ cm}$ จากนั้นนำไปแช่ในน้ำเปล่าที่มีส่วนผสมของสารโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (ตราแม่กกาแรต ผลิตโดยบริษัท เจอร์ เอฟ แอนด์ บี จำกัด ประเทศไทย) มีอัตราส่วนเท่ากับโซเดียมไฮโปคลอไรต์ 5 g ต่อน้ำเปล่า 4 L เป็นเวลา 1 นาที (กัลยา และ สุภารัตน์, 2563) เพื่อช่วยรักษาสีให้คงความเขียวสด ภายหลังจากได้นำไปต้มในน้ำเดือด (อุณหภูมิประมาณ 100°C) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อลดปริมาณไผ่ในดตามวิธีที่ได้รายงานโดย Godinez-Santillán et al. (2019) เมื่อครบเวลาแล้วนำชิ้นใบไผ่ไปแช่ในน้ำเย็น 5 นาที ทิ้งให้สะเด็ดน้ำบนตะแกรงที่สะอาด 5 นาที นำใบไผ่ที่ได้มาสกัดด้วยน้ำเปล่าในอัตราส่วน 1:1 จากนั้นนำไปกรองด้วยผ้าขาวบาง แล้วนำน้ำสกัดที่ได้บรรจุลงในขวดพลาสติกปริมาตร 150 ml เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5, 10 และ 25°C เป็นเวลา 10 วัน โดยได้ทำการสูมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ต่าง ๆ ในวันที่ 1, 3, 5, 7 และ 10 ของการเก็บรักษา ทั้งนี้การสูมตัวอย่างเพื่อวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด และกรดแอสคอร์บิกได้ทำการสูมทุก ๆ 2 ชั่วโมงในช่วง 6 ชั่วโมงแรกของการเก็บรักษา เนื่องจากดัชนีทั้งสองมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเร็วในช่วงแรกของการเก็บรักษา (ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นผลจากการศึกษาเบื้องต้น)

2. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำสกัดใบไผ่

2.1 การเปลี่ยนแปลงสี

การวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างน้ำสกัดใบไผ่ซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ มาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีในวันที่ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 ของการเก็บรักษา ด้วยเครื่อง Hunter Lab (Color flex 4510, USA) ในหน่วยของ L^* , a^* และ b^* โดยค่า L^* คือ ความสว่างมี ค่าตั้งแต่ 0-100 ซึ่ง 0 คือ สีดำ และ 100 คือ สีขาว ในขณะที่ค่า a^* แสดงความเป็นสีเขียว ($-a^*$) สีแดง ($+a^*$) ส่วนค่า b^* แสดงสีน้ำเงิน ($-b^*$) และสีเหลือง ($+b^*$) โดยในการวิจัยนี้ นำเสนอค่าสี a^* เพื่อแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในความเป็นสีเขียวของน้ำสกัดใบไผ่

2.2 ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (Total chlorophyll)

การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (Total chlorophyll) ในน้ำสกัดจากใบไชยาสดในช่วงเวลาที่ 0, 2, 4 และ 6 วันที่ 1, 3, 5, 7 และ 10 ของการเก็บรักษา ดำเนินการด้วยการดัดแปลงจากวิธีของ Lichtenthaler and Buschmann (2001) โดยนำน้ำสกัดใบไชยาปริมาณ 5 ml เติมสารละลายอะซิโตน (Acetone; Loba Chemie Pvt. Ltd., India) ความเข้มข้น 80% (v/v) ปริมาณ 20 ml ปรับปริมาตรด้วยสารละลายอะซิโตนให้ได้ปริมาตรทั้งหมด 100 ml จากนั้นนำสารละลายที่ได้วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer รุ่น Evolution 300 PC) โดยทำการเปรียบเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงของตัวเปรียบเทียบ (Blank) ที่เป็นสารละลายอะซิโตนความเข้มข้น 80% (v/v) ใน การศึกษานี้ได้วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 645 และ 663 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์ด้วยสูตรดังต่อไปนี้

$$\text{Total chlorophyll} = \frac{20.9(OD\ 645) + 8.02(OD\ 663)}{1000 \times W} \times V$$

กำหนดให้ V คือ ปริมาตรของสารละลายที่นำมาหาปริมาณคลอโรฟิลล์ (ml); W คือ น้ำหนักตัวอย่างที่นำมาหาปริมาณคลอโรฟิลล์ (kg) และ OD คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้จากเครื่อง Spectrophotometer ทั้งนี้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดรายงานในหน่วยของ mg 100 g⁻¹

2.3 ปริมาณกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid content)

วิเคราะห์ปริมาณกรดแอสคอร์บิก (วิตามินซี) ในน้ำสกัดใบไชยาในช่วงเวลาที่ 0, 2, 4 และ 6 วันที่ 1, 3, 5, 7 และ 10 ของการเก็บรักษา ด้วยกระบวนการไตเตรทโดยใช้สารละลายมาตรฐานอินโดฟินอล (Indophenols standard solution) นำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณกรดทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำสกัดโดยคิดเป็นมิลลิกรัมกรดแอสคอร์บิก ต่อ 100 g ดัดแปลงจากวิธีของ AOAC (1990) นำน้ำสกัดใบไชยา 1 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml เติม 5% Trichloroacetic acid ปริมาตร 9 ml เขย่าให้เข้ากันทันที แล้วทำการไตเตรททันทีกับ Indophenols solution จนถึงจุดยุติ คือ เปลี่ยนเป็นสีชมพูที่คงตัว สำหรับตัวอย่างเปรียบเทียบ (Blank sample) นำ 5% Trichloroacetic acid ปริมาตร 10 ml ไตเตรทเช่นเดียวกับน้ำสกัดใบไชยา จากนั้นนำค่าที่ได้จากการไตเตรทมาวิเคราะห์ปริมาณกรดแอสคอร์บิกโดยใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$\text{Ascorbic acid content} = ((X-B) \times (F/E) \times 100) / (V-Y)$$

กำหนดให้ X คือ ปริมาตร Indophenols solution ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง (ml); B คือ ปริมาตร Indophenols solution ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง Blank (ml); F คือ ความเข้มข้นของ Ascorbic acid standard solution (mg ml⁻¹); E คือ ปริมาตรของ Ascorbic acid standard solution (ml); V คือ ปริมาตร Indophenols standard ที่ใช้ในการไตเตรทสารละลายมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก (ml) และ Y คือ ปริมาตร Indophenols standard ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง Blank (ml) ทั้งนี้ปริมาณกรดแอสคอร์บิกรายงานในหน่วยของ mg 100 g⁻¹

3. การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในน้ำสกัดใบไชยา

ข้อมูลซึ่งเป็นผลจากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 2.1-2.3 ได้นำมาศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงค่าสี a* ปริมาณกรดแอสคอร์บิกและปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ทั้งนี้การศึกษาจลนพลศาสตร์เกี่ยวข้องกับอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาที่ส่งผลให้เกิดเปลี่ยนแปลงของสารประกอบในอาหาร โดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยากับความ

เข้มข้นของสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์มีลำดับ (Order) ตามกฎของอัตรา (Rate law) ของการเกิดปฏิกิริยาในระหว่าง การแปรรูปและการเก็บรักษาอาหาร ซึ่งลำดับส่วนใหญ่เท่ากับ 0 หรือ 1 (Zeroth order หรือ First order reaction ตามลำดับ) (Earle and Earle, 2003) จากการศึกษาเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น ของวิตามินซี หรือสารสำคัญในผลิตภัณฑ์อาหารมักเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ซึ่งอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาสัมพันธ์ กับความเข้มข้นหรือปริมาณของสารตั้งต้นในช่วงเวลาต่าง ๆ (เวียงโขง และคณะ, 2559; Robertson, 2012) ในปัจจุบัน ยังไม่พบการศึกษาจนผลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงน้ำสกัดใบชโยา ดังนั้นผู้วิจัยจึงตั้งสมมติฐานว่าการเปลี่ยนแปลงสี ปริมาณคลอโรฟิลล์ และกรดแอสคอร์บิกเกิดขึ้นในรูปแบบของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และผู้วิจัยได้ประยุกต์แบบจำลอง คณิตศาสตร์ First-order fractional conversion model (Eq. 1) ซึ่งแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ได้มีการใช้อย่าง แพร่หลายเพื่อทำนายจนผลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของผลิตภัณฑ์อาหาร (Van et al., 2014)

$$\frac{A_t^i - A_\infty^i}{A_0^i - A_\infty^i} = \exp(-k_{1st}^i t) \quad \text{Eq. 1}$$

กำหนดให้ A_t^i คือ ค่าสิ่งที่สนใจ i ที่เวลาใด ๆ (t); A_0^i คือ ค่าสิ่งที่สนใจ i ที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$); A_∞^i คือ ค่าสิ่งที่ สนใจ i เมื่อเข้าสู่สมดุล ($t \cong \infty$); k_{1st}^i คือ ค่าคงที่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ในค่าสิ่งที่สนใจ i (day^{-1}) และ t คือ ระยะเวลาการเก็บรักษา (day) ทั้งนี้ค่าที่สนใจ i ประกอบด้วย ค่าสี a^* (ไม่มีหน่วย) ความเข้มข้นของ กรดแอสคอร์บิก ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$) และปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ($\text{mg } 100 \text{ g}^{-1}$) นอกจากนี้ การวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของ อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิการเก็บรักษาด้วยความสัมพันธ์อาร์เรเนียส (Arrhenius relationship) ซึ่งมี แบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงใน Eq. 2

$$k_{1st}^i = k_{1st,ref}^i \exp\left(\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad \text{Eq. 2}$$

กำหนดให้ $k_{1st,ref}^i$ คือ ค่าคงที่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ที่อุณหภูมิอ้างอิง (day^{-1}); Ea คือ พลังงานกระตุ้น หรือ activation energy (J mol^{-1}); T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิง ณ ที่นี้ คือ 18°C หรือ 291.15 K การศึกษานี้ ได้ใช้วิธี Non-linear regression เพื่อประมาณค่า k_{1st}^i $k_{1st,ref}^i$ และ Ea ของการเปลี่ยนแปลงสารที่สนใจที่ได้ จากการทดลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Microsoft Excel® 2016 (Microsoft Inc.) การประมาณค่าโดยใช้ Non-linear regression นั้นดำเนินการตามวิธีที่ได้นำเสนอโดย Avila and Silva (1999) โดยความแม่นยำของการทำนายค่าที่ได้จากการ ทดลองด้วย Eq. 1 แสดงโดยค่า Root mean square of error (RMSE) และค่า R^2 โดยประยุกต์แนวทางที่รายงานโดย Phungarm et al. (2018)

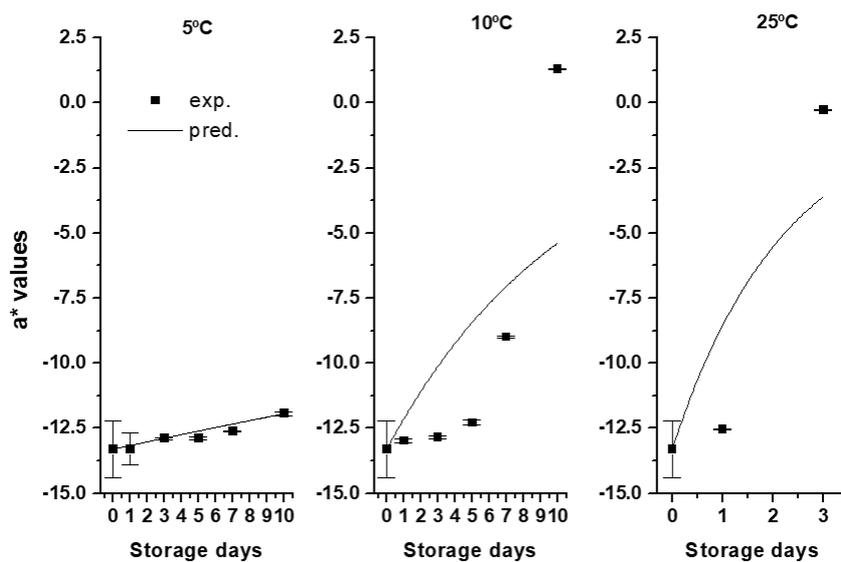
4. การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์สถิติ

งานวิจัยนี้วางแผนการทดลองแบบ Full factorial in randomized completely block design (RCBD) โดยมีปัจจัย คือ อุณหภูมิการเก็บรักษา (5, 10 และ 25°C) และระยะเวลาการเก็บรักษา (1, 3, 5, 7 และ 10 วัน) ดำเนินการดำเนินการ 3 ซ้ำการทดลอง การวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาระหว่างกุมภาพันธ์-เมษายน 2565

ผลการวิจัย

1. การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีเขียว (a^*)

ค่าความเป็นสีเขียว (a^*) ของน้ำสกัดใบชาเขียวมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้น (มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -13.30) ตามระยะเวลาของการเก็บรักษา (รูปที่ 1) นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าสี a^* เกิดขึ้นได้สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น จากข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 1 พบว่า ค่าสี a^* เริ่มมีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนหลังจากการเก็บรักษา 3 วัน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C ซึ่งมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดดหรือเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงค่าสี a^* ของน้ำสกัดใบชาเขียวที่อุณหภูมิ 5°C มีแนวโน้มเกิดขึ้นได้น้อยกว่า (รูปที่ 1) ทั้งนี้ น้ำสกัดจากใบชาเขียวซึ่งหลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 4 วัน มีสีคล้ำและตกตะกอน ตลอดจนมีกลิ่นไม่พึงประสงค์และไม่เหมาะกับการนำมาประกอบอาหาร จึงได้ยุติการวัดค่าสี และองค์ประกอบอื่น ๆ หลังจากวันที่ 3 ของการเก็บรักษา



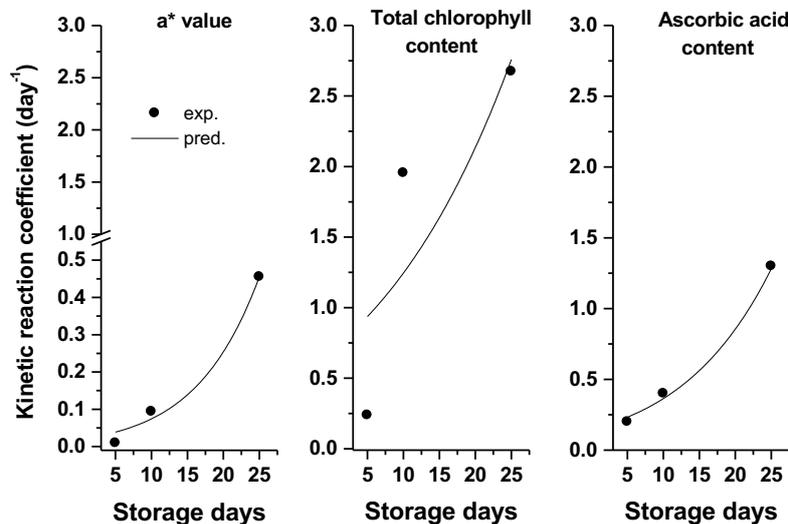
รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่าสี a^* ในน้ำสกัดใบชาเขียวเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5, 10 และ 25°C เป็นเวลา 10 วัน ทั้งนี้สัญลักษณ์ ■ และบาร์ (Bars) แทนค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (n=3) (exp.) และเส้นสีดำ คือ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ Eq. 1 (pred.)

เมื่อทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงค่าสี a^* ของน้ำสกัดใบชาเขียวในแต่ละอุณหภูมิ พบว่า สมการ Eq. 1 สามารถทำนายแนวโน้มและค่าสี a^* ได้ดีโดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 5°C โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.93 และค่า RMSE เท่ากับ 0.12 (ตารางที่ 1) ในทางตรงกันข้ามค่าที่ทำนายจากสมการ Eq. 1 สำหรับอุณหภูมิ 10 และ 25°C มีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองโดยเฉพาะหลังจากการเก็บรักษา 3-10 วัน ซึ่งมีค่า R^2 และ RMSE อยู่ในช่วงของ 0.63-0.80 และ 2.13-2.44 ตามลำดับ (ตารางที่ 1) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่า $k_{1st}^{a^*}$ ที่ได้จากการทำนายของสมการ Eq. 1 พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น โดยค่า $k_{1st}^{a^*}$ ที่อุณหภูมิ 25°C มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 5 และ 10°C ประมาณ 46 และ 5 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้ในรูปที่ 2 แสดงให้ทราบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k_{1st}^{a^*}$ และอุณหภูมิการเก็บรักษาเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล และสามารถทำนายโดยสมการ Eq. 2 ได้อย่างดี โดยมีค่า R^2 และ RMSE เท่ากับ 0.99 และ 0.01 ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับ 1 (Eq.1) ของการเปลี่ยนแปลงค่าสี a^* ของน้ำสกัดจากใบไชยาสด เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5, 10 และ 25°C เป็นเวลา 10 วัน

อุณหภูมิ (°C)	$k_{1st}^{a^*}$	R^2	RMSE
5	0.01	0.93	0.09
10	0.09	0.63	2.44
25	0.46	0.80	2.13

หมายเหตุ: $k_{1st}^{a^*}$ = ค่าคงที่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของค่าสี a^* (รายงานในหน่วย day^{-1})



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (First order kinetic reaction coefficients) (ข้อมูลสัญลักษณ์ \blacklozenge ; exp.) สำหรับค่าสี a^* value ($k_{1st}^{a^*}$) ค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (Total chlorophyll content; k_{1st}^{chl}) และปริมาณกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid content; k_{1st}^{asc}) ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิการเก็บรักษาและการทำนายด้วยสมการ Eq. 2 (ข้อมูลเส้น; pred.)

ตารางที่ 2 ตัวแปรในความสัมพันธ์อาร์เรย์เนยส (Eq. 2) ระหว่างค่า $k_{1st}^{a^*}$ และอุณหภูมิการเก็บรักษา พร้อมด้วยค่า R^2 และ RMSE

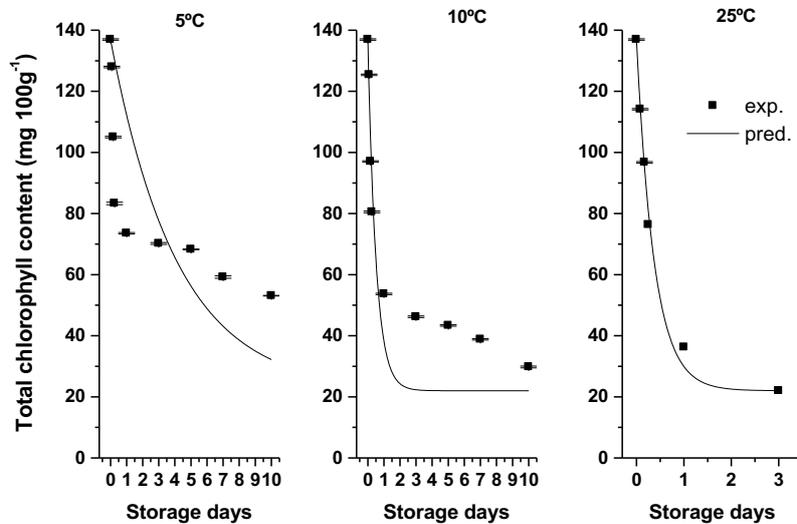
$k_{1st,ref}^{a^*}$	Ea (kJ mol^{-1})	R^2	RMSE
0.20	84.91	0.99	0.01

หมายเหตุ: $k_{1st,ref}^{a^*}$ = ค่าคงที่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของค่าสี a^* ในน้ำสกัดใบไชยาและอุณหภูมิ 18°C (รายงานในหน่วย day^{-1})

2. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด

ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดของน้ำสกัดใบไชยามีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจากค่าวันเริ่มต้น (มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $136.95 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) เมื่อมีระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3) ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดมีแนวโน้มเกิดการสูญเสียได้เร็วที่สัมพันธ์กับระดับอุณหภูมิการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ น้ำสกัดใบไชยาซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C มีปริมาณคลอโรฟิลล์

ทั้งหมดลดลงตั้งแต่ชั่วโมงที่ 2 และลดต่ำลงที่สุดในวันที่ 3 โดยมีค่าต่ำกว่าค่าเริ่มต้นประมาณ 6.23 เท่า นอกจากนี้หลังจากวันที่ 3 ผู้วิจัยไม่ได้วิเคราะห์ เนื่องจากน้ำสกัดใบช่ายามีสี และกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ซึ่งได้นำเสนอก่อนหน้านี้ เมื่อพิจารณาในรูปที่ 3 พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดของน้ำสกัดใบช่ายที่อุณหภูมิ 5 °C โดยเฉพาะในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการเก็บรักษา เกิดการลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดที่อุณหภูมิ 10 และ 25 °C ซึ่งเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่ชั่วโมงที่ 1 ของการเก็บรักษา



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ในน้ำสกัดใบช่ายเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5, 10 และ 25°C เป็นเวลา 10 วัน โดย 0.08 คือ การวิเคราะห์ในชั่วโมงที่ 2; 0.17 คือ การวิเคราะห์ในชั่วโมงที่ 4 และ 0.25 คือ การวิเคราะห์ในชั่วโมงที่ 6 ทั้งนี้สัญลักษณ์ ■ และบาร์ (bars) แทนค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากทดลอง (n=3) (exp.) และเส้นสีดำ คือ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ Eq. 1 (pred.)

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับ 1 (Eq.1) ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดของน้ำสกัดจากใบช่ายสด เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 10 และ 25 °C เป็นเวลา 10 วัน

อุณหภูมิ (°C)	k_{1st}^{chl}	R^2	RMSE
5	0.24	0.70	1.81
10	1.95	0.96	1.22
25	2.67	0.99	0.26

หมายเหตุ: k_{1st}^{chl} = ค่าคงที่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (รายงานในหน่วย day⁻¹)

เมื่อทำการศึกษากลจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในแต่ละอุณหภูมิ พบว่า สมการ Eq. 1 สามารถทำนายภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงได้ดี โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 5 และ 25 °C โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.78-0.99 และค่า $RMSE \leq 1.45$ ทั้งนี้การประมาณค่าของปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดที่อุณหภูมิ 5 และ 10 °C โดยสมการ Eq. 1 มีค่าคลาดเคลื่อนที่เห็นได้ชัดภายหลังจากวันที่ 5 และ 1 ตามลำดับ (รูปที่ 3) ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{1st}^{chl} และอุณหภูมิการเก็บรักษา (รูปที่ 2 พิจารณา ณ รูปย่อย Total chlorophyll content และตารางที่ 4) พบว่า สมการ Eq. 2

สามารถทำนายแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าของ k_{1st}^{chl} โดยมีค่า R^2 และ RMSE เท่ากับ 0.76 และ 0.41 ตามลำดับ ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนของการทำนายสังเกตได้ชัดที่อุณหภูมิ 5 และ 10°C

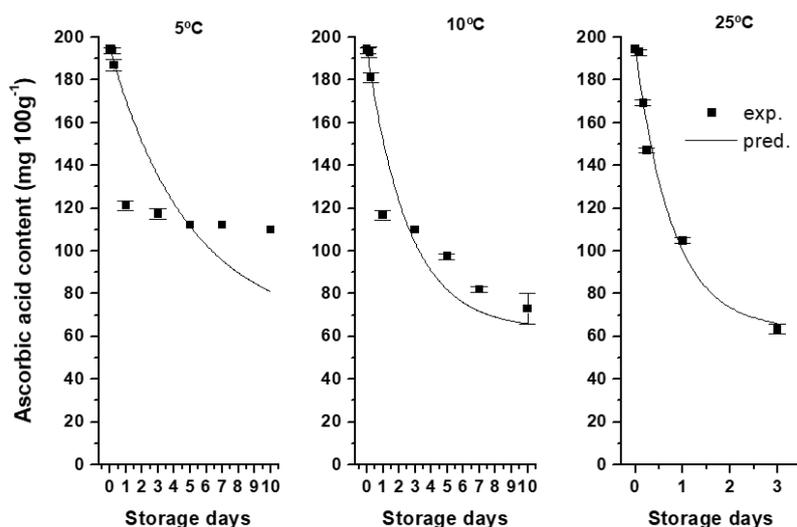
ตารางที่ 4 ตัวแปรในความสัมพันธ์อาร์รี่เนียส (Eq. 2) ระหว่างค่า k_{1st}^{chl} และอุณหภูมิการเก็บรักษา พร้อมด้วยค่า R^2 และ

$k_{1st,ref}^{chl}$	Ea (kJ mol ⁻¹)	R^2	RMSE
1.93	37.03	0.76	0.41

หมายเหตุ: $k_{1st,ref}^{chl}$ = ค่าคงที่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ในน้ำสกัดใบไชยาและอุณหภูมิ 18°C (รายงานในหน่วย day⁻¹)

3. การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดแอสคอร์บิก

ปริมาณกรดแอสคอร์บิกของน้ำสกัดใบไชยามีค่าลดลงจากค่าที่เริ่มต้น (มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 194.44 mg 100 g⁻¹) ตามระยะเวลาการเก็บรักษา (รูปที่ 4) โดย พบว่า ปริมาณกรดแอสคอร์บิกที่อุณหภูมิ 5°C มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการเก็บรักษา ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการเก็บรักษา ณ วันที่ 3 ของการเก็บรักษา พบว่า ปริมาณกรดแอสคอร์บิกมีค่าลดลงมากกว่า 3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้น ทั้งนี้ปริมาณกรดแอสคอร์บิกของน้ำสกัดใบไชยาที่ 5 และ 10°C มีปริมาณที่หลงเหลือในวันสุดท้ายของการเก็บรักษาที่สูงกว่าการเก็บรักษาที่ 25°C โดยลดลงจากค่าเริ่มต้นประมาณ 2 และ 2.67 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในน้ำสกัดใบไชยาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5, 10 และ 25°C เป็นเวลา 10 วัน โดย 0.08 คือ การวิเคราะห์ในชั่วโมงที่ 2; 0.17 คือ การวิเคราะห์ในชั่วโมงที่ 4 และ 0.25 คือ การวิเคราะห์ในชั่วโมงที่ 6 ทั้งนี้สัญลักษณ์ ■ และบาร์ (bars) แทนค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (n=3) (exp.) และเส้นสีดำ คือ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ Eq. 1 (pred.)

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับ 1 (Eq.1) ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกของน้ำสกัดจากใบไผ่สด เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5, 10 และ 25°C เป็นเวลา 10 วัน

อุณหภูมิ (°C)	k_{1st}^{asc}	R^2	RMSE
5	0.20	0.77	1.20
10	0.39	0.93	0.84
25	1.28	0.98	0.41

หมายเหตุ: k_{1st}^{asc} = ค่าคงที่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของปริมาณกรดแอสคอร์บิก (รายงานในหน่วย day^{-1})

ในรูปที่ 4 แสดงข้อมูลจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกของน้ำสกัดใบไผ่สด พบว่า สมการ Eq. 1 สามารถทำนายภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้ดี โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 25°C โดยมีค่า R^2 และ RMSE อยู่ในช่วง 0.77-0.98 และ 0.41-1.20 ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า ความคลาดเคลื่อนของการทำนายด้วยสมการ Eq. 1 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 5°C มากกว่าที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง k_{1st}^{asc} และอุณหภูมิการเก็บรักษาซึ่งแสดงในรูปที่ 2 (พิจารณา ณ รูปย่อย Ascorbic acid content) และตารางที่ 6 พบว่า สมการ Eq. 2 สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงค่า k_{1st}^{asc} ได้เป็นอย่างดีโดยมีค่า R^2 และ RMSE เท่ากับ 0.99 และ 0.02 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ตัวแปรในความสัมพันธ์อาร์เรย์เนิส (Eq. 2) ระหว่างค่า k_{1st}^{asc} และอุณหภูมิการเก็บรักษา พร้อมด้วยค่า R^2 และ RMSE

$k_{1st,ref}^{chl}$	Ea (kJ mol ⁻¹)	R^2	RMSE
0.74	58.97	0.99	0.02

หมายเหตุ: $k_{1st,ref}^{a*}$ = ค่าคงที่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ของปริมาณกรดแอสคอร์บิก ในน้ำสกัดใบไผ่สดและอุณหภูมิ 18°C (รายงานในหน่วย day^{-1})

การอภิปรายผล

ใบไผ่สดมีสีเขียวเข้มเมื่อผ่านกระบวนการสกัดที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าสีเขียว (a^*) เริ่มต้นประมาณ -13.30 ที่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของสีใบสดที่มีค่าสี a^* ประมาณ -10 ซึ่งรายงานโดย ศศิมล และคณะ (2565) ที่ดำเนินการศึกษาการจืดเก็บใบไผ่สดในบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากระบวนการการสกัดที่ประยุกต์ใช้ในการศึกษานี้ให้น้ำสกัดที่มีสีเขียวคล้ายสีใบสดจึงมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อให้สีเขียวแก่อาหาร เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด และกรดแอสคอร์บิก ซึ่งเป็นลักษณะคุณภาพ (Quality attributes) ที่สำคัญหนึ่งของผลิตภัณฑ์อาหาร (Hanh et al., 2016; Indrasti et al., 2018) พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างการเก็บรักษา และการเปลี่ยนแปลงมีแนวโน้มเกิดขึ้นได้เร็วมากเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของลักษณะคุณภาพเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง เอนไซม์สำคัญในการเปลี่ยนแปลงหรือเสื่อมสลายของสารประกอบคลอโรฟิลล์ซึ่งให้สีเขียวและกรดแอสคอร์บิก คือ คลอโรฟิลล์เลส (Chlorophyllase) และ แอสคอร์เบตออกซิเดส (Ascorbate oxidase) ตามลำดับ (Rasul and Inanc, 2014; Akyildiz et al., 2021) กิจกรรมของเอนไซม์โดยทั่วไปมีความสัมพันธ์

แบบเอกโปเนนเชียลกับอุณหภูมิ ดังแสดงโดยความสัมพันธ์อาร์เรเนียส (Eq. 2) เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ดังกล่าว การเปลี่ยนแปลงของทั้งสารประกอบคลอโรฟิลล์และกรดแอสคอร์บิกในน้ำสกัดใบชาจึงเกิดขึ้นในอัตราเร็วที่สูงเมื่ออุณหภูมิ การเก็บรักษาเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 25°C พบว่า การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มทำให้คุณภาพของน้ำสกัดใบชา ลดลงอย่างมาก และเป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ต่อการบริโภค ดังผลการทดลองที่แสดงให้ทราบถึงการตกตะกอน หรือการเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีคล้ำน้ำตาล

ผลการศึกษากการเปลี่ยนแปลงลักษณะคุณภาพทั้งสามซึ่งแสดงในรูปที่ 1, 3 และ 4 ทำให้ทราบได้ว่าจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 กล่าวคือ อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับปริมาณของสารตั้งต้น ในแต่ละช่วงเวลา (Earle and Earle, 2003) สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในแต่ละอุณหภูมิซึ่งพบว่า การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก หรือวันที่ 1-3 ของการเก็บรักษา ทั้งนี้ข้อมูลจลนพลศาสตร์ที่ศึกษากการเปลี่ยนแปลงของน้ำสกัดใบชาเป็นองค์ความรู้ใหม่ที่ยังไม่ได้มีการรายงานในเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง ความรู้ด้านจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษานี้จึงสนับสนุนองค์ความรู้ด้านการลดลงของสีเขียว หรือ กรดแอสคอร์บิกในผลิตภัณฑ์อาหารระหว่างการแปรรูป หรือการเก็บรักษา ซึ่งมีการรายงานอย่างกว้างขวางว่าเป็นจลนพลศาสตร์แบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ดังตัวอย่างของการวิจัย การเปลี่ยนสีของผลแอปเปิ้ลคอกแท่ง (Deng et al., 2022) เนื้อถั่วพีแคน (Prabhakar et al., 2022) หรือข้าวกล้องและข้าวฮางอก (เวียงโขง และคณะ, 2559)

เมื่อพิจารณาข้อมูลจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงจากในงานวิจัยนี้ (รูปที่ 1-4) พบว่า แม้ว่าสมการ Eq. 1 สามารถทำนายภาพรวมและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ทั้งสามที่ศึกษา แต่ความคลาดเคลื่อนที่ชัดเจนของการทำนายนั้นอยู่ในกลุ่มข้อมูล (1) ค่า a^* ที่ 25°C (รูปที่ 1) ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดที่อุณหภูมิ 10°C (รูปที่ 3) และ ปริมาณกรดแอสคอร์บิกที่อุณหภูมิ 5°C (รูปที่ 4) ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวสนับสนุนด้วยค่า RMSE ที่มากกว่า 2 โดยค่า RMSE ที่แสดงถึงความแม่นยำในการทำนายโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ควรมีค่าที่ต่ำกว่า 2 (Yang and Chinnan, 1988) ตลอดจนค่า R^2 ที่ต่ำกว่า 0.90 ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจเป็นผลจากอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่ส่งผลให้กระบวนการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้ช้ากว่าการทำนายโดยสมการ Eq. 1 ดังในกรณีของการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ภายหลังจากวันที่ 1 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C หรือปริมาณกรดแอสคอร์บิกในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการเก็บรักษาที่ 5°C ซึ่งพบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่ทำนายโดยสมการ Eq. 1 (รูปที่ 3 และรูปที่ 4) ทั้งนี้จากการทดลองทำให้คาดคะเนว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำอาจช่วยชะลออัตราเร็วของขั้นตอนย่อยในปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงคลอโรฟิลล์และกรดแอสคอร์บิกจึงส่งผลให้อัตราเร็วในภาพรวมลดลง อย่างไรก็ตามสมการ Eq. 1 ไม่ได้รวมผลที่เกิดขึ้นในขั้นตอนย่อย ๆ ต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยรวม ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาในประเด็นนี้ต่อไปในอนาคตโดยเฉพาะขั้นตอนที่กำหนดอัตราเร็ว (Rate-limiting step) ของการเปลี่ยนแปลงคลอโรฟิลล์และกรดแอสคอร์บิก ในทางตรงกันข้ามที่อุณหภูมิ 25°C พบว่า ความคลาดเคลื่อนในการทำนายโดยสมการ Eq. 1 ที่ 25°C เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในกรณีของกรดแอสคอร์บิกและคลอโรฟิลล์ อาจเป็นผลเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 25°C ไม่ส่งผลต่อการชะลอของขั้นตอนย่อยและการเกิดปฏิกิริยาโดยรวม ทั้งนี้กลไกที่ซับซ้อนในการเกิดปฏิกิริยา (Complex reaction mechanism) ส่งผลต่อความแม่นยำในการทำนายจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาดังที่มีการอธิบายในกรณีของการเกิดสีน้ำตาลจากปฏิกิริยามเมลลาร์ด (Maillard reaction) (Labuza, 2005) หรือในกระบวนการทางชีวภาพและชีวเคมีอื่น ๆ (Peleg et al., 2004) อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของการทำนายค่า a^* ที่อุณหภูมิ 25°C (รูปที่ 1) อาจเป็นผลจากการเนาเสียของน้ำสกัดใบชาจึงทำให้ค่า a^* มีค่าที่เปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นได้เร็วและมีค่าที่สูงมากแม้เก็บรักษาเพียง 3 วัน

จากข้อมูลในรูปที่ 2 และตารางที่ 2, 4 และ 6 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาซึ่งเป็นค่า k_{1st}^i และอุณหภูมิการเก็บรักษาเป็นรูปแบบของเอกซ์โปเนนเชียล หรือเป็นรูปแบบของความสัมพันธ์อาร์เรเนียส โดยสามารถทำนายได้ดีด้วยสมการ Eq. 2 ความสัมพันธ์อาร์เรเนียสได้รับการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการศึกษาจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลง

คุณภาพหรือองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์อาหารในระหว่างการเก็บรักษา (Earle and Earle, 2003; Roberston 2012) ผลการศึกษาความสัมพันธ์อาร์เรเนียนี้แสดงว่านี่สนับสนุนการเปลี่ยนแปลงลักษณะคุณภาพของน้ำสกัดใบไชยาที่มีแนวโน้มเกิดขึ้นในอัตราเร็วที่สูงเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้สนับสนุนองค์ความรู้ด้านการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารที่ควรเก็บรักษาในที่อุณหภูมิต่ำเพื่อชะลอการเสื่อมเสีย ทั้งนี้ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ที่ได้จากการประมาณค่าของสมการ Eq. 2 อยู่ในช่วง 37-84 kJ mol⁻¹ ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกันกับค่า E_a ของปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสลายของวิตามินและสี (Vitamin and Color degradation) หรือปฏิกิริยาของเอนไซม์ (Enzyme reaction) ที่มีช่วงระหว่าง 42-147 kJ mol⁻¹ (Roberston, 2012) ค่าพลังงานกระตุ้นแสดงถึงระดับความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาจากค่า E_a ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในน้ำสกัดใบไชยา จึงคาดคะเนได้ว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จึงสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงหรือเสื่อมเสียที่เร็วของน้ำสกัดใบไชยาซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C

บทสรุป

จากผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงสี ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด และกรดแอสคอร์บิกของน้ำสกัดใบไชยา มีความสัมพันธ์กับทั้งเวลาและอุณหภูมิการเก็บรักษา โดยจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงโดยรวมเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยามีความสัมพันธ์แบบอาร์เรเนียนี้กับอุณหภูมิการเก็บรักษา จากข้อมูลการวิจัยนี้จึงนำเสนอในเบื้องต้นว่าควรเก็บรักษาน้ำสกัดใบไชยาที่อุณหภูมิระหว่าง 5-10°C เพื่อชะลอการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางคุณภาพและควรเก็บรักษาไว้ประมาณ 7-10 วัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิเย็นดังกล่าว ทั้งนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในคุณภาพการเก็บรักษาอื่น ๆ โดยเฉพาะการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในระหว่างการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ และ/หรือคุณภาพทางประสาทสัมผัสสำหรับการประเมินอายุการเก็บรักษาที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น ในภาพโดยรวมวิธีการศึกษาที่ได้ประยุกต์ในการวิจัยนี้มีประสิทธิภาพและส่งผลให้สามารถทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้ องค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการจัดการโลจิสติกส์ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการอุณหภูมิและระยะเวลาการขนส่ง/เก็บรักษาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- กัลยา นามวงศ์สา และ สุดารัตน์ สดสร้อย. (2563). ผลของสภาวะอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผงใบไชยาในบรรจุภัณฑ์. รายงานการวิจัย. สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี.
- เวียงโขง วันสะหว่าง, วีระเวทย์ อุทโซ, เอกสิทธิ์ อ่อนสอาด, วชิราพรรณ บุญญาพิพิงค์ และเมทินี มาเวียง. (2559). ผลของการเก็บรักษาข้าวเปลือกในบรรจุภัณฑ์อุณหภูมิและระยะเวลาต่อคุณภาพของข้าวฮางอก. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 34(3): 73-85.
- ศศิมล มุ่งหมาย, วัชรพงษ์ วัฒนกุล, อดุลย์ อภินันท์ และวีระเวทย์ อุทโซ. (2565). ผลของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของใบไชยาสด. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์. 6(2): 33-49.
- สุรวีทย์ นันทการรัตน์, ภาณุภัทร ตางาม, อนัญญา ไทยบุญนาคน, บุญชัย ดั่งสวัสดิ์ และสุวรรณา รุ่งเรือง. (2559). การผลิตผงสีจากวัชพรรณชาติเพื่อผลิตภัณฑ์อาหาร. รายงานการวิจัย. สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กรุงเทพมหานคร.

- สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ. (2563). เอกสาร BCG in Action กลุ่มอาหาร. รายงานการวิจัย. สถาบันทรัพย์สินทางปัญญาแห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร.
- Akyildiz A., Mertoglu T. S. and Agcam E. (2021). Kinetic study for ascorbic acid degradation, hydroxy methyl furfural and furfural formations in orange juice. *Journal of Food Composition and Analysis*. 102(1): 11-16.
- AOAC. (1990). Official methods of the association of analytical chemistry international 16th Edition. Gaithersburg: MD.
- Avila I.M.L.B. and Silva C.L.M. (1999). Modelling kinetics of thermal degradation of colour in peach puree. *Journal of Food Engineering*. 39(2): 161-166.
- Deng L., Xiong C., Pei Y., Zhu Z., Zheng X., Zhang Y., Yang X., Lui Z. and Xiao Y. (2022). Effects of various storage conditions on total phenolic, carotenoids, antioxidant capacity, and color of dried apricots. *Food Control*. 136(3): 1-10.
- Earle R. L. and Earle M. D. (2003). Fundamentals of food reaction technology. Leatherhead. NY.
- Godínez-Santillan R. S., Chavez-Servin J. L., Garcia-Gasca T. and Guzman-Maldonado S. H. (2019). Phenolic characterization and antioxidant capacity of alcoholic extracts from raw and boiled leaves of *Cnidioscolus aconitifolius* (Euphorbiaceae). *Acta Botanica Mexicana*. 126(1): 1-15.
- Ghosh S., Sarkar T., Das A. and Chakraborty R. (2022). Natural colorants from plant pigments and their encapsulation: An emerging window for the food industry. *LWT-Food Science and Technology*. 153 (112527): 1-12.
- Hanh N.T., Hoang N.V. and Tao P.T.P. (2016). Change of chlorophyll and vitamin c in green peas (*Pisum Sativum*) during thermal processing. *Vietnam Journal of Agricultural Sciences*. 14(7): 1068–1074.
- Indrasti D., Andarwulan N., Eko H.P.E.H. and Wulandari N. (2018). Stability of chlorophyll as natural colorant: a review for suji (*Dracaena angustifolia* Roxb.) leaves case. *Current Research in Nutrition and Food Science*. 6(3): 609-625.
- Labuza T.P. (2005). Interpreting the complexity of the kinetics of the maillard reaction millard reactions in chemistry food and health. Woodhead publishing. Sawston.
- Lichtenthaler H.K. and Buschmann C. (2001). Chlorophylls and carotenoids–measurement and characterisation by UV-VIS. current protocols in food analytical chemistry (CPFA), (supplement 1). John Wiley. NY.
- Martins N., Roriz C.L., Patricia M.P., Barros L. and Ferreira I.C.F.R. (2016). Food colorants: challenges, opportunities and current desires of agroindustry to ensure consumer expectations and regulatory practices. *Trends in Food Science & Technology*. 52(1): 1-15.
- Peleg M., Corradini M.G. and Normand M.D. (2004). Kinetic models of complex biochemical reactions and biological processes. *Chemie Ingenieur Technik*. 76(4): 413-423.
- Phungam N., Utto W. and Pruthitkul R. (2018). Interaction between surface coating using cabbage leaf wax extract and temperature on water vapour and gas exchange properties of fresh okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) moench). *International Food Research Journal*. 25(5): 1885-1892.

- Prabhakar H., Bock C., Kerr W. and Kong F. (2022). Pecan color change during storage: kinetics and modeling of the processes. *Current Research in Food Science*. 5(1): 118-128.
- Ramirez R.M.M., Metri O.J.C., Diaz M.G. and Baigts A.D.K. (2021). Use of chaya (*Cnidocolous chayamansa*) leaves for nutritional compounds production for human consumption. *Journal of Mexican Chemical Society*. 65(1): 261-271.
- Robertson G.L. (2012). *Food packaging: principles and practice*. 3rd Edition. Taylor and Francis Group. NY.
- Rasul H. and Inanç A. (2014). Thermal stability of chlorophyll pigments in virgin olive oil. *KSU Journal of Natural Sciences*. 17(2): 34-40.
- Sezgin A.C. and Ayyildiz S.V. (2017). Science within food: up-to-date advances on research and educational ideas. *Food Additives: Colorants*. Spain: Formatex Research Center. 3(1): 87-94.
- Van L.A., Christiaens S., Colle I., Grauwet T., Lemmens L., Smout C., Van B.S., Vervoort L. and Hendrickx M. (2014). Kinetic data for biochemical and microbiological processes during thermal processing. In Rao M.A., Rizvi S.S.H., Datta A.K. and Ahmed J., Edition. *Engineering properties of foods*. Boca Raton. Springer Singapore. London.
- Yang C.C. and Chinnan M.S. (1988). Modeling the effect of O₂ and CO₂ on respiration and quality of stored tomatoes. *Transactions of the ASAE*. 31(3): 920-925.