

Received: December 14, 2023; Revised: July 8, 2024; Accepted: August 20, 2024

ผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเก็บเกี่ยวของใบผักโขมสวนสด Effect of storage conditions on postharvest changes of fresh amaranth leaves

สุกัญญา บุญตะไนย์¹ หทัยพร กัมพวงค์¹ กฤตยา อุทโธ² และวีรเวทย์ อุทโธ^{1,3,4*}Sukanya Buntanai¹, Hathaiphon Kampawong¹, Grittaya Uttho² and Weerawate Uttho^{1,3,4*}¹คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี¹Faculty of Agriculture, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani Province²คณะบริหารศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี²Faculty of Management Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani Province³ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กรุงเทพฯ³Postharvest Technology Innovation Center, Office of the Higher Education Commission, Bangkok⁴ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมอาหารพื้นบ้าน มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี⁴Local Food Industry Research and Development Center, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani Province

*Corresponding Author E-mail Address: weerawate.u@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

ใบผักโขมสวนสดมีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวได้เร็วส่งผลให้ความสามารถทางการตลาดลดลง การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษาประกอบด้วยอุณหภูมิ (10-35°C) และเวลา (10 วัน) ต่ออัตราการหายใจ น้ำหนักสด และกรดแอสคอร์บิกภายหลังการเก็บเกี่ยวของใบผักโขมสวนสด ผลทดลอง พบว่า การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวดังกล่าวที่อุณหภูมิ 10°C เกิดขึ้นได้ช้ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ 25°C และ 35°C การเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจสัมพันธ์กับอุณหภูมิในลักษณะของเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) และทำนายได้ดีด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius model) มีค่า R^2 และ RMSE (Root Mean Square of Errors) เท่ากับ 0.98 และ 0.08 ตามลำดับ และค่า energy of activation เท่ากับ 32.65 kJ mol⁻¹ ใบผักโขมสูญเสียน้ำหนักสดอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะที่ 25°C และ 35°C มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักสดสูงกว่า 2.50 ภายหลังเก็บรักษา 3 วัน ใบผักโขมเหี่ยวเฉาและไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ในทางตรงกันข้ามที่ 10°C ใบผักโขมสูญเสียน้ำหนักสดต่ำกว่าร้อยละ 3.50 และมีลักษณะปรากฏที่สอดคล้องต่อการเก็บรักษา ปริมาณกรดแอสคอร์บิกลดลงอย่างต่อเนื่องจากค่าเริ่มต้น (11.48 mg 100g⁻¹) และเกิดขึ้นได้เร็วกว่าที่ 25°C และ 35°C ปริมาณกรดแอสคอร์บิกในแต่ละช่วงเวลาทำนายได้ดีด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ First Order Fractional Conversion (FOFC model) มีค่า R^2 และ RMSE เท่ากับ 0.99 และ 0.001-0.120 ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์ FOFC model มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิแบบเอกซ์โปเนนเชียลและทำนายได้ดีด้วย Arrhenius model มีค่า R^2 และ RMSE เท่ากับ 0.99 และ 0.02 ตามลำดับ และมีค่า energy of activation เท่ากับ 93.10 kJ mol⁻¹ ข้อมูลจากผลการวิจัยนี้เป็นแนวทางเพื่อวางแผนชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผักโขมสดในระหว่างการเก็บรักษา

คำสำคัญ: อัตราการหายใจ น้ำหนักสด ปริมาณกรดแอสคอร์บิก ใบผักโขมสด

Abstract

Fresh amaranth leaves have rapid changes in postharvest qualities causing decreases in marketability. This research undertaken purposely was to study effects of storage conditions including temperature (10-35°C) and time (10 days) on postharvest respiration rates, fresh weight, and ascorbic acid contents of fresh amaranth leaves. Experimental results show that such postharvest changes occurred at 10°C were slower than those at 25°C and 35°C. Increases in respiration rates were in exponential relations to storage temperatures, and these were well predicted using the Arrhenius model having R^2 and RMSE (root mean square of errors) values of 0.98 and 0.08 respectively. The energy of activation was 32.65 kJ mol⁻¹. The amaranth leaves losses their fresh weights continuously especially at 25°C and 35°C at which the fresh weight loss percentages were higher than 2.50 after 3-day storage. The leaves apparently became heavily wilt and lost their marketability. In contrast at 10°C, the amaranth leaves had the fresh weight loss percentages lower than 3.50 and had fresh appearances throughout the storage period. Ascorbic acid contents continuously decreases from their initial values (11.48 mg 100g⁻¹) and became rapid reductions at 25°C and 35°C. The ascorbic acid contents at any time period were well predicted by the first order fractional conversion (FOFC model) of which the R^2 and RMSE were 0.99 and 0.001-0.120, respectively. Increases of the FOFC model coefficients had exponential relationships with the storage temperatures, and these were well predicted by the Arrhenius model, having R^2 and RMSE values of 0.99 and 0.02, respectively. The energy of activation was 93.10 kJ mol⁻¹. Information of this present research is a guideline for making plans to delay quality changes of the fresh amaranth leaves during storage.

Keywords: Respiration rate, Fresh weight, Ascorbic acid content, Fresh amaranth leaf

บทนำ

ผักโขมสวน (*Amaranthus tricolor* L. หรือชื่อสามัญ Joseph's Coat) เป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการ โดยเฉพาะมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบสูง (ร้อยละ 3-17) เมื่อเทียบกับผักรับประทานใบอื่น ๆ (Sarker et al., 2022; Jan et al., 2023; Zhu, 2023) โดยมีกรดอะมิโนที่จำเป็นหลายชนิด เช่น กลูตามิก (Glutamic acid) ไลซีน (Lycine) (Jahan et al., 2022) เนื่องจากผักโขมมีโปรตีนในปริมาณที่สูงจึงได้รับความสนใจนำมาเป็นอาหารหรือเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์อาหารประเภทโปรตีนทางเลือก (Alternative protein) ซึ่งมักเป็นพืชที่มีองค์ประกอบของโปรตีนที่สูง เช่น อาร์ติโชค (Artichoke) อะโวคาโด (Avocado) ผักเคล (Kale) ขนุนอ่อน (Young jackfruit) สหรัยผำ หรือไข่น้ำ (Ranasinghe, 2019; Kaszás, 2020; Bangar et al., 2022; Monthakantir et al., 2022) หรือโปรตีนจากแมลง เช่น จิ้งหรีด (Cricket) (Montowska et al., 2019) นอกจากองค์ประกอบโปรตีน ผักโขมสวนยังเป็นแหล่งของกรดแอสคอร์บิก หรือวิตามินซี ตลอดจนแร่ธาตุ สารประกอบฟีนอลิกซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Jimenez-Aguilar et al., 2017) ในการวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับการเก็บรักษาผักโขมซึ่งเป็นผักพื้นบ้านในท้องถิ่นภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เนื่องจากผักโขมและผักรับประทานใบอื่น ๆ มักเกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเก็บเกี่ยวได้เร็วโดยเฉพาะภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่สูงดังปรากฏจากการเหี่ยวหรือการเปลี่ยนแปลงสีของใบเมื่อเก็บรักษาผักรับประทานใบที่อุณหภูมิห้องทั้งนี้กระบวนการทางเมตาบอลิซึมและทางชีวเคมีต่าง ๆ เช่น การคายน้ำของผลิตภัณฑ์สดดำเนินการต่อเนื่องภายหลังการเก็บเกี่ยวจึงเป็นสาเหตุสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพดังกล่าว (จริงแท้, 2550; วีรเวทย์, 2562) จากที่ได้นำเสนอข้างต้น อุณหภูมิเก็บรักษาเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเก็บเกี่ยว โดยอุณหภูมิสำหรับการเก็บรักษาผักโขมสด (ในรูปทั้งใบหรือตัดสด) อยู่ระหว่าง 0-10°C (Izumi et al., 1999; Thammawong et al., 2019; Jin et al., 2021) สอดคล้องกับแนวทางการเก็บรักษาผักรับประทานใบในอุณหภูมิต่ำ ดังเช่นในการศึกษาการเก็บรักษาผักกาดขาวเตอร่เครสสด สุกัญญา และคณะ (2565) รายงานว่า อัตราการหายใจ การสูญเสีย น้ำหนักสด และการลดลงของปริมาณกรดแอสคอร์บิกเกิดขึ้นด้วยอัตราเร็วที่สูงเมื่อเก็บรักษาผักกาดขาวเตอร่เครสสดที่อุณหภูมิห้อง

(30-32°C) เมื่อเปรียบเทียบกับ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า ในทำนองเดียวกัน Sun et al. (2020) รายงานว่า การเก็บรักษาผักสลัดเบบี้มัสตาร์ด (Baby mustard salad) ที่อุณหภูมิ 4°C ลดการสูญเสียกรดแอสคอร์บิก การสูญเสียน้ำหนัก และคุณภาพด้านอื่น ๆ ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 20°C

ในการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษา ประกอบด้วย อุณหภูมิและระยะเวลาของการเก็บรักษา ต่อการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเก็บเกี่ยวของใบผักโขมสวนสดในด้านอัตราการหายใจ น้ำหนักสด และปริมาณกรดแอสคอร์บิก ทั้งนี้ผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงโปรตีนยังอยู่ในระหว่างการดำเนินการ ดังนั้นผู้วิจัยจึงยังไม่ได้นำเสนอในต้นฉบับนี้ แม้ว่าผักโขมสวนสดจะเป็นพืชในกลุ่มผักโขมที่มีปริมาณโปรตีนที่สูง อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงที่ได้รายงานในต้นฉบับการวิจัยนี้เป็นข้อมูลสำคัญเพื่อเป็นพื้นฐานของการจัดการเก็บรักษาผักโขมสวนสดเพื่อการบริโภคสดหรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหารต่อไป โดยเฉพาะด้านจุลพิษศาสตร์การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในใบผักโขมสวนสดยังไม่ได้มีการรายงานในเอกสารอ้างอิง

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1.การเตรียมผักโขม

การเตรียมผักโขมสวนสดนำมาทั้งต้นรวมราก โดยกำหนดอายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 3 สัปดาห์ หลังจากเพาะเมล็ด จากสวนในอำเภวารินชำราบ ทำการเคลื่อนย้ายมายังห้องปฏิบัติการหลังการเก็บเกี่ยว คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ภายใน 30 นาที เพื่อคงความสดและหลีกเลี่ยงการเสื่อมเสียคุณภาพจากระยะเวลาการจัดเก็บ จากนั้นทำการแยกเอาต้นที่ไม่สมบูรณ์ออก (เช่น ใบมีรู ใบมีจุดสีดำ รอยแตก หรือก้านหัก) เอาเฉพาะบริเวณยอดรวมลำต้นอ่อนโดยนับใบอ่อนบนยอดสุดลงมา 4 ใบ และตัดด้วยมีดที่คม ทำการล้างผักโขมสวนสดด้วยน้ำประปา 2 รอบ จากนั้นแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (บริษัท ไทยอาซาฮีเคมีภัณฑ์ จำกัด ประเทศไทย) ความเข้มข้น 150 mg L⁻¹ เป็นเวลา 30 วินาที วางสะเด็ดน้ำที่อุณหภูมิห้องและมีอากาศถ่ายเท จากนั้นแบ่งผักโขมสวนสดออกเป็น 3 กลุ่ม บรรจุผักโขมสวนสดถาดละ 100±2 g ในถาดพลาสติกแข็งชนิด PP (Polypropylene) ขนาด 1 L จากนั้นใส่ในถุง Low Density Polyethylene (LDPE) และพับปากของถุงเพื่อชะลอการคายน้ำ ดังวิธีที่รายงานใน ปณีวัฒน์ และวีระเวทย์ (2559) ภายหลังได้นำถุงที่เตรียมวางไว้ตามอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ ประกอบด้วย 10 25 และ 35°C เป็นระยะเวลา 17 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดสมดุลกับอุณหภูมิที่จะใช้ทดสอบและป้องกันการเกิดความเครียดของผักโขมสวนสดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงขึ้น (Marc et al., 2020)

2.การวัดอัตราการหายใจ

การวัดอัตราการหายใจของผักโขมสวนสดได้ประยุกต์วิธีการที่รายงานใน Phungam et al. (2018) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ที่เพิ่มขึ้นในระบบปิด กระบวนการวัดและวิเคราะห์มีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้ นำใบผักโขมสวนสดมีน้ำหนักประมาณ 100±2 g ใส่ในกล่องพลาสติกชนิด PP (Polypropylene) ขนาด 3.5 L ที่มีเครื่องวัดแก๊ส CO₂ (HTI, HT-2000, Protronics Intertrade Co., Ltd., Thailand) อยู่ภายในกล่องด้วย จากนั้นทำการปิดกล่องและทิ้งไว้เป็นระยะเวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง ในแต่ละอุณหภูมิที่ศึกษา เพื่อการสะสมของแก๊ส CO₂ ภายในระบบปิด โดยอุณหภูมิที่ศึกษาประกอบด้วย 10 25 และ 35°C ทั้งนี้ความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ที่สะสมในช่วงเวลาศึกษาควรมีค่าน้อยกว่า 10 เท่าของค่าเริ่มต้น จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลความเข้มข้นและระยะเวลาเพื่อนำไปคำนวณอัตราการผลิตแก๊ส CO₂ ตามแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ปรากฏใน Eq. 1

$$r_{amr}^{CO_2} = \frac{C_{amr}^{CO_2} \cdot P_{tot}}{100} \frac{(V_{jar} - V_{amr})}{R \cdot T_{str} \cdot t \cdot M_{amr}} \quad (Eq. 1)$$

โดยที่ $r_{amr}^{CO_2}$ คือ อัตราการหายใจของใบผักโขมสวนสด (mol s⁻¹ kg⁻¹) $C_{amr}^{CO_2}$ คือ ความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ซึ่งปลดปล่อยจากใบผักโขมสวนสด (% v v⁻¹) P_{tot} คือ ความดันบรรยากาศปกติ (Pa) V_{jar} และ V_{amr} คือ ปริมาตรกล่องพลาสติกและใบผักโขมสวนสด (m³) ตามลำดับ R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส เท่ากับ 8.314 J mol⁻¹ K⁻¹ T_{str} คือ อุณหภูมิการเก็บรักษา (K) t คือ เวลา (s) และ M_{amr} คือ น้ำหนักใบผักโขมสวนสด (kg)

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจของใบผักโขมสวนสดและอุณหภูมิการเก็บรักษา ได้ประยุกต์แบบจำลองคณิตศาสตร์อาร์เรเนียส (Arrhenius model) วิธีการที่รายงานใน Phungam et al. (2018) ดังแสดงใน Eq. 2

$$r_{amr}^{CO_2} = r_{amr,ref}^{CO_2} \exp\left(\frac{Ea_{r_{amr}^{CO_2}}}{R} \left(\frac{1}{T_{str,ref}} - \frac{1}{T_{str}}\right)\right) \quad (\text{Eq. 2})$$

โดยที่ $r_{amr,ref}^{CO_2}$ คือ อัตราการหายใจของใบผักโขมสวนสดที่อุณหภูมิอ้างอิง ($\text{mol s}^{-1} \text{kg}^{-1}$) $Ea_{r_{amr}^{CO_2}}$ คือ พลังงานกระตุ้น หรือ Energy of activation ของอัตราการหายใจของใบผักโขมสวนสด (J mol^{-1}) $T_{str,ref}$ คือ อุณหภูมิการเก็บรักษาอ้างอิง ณ ที่นี้คือ 291.15 K (หรือ 18°C) การศึกษานี้ได้ใช้วิธี Non-linear regression เพื่อประมาณค่า $r_{amr,ref}^{CO_2}$ และ $Ea_{r_{amr}^{CO_2}}$ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Microsoft Excel® 2019 (Microsoft Inc.) การประมาณค่าโดยใช้กระบวนการ Non-linear regression ด้วยการประยุกต์วิธีที่ได้นำเสนอโดย Ávila and Silva (1999) ความแม่นยำของการทำนายค่าที่ได้จากการทดลองด้วย Eq. 2 แสดงโดยค่า Root Mean Square of Error (RMSE) และค่า R^2 โดยประยุกต์แนวทางที่รายงานโดย Phungam et al. (2018)

3. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสดและปริมาณกรดแอสคอร์บิกของผักโขมสวนสดระหว่างการเก็บรักษา

3.1 การจัดการตัวอย่างผักโขมสวนสด

ในการเตรียมตัวอย่างผักโขมสวนสดสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษา ดำเนินการโดยนำผักโขมสวนสดที่ผ่านการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น (การแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์ความเข้มข้น 150 mg L^{-1} เป็นเวลา 30 วินาที) บรรจุผักโขมสวนสดด้วยน้ำหนักประมาณ 100 g ลงในภาชนะพลาสติกแข็ง จากนั้นใส่ในถุง Low Density Polyethylene (LDPE) (ตราเอโร่ บริษัท ไพโรซินเตอร์แพค (1999) จำกัด ประเทศไทย) หนา 60 μm ขนาด 20.32 x 30.48 cm แล้วทำการพับปากถุงเพื่อเป็นการลดการสูญเสียความชื้นแต่ไม่ได้สร้างสภาวะบรรยากาศดัดแปร จากนั้นแยกเก็บรักษาที่อุณหภูมิเก็บรักษา 10, 25 และ 35°C โดยในแต่ละอุณหภูมิได้ทำการจัดบรรจุภัณฑ์ออกเป็น 2 กลุ่ม ประกอบด้วย กลุ่มที่ 1 สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสด บรรจุภัณฑ์ในกลุ่มนี้จะไม่ได้มีการเปิดบรรจุภัณฑ์เพื่อนำใบผักโขมสวนสดออกไปจากบรรจุภัณฑ์ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการชั่งบรรจุภัณฑ์เดิมในแต่ละวันที่ทำการศึกษาก่อนนำมาคำนวณหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปดังวิธีที่นำเสนอในหัวข้อต่อไป และกลุ่มที่ 2 สำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิก บรรจุภัณฑ์ในกลุ่มนี้ได้เตรียมตามจำนวนวันสำหรับการวิเคราะห์กรดแอสคอร์บิก เนื่องจากได้มีการนำผักโขมสวนสดภายในบรรจุภัณฑ์ออกมาทำการเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ เช่น บดย่อย การกรองน้ำเอาน้ำสกัด ดังวิธีการที่ได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป

3.2 การสูญเสียน้ำหนักสด

การศึกษากการสูญเสียน้ำหนักสดของใบผักโขมสวนสด ผู้วิจัยได้ทำการชั่งน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ผักโขมสวนสด ณ วันที่ทำการศึกษา (โดยเป็นการชั่งน้ำหนักบรรจุภัณฑ์เดิมและไม่เปิดบรรจุภัณฑ์) จากนั้นทำการเปรียบเทียบน้ำหนักเริ่มต้น และน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์บรรจุผักโขมสวนสด และรายงานเป็นร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก หทัยพร (2563) ดังแสดงใน Eq. 3

$$Wt_{loss} = \frac{(Wt_0 - Wt_t)}{Wt_0} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

โดยกำหนดให้ Wt_{loss} คือ ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก Wt_0 คือ น้ำหนักเริ่มต้น (g) Wt_t คือ น้ำหนักที่เวลาใด ๆ (g)

3.3 ปริมาณกรดแอสคอร์บิก

การวิเคราะห์ปริมาณกรดแอสคอร์บิก (วิตามินซี) ในใบผักโขมสวนสด ด้วยการประยุกต์วิธีของ AOAC (1990) ซึ่งอ้างอิงใน หทัยพร (2563) เป็นวิธีการวิเคราะห์ด้วยการไตเตรทโดยใช้สารละลายมาตรฐานอินโดฟินอล (Indophenols standard solution) วิธีการดังกล่าวเป็นการนำค่าที่ได้จากการไตเตรทมาคำนวณหาปริมาณกรดแอสคอร์บิกทั้งหมดที่มีอยู่ใน

น้ำสกัดโดยคิดเป็นมิลลิกรัมกรดแอสคอร์บิก ต่อ 100 g ที่มีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้ นำผักโขมสวนสดที่คั้นน้ำ 1 ml ใส่ในขวด 250 ml เติมสารละลาย 5% (v/v) Trichloroacetic acid ปริมาตร 9 ml เขย่าให้เข้ากันทันที แล้วทำการไตเตรทด้วยสารละลาย Indophenols จนถึงจุดยุติ ซึ่งเป็นจุดที่สารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูที่คงตัว สำหรับตัวอย่างเปรียบเทียบ (Blank sample) นำสารละลาย 5% (v/v) Trichloroacetic acid ปริมาตร 10 ml ไตเตรทเช่นเดียวกับน้ำสกัดจากใบผักโขมสวนสด ทำการบันทึกค่าที่ได้จากการไตเตรทจากนั้นคำนวณหาปริมาณกรดแอสคอร์บิกโดยใช้สมการ Eq. 4

$$C_{amr}^{ASC} = \frac{(X - B) \cdot (F / E)}{(V - Y)} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

กำหนดให้ C_{amr}^{ASC} คือ ปริมาณ (หรือความเข้มข้น) ของกรดแอสคอร์บิกในใบผักโขมสวนสด ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$) X คือ ปริมาตรสารละลาย Indophenols ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง (ml) B คือ ปริมาตรสารละลาย Indophenols ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง Blank (ml) F คือ ความเข้มข้นของสารละลาย Ascorbic acid standard solution (mg ml^{-1}) E คือ ปริมาตรของสารละลาย Ascorbic acid standard solution (ml) V คือ ปริมาตรของสารละลาย Indophenols standard ที่ใช้ในการไตเตรทสารละลายมาตรฐานกรดแอสคอร์บิก (ml) และ Y คือ ปริมาตรของสารละลาย Indophenols standard ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง Blank (ml)

4. การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกของใบผักโขมสวนสด

ผู้วิจัยได้นำผลการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกในใบผักโขมสวนสด (หัวข้อ 3.3) มาศึกษาจลนพลศาสตร์ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ทั้งนี้อันดับของปฏิกิริยาของการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกส่วนใหญ่เป็นอันดับที่ 1 (First order reaction) โดยอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยามีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารตั้งต้น (ณ ที่นี้คือความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิก) (Earle and Earle, 2003) ตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกซึ่งเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เช่น พริกหวานสด (หทัยพร, 2563) ผักชีฝรั่ง (ปนิวัฒน์ และ วีระเวทย์, 2559) และผักกาดเขียวปลี (สุกัญญา และคณะ, 2565) ในการศึกษาการเก็บรักษาผักกาดเขียวปลีสุกัญญา และคณะ (2565) ได้ประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ First-order fractional conversion model (ดังแสดงใน Eq. 5) เพื่อการทำนายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกระหว่างการเก็บรักษา และพบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังกล่าวสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นได้อย่างดี โดยข้อมูลจากการทำนาย (Predicted data) เป็นตัวแทนที่ดีของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (Empirical data) เนื่องจากผักกาดเขียวปลีและผักโขมสวนสดเป็นผักที่รับประทานใบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการประยุกต์แบบจำลองคณิตศาสตร์ (Eq. 5) เพื่อเป็นเครื่องมือในการศึกษาจลนพลศาสตร์และทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในใบผักโขมสวนสด

$$\frac{C_{amr,t}^{ACA} - C_{amr,t_0}^{ACA}}{C_{amr,t_0}^{ACA} - C_{amr,t_\infty}^{ACA}} = \exp(-k_{1st,amr}^{ACA} \cdot t) \quad (\text{Eq. 5})$$

กำหนดให้ $C_{amr,t}^{ASC}$ คือ ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกในใบผักโขมสวนสดที่เวลาใด ๆ (t) ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$) C_{amr,t_0}^{ASC} คือ ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกในใบผักโขมสวนสดที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$) C_{amr,t_∞}^{ASC} คือ ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกในใบผักโขมสวนสดเมื่อเข้าสู่สมดุล ($t \cong \infty$) $k_{1st,amr}^{ASC}$ คือ ค่าคงที่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกในใบผักโขมสวนสดแบบปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (Day^{-1}) และ t คือ ระยะเวลาการเก็บรักษา (Day) การวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิก หรือ ค่า $k_{1st,amr}^{ASC}$ กับอุณหภูมิการเก็บรักษาด้วยความสัมพันธ์อาร์เรย์เนยส์ (Eq. 2) โดยทำการแทนที่ $r_{amr}^{CO_2}$ และ $r_{amr,ref}^{CO_2}$ ด้วย $k_{1st,amr}^{ASC}$ และ $k_{1st,ref,amr}^{ASC}$ ตามลำดับ และการแทนที่ $Ea_{r_{amr}^{CO_2}}$ ด้วย $Ea_{k_{1st,amr}^{ASC}}$ การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ที่ปรากฏ Eq. 5 และความสัมพันธ์อาร์เรย์เนยส์ได้ใช้แนวทางของกระบวนการ Nonlinear regression ดังแสดงในหัวข้อ 2

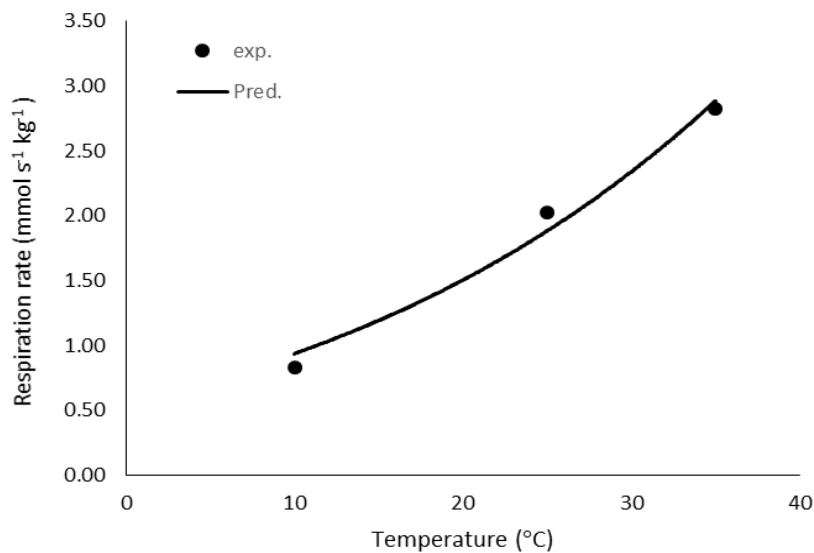
5. การวางแผนการทดลอง

การวิจัยนี้วางแผนการทดลองแบบ Randomized Completely Block Design (RCBD) จำนวน 3 ซ้ำการทดลอง และใช้แนวทาง Nonlinear regression ในการประมาณค่าของพารามิเตอร์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ดังที่ได้นำเสนอข้างต้น

ผลการวิจัย

ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการหายใจ

อัตราการหายใจของผักโขมสวนสดมีค่าเพิ่มขึ้นที่สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเก็บรักษา (รูปที่ 1) อัตราการหายใจที่อุณหภูมิ 35°C (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $2.83 \text{ mmol s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$) มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 10°C (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $2.83 \text{ mmol s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$) ประมาณ 3.41 เท่า ในขณะที่อัตราการหายใจที่อุณหภูมิ 25°C (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $2.02 \text{ mmol s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$) มีค่าสูงกว่าที่ 10°C ประมาณ 2.43 เท่า ทั้งนี้อัตราการหายใจที่อุณหภูมิ 35°C สูงกว่าที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 1.40 เท่า ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจสัมพันธ์กับอุณหภูมิในลักษณะของเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) เมื่อทำการประมาณอัตราการหายใจในแต่ละอุณหภูมิด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ Arrhenius (Eq. 2) พบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถทำนายค่าที่ได้จากการทดลองได้อย่างดี โดยมีค่า R^2 และค่า RMSE เท่ากับ 0.98 และ 0.08 ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของ Eq. 2 ประกอบด้วย $r_{amr,ref}^{CO_2}$ และ $Ea_{r_{amr}^{CO_2}}$ เท่ากับ $1.19 \text{ mmol s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ และ $32.65 \text{ kJ mol}^{-1}$ ตามลำดับ (ตารางที่ 1)



รูปที่ 1 อัตราการหายใจของผักโขมสวนสด เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 25 และ 35°C สัญลักษณ์ ● แทนข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (exp.) (ค่าเฉลี่ย n=3) และ เส้นสีดำ คือ ค่าอัตราการหายใจที่ทำนาย Eq. 2 (pred.)

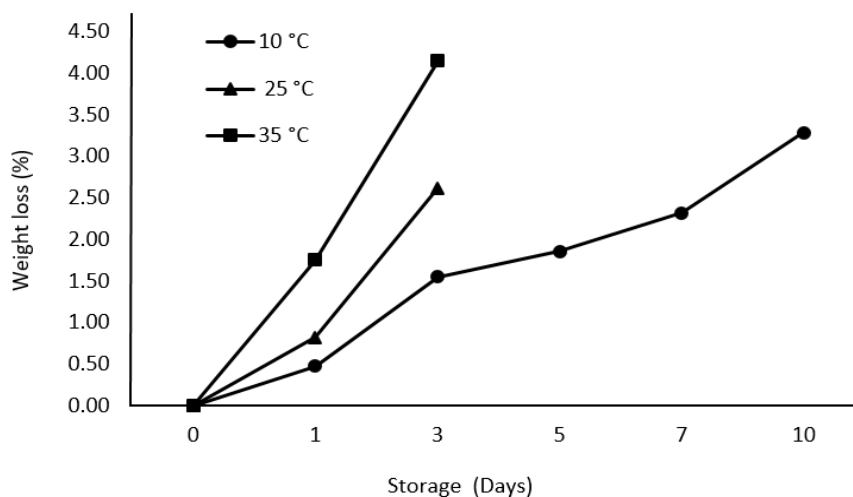
ตารางที่ 1 ตัวแปรในความสัมพันธ์อาร์เรนีเยส (Eq. 2) ระหว่างอัตราการหายใจและอุณหภูมิ และค่า R^2 และ RMSE

$r_{amr,ref}^{CO_2}$ ($\text{mmol s}^{-1} \text{ kg}^{-1}$)	$Ea_{r_{amr}^{CO_2}}$ (kJ mol^{-1})	R^2	RMSE
1.19	32.65	0.98	0.08

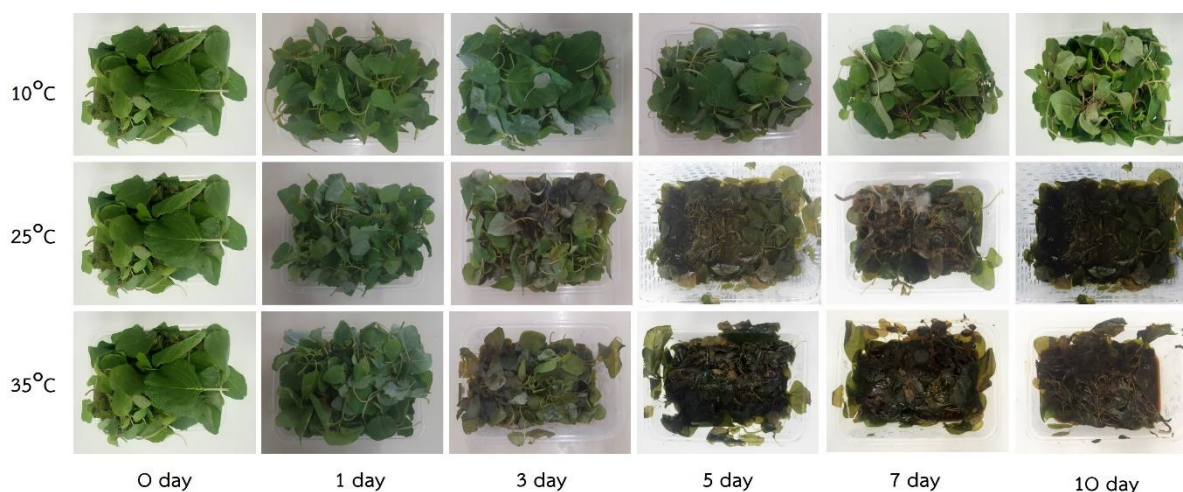
การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสด

ผักโขมสวนสดมีการสูญเสียน้ำหนักสดที่เพิ่มขึ้นตลอดอายุการเก็บรักษา (รูปที่ 2) ส่งผลให้เกิดการเหี่ยวเฉาของใบผักโขมสวนสดในระหว่างการเก็บรักษา (รูปที่ 3) เมื่อพิจารณาในแต่ละวันที่ทำการศึกษา พบว่า ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักสดที่อุณหภูมิ 35°C มีค่าสูงสุด และมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิ 10°C ทั้งนี้อายุการเก็บรักษาของผักโขมสวนสดเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C

และ 35°C เมื่อพิจารณาจากลักษณะปรากฏของการเหี่ยวเฉา และ/หรือมีการมองเห็นการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ด้วยตาเปล่า (รูปที่ 3) ซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เท่ากับ 3 วัน โดยค่าเฉลี่ยร้อยละการสูญเสียน้ำหนักสด (ณ วันที่ 3 ของการเก็บรักษา) เท่ากับ 2.62 และ 4.15 ตามลำดับ จากข้อมูลอายุการเก็บรักษาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงไม่ได้ทำการวิเคราะห์การสูญเสีย น้ำหนัก และปริมาณกรดแอสคอร์บิกของใบผักโขมสวนสดที่อุณหภูมิ 25°C และ 35°C ภายหลังจากการเก็บรักษา 3 วัน เมื่อพิจารณาในรูปที่ 2 พบว่า ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักสดของใบผักโขมสวนสดที่อุณหภูมิ 10°C มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 3.50 ตลอดการเก็บรักษา 10 วัน



รูปที่ 2 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของผักโขมสด (ค่าเฉลี่ย n=3) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 25 และ 35°C เป็นเวลา 10 วัน

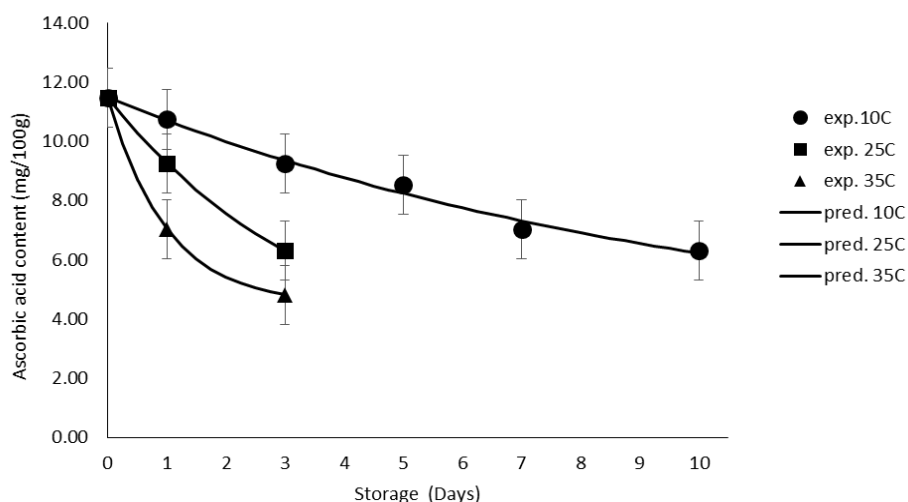


รูปที่ 3 ลักษณะปรากฏของใบผักโขมสวนสด เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 25 และ 35°C เป็นเวลา 10 วัน

การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิก

การเปลี่ยนแปลงปริมาณหรือความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกของผักโขมสวนสดซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10-35°C แสดงในรูปที่ 4 พบว่า ปริมาณกรดแอสคอร์บิกมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้น ($11.48 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$) อย่างต่อเนื่องในระหว่างการเก็บรักษา การลดลงดังกล่าวเกิดขึ้นได้เร็วเมื่ออุณหภูมิของการเก็บรักษาสูงขึ้น เมื่อพิจารณาวันที่ 3 ของการเก็บรักษา พบว่า ปริมาณกรดแอสคอร์บิกของใบผักโขมสวนสดเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และ 35°C มีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้นประมาณ 1.82 และ 2.38 เท่า ตามลำดับ ดังที่ได้นำเสนอในหัวข้อการสูญเสียน้ำหนักสดว่าอายุการเก็บรักษาของใบผักโขมสวนสดที่อุณหภูมิ 25°C และ 35°C เท่ากับ 3 วัน เนื่องจากเกิดการเน่าเสียซึ่งเกิดจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า ดังแสดงใน

รูปที่ 3 ซึ่งอาจไม่เป็นที่ยอมรับในการนำมาบริโภค ดังนั้นจึงไม่ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณกรดแอสคอร์บิกภายหลังจากวันที่ 3 ในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C พบว่า ปริมาณกรดแอสคอร์บิกลดลงจากค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1.82 เท่าเมื่อพิจารณา ณ วันที่ 10 ของการเก็บรักษา (รูปที่ 4)

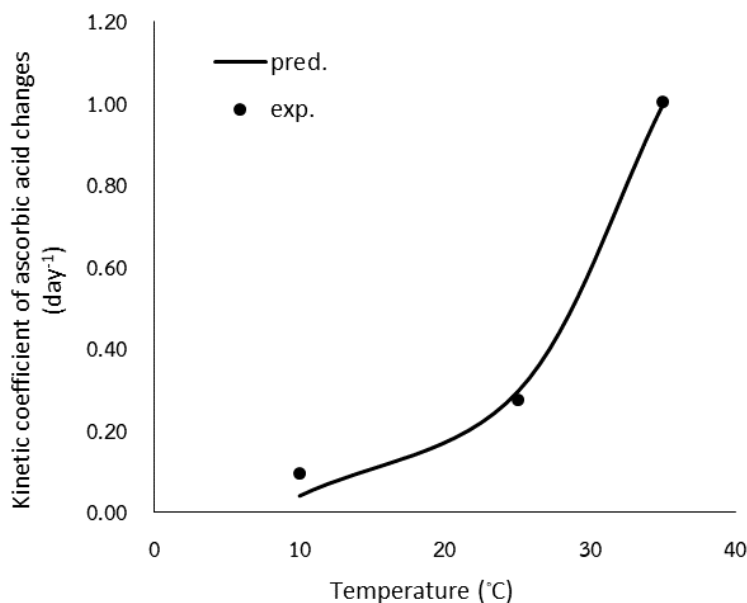


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในผักโขมสวนสดเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 25 และ 35°C เป็นเวลา 10 วัน สัญลักษณ์ ● ■ ▲ ที่แสดงตามลำดับอุณหภูมิ (10 25 และ 35°C) แทนข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (exp.) (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $n=3$) และ เส้นสีดำ คือ ค่าปริมาณกรดแอสคอร์บิกที่ทำนายโดย Eq. 5 (pred.)

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับ 1 ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกของใบผักโขมสวนสด เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 25 และ 35°C เป็นเวลา 10 วัน

อุณหภูมิ (°C)	$k_{1st,amr}^{ASC}$	R^2	RMSE
10	0.09	0.99	0.120
25	0.28	0.99	0.001
35	1.00	0.99	0.001

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ First-order fractional conversion model (Eq. 5) พบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกของผักโขมสวนสดในแต่ละอุณหภูมิได้ดี โดยมีค่า R^2 และ RMSE อยู่ในช่วง 0.99 และ 0.001-0.120 ตามลำดับ (ตารางที่ 2) จากการประมาณค่าปริมาณกรดแอสคอร์บิกด้วย Eq. 5 ตามวิธี Non-linear regression ทำให้ได้ค่า $k_{1st,amr}^{ASC}$ และพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเก็บรักษาในลักษณะของเอกซ์โปเนนเชียล (ดังกรณีของอัตราการหายใจ) (รูปที่ 4) ดังนั้นจึงได้นำแบบจำลองคณิตศาสตร์ Eq. 2 มาประมาณค่า $k_{1st,amr}^{ASC}$ ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิการเก็บรักษา โดยพบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ Eq. 2 สามารถทำนายค่า $k_{1st,amr}^{ASC}$ ได้อย่างดี มีค่า R^2 และ RMSE อยู่ในช่วง 0.99 และ 0.02 ตามลำดับ ค่า $k_{1st,ref,amr}^{ASC}$ และค่า $Ea_{k_{1st}^{ASC}}$ เท่ากับ 0.08 day^{-1} และ $93.10 \text{ kJ mol}^{-1}$ ตามลำดับ (รูปที่ 5 และตารางที่ 3)



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของค่า $k_{1st,amr}^{ASC}$ (ข้อมูลสัญลักษณ์ ●) ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิการเก็บรักษาและการทำนายด้วยสมการ Eq. 5 (ข้อมูลเส้นทึบ)

ตารางที่ 3 ตัวแปรในความสัมพันธ์อาร์เรเนียส (Eq. 2) ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกและอุณหภูมิ และค่า R^2 และ RMSE

$k_{1st,ref,amr}^{ASC}$ (day ⁻¹)	$Ea_{r,amr}^{ASC}$ (kJ mol ⁻¹)	R^2	RMSE
0.08	93.10	0.99	0.02

การอภิปรายผล

จากการวิจัยนี้ แสดงให้เห็นถึงผลของทั้งอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเก็บเกี่ยวของใบผักโขมสวนสด ซึ่งได้ศึกษาและรายงานในด้านอัตราการหายใจ การสูญเสียน้ำหนักสด และปริมาณกรดแอสคอร์บิก โดยการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วภายใต้อุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงและต่อเนื่องตลอดอายุการเก็บรักษา ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและ (1) อัตราการหายใจ และ (2) อัตราการลดลงของปริมาณกรดแอสคอร์บิกสอดคล้องกับความสัมพันธ์อาร์เรเนียส (Arrhenius relationship) ที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงซึ่งเกิดสูงขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียลเมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (ณ ที่นี้ คือ อุณหภูมิการเก็บรักษา) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ผลการศึกษานี้สนับสนุนข้อมูลความสัมพันธ์ของอุณหภูมิการเก็บรักษากับอัตราการหายใจของผักปวยเล้ง ซึ่งอยู่ใน Amaranthaceae family เช่นเดียวกับผักโขมสวนสด และมีการเรียกชื่อผักปวยเล้งว่าผักโขม ที่รายงานโดย Examma et al. (1993) และ Fonseca et al. (2002) พบว่า อัตราการหายใจของผักปวยเล้งเพิ่มขึ้นในลักษณะเอกซ์โปเนนเชียลเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นและสามารถทำนายได้ดีด้วยความสัมพันธ์อาร์เรเนียส โดยค่า Energy of activation (Ea_{r,co_2}) ของการเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจ เท่ากับ 36 kJ mol⁻¹ ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่า Ea_{r,co_2} ของการเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจของใบผักโขมสวนสด ซึ่งเท่ากับ 32.65 kJ mol⁻¹

จากการสืบค้นข้อมูลในเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องยังไม่พบการรายงานค่า Ea_{r,co_2} ของใบผักโขมสวนสด ในการศึกษาการเก็บรักษาผักอวอเตอร์เครสสด สุกัญญา และคณะ (2565) รายงานว่าค่า Energy of activation ของการเปลี่ยนแปลงอัตราการ

หายใจในผักกาดเต๋อเครสสดเท่ากับ $60.43 \text{ kJ mol}^{-1}$ ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าใบผักโขมสวนสดเกือบสองเท่า ทั้งนี้ค่า Energy of activation แสดงถึงความไว (Sensitivity) ของอัตราการหายใจ (หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงในประเด็นอื่น ๆ) ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (วีรเวทย์, 2562) ดังนั้นจึงทำให้ทราบในเบื้องต้นว่าผักกาดเต๋อเครสมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจที่เร็วกว่าใบผักโขมสวนสด และอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพภายหลังการเก็บเกี่ยวได้เร็วกว่า

จากข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสดในใบผักโขมสวนสด พบว่า ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง ($25-35^{\circ}\text{C}$) เกิดการสูญเสียน้ำหนักสดอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับอุณหภูมิต่ำ (10°C) สอดคล้องกับ พรชัย และคณะ (2563) พบว่า การเก็บรักษาไมโครกรีน (Microgreen) ที่อุณหภูมิ $5-10^{\circ}\text{C}$ เกิดการสูญเสียน้ำหนักที่ต่ำกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C โดยการสูญเสียน้ำหนักสดดังกล่าวเป็นผลมาจากการสูญเสียน้ำซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความดันไอน้ำภายในและภายนอกผลผลิต ส่งผลให้น้ำจากภายในผลผลิตเกิดการแพร่ออกไปยังภายนอกผลผลิต (จริงแท้, 2550) ทั้งนี้อุณหภูมิที่สูงส่งผลให้ความดันไอน้ำภายในผลผลิตสูงและยังส่งผลให้สมบัติการยอมให้น้ำซึมผ่าน (Water vapor permeance) ของเนื้อเยื่อและส่วนประกอบอื่น ๆ เพิ่มขึ้นและนำไปสู่การเคลื่อนที่ของไอน้ำจากผลผลิตสู่สิ่งแวดล้อมด้วยอัตราเร็วที่สูงกว่าอุณหภูมิต่ำ การสูญเสียน้ำหนักสดส่งผลต่อลักษณะปรากฏของใบที่เหี่ยวเฉาของผลผลิตได้ (วีรเวทย์, 2562) นอกจากนี้อัตราการหายใจที่สูงก็ส่งผลกระตุ้นการสูญเสียน้ำในระหว่างการเก็บรักษาของผลผลิตได้เช่นเดียวกัน จากข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางในการจัดการระหว่างการเก็บรักษาสถิตผลเพื่อลดการสูญเสียน้ำหนักซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิในระหว่างการจัดเก็บได้

การเปลี่ยนแปลงของกรดแอสคอร์บิกในระหว่างการเก็บรักษาใบผักโขมสวนสดเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกที่เป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 ทำให้ทราบว่าอัตราการลดลงของกรดแอสคอร์บิกในช่วงแรกเกิดขึ้นได้ค่อนข้างเร็วเนื่องจากปริมาณเริ่มต้นของกรดแอสคอร์บิกยังมีปริมาณที่สูงโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงอัตราเร็วของปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้อัตราเร็วของการลดลงของปริมาณกรดแอสคอร์บิกในใบผักโขมสวนสดมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเก็บรักษาแบบเอกโปเนนเชียลหรือความสัมพันธ์อาร์รีเนียส โดยค่า Energy of activation ($Ea_{\text{asc}}^{\text{asc}}$) ที่มีค่าเท่ากับ $93.10 \text{ kJ mol}^{-1}$ ในปัจจุบันยังไม่พบรายงานค่า $Ea_{\text{asc}}^{\text{asc}}$ ของใบผักโขมสวนสดหรือใบผักปวยเล้งในการศึกษาจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในใบผักกาดเต๋อเครสสด สุกัญญา และคณะ (2565) รายงานว่า ค่า Energy of activation มีค่าเท่ากับ $35.13 \text{ kJ mol}^{-1}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าในใบผักโขมสวนสดประมาณ 2.65 เท่า โดยแสดงให้เห็นว่าปริมาณกรดแอสคอร์บิกในใบผักโขมสวนสดมีแนวโน้มการลดลงด้วยอัตราที่เร็วกว่าในใบผักกาดเต๋อเครสสดเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงขึ้น การลดลงของกรดแอสคอร์บิกดังกล่าวอาจเป็นผลมาจากการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์แอสคอร์บิกออกซิเดส (Ascorbic acid oxidase) ซึ่งส่งผลให้กรดแอสคอร์บิกเกิดการเปลี่ยนรูปหรือเกิดการสลายตัวได้เมื่อสัมผัสกับ O_2 หรืออุณหภูมิที่สูงขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา (นิธิยา, 2545) นอกจากนี้การสูญเสียน้ำในระหว่างการเก็บรักษายังส่งผลให้เกิดการสูญเสียของกรดแอสคอร์บิกจึงทำให้ปริมาณของกรดแอสคอร์บิกลดลงในระหว่างการเก็บรักษา (จริงแท้, 2550) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของการสูญเสียน้ำหนักสดที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบถึงความสำคัญของอุณหภูมิที่ใช้ในระหว่างการเก็บรักษาซึ่งจะส่งผลต่อการลดลงของกรดแอสคอร์บิกในระหว่างการเก็บรักษาได้

บทสรุป

อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในระหว่างการเก็บรักษาใบผักโขมสวนสดเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเก็บเกี่ยว การเก็บรักษาใบผักโขมสวนสดที่อุณหภูมิ 10°C ช่วยชะลออัตราการหายใจ การสูญเสียน้ำหนักสด และปริมาณกรดแอสคอร์บิกได้ดีกว่าการเก็บรักษาใบผักโขมสวนสดที่อุณหภูมิ 25°C และ 35°C ในระหว่างการเก็บรักษา 10 วัน ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเก็บรักษาและอัตราการหายใจหรือการลดลงของปริมาณกรดแอสคอร์บิกเป็นในรูปแบบเอกโปเนนเชียลซึ่งสามารถทำนายได้ดีด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ตามความสัมพันธ์อาร์รีเนียส นอกจากนี้จลนพลศาสตร์ของ

การลดลงของปริมาณกรดแอสคอร์บิกในใบผักโขมสวนสดเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 โดยปริมาณกรดแอสคอร์บิกในแต่ละช่วงเวลาของการเก็บรักษาสามารถทำนายได้ดีด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ First-order fractional conversion model ที่ได้ประยุกต์ใช้ในการศึกษานี้ ข้อมูลจากการศึกษาดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางสำคัญในการจัดการใบผักโขมสดหรือประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ โดยเฉพาะผักรับประทานใบเพื่อชะลอการเปลี่ยนแปลงที่นำไปสู่การเสื่อมเสียในระหว่างการเก็บรักษาผลิตผลได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมอาหารพื้นบ้าน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณและห้องปฏิบัติการในการดำเนินกิจกรรมวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- จริงแท้ ศิริพานิช. (2550). ชีววิทยาหลังการเก็บเกี่ยวและการหายใจของพืช. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ: นครปฐม.
- นิธิยา รัตนพานนท์. (2545). เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์โอเอสพรี้นติ้งเฮาส์: กรุงเทพฯ.
- ปนิวัฒน์ ทาสา และวีรเวทย์ อุทโธ. (2559). จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงของคลอโรฟิลล์เอนในใบผักชีฝรั่งที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิการเก็บรักษาและสภาวะบรรยากาศตัดแปรในบรรจุภัณฑ์. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ มอบ. วิจัยครั้งที่ 10 การพัฒนาท้องถิ่นสู่ภูมิภาคอาเซียน: งานวิจัยกับอนาคตสังคมไทย 7-8 กรกฎาคม 2559. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. อุบลราชธานี.
- พรชัย ทาระโคตร, ลลิตา เจริญทรัพย์, ภาณุมาศ ฤทธิไชย และสมพงษ์ ทะบันหาร. (2563). ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณภาพปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระในไมโครกรีนผักชีหูด (*Raphanus sativus* var. *caudatus* Alef). วารสารแก่นเกษตร. 48(1): 201-210.
- วีรเวทย์ อุทโธ. (2562). การบรรจุภัณฑ์บรรยากาศตัดแปรแอคทีฟสำหรับผักและผลไม้สด. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี: อุบลราชธานี.
- วีรเวทย์ อุทโธ, วรงค์ นัยวินิจ, เรวัต ชัยราช, วัชรพงษ์ วัฒนกุล และอดุลย์ อภินันท์. (2563). การหายใจและการสูญเสียน้ำหนักของมะม่วงแก้วขมิ้นที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิในระหว่างกิจกรรมโลจิสติกส์ภายหลังการเก็บเกี่ยวของเกษตรกรรายย่อยชาวแก้มพูชา. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ มอบ. วิจัยครั้งที่ 14 Research and Innovations for All 3-4 กันยายน 2563. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. อุบลราชธานี.
- ศศิมล มุ่งหมาย, วัชรพงษ์ วัฒนกุล, อดุลย์ อภินันท์ และวีรเวทย์ อุทโธ. (2565). ผลการปล่อยไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟต่อคุณภาพการเก็บรักษาสำหรับไชยสาด. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์. 6(2): 33-50.
- สุกัญญา บุญตะนัย, หทัยพร แก้มพวงค์, นิตยา ภูงาม, กฤตยา อุทโธ, เรวัต ชัยราช และวีรเวทย์ อุทโธ. (2565). ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวอเตอร์เครส. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 13 วิจัยและนวัตกรรมเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจ BCG 17-18 พฤศจิกายน 2565. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์. สุรินทร์. 498-509.
- หทัยพร แก้มพวงค์. (2563). การพัฒนาของควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลด้วยการกระตุ้นโดยความชื้นเพื่อการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับพริกหวานสด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- A.O.A.C. (1990). Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Association of Official Analytical Chemists Inc. U.S.A. 910-930: 1045-1114.

- Ávila I.M.L.B. and Silva C.L.M. (1999). Modelling kinetics of thermal degradation of color in peach puree. *Journal of Food Engineering*. 39(2): 161–166.
- Bangar S.P., Dunno K., Dhull S.B., Siroha A.K., Changan S., Maqsood S. and Rusu A.V. (2022). Avocado seed discoveries chemical composition biological properties and industrial food applications. *Food Chemistry X*. 16: 100507.
- Chaudhary S., Hisham H. and Mohamed D. (2018). A review on phytochemical and pharmacological potential of watercress plant. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*. 11: 102.
- Chen X.Y., Hertog M.L.A.T.M. and Banks N.H. (2000). The effect of temperature on gas relations in MA packages for capsicums (*Capsicum annuum* L., cv. Tasty) an integrated approach. *Postharvest Biology and Technology*. 20: 71-80.
- Cruz R.M.S., Vieira M.C. and Silva C.L.M. (2006). Effect of heat and thermosonication treatments on peroxidase inactivation kinetics in watercress (*Nasturtium officinale*). *Journal of Food Engineering*. 72(1): 8-15.
- Cruz R.M.S., Vieira M.C. and Silva C.L.M. (2008). Effect of heat and thermosonication treatments on watercress (*Nasturtium officinale*) vitamin C degradation kinetics. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 9(4): 483-488.
- Earle M.D. and Earle R.L. (2003). Product changes during processing. *Fundamentals of Food Reaction Technology*. pp. 32-72.
- Exama A., Arul J., Lencki R.W., Lee L.Z. and Toupin C. (1993). Suitability of plastic films for modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. *Journal of Food Science*. 58: 1365–1370.
- Fonseca S.C., Oliveira F.A. and Brecht J.K. (2002). Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages a review. *Journal of food engineering*. 52(2): 99-119.
- Giallourou N., Oruna-Concha M.J. and Harbourne N. (2016). Effects of domestic processing methods on the phytochemical content of watercress (*Nasturtium officinale*). *Food Chemistry*. 212: 411-419.
- Hertog M.L.A.T., Peppelenbos H.W., Evelo R.G. and Tijskens L.M.M. (1998). Dynamic and generic model of gas exchange of respiring produce the effects of oxygen carbon dioxide and temperature. *Postharvest Biology and Technology*. 14: 349-335.
- Izumi H., Nakatani T. and Ogikubo H. (1999). 364 Controlled-atmosphere storage of fresh-cut spinach at various temperatures. *Hortscience*. 34(3): 506-506.
- Jahan F., Bhuiyan M.N.H., Islam M.J., Ahmed S., Hasan M.S., Bashera M.A. and Moulick S.P. (2022). *Amaranthus tricolor* (red amaranth) an indigenous source of nutrients minerals amino acids phytochemicals and assessment of its antibacterial activity. *Journal of Agriculture and Food Research*. 10: 100419.
- Jan N., Hussain S.Z., Naseer B. and Bhat T.A. (2023). Amaranth and quinoa as potential nutraceuticals a review of anti-nutritional factors health benefits and their applications in food medicinal and cosmetic sectors. *Food Chemistry X*. 18: 100687.
- Jiménez-Aguilar D.M. and Grusak M.A. (2017). Minerals vitamin c phenolics flavonoids and antioxidant activity of amaranthus leafy vegetables. *Journal of Food Composition and Analysis*. 58: 33-39.
- Jin S., Ding Z. and Xie J. (2021). Modified atmospheric packaging of fresh-cut amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) for extending shelf life. *Agriculture*. 11(10): 1016.
- Kaszás L., Alshaal T., El-Ramady H., Kovács Z., Koroknai J., Elhawat N. and Domokos-Szabolcsy É. (2020). Identification of bioactive phytochemicals in leaf protein concentrate of jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.). *Plants*. 9(7): 889.

- Marc M., Cournol M., Hanteville S., Poisson A.-S., Guillou M.-C., Pelletier S., Laurens F., Tessier C., Coureau C., Renou J.-P., Delaire M. and Orsel M. (2020). Pre-harvest climate and post-harvest acclimation to cold prevent from superficial scald development in granny smith apples. *Scientific Reports*. 10(1): 6180.
- Maringgal B., Hashim N., Tawakkal I. S.M.A. and Mohamed M.T.M. (2020). Recent advance in edible coating and its effect on fresh/fresh-cut fruits quality. *Trends in Food Science & Technology*. 96: 253-267.
- Monthakantirat O., Chulikhit Y., Maneenet J., Khamphukdee C., Chotritthirong Y., Limsakul S. and Daodee S. (2022). Total active compounds and mineral contents in *Wolffia globosa*. *Journal of Chemistry*. 2022(1): 9212872.
- Montowska M., Kowalczewski P.L., Rybicka I. and Fornal E. (2019). Nutritional value protein and peptide composition of edible cricket powders. *Food Chemistry*. 289: 130-138.
- Phungam N., Utto W. and Pruthikul 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.
- Ranasinghe R., Maduwanthi S. and Marapana R. (2019). Nutritional and health benefits of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) a review. *International journal of food science*. 2019(1): 4327183.
- Sarker U., Lin Y.-P., Oba S., Yoshioka Y. and Hoshikawa K. (2022). Prospects and potentials of underutilized leafy amaranths as vegetable use for health-promotion. *Plant Physiology and Biochemistry*. 182: 104-123.
- Sun B., Lin P.-X., Xia P.-X., Di H.-M., Zhang J.-Q., Zhang C.-L. and Zhang F. (2020). Low temperature storage after harvest retards the deterioration in the sensory quality health-promoting compounds and antioxidant capacity of baby mustard. *RSC advances*. 10(60): 36495-36503.
- Thammawong M., Kasai E., Syukri D. and Nakano K. (2019). Effect of a low oxygen storage condition on betacyanin and vitamin c retention in red amaranth leaves. *Scientia Horticulturae*. 246: 765-768.
- Zhu F. (2023). Amaranth proteins and peptides biological properties and food uses. *Food Research International*. 164: 112405.