

การออกแบบและประเมินสมรรถนะเครื่องสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำเพื่อลดการเกิด สีน้ำตาลของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภค

DESIGN AND PERFORMANCE EVALUATION OF A LOW-TEMPERATURE SPIN-DRYING SYSTEM FOR REDUCING BROWNING IN FRESH-CUT ORGANIC GREEN COS LETTUCE

ณัฐพงษ์ แกมทับทิม¹, ภควัต หุ่นฉัตร¹, เอกรัฐ ชะอุ่มเอียด¹,
เดือนแรม แผงเกี้ยว¹, สุวรรณ เอกรัมย์², นิติกร หลีชัย^{1*}

Natthaphong Kaemthapthim¹, Phakhawat Hunchat¹, Ekarat Chauumeiad¹,
Duanraem Phaengkieo¹, Suwan Aekram², Nitikorn Leechai^{1*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก
อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

¹Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok, Muang, Phitsanulok,
Thailand, 65000

²Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok,
Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: Nitikorn@rmutl.ac.th

วันที่เข้ารับ 10 กรกฎาคม 2569

วันที่แก้ไขบทความ 26 สิงหาคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ 27 สิงหาคม 2569

บทคัดย่อ

การรักษาคุณภาพของผักตัดแต่งพร้อมบริโภค โดยเฉพาะผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*) เป็นความท้าทายสำคัญในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากการเกิดสีน้ำตาลส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพด้านรูปลักษณ์และการยอมรับของผู้บริโภค งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและประเมินสมรรถนะเครื่องสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำสำหรับกระบวนการสลัดน้ำของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภค และศึกษาผลของการควบคุมอุณหภูมิระหว่างกระบวนการสลัดน้ำต่อการเกิดสีน้ำตาลของผลิตผล เครื่องต้นแบบได้รับการออกแบบโดยบูรณาการระบบทำความเย็นเข้ากับกระบวนการสลัดน้ำ โดยนำตัวอย่างผักที่ผ่านการตัดแต่งและล้างทำความสะอาดมาสุ่มแบ่งเป็นชุดละ 1 kg ก่อนเดินระบบทำความเย็นล่วงหน้าเป็นเวลา 5 min และสลัดน้ำที่ความเร็วรอบคงที่ 180 rpm เป็นเวลา 15 min ภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีอุณหภูมิลมจ่ายและลมกลับเท่ากับ 18.0 และ 22.3 °C ตามลำดับ ส่วนชุดควบคุมผ่านกระบวนการสลัดน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องโดยไม่เปิดระบบทำความเย็น หลังการสลัดน้ำ ตัวอย่างของแต่ละสภาวะถูกแบ่งเป็น 20 หน่วยทดลอง หน่วยละ 20 g บรรจุในถุงพอลิเอทิลีน และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 10 วัน โดยติดตาม

การเกิดสีน้ำตาลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายในระบบสี HSI และกำหนดช่วงมุมสี 35° – 50° สำหรับระบุพื้นที่สีน้ำตาล ผลการประเมินสมรรถนะทางวิศวกรรมพบว่า เครื่องมีความสามารถในการทำความเย็น 0.066 TR อัตราการไหลของอากาศ $2.97 \text{ m}^3/\text{min}$ และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) 0.73 BTU/h/W ผลการวิเคราะห์พื้นที่การเกิดสีน้ำตาลพบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลต่ำกว่า 2.5% ขณะที่ชุดควบคุมมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลมากกว่า 3.6% และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การสลัดน้ำร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิต่ำมีศักยภาพในการลดการเกิดสีน้ำตาลและช่วยรักษาคุณภาพด้านรูปลักษณะของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภคระหว่างการเก็บรักษา

คำสำคัญ: ระบบสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำ, การเกิดสีน้ำตาล, ผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์, การจัดการหลังการเก็บเกี่ยว, ระบบทำความเย็น

Abstract

Maintaining the quality of fresh-cut, ready-to-eat vegetables, particularly organic green cos lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*), remains a major challenge in postharvest handling because browning directly affects visual quality and consumer acceptance. This study aimed to design and evaluate the engineering performance of a temperature-controlled spin dryer for fresh-cut organic green cos lettuce and to investigate the effect of low-temperature control during spin drying on browning development. The prototype was designed by integrating a refrigeration system into the spin-drying process. After trimming and washing, the lettuce samples were randomly divided into 1-kg batches. The refrigeration system was operated for 5 min before spin drying. The samples were then spin-dried at a constant rotational speed of 180 rpm for 15 min under low-temperature conditions, with supply- and return-air temperatures of 18.0 and 22.3 °C, respectively. Control samples were spin-dried under ambient conditions without operating the refrigeration system. Following spin drying, the samples from each treatment were divided into 20 experimental units of 20 g each, individually packaged in polyethylene bags, and stored at 4 °C for 10 days. Browning development was monitored using image analysis based on the hue–saturation–intensity (HSI) color model, with hue angles ranging from 35° to 50° used to identify browned areas. The engineering performance evaluation showed that the prototype had a cooling capacity of 0.066 TR, an airflow rate of $2.97 \text{ m}^3/\text{min}$, and an

energy efficiency ratio (EER) of 0.73 BTU/h/W. Image analysis revealed that the samples subjected to low-temperature spin drying exhibited less than 2.5% browned area, whereas the control samples exhibited more than 3.6%. The difference between the treatments was statistically significant ($p < 0.05$). These findings demonstrate that spin drying under controlled low-temperature conditions can reduce browning and help maintain the visual quality of fresh-cut organic green cos lettuce during refrigerated storage.

Keywords: Low-temperature spin-drying system, Browning, Organic green cos lettuce, Postharvest handling, Cooling system

1. บทนำ

ผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*) เป็นผักกินใบที่ได้รับความนิยมสำหรับการบริโภคสดและการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ตัดแต่งพร้อมบริโภค (Fresh-cut หรือ Ready-to-eat) เนื่องจากมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่กรอบและสะดวกต่อการบริโภค อย่างไรก็ตาม ผักสลัดมีปริมาณน้ำสูงและมีโครงสร้างเนื้อเยื่อที่บอบบาง จึงมีความไวต่อการเสื่อมคุณภาพภายหลังการเก็บเกี่ยว โดยเฉพาะเมื่อผ่านกระบวนการตัดแต่ง การล้าง การกำจัดน้ำ และการบรรจุ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อและเร่งการเปลี่ยนแปลงด้านสีและลักษณะปรากฏ ส่งผลต่อคุณภาพและการยอมรับของผู้บริโภค (Bhatia *et al.*, 2024; Toivonen & Brummell, 2008)

การล้างเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการผลิตผักตัดแต่งพร้อมบริโภค เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและลดสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิว อย่างไรก็ตาม ภายหลังการล้างมักมีน้ำอิสระตกค้างบริเวณผิวใบ ซึ่งหากกำจัดออกไม่เพียงพออาจทำให้เกิดการสะสมของหยดน้ำภายในบรรจุภัณฑ์ และส่งผลต่อสภาวะแวดล้อมรอบผลิตผลระหว่างการเก็บรักษา ดังนั้น การกำจัดน้ำส่วนเกินออกจากพื้นผิวก่อนการบรรจุจึงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อการรักษาคุณภาพของผักตัดแต่ง วิธีการที่นิยมใช้ ได้แก่ การผึ่งลม การใช้ลมบังคับ และการสลัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยง โดยการสลัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยงสามารถกำจัดน้ำส่วนเกินบริเวณพื้นผิวได้อย่างรวดเร็วและเหมาะสมกับกระบวนการผลิตผักตัดแต่ง (Bolin & Huxsoll, 1991) อย่างไรก็ตาม หากกำหนดสภาวะการสลัดน้ำไม่เหมาะสม อาจทำให้ผลิตผลเกิดความเสียหายทางกลหรือเกิดการสูญเสียน้ำมากเกินไป ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพของผลิตผลในระหว่างการเก็บรักษา

การเกิดสีน้ำตาลเป็นปัญหาสำคัญด้านคุณภาพของผักสลัดตัดแต่ง เนื่องจากกระบวนการตัด การเสียดสี และการกระแทกสามารถทำลายความสมบูรณ์ของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้สารประกอบฟีนอลิกและเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในเนื้อเยื่อมีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้น และนำไปสู่การพัฒนาของสีน้ำตาล นอกจากนี้ การบาดเจ็บของเนื้อเยื่อยังสามารถกระตุ้นการตอบสนอง

ต่อบาดแผล (Wound response) และการเปลี่ยนแปลงของวิถีเมแทบอลิซึมฟีนิลโพรพานอยด์ (Phenylpropanoid metabolism) ซึ่งสัมพันธ์กับการสังเคราะห์และสะสมสารประกอบฟีนอลิกที่มีบทบาทต่อการเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ตัดแต่ง (He & Luo, 2007; Toivonen & Brummell, 2008; Li *et al.*, 2023) Iakimova & Woltering, (2018) รายงานว่า แม้ผักสลัดตัดแต่งจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C แต่ยังสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อและการเกิดสีน้ำตาลบริเวณรอยตัดในระหว่างการเก็บรักษาได้ แสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการเก็บรักษาเพียงอย่างเดียวอาจไม่สามารถป้องกันการตอบสนองของเนื้อเยื่อที่เกิดขึ้นภายหลังการตัดแต่งได้ทั้งหมด

ในด้านการกำจัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยง เกร์รัฐ และเดือนแรม (2565) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสลัดน้ำของผักตัดแต่ง โดยพิจารณาน้ำหนักตัวอย่าง ความเร็วรอบ และระยะเวลาการสลัด ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังกล่าวมุ่งเน้นการกำหนดสภาวะการทำงานของกระบวนการสลัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยงภายใต้สภาวะแวดล้อมทั่วไป โดยยังไม่ได้บูรณาการระบบทำความเย็นเข้ากับกระบวนการสลัดน้ำ งานวิจัยนี้จึงต่อยอดแนวคิดดังกล่าวโดยบูรณาการระบบทำความเย็นและการหมุนเวียนอากาศเข้ากับกระบวนการสลัดน้ำ เพื่อศึกษาผลของการควบคุมสภาวะอุณหภูมิระหว่างการกำจัดน้ำต่อการเกิดสีน้ำตาลของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภคระหว่างการเก็บรักษา

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าเครื่องหรือกระบวนการสลัดน้ำสำหรับผักตัดแต่งส่วนใหญ่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำส่วนเกิน โดยพิจารณาปัจจัยด้านความเร็วรอบ ปริมาณผลิตภัณฑ์ และระยะเวลาการสลัดเป็นหลัก ขณะที่การบูรณาการการสลัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยง ร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิของอากาศภายในเครื่อง เพื่อให้สามารถกำจัดน้ำส่วนเกินและควบคุมสภาวะอุณหภูมิของอากาศในขั้นตอนเดียวกันยังมีรายงานค่อนข้างจำกัด โดยเฉพาะการประเมินผลของกระบวนการดังกล่าวต่อการพัฒนาของสีน้ำตาลในผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งระหว่างการเก็บรักษา นอกจากนี้ การประเมินพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลในเชิงปริมาณด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายยังเป็นแนวทางที่สามารถลดความคลาดเคลื่อนจากการประเมินด้วยสายตาและช่วยให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพได้อย่างเป็นระบบ ดังนั้น เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้จึงมีลักษณะแตกต่างจากเครื่องสลัดน้ำทั่วไป โดยบูรณาการถังสลัดน้ำแบบแรงเหวี่ยงร่วมกับระบบทำความเย็นและระบบหมุนเวียนอากาศ พร้อมประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายในระบบสี HSI เพื่อประเมินพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลของผักสลัดในเชิงปริมาณตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา

ในการศึกษานี้ ชุดทดลองดำเนินการสลัดน้ำภายใต้ระบบทำความเย็น โดยมีอุณหภูมิลมจ่าย 18.0 °C และอุณหภูมิลมกลับ 22.3 °C ขณะที่ชุดควบคุมผ่านกระบวนการสลัดน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องโดยไม่เปิดระบบทำความเย็น แม้ว่าภายหลังการสลัดน้ำ ตัวอย่างจากทั้งสองสภาวะจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิเดียวกัน คือ 4°C แต่ความแตกต่างของการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บ

รักษาอาจสัมพันธ์กับสถานะที่ผลิตผลได้รับในช่วงหลังการล้างและก่อนการบรรจุ ซึ่งเป็นระยะเริ่มต้น ภายหลังเนื้อเยื่อได้รับความเสียหายจากการตัดแต่ง การใช้อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าสถานะแวดล้อม ในระหว่างการสลัดน้ำอาจช่วยลดภาระความร้อนของผลิตผลและชะลอการเปลี่ยนแปลงทาง สรีรวิทยาและชีวเคมีในระยะแรกก่อนเข้าสู่การเก็บรักษาที่ 4°C ประกอบกับการกำจัดน้ำอิสระออก จากพื้นผิวก่อนการบรรจุอาจช่วยลดการสะสมของความชื้นส่วนเกินภายในบรรจุภัณฑ์ ดังนั้น ความ แตกต่างของพื้นที่การเกิดสื่อน้ำตาลที่ตรวจพบในระหว่างการเก็บรักษาจึงอาจเป็นผลต่อเนื่องจาก สถานะการจัดการผลิตผลก่อนเข้าสู่การเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการศึกษานี้ไม่ได้ตรวจวัด กิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) เพอร์ออกซิเดส (POD) หรือฟีนอละลาโนน แอมโมเนียไลเอส (PAL) โดยตรง การอธิบายกลไกที่เกี่ยวข้องจึงพิจารณาจากแนวโน้มของการ เปลี่ยนแปลงพื้นที่การเกิดสื่อน้ำตาลร่วมกับกลไกที่มีรายงานในงานวิจัยที่ผ่านมา (Luna *et al.*, 2016; lakimova & Woltering, 2018)

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและประเมินสมรรถนะของเครื่องสลัดน้ำ อุณหภูมิต่ำสำหรับสลัดน้ำบนพื้นผิวของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภคร และศึกษาผล ของการสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิต่อการเกิดสื่อน้ำตาลระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายในระบบสี HSI เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของ พื้นที่การเกิดสื่อน้ำตาลในเชิงปริมาณ

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำสำหรับกระบวนการสลัดน้ำของผักสลัด กรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภคร

2.2 เพื่อประเมินสมรรถนะทางวิศวกรรมของเครื่องต้นแบบและระบบทำความเย็นภายใต้ สถานะการทำงานที่กำหนด

2.3 เพื่อศึกษาผลของกระบวนการสลัดน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำต่อการเกิดสื่อน้ำตาลของผัก สลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภครระหว่างการเก็บรักษา โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ ภาพถ่าย (Image analysis) ในระบบสี HSI เพื่อประเมินพื้นที่การเกิดสื่อน้ำตาลเชิงปริมาณ

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบและประเมินเครื่องสลัดน้ำแบบอุณหภูมิต่ำ

การศึกษานี้มุ่งออกแบบและพัฒนาเครื่องสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำ โดยบูรณาการกระบวนการ สลัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยงร่วมกับระบบทำความเย็นและระบบหมุนเวียนอากาศ เพื่อควบคุมสภาวะ อุณหภูมิของผลิตผลในระหว่างกระบวนการสลัดน้ำและศึกษาผลต่อการพัฒนาของพื้นที่การเกิดส

น้ำตาระหว่างการเก็บรักษา การออกแบบเครื่องต้นแบบให้มีความสำคัญกับการรักษาสภาพของผลิตภัณฑ์ การลดความเสียหายทางกลระหว่างกระบวนการ และการควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องให้ต่ำกว่าสภาวะแวดล้อมก่อนและระหว่างการปฏิบัติงาน

เกณฑ์การออกแบบกำหนดให้ระบบสามารถลดอุณหภูมิอากาศภายในบริเวณควบคุมอุณหภูมิของเครื่องให้ต่ำกว่าอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 4–5 °C ภายในระยะเวลา 5 min ระบบต้นแบบประกอบด้วยคอมเพรสเซอร์กำลังไฟฟ้าพิกัด 1.1 kW คอยล์เย็น (Evaporator) พร้อมระบบส่งลมเย็นแบบบังคับทิศทาง คอยล์ร้อน (Condenser) พร้อมพัดลมระบายความร้อน ชุดควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติร่วมกับเซ็นเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิ (DS18B20/NTC) และพัดลมโบลเวอร์สำหรับหมุนเวียนอากาศ โครงสร้างเครื่องต้นแบบมีขนาด 90 × 90 × 100 cm ภายในติดตั้งถังตะแกรงหมุนสำหรับสไลด์น้ำ ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1/2 hp (220 V, 50 Hz) โดยควบคุมความเร็วรอบให้เหมาะสมกับสภาวะการทดลอง (ภาพที่ 1) ในการออกแบบระบบทำความเย็น ได้ประมาณการระความร้อนสัมผัสของอากาศภายในบริเวณควบคุมอุณหภูมิจากสมดุลพลังงาน โดยพิจารณาความหนาแน่นของอากาศ ปริมาตรของบริเวณควบคุม ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ผลต่างอุณหภูมิ และระยะเวลาที่กำหนด ตามหลักการของ ซิงห์ และเฮลด์แมน (Singh & Heldman, 2014) ดังสมการที่ (1)

$$Q = \frac{\rho V c_p \Delta T}{t} \quad (1)$$

โดยที่ Q คือการระความร้อน (kW), ρ คือความหนาแน่นของอากาศ (1.2 kg/m³), V คือปริมาตรห้อง (0.81 m³), c_p คือความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (1.006 kJ/kg·K), ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิ (10 K) และ t คือเวลา (300 s)

แม้ว่าเป้าหมายการทำงานของเครื่องต้นแบบกำหนดให้ลดอุณหภูมิอากาศภายในระบบต่ำกว่าอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 4–5 °C แต่ในการคำนวณออกแบบได้กำหนดค่า ΔT เท่ากับ 10 K ซึ่งสูงกว่าเป้าหมายการใช้งานจริง เพื่อใช้เป็น ค่าความต่างอุณหภูมิสำหรับการออกแบบที่มีส่วนเผื่อ (Design safety margin) รองรับความแปรผันของสภาวะแวดล้อมและการระความร้อนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการใช้งานจริง จากสมการที่ 1 คำนวณได้การระความร้อนสัมผัสของอากาศประมาณ 0.033 kW หรือ 33 W

ทั้งนี้ ค่าดังกล่าวเป็นการประมาณเฉพาะการระความร้อนสัมผัสของอากาศ และไม่ได้รวมการระความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระหว่างการปฏิบัติงานจริง เช่น การระความร้อนจากผลิตภัณฑ์ การระความร้อนแฝงจากความชื้น การถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้าง การแทรกซึมของอากาศจากภายนอก

และความร้อนจากอุปกรณ์ภายในเครื่อง ดังนั้น การเลือกอุปกรณ์ทำความเย็นจึงพิจารณาให้มีกำลังสำรองเหนือกว่าค่าภาระความร้อนสัมผัสที่คำนวณได้ โดยเครื่องต้นแบบใช้คอมเพรสเซอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าพิกัด 1.1 kW สำหรับระบบทำความเย็น ส่วนสมรรถนะการทำความเย็นจริงของระบบประเมินจากอัตราการไหลของอากาศ ความแตกต่างของเอนทัลปีระหว่างลมกลับและลมจ่าย ความสามารถในการทำความเย็นสุทธิ และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) ภายใต้สภาวะการทำงานจริง ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.3

3.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดลองสลัดน้ำ

ผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์สดที่ใช้ในการทดลองจัดซื้อจากวิสาหกิจชุมชนผักปลอดภัยจากสารพิษ ตำบลเกาะตาเลี้ยง อำเภอสรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย ก่อนการทดลอง ตัวอย่างผักถูกคัดเลือกและตัดแต่งด้วยมือ โดยคัดแยกส่วนที่มีลักษณะเสียหายหรือไม่สมบูรณ์ออก จากนั้นล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาไหลผ่านเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนบริเวณพื้นผิว ก่อนสุมแบ่งตัวอย่างชุดละ 1 kg บรรจุลงในตะกร้าพอลิโพรพิลีนแบบมีรูพรุน และนำเข้าสู่เครื่องสลัดน้ำต้นแบบ (ภาพที่ 1)

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ ได้แก่ 1) การสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิต่ำโดยเปิดระบบทำความเย็น และ 2) ชุดควบคุม (Control) ซึ่งดำเนินการสลัดน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องโดยไม่เปิดระบบทำความเย็น สำหรับสภาวะควบคุมอุณหภูมิต่ำ ระบบทำความเย็นถูกเดินเครื่องล่วงหน้า (Pre-cooling) เป็นเวลา 5 min เพื่อให้อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องเข้าสู่สภาวะที่กำหนดก่อนเริ่มกระบวนการสลัดน้ำ โดยกำหนดอุณหภูมิลมจ่าย (Supply-air temperature) เท่ากับ 18.0°C ขณะที่อุณหภูมิลมกลับ (Return-air temperature) เฉลี่ยเท่ากับ 22.3°C และความเร็วลมกลับเท่ากับ 3.2 m/s การกำหนดอุณหภูมิลมจ่ายที่ 18.0°C สอดคล้องกับเกณฑ์การออกแบบของเครื่องต้นแบบที่กำหนดให้สามารถลดอุณหภูมิอากาศภายในบริเวณควบคุมให้ต่ำกว่าสภาวะแวดล้อมประมาณ $4\text{--}5^{\circ}\text{C}$ ภายในระยะเวลา 5 min

ภายหลังการทำ Pre-cooling ตัวอย่างถูกสลัดน้ำที่ความเร็วรอบคงที่ 180 rpm เป็นเวลา 15 min การกำหนดสภาวะดังกล่าวเป็นการต่อยอดจากงานวิจัยของ เอกรัฐ และเดือนแรม (2565) ซึ่งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลัดน้ำของผักสดตัดแต่งชนิดผักใบ โดยทดสอบความเร็วรอบ 85, 130 และ 180 rpm และระยะเวลาการสลัดน้ำ 5, 10 และ 15 min ผลการศึกษาดังกล่าวพบว่าสำหรับผักน้ำหนัก 1 kg การสลัดที่ความเร็วรอบ 180 rpm เป็นองค์ประกอบของสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำสูง โดยรายงานผลที่ระยะเวลา 10 min ดังนั้น การศึกษาปัจจุบันจึงเลือกความเร็วรอบ 180 rpm และกำหนดระยะเวลา 15 min ซึ่งเป็นระดับที่อยู่ภายในช่วงพารามิเตอร์ที่ได้รับการศึกษามาก่อน เพื่อใช้เป็นสภาวะการทำงานคงที่สำหรับประเมินผลของการบูรณาการระบบทำความเย็น ทั้งนี้ มิได้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอว่าสภาวะ 180 rpm และ 15 min เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผักกรีนคอส สำหรับชุดควบคุม ใช้ปริมาณตัวอย่าง ความเร็วรอบ และระยะเวลาการสลัดน้ำเช่นเดียวกับ

ชุดทดลองทุกประการ แต่ไม่เปิดระบบทำความเย็น เพื่อให้ปัจจัยหลักที่แตกต่างกันระหว่างสองสภาวะ เป็นการควบคุมอุณหภูมิระหว่างกระบวนการสลัดน้ำ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการสลัดน้ำ ตัวอย่างของแต่ละสภาวะถูกสุ่มแบ่งออกเป็น 20 หน่วยทดลอง โดยกำหนดมวลตัวอย่างหน่วยละ 20 g และบรรจุแยกในถุงพอลิเอทิลีนจำนวน 20 ถุง ทั้งนี้ การกำหนดหน่วยทดลองใช้มวลของตัวอย่างเป็นเกณฑ์โดยไม่ได้กำหนดจำนวนใบต่อถุง เนื่องจากขนาดและมวลของใบผักมีความแปรผันตามธรรมชาติ ตัวอย่างทั้งหมดถูกนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 10 วันภายใต้สภาวะเดียวกัน

การติดตามการเกิดสีน้ำตาลดำเนินการโดยกำหนดรหัสประจำหน่วยทดลองแต่ละถุง และใช้ตัวอย่างชุดเดิมของแต่ละหน่วยทดลองในการบันทึกภาพซ้ำทุกวันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา โดยบันทึกภาพในเวลา 12.00 น. ของแต่ละวัน เพื่อให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลของตัวอย่างเดียวกันตามระยะเวลาการเก็บรักษาได้อย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 1 เครื่องสลัดน้ำต้นแบบ

3.3 การประเมินสมรรถนะของระบบทำความเย็น

สมรรถนะของระบบทำความเย็นถูกประเมินผ่านพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (CMM, m³/min) คำนวณจากความเร็วลมกลับและพื้นที่หน้าตัดของท่อลม ดังสมการที่ (2)

$$CMM = 60 \times V \times A \quad (2)$$

โดยที่ V คือความเร็วลมกลับเฉลี่ย (m/s) และ A คือพื้นที่หน้าตัดของท่อ (m²) จากนั้น ภาระการทำความเย็น (Cooling capacity) ในหน่วยตันความเย็น (TR) คำนวณจากความแตกต่างของเอนทัลปีระหว่างลมกลับและลมจ่ายตามสมการที่ (3)

$$TR = 5.707 \times 10^{-3} \times CMM \times (H_r \times H_s) \quad (3)$$

โดยที่ H_r และ H_s คือเอนทัลปีของลมกลับและลมจ่าย (kJ/kg) ตามลำดับ เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ได้ทำการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าต่อตันความเย็น (CHP) ตามสมการที่ (4)

$$CHP = \frac{W_{in}}{TR} \quad (4)$$

โดยที่ W_{in} คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้า (kW) นอกจากนี้ อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Ratio, EER) ซึ่งเป็นดัชนีมาตรฐานในงานวิศวกรรมทำความเย็น ได้ถูกคำนวณดังนี้

$$ERR = \frac{Q}{W_{in}} \quad (5)$$

โดยที่ Q คือความจุการทำความเย็นสุทธิ (BTU/h) และ W_{in} คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ (W)

3.4 การถ่ายภาพและการประเมินการเกิดสีน้ำตาลด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่าย

การประเมินการเกิดสีน้ำตาลของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ดำเนินการเชิงปริมาณด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่าย ภายใต้สภาวะการถ่ายภาพที่ควบคุมให้คงที่ โดยใช้ตู้ถ่ายภาพควบคุมแสง (Studio Light Box, Shenzhen PULUZ Technology Co., Ltd., China) ขนาด 25 × 25 cm ติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65 เพื่อควบคุมอุณหภูมิสีและสภาวะแสงระหว่างการบันทึกภาพให้

มีความสม่ำเสมอ ภาพตัวอย่างถูกบันทึกในมุมมองด้านบน (Top-down view) ด้วยสมาร์ทโฟน iPhone 13 (Apple Inc., USA) โดยกำหนดระยะห่างระหว่างกล้องกับตัวอย่างเท่ากับ 25 cm และบันทึกภาพที่มีความละเอียด 3024 × 4032 pixel

ภายหลังการสลัดน้ำ ตัวอย่างของแต่ละสภาวะถูกแบ่งเป็น 20 หน่วยทดลอง โดยกำหนดมวลตัวอย่างหน่วยละ 20 g และบรรจุแยกในถุงพอลิเอทิลีนจำนวน 20 ถุงต่อสภาวะ การกำหนดหน่วยทดลองใช้มวลของตัวอย่างเป็นเกณฑ์ โดยไม่ได้กำหนดจำนวนใบ เนื่องจากใบผักสลัดมีความแตกต่างกันด้านขนาดและมวลตามธรรมชาติ แต่ละหน่วยทดลองถูกกำหนดรหัสประจำตัวเพื่อใช้ติดตามตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา

การบันทึกภาพดำเนินการกับตัวอย่างชุดเดิมของแต่ละหน่วยทดลองตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 10 วัน โดยถ่ายภาพตัวอย่างแต่ละหน่วยทดลองทุกวันในเวลา 12.00 น. ภายใต้ตำแหน่งกล้อง ระยะถ่ายภาพ และสภาวะแสงเดียวกันตลอดการทดลอง การใช้ตัวอย่างชุดเดิมในการติดตามรายวันทำให้สามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลของแต่ละหน่วยทดลองตามระยะเวลาการเก็บรักษาได้อย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 การจัดวางผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ในระบบถ่ายภาพ

การประมวลผลภาพดำเนินการด้วยภาษา Python ร่วมกับไลบรารี OpenCV เวอร์ชัน 4.10.0 ประกอบด้วยขั้นตอนการประมวลผลภาพเบื้องต้น การแปลงปริภูมิสี และการแบ่งส่วนภาพด้วยค่าขีดจำกัดสี (Color thresholding) ภาพต้นฉบับในปริภูมิสี RGB ถูกแปลงเป็นปริภูมิสี HSI (Hue, Saturation, Intensity) ตามสมการที่ 6–9 จากนั้นแยกพื้นที่ของผักออกจากพื้นหลังและระบุบริเวณที่เกิดสีน้ำตาลโดยประยุกต์หลักเกณฑ์การวิเคราะห์ค่าสี (Aekram *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2004) โดย Aekram *et al.* (2024) รายงานช่วงมุมสีสำหรับพื้นที่สีน้ำตาลที่ 35°–79° อย่างไรก็ตาม

ตาม จากการตรวจสอบค่ามุมสีของตัวอย่างในการศึกษานี้ พบว่าพิกเซลที่จำแนกเป็นพื้นที่สีน้ำตาลอยู่ในช่วง 35° – 50° และไม่พบค่ามุมสีในช่วง 51° – 79° ดังนั้น การศึกษานี้จึงกำหนดช่วงมุมสี 35° – 50° สำหรับการจำแนกพื้นที่สีน้ำตาลของตัวอย่างที่ศึกษา ทั้งนี้ วิธีการดังกล่าวประยุกต์จาก Aekram *et al.* (2024) ซึ่งรายงานความสอดคล้องระหว่างพื้นที่ที่คำนวณด้วยวิธีวิเคราะห์ภาพและพื้นที่จากการวัดจริง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3% (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 อัลกอริทึมการวิเคราะห์ภาพถ่ายสำหรับการหาปริมาณพื้นที่ที่เกิดสีน้ำตาล

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{\left[(R-B)^2 + (R-B)(G-B) \right]^{\frac{1}{2}}} \right\} \quad (6)$$

$$H = \begin{cases} \theta & B \leq G \\ 360 - \theta & B > G \end{cases} \quad (7)$$

$$S = 1 - \frac{1}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)] \quad (8)$$

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B) \quad (9)$$

โดยที่ $[\min(R, G, B)]$ คือค่าต่ำสุดเมื่อเทียบระหว่างค่าของ R, G และ B

ข้อมูลร้อยละพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบผสมสองปัจจัย (Two-way mixed-design ANOVA) โดยกำหนดสถานะการสลัดน้ำ (Treatment) เป็นปัจจัยระหว่างหน่วยทดลอง (Between-subject factor) ประกอบด้วยสถานะควบคุมอุณหภูมิต่ำและสถานะอุณหภูมิห้อง และกำหนดระยะเวลาการเก็บรักษา (Storage time) เป็นปัจจัยภายในหน่วยทดลองแบบวัดซ้ำ (Within-subject repeated-measures factor) เนื่องจากตัวอย่างชุดเดิมของแต่ละหน่วยทดลองถูกติดตามและบันทึกภาพซ้ำตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา การวิเคราะห์พิจารณาผลหลักของสถานะการสลัดน้ำ ผลหลักของระยะเวลาการเก็บรักษา และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสถานะการสลัดน้ำกับระยะเวลาการเก็บรักษา (Treatment $\times$ storage time)

ก่อนการวิเคราะห์ ข้อมูลได้รับการตรวจสอบการแจกแจงของค่าคลาดเคลื่อนและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แบบวัดซ้ำ ในกรณีที่สมมติฐานความเป็นทรงกลม (Sphericity) ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ จะใช้การปรับค่าองศาอิสระด้วยวิธี Greenhouse-Geisser สำหรับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างสถานะการทดลองในแต่ละช่วงเวลาหรือระหว่างช่วงเวลาการเก็บรักษา ใช้การเปรียบเทียบรายคู่พร้อมปรับค่า p ด้วยวิธี Bonferroni โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

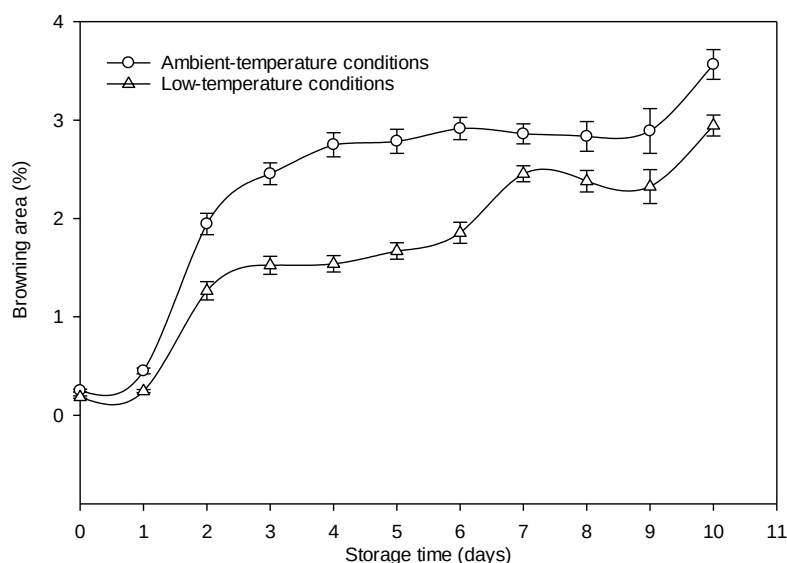
4. ผลการวิจัย

4.1 สมรรถนะของระบบทำความเย็นในเครื่องสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำ

จากการประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องสลัดน้ำต้นแบบที่บูรณาการระบบปรับอากาศเพื่อกำจัดความชื้นบนผิวผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ พบว่าระบบมีอัตราการไหลเวียนของอากาศเท่ากับ $2.97 \text{ m}^3/\text{min}$ และให้ความสามารถในการทำความเย็นสุทธิที่ 0.066 TR หรือคิดเป็น 794.02 BTU/h อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน พบว่าระบบมีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) เท่ากับ 0.73 BTU/h/W

4.2 ผลของการสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำต่อการเกิดสีน้ำตาล

การติดตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลในผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภคน้ำที่ผ่านกระบวนการสลัดน้ำภายใต้ 2 สถานะ ได้แก่ สถานะควบคุมอุณหภูมิต่ำและสถานะอุณหภูมิห้อง ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 10 วัน พบว่า พื้นที่การเกิดสีน้ำตาลของตัวอย่างในทั้งสองสถานะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สถานะควบคุมอุณหภูมิต่ำมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลต่ำกว่าชุดควบคุมที่สลัดน้ำภายใต้สถานะอุณหภูมิห้อง การวิเคราะห์แบบวัดซ้ำพบว่าสถานะการสลัดน้ำ ระยะเวลาการเก็บรักษา และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสถานะการสลัดน้ำกับระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 4 เปอร์เซ็นต์พื้นที่การเกิดสีน้ำตาลของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 10 วัน ภายใต้สภาวะการสลัดน้ำที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่า พื้นที่การเกิดสีน้ำตาลของทั้งสองสภาวะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 2 วันแรก โดยรอยสีน้ำตาลปรากฏเด่นชัดบริเวณรอยตัดและบริเวณเนื้อเยื่อที่ได้รับความเสียหายทางกล (Mechanical damage) (ภาพที่ 5) หลังจากนั้นในช่วงวันที่ 3-9 อัตราการเพิ่มขึ้นของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับช่วง 2 วันแรก ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งในวันที่ 10 (ภาพที่ 6) ทั้งนี้ ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ชุดควบคุมมีแนวโน้มของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลสูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิต่ำ

ในช่วงปลายระยะเวลาการเก็บรักษา ตัวอย่างที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิต่ำมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลต่ำกว่า 2.5% ขณะที่ชุดควบคุมมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลมากกว่า 3.6% ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลระหว่างสองสภาวะประมาณ 1.1 จุดเปอร์เซ็นต์ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แม้ว่าตัวอย่างจากทั้งสองสภาวะจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิเดียวกัน คือ 4°C แต่สภาวะการจัดการในขั้นตอนการสลัดน้ำก่อนการบรรจุมีความสัมพันธ์กับระดับการเกิดสีน้ำตาลที่ตรวจพบในระหว่างการเก็บรักษา โดยตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิต่ำมีการพัฒนาของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลน้อยกว่าชุดควบคุม



ภาพที่ 5 พื้นที่สีน้ำตาลที่เกิดจากการตัดที่สังเกตพบในช่วง 2 วันแรกของการเก็บรักษา



ภาพที่ 6 การพัฒนาของการเกิดสีน้ำตาลถูกติดตามตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 10 วัน

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้สามารถออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบสลัดน้ำอุณหภูมิต่ำที่บูรณาการระบบทำความเย็นร่วมกับกระบวนการสลัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยงสำหรับผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภค โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ ได้แก่ 1) ชุดทดลองที่ดำเนินการสลัดน้ำภายใต้ระบบทำความเย็น โดยใช้อุณหภูมิลมจ่ายเท่ากับ 18.0°C และอุณหภูมิลมกลับเฉลี่ยเท่ากับ 22.3°C และ

2) ชุดควบคุมที่ดำเนินการสลัดน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องโดยไม่เปิดระบบทำความเย็น ทั้งสองสภาวะใช้ความเร็วรอบ 180 rpm เป็นเวลา 15 min ภายใต้ปริมาณตัวอย่างและเงื่อนไขการสลัดน้ำเดียวกัน จากนั้นตัวอย่างทั้งหมดถูกนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 10 วัน ผลการประเมินด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายในระบบสี HSI แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิตำมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในช่วงปลายระยะเวลาการเก็บรักษา ตัวอย่างที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิตำมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลต่ำกว่า 2.5% ขณะที่ชุดควบคุมมีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลมากกว่า 3.6% แสดงให้เห็นว่าการควบคุมสภาวะอุณหภูมิระหว่างกระบวนการสลัดน้ำก่อนการบรรจุมีความสัมพันธ์กับการลดระดับการเกิดสีน้ำตาลของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิตำ

ในด้านสมรรถนะทางวิศวกรรม เครื่องต้นแบบมีอัตราการไหลเวียนของอากาศ 2.97 m³/min ความสามารถในการทำความเย็นสุทธิ 0.066 TR และมีอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy efficiency ratio; EER) เท่ากับ 0.73 BTU/h/W ผลการศึกษาจึงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการบูรณาการกระบวนการสลัดน้ำด้วยแรงเหวี่ยงร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิสำหรับการลดน้ำส่วนเกินบนพื้นผิวและชะลอการพัฒนาของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลในผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ตัดแต่งพร้อมบริโภค ทั้งนี้ การพัฒนาระบบในอนาคตควรให้ความสำคัญกับการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานควบคู่กับการรักษาคุณภาพของผลิตผล

5.2 การอภิปรายผล

5.2.1 การวิเคราะห์สมรรถนะและการใช้พลังงานของระบบ

แม้ว่าระบบจะสามารถลดอุณหภูมิและกำจัดความชื้นเพื่อรักษาคุณภาพของผักสลัดได้ตามเป้าหมาย แต่ค่า EER ที่ 0.73 BTU/h/W ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานของระบบทำความเย็นเชิงพาณิชย์ทั่วไป (มักมีค่า EER อยู่ระหว่าง 8–12 BTU/h/W) อย่างมีนัยสำคัญ ถือเป็นประเด็นความท้าทายทางวิศวกรรม ค่า EER ที่ต่ำนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากการออกแบบเครื่องจักรที่ต้องให้ความสำคัญสูงสุดกับการรักษาโครงสร้างใบที่บอบบางของผลิตผล โดยต้องควบคุมความเร็วลมและรูปแบบการไหลเวียนของอากาศอย่างนุ่มนวลเพื่อป้องกันความบอบช้ำทางกล แทนที่จะมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเพียงอย่างเดียว ความท้าทายในการรักษาสมดุลระหว่างประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการควบคุมสภาวะแวดล้อมที่แม่นยำนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Song *et al.* (2008) ที่รายงานถึงข้อจำกัดของการจัดการพลังงานในระบบเครื่องทำความเย็นเฉพาะทาง นอกจากนี้ Zhang & Kacira (2020) ยังได้เน้นย้ำถึงความท้าทายในการปรับสมดุลระหว่างการใช้พลังงานกับคุณภาพของพืชผลในระบบปรับอากาศและระบายอากาศสำหรับโรงเรือนควบคุมสภาพแวดล้อม ดังนั้น ในอนาคตการปรับปรุงระบบโดยนำเทคโนโลยีควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

การปรับปรุงรูปแบบการไหลเวียนของอากาศ หรือการประยุกต์ใช้ระบบลดความชื้นร่วมด้วย อาจเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องต้นแบบ โดยควรประเมินผลร่วมกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์และการใช้พลังงานต่อหน่วยมวลผลิตผลเพื่อพิจารณาความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง

5.2.2 ผลของสภาวะการสลัดน้ำต่อการเกิดสีน้ำตาลระหว่างการเก็บรักษา

ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายแสดงให้เห็นว่า ผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิตำ่มีพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลต่ำกว่าชุดควบคุมที่ผ่านการสลัดน้ำภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แม้ว่าภายหลังการสลัดน้ำ ตัวอย่างจากทั้งสองสภาวะจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิเดียวกัน คือ 4°C ตลอดระยะเวลา 10 วันก็ตาม ความแตกต่างดังกล่าวอาจสัมพันธ์กับสภาวะที่ผลิตผลได้รับในช่วงหลังการล้างและก่อนการบรรจุ ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของการตอบสนองของเนื้อเยื่อภายหลังการตัดแต่ง โดยในการทดลองนี้ ทั้งสองสภาวะใช้ปริมาณตัวอย่าง ความเร็วรอบ 180 rpm และระยะเวลาการสลัดน้ำ 15 min เท่ากัน ปัจจัยหลักที่แตกต่างกันจึงเป็นการควบคุมอุณหภูมิระหว่างกระบวนการสลัดน้ำ โดยชุดทดลองใช้อุณหภูมิเฉลี่ย 18.0°C และอุณหภูมิกลับเฉลี่ย 22.3°C ขณะที่ชุดควบคุมดำเนินการภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องโดยไม่เปิดระบบทำความเย็น

การตัดแต่ง การเสียดสี และการกระทบกระเทือนของเนื้อเยื่อเป็นปัจจัยสำคัญที่กระตุ้นการเกิดสีน้ำตาลในผลิตผลตัดแต่ง เนื่องจากความเสียหายของโครงสร้างเซลล์ทำให้สารประกอบฟีนอลิกและเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชันมีโอกาสดำรงกันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีบริเวณเนื้อเยื่อที่ได้รับความเสียหาย (He & Luo, 2007; Toivonen & Brummell, 2008) นอกจากนี้ Aquino-Bolaños & Mercado-Silva, (2004) รายงานความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) และเพอร์ออกซิเดส (POD) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และการพัฒนาของสีน้ำตาลในเนื้อเยื่อตัดแต่ง ขณะที่ Li *et al.* (2023) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของวิถีเมแทบอลิซึมฟีนิลโพรพานอยด์ (Phenylpropanoid metabolism) มีบทบาทสำคัญต่อการเกิดสีน้ำตาลของผักกาดหอมตัดแต่ง

การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลในช่วง 2 วันแรกของการเก็บรักษา โดยเฉพาะบริเวณรอยตัดและบริเวณที่ได้รับความเสียหายทางกล อาจเกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อบาดแผล (Wound response) ที่เกิดขึ้นภายหลังการตัดแต่ง Iakimova & Woltering (2018) รายงานว่า Fresh-cut lettuce ยังคงเกิดการตอบสนองของเนื้อเยื่อต่อบาดแผลและการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาลได้แม้เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิตำ่ระหว่างการเก็บรักษาไม่สามารถยุติกระบวนการตอบสนองต่อบาดแผลได้ทั้งหมด ดังนั้น การจัดการสภาวะของผลิตผลในช่วงก่อนเข้าสู่การเก็บรักษาจึงอาจมีส่วนต่อระดับการเกิดสีน้ำตาลที่ตรวจพบในระยะต่อมา

การที่ชุดทดลองได้รับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าสภาวะแวดล้อมในระหว่างการสลัดน้ำ อาจช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและชีวเคมีในระยะแรกภายหลังการตัดแต่งก่อนที่ ผลผลิตจะเข้าสู่การเก็บรักษาที่ 4 °C ส่งผลให้การพัฒนาของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลในชุดทดลองมี แนวโน้มต่ำกว่าชุดควบคุมตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการ จัดการผลิตผลตัดแต่งที่ให้ความสำคัญกับการลดความเสียหายของเซลล์และการควบคุมสภาวะ แวดล้อมภายหลังกระบวนการตัดแต่ง เพื่อชะลอการเปลี่ยนแปลงด้านสีและคุณภาพของผลิตผล (Toivonen & Brummell, 2008) นอกจากนี้ Zhou *et al.* (2004) รายงานว่าการเปลี่ยนแปลงของ สีและพื้นที่ผิวดินบนผิวผักสลัดสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณในการติดตามการเสื่อมคุณภาพของ ผักสลัดพร้อมใช้ระหว่างการเก็บรักษาได้

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ไม่ได้ตรวจวัดกิจกรรมของเอนไซม์ PPO, POD หรือฟีนอลอะ ลานินแอมโมเนียไลเอส (PAL) โดยตรง ดังนั้น จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าการลดลงของพื้นที่การเกิดสี น้ำตาลในชุดทดลองเป็นผลโดยตรงจากการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ดังกล่าว การอภิปรายกลไกใน งานวิจัยนี้จึงเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ของผลการทดลองกับกลไกที่มีรายงานในงานวิจัยที่ผ่านมา ผลการศึกษานี้สนับสนุนว่าการควบคุมสภาวะอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการสลัดน้ำก่อนการบรรจุมี ศักยภาพในการชะลอการพัฒนาของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาลของผักสลัดกรีนคอสอินทรีย์ระหว่างการ เก็บรักษา ทั้งนี้ การศึกษาในอนาคตควรตรวจวัดกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาล ร่วมกับตัวชี้วัดทางกายภาพและชีวเคมีอื่น เพื่อยืนยันกลไกที่เกี่ยวข้องกับผลของการควบคุมอุณหภูมิ ระหว่างกระบวนการสลัดน้ำให้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ทั้งนี้ การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นการประเมินสมรรถนะของระบบทำความเย็นและการ เปลี่ยนแปลงของพื้นที่การเกิดสีน้ำตาล โดยไม่ได้ตรวจวัดปริมาณน้ำส่วนเกินบนพื้นผิวหรือร้อยละการ ลดลงของมวลก่อนและหลังการสลัดน้ำโดยตรง ดังนั้น การศึกษาครั้งต่อไปควรประเมินประสิทธิภาพ การกำจัดน้ำเชิงปริมาณร่วมกับการสูญเสียมวล คุณภาพของผลิตผล และการใช้พลังงาน เพื่อให้ สามารถประเมินสมรรถนะของเครื่องได้อย่างครอบคลุมยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภายใต้ การสนับสนุนของมูลนิธิโครงการหลวงและศูนย์สนับสนุนโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ วิสาหกิจชุมชนผักปลอดภัยจากสารพิษ ตำบลเกาะตาเลี้ยง อำเภอสรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบทางการเกษตร ตลอดจนให้ความร่วมมือ และการสนับสนุนอย่างดียิ่งตลอดการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- เอกรัฐ ชะอุ่มเอียด, และเดือนแรม แพ่งเกี่ยว. (2565). การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมการทำงานของเครื่องสลัดน้ำผักสดตัดแต่งชนิดผักใบด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง. **วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 15(3), 57-70.
- Aekram, S., Prompuge, W., Wongkhunkaew, P., Samosorn, B., Doncomephang, W., Treerat, N., & Kanjanna, B. (2024). Image processing algorithm for area determination of irregularity quality in leafy green salad. **Food Agricultural Sciences and Technology**, 10(1), 29-41. Doi: 10.14456/fast.2024.3
- Aquino-Bolaños, E. N., & Mercado-Silva, E. (2004). Effects of polyphenol oxidase and peroxidase activity, phenolics and lignin content on the browning of cut jicama. **Postharvest Biology and Technology**, 33(3), 275-283. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2004.03.009
- Bhatia, V., Nag, R., Burgess, C. M., Gaffney, M., Celayeta, J. M. F., & Cummins, E. (2024). Microbial risks associated with ready-to-eat fresh produce (RTEFP)–A focus on temperate climatic conditions. **Postharvest Biology and Technology**, 213, 112924. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2024.112924
- Bolin, H. R., & Huxsoll, C. C. (1991). Effect of preparation procedures and storage parameters on quality retention of salad-cut lettuce. **Journal of Food Science**, 56(1), 60-62. Doi: 10.1111/j.1365-2621.1991.tb07975.x
- He, Q., & Luo, Y. (2007). Enzymatic browning and its control in fresh-cut produce. **Stewart Postharvest Review**, 3(6), 1-7. Doi: 10.2212/spr.2007.6.3
- Iakimova, E. T., & Woltering, E. J. (2018). The wound response in fresh-cut lettuce involves programmed cell death events. **Protoplasma**, 255(4), 1225-1238. Doi: 10.1007/s00709-018-1228-y
- Li, X., Zhang, S., Wang, Q., & Dong, T. (2023). Diacetyl inhibits the browning of fresh-cut stem lettuce by regulating the metabolism of phenylpropane and antioxidant ability. **Foods**, 12(4), 740. Doi: 10.3390/foods12040740
- Luna, M. C., Tudela, J. A., Tomás-Barberán, F. A., & Gil, M. I. (2016). Modified atmosphere (MA) prevents browning of fresh-cut romaine lettuce through multi-target effects

- related to phenolic metabolism. **Postharvest Biology and Technology**, 119, 84-93. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2016.05.001
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2014). **Introduction to food engineering** (5th ed.). Amsterdam: Elsevier, Academic Press.
- Song, Y.-H., Akashi, Y., & Yee, J.-J. (2008). A study on the energy performance of a cooling plant system: Air-conditioning in a semiconductor factory. **Energy and Buildings**, 40(8), 1521-1528. Doi: 10.1016/j.enbuild.2008.02.003
- Toivonen, P. M. A., & Brummell, D. A. (2008). Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables. **Postharvest Biology and Technology**, 48(1), 1-14. Doi: 10.1016/j.postharvbio.2007.09.004
- Zhang, Y., & Kacira, M. (2020). Comparison of energy use efficiency of greenhouse and indoor plant factory system. **European Journal of Horticultural Science**, 85(5), 310-320. Doi: 10.17660/eJHS.2020/85.5.2
- Zhou, T., Harrison, A. D., McKellar, R. C., Young, J. C., Odumeru, J. A., Piyasena, P., Lu, X., Mercer, D. G., & Karr, S. (2004). Determination of acceptability and shelf life of ready-to-use lettuce by digital image analysis. **Food Research International**, 37(9), 875-881. Doi: 10.1016/j.foodres.2004.05.005