

**ประสิทธิภาพของน้ำคั้นสับประรดร่วมกับแคลเซียมแอสคอร์เบตต่อการลดการเกิดสีน้ำตาลของ
มะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้ตัดแต่งพร้อมบริโภคร**
**Efficacy of Pineapple Juice Incorporated with Calcium Ascorbate on Browning Reduction of
Fresh-cut Mango cv. 'Nam Dok Mai'**

พนิดา บุญฤทธิ์ธงไชย^{1,2} มธุรส ขุมทองวัฒนา^{1,2} ไชยพร เก็บเงิน^{1,2} ปุณิกา แสงสุข^{1,2} และ รัตนา รุ่งศิริสกุล³
Panida Boonyaritthongchai^{1,2}, Mathurot Khumthogwattana^{1,2}, Chaiporn Ngebgaoen^{1,2}, Punika Saengsuk^{1,2}
and Ratana Rungsirisakul³

บทคัดย่อ

ปัญหาหลักของมะม่วงสุกตัดแต่งพร้อมบริโภค คือการเกิดสีน้ำตาลของเนื้อผลและการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งทำให้คุณภาพเสื่อมเสียได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคและมีอายุการเก็บรักษาสั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้น้ำสับประรด (PJ) ร่วมกับสารละลายแคลเซียมแอสคอร์เบต (CA) ต่อการชะลอการเกิดสีน้ำตาลในเนื้อมะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้ตัดแต่งพร้อมบริโภค โดยคัดเลือกผลมะม่วงที่มีขนาดและวัยเดียวกัน นำมาล้าง ปอกเปลือก และหั่นชิ้น ก่อนนำมาจุ่มในน้ำกลั่น (ชุดควบคุม) เปรียบเทียบกับชุดที่จุ่มใน PJ ความเข้มข้น 50% ผสมกับ CA ความเข้มข้น 2% (PJ+CA) เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นสะเด็ดน้ำและบรรจุในบรรจุภัณฑ์พลาสติกโพลีโพรพิลีน กึ่งคงรูป เก็บรักษาที่ 4 °C เป็นเวลา 6 วัน พบว่า การใช้ PJ+CA สามารถชะลอการลดลงของค่าความสว่าง (L^*) และลดการเกิดสีน้ำตาลของชิ้นมะม่วงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สอดคล้องกับคะแนนการประเมินสีน้ำตาล เนื่องจากการใช้ PJ + CA ลดกิจกรรมเอนไซม์โพลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม นอกจากนี้มะม่วงที่จุ่มใน PJ + CA มีค่ากิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณโพลิฟีนอลทั้งหมดสูงกว่า โดยเฉพาะปริมาณวิตามินซีที่มากกว่าชุดควบคุม 2 เท่า นอกจากนี้มะม่วงชุด PJ + CA มีอายุการเก็บรักษา 6 วัน ในขณะที่ชุดควบคุมมีอายุการเก็บรักษา 2 วัน สรุปได้ว่าการใช้ PJ+CA เป็นวิธีที่มีศักยภาพในการรักษาคุณภาพทั้งทางกายภาพและเคมีในมะม่วงสุกตัดแต่งพร้อมบริโภค

คำสำคัญ: การเกิดสีน้ำตาล, แคลเซียมแอสคอร์เบต, น้ำสับประรด, มะม่วงสุกหั่นชิ้น

Abstract

The major problems of fresh-cut ripe mango are pulp browning and microbial contamination, which rapidly deteriorate quality, resulting in poor consumer acceptance and a short shelf life. This study aimed to investigate the effect of pineapple juice (PJ) combined with calcium ascorbate (CA) on inhibiting browning in ripe 'Nam Dok Mai' mango slices. Uniform mangoes were washed, peeled, cut into pieces, and dipped in distilled water (control) or 50% PJ mixed with 2% CA (PJ+CA) for 1 min. The samples were drained, packed in semi-rigid polypropylene containers, and stored at 4 °C for 6 days. The results revealed that the PJ + CA treatment significantly delayed the loss of lightness (L^*) and browning development consistent with lesser browning score. Moreover, PJ+CA-treated mangoes exhibited higher antioxidant activity, ascorbic acid, and total polyphenol contents, particularly with ascorbic acid levels more than two-fold higher than the control and PJ alone. In addition, the shelf life of mangoes treated with PJ + CA was 6 days, whereas that of the control was only 2 days. In conclusion, PJ+CA treatment shows a promising natural approach in maintaining the physicochemical quality and consumer acceptability of ready-to-eat ripe mango.

Keywords: Browning, calcium ascorbate, pineapple juice, fresh cut mango

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (บางขุนเทียน)

49 ซอยเทียนทะเล 25 ถนนบางขุนเทียนชายทะเล แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร 10150

² Division of Postharvest Technology, School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi (Bangkhuntien), 49 Tientalay 25, Tha Kham, Bangkok, Bangkok 10150

³ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กองส่งเสริมและประสานเพื่อประโยชน์ทางวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานปลัดกระทรวง กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม 10400

² Postharvest Technology Innovation Center, Science, Research and Innovation Promotion and Utilization Division, Office of the Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation 10400

³ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี 70120

³ King Mongkut's University of Technology Thonburi, Ratchaburi Campus 70120

คำนำ

ปัจจุบันแนวโน้มผู้บริโภครับประทานอาหารที่สะดวก รวดเร็ว และดีต่อสุขภาพเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ผลไม้สดแต่งพร้อมบริโภค (fresh-cut fruits หรือ ready-to-eat fruits) มีบทบาททางการตลาดและโภชนาการอย่างเด่นชัด (Chen et al., 2024) ผลไม้สดแต่งพร้อมบริโภค คือ ผลไม้ที่ผ่านขั้นตอนต่างๆ ภายหลังการเก็บเกี่ยว ได้แก่ การทำความสะอาด การปอกเปลือก การตัดแต่ง และการบรรจุ เป็นต้น โดยผลไม้ยังคงความสดใหม่ เพื่อเป็นการตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบันที่มีความเร่งรีบในการดำเนินชีวิต ทำให้ต้องการความสะดวกสบายและรวดเร็วที่สามารถนำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไปรับประทานได้ทันที แต่ผลิตภัณฑ์สดแต่งพร้อมบริโภคมีอายุการเก็บรักษาที่สั้น เนื่องจากเซลล์หรือเนื้อเยื่อของพืชถูกทำลายจากกระบวนการตัดแต่ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาที่รวดเร็วและมีการเสื่อมเสียได้ง่ายกว่าผักและผลไม้ที่ยังไม่ได้ผ่านการตัดแต่ง เช่น การเกิดสีน้ำตาลบริเวณรอยตัด (browning) การอ่อนนุ่ม และการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ เป็นต้น การเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์สดแต่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) เมื่อเซลล์ของผลผลิตผ่านกระบวนการตัดแต่ง ทำให้เอนไซม์ สารที่พืชราก (substrate) และออกซิเจนเข้ามาสัมผัสกันเกิดเป็นสีน้ำตาลขึ้น เนื้อเยื่อที่ถูกทำลายหรือเกิดบาดแผลสามารถกระตุ้นเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเซลล์ เช่น เอนไซม์เพกทินเมทิลเอสเทอเรส (pectinmethylesterase; PME) เอนไซม์โพลีกาแลคทูโรเนส (polygalacturonase; PG) และเอนไซม์เซลลูโลส (cellulase) และง่ายต่อการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ การใช้สารละลายแคลเซียมเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผนังเซลล์ โดยแคลเซียม (Ca^{2+}) สามารถเข้าไปจับกับสารประกอบเพกติก (pectic substance) ในผนังเซลล์และ middle lamella ของพืชเป็น calcium pectate ทำให้เซลล์แข็งแรงขึ้น (Degrave และคณะ, 2003) งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำสารละลายแคลเซียมอนุพันธ์ต่างๆ มาใช้ ซึ่งแคลเซียมแอสคอร์เบทเป็นอนุพันธ์ชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในผลิตผลสดและผลิตผลตัดแต่ง โดยสารละลายแคลเซียมแอสคอร์เบทมีรายงานว่าสามารถรักษาความแน่นเนื้อ ยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล และยืดอายุการเก็บรักษาของผักผลไม้สดและผักสด เช่น แอปเปิ้ล (Wang et al., 2007; Li et al., 2015) เมลอน (Silveira et al., 2011) และ มะเขือยาว (Barbagallo et al., 2012) ได้ สำหรับสารจากธรรมชาติที่สามารถช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase; PPO) ได้แก่ น้ำส้มปรง (Lozano-de-Gonzales et al., 1993) สารสกัดจากอบเชย ชิง ชาเขียว (Dincer และ Cakli, 2022) ดังนั้นการใช้สารประกอบแคลเซียมแอสคอร์เบทร่วมกับน้ำส้มปรงจึงคาดว่าจะช่วยลดการเกิดสีน้ำตาลของมะม่วงสุกตัดแต่งพร้อมบริโภคได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้แคลเซียมแอสคอร์เบทร่วมกับน้ำส้มปรงในการลดการเกิดสีน้ำตาลและยืดอายุการเก็บรักษา และวางจำหน่ายของมะม่วงน้ำดอกไม้สุกตัดแต่งพร้อมบริโภค

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยครั้งนี้ใช้มะม่วงสุกพันธุ์น้ำดอกไม้ที่มีขนาดน้ำหนักประมาณ 200-250 กรัมต่อผล ผลมีรูปทรงสมมาตร ปราดจากโรคและแมลง ไม่มีตำหนิ มีความแน่นเนื้อ 10-13 นิวตัน โดยการวัดความแน่นเนื้อทั้งผลแบบไม่ทำลาย (Non-destructive Limited Compression Technique) (Penchaiya et al., 2015) ทำการล้างผลมะม่วงด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 5 นาที ผึ่งลมให้แห้ง หลังจากนั้นปอกเปลือกและหั่นเป็นชิ้น (ตัดตามขวางของผลจำนวน 8 ชิ้นต่อหนึ่งผล) แล้วนำมาจุ่มในน้ำส้มปรงความเข้มข้น 50% (สับปรงพันธุ์ตราสีทองวัยเหลือง 20-40 เปอร์เซ็นต์) ร่วมกับสารละลายแคลเซียมแอสคอร์เบทความเข้มข้น 2% (PJ + CA) เป็นเวลา 1 นาที และมะม่วงชุดที่จุ่มในน้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม หลังจากนั้นปล่อยให้สะเด็ดน้ำและบรรจุใส่กล่องพลาสติกแบบกึ่งคงรูปมีฝาปิดและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สุ่มตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองทุกๆ 2 วัน ดังนี้ ตรวจสอบค่าความสว่าง (L^*) คะแนนการเกิดสีน้ำตาล (browning score) กิจกรรมเอนไซม์ PPO (Flurkey and Jen, 1978) กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระตรวจสอบโดยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay (Brand-Williams et al., 1995) และ Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) assay (Benzie and Strain, 1999). ปริมาณกรดแอสคอร์บิก และทำการประเมินความยอมรับของผู้บริโภคต่อมะม่วงสุกตัดแต่ง โดยการให้คะแนนใช้ 9-point hedonic scale ซึ่งคะแนน 1 = ไม่ชอบอย่างยิ่ง, 5 = เฉย ๆ/ปานกลาง, 9 = ชอบอย่างยิ่ง (Lim, 2011) งานวิจัยนี้วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) และ วิเคราะห์ผลทางสถิติแบบ Duncan's Multiple Range (DMRT) จำนวน 4 ซ้ำ

ผล

การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) ของชิ้นมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ผ่านและไม่ผ่าน (ชุดควบคุม) การจุ่มสารละลาย PJ + CA มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดอายุการเก็บรักษา โดยชุดควบคุมมีค่าความสว่างต่ำกว่าชุดที่จุ่ม

สาร เมื่อทำการเก็บรักษาครบ 6 วัน โดยวันเริ่มต้นของการเก็บรักษา พบว่า ค่า L^* ของมะม่วงไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) มีค่าความสว่างอยู่ที่ 66.76 ถึง 68.98 และมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยชุดที่จุ่ม PJ + CA มีค่าความสว่างเท่ากับ 58.27 ในขณะที่ชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ 53.32 (Figure 1A) ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจสอบการเกิดสีน้ำตาลบริเวณผิวของชิ้นมะม่วงโดยการให้คะแนน พบว่ามะม่วงตัดแต่งทั้งสองวิธีมีคะแนนการเกิดสีน้ำตาลเพิ่มขึ้นเมื่ออายุเก็บรักษานานขึ้น โดยมีเส้นเกณฑ์การยอมรับของผู้บริโภคอยู่ที่ 5.0 คะแนน โดยมีคะแนนเริ่มต้นอยู่ที่ 1.00 ถึง 1.25 คะแนน และเมื่อเก็บรักษา 6 วัน พบว่า คะแนนการเกิดสีน้ำตาลในมะม่วงชุดควบคุมมีค่ามากกว่าชุดที่จุ่มสาร PJ + CA โดยมีคะแนน 4 และ 3.25 ตามลำดับ (Figure 1B) เมื่อวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ PPO พบว่า ค่ากิจกรรมของเอนไซม์ PPO ในมะม่วงตัดแต่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บรักษา โดยพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดควบคุมและชุด PJ + CA และเมื่อเก็บรักษา 2 วัน พบว่า ค่ากิจกรรม PPO ของชุดควบคุมสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับชุดที่จุ่ม PJ + CA โดยมีค่า 3.60 unit/100 g FW ในขณะที่ชุดควบคุมมีค่ากิจกรรม PPO 7.80 unit/100 g FW และในวันที่ 4 และ 6 ค่ากิจกรรมเอนไซม์ PPO มีแนวโน้มเช่นเดียวกับวันที่ 2 (Figure 2)

ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (FRAP) ของมะม่วงตัดแต่งระหว่างการเก็บรักษา พบว่า โดยในวันเริ่มต้น (0 วัน) ไม่พบความแตกต่างระหว่างชุดควบคุม (0.84 $\mu\text{mol TE/g FW}$) และชุด PJ + CA (1.19 $\mu\text{mol TE/g FW}$) อย่างไรก็ตาม ตั้งแต่วันที่ 2 เป็นต้นไป พบว่ามะม่วงชุด PJ + CA มีค่า FRAP สูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$) โดยมีค่า 1.66, 1.45 และ 1.32 $\mu\text{mol TE/g FW}$ ในวันที่ 2, 4 และ 6 ตามลำดับ ขณะที่ชุดควบคุมมีค่าเพียง 1.19, 0.69 และ 1.03 $\mu\text{mol TE/g FW}$ ตามลำดับ (Figure 3A) จากการวิเคราะห์โดยวิธี DPPH พบว่า มีความสอดคล้องกับการทดสอบโดยวิธี FRAP โดยในวันเริ่มต้น (0 วัน) ไม่พบความแตกต่างระหว่างวิธีและหลังจากวันที่ 2 เป็นต้นไป พบว่าชุด PJ + CA มีค่า DPPH สูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$) (Figure 3B) จากผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของมะม่วงตัดแต่งระหว่างการเก็บรักษา พบว่ามะม่วงชุด PJ + CA มีค่าฟีนอลิกสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$) ในทุกช่วงการเก็บรักษา โดยในวันที่ 6 มีค่าฟีนอลิกสูงสุดที่ 375.21 $\mu\text{g GAE/100 g FW}$ ในขณะที่ชุดควบคุมมีค่าเพียง 282.35 $\mu\text{g GAE/100 g FW}$ ตามลำดับ (Figure 3C) แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับค่าการต้านอนุมูลอิสระที่ประเมินโดยวิธี FRAP และ DPPH

จากการวิเคราะห์ปริมาณกรดแอสคอร์บิก พบว่า มะม่วงตัดแต่งชุดที่จุ่มด้วย PJ + CA มีค่าสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$) ในทุกช่วงการเก็บรักษา โดยในวันเริ่มต้น (0 วัน) ชุดจุ่มสารมีปริมาณกรดแอสคอร์บิกสูงถึง 3.31 mg/100 g FW ขณะที่ชุดควบคุมมีค่าเพียง 0.87 mg/100 g FW แม้ค่าจะลดลงตามระยะเวลาเก็บรักษา แต่ชุด PJ + CA ยังคงรักษาระดับของกรดแอสคอร์บิกได้สูงกว่าชุดควบคุมอย่างต่อเนื่องจนวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (Figure 4) สำหรับผลการทดสอบคะแนนการยอมรับของผู้บริโภค พบว่าในวันเริ่มต้นมีคะแนนการยอมรับที่ 9 คะแนน เท่ากันทั้งชุดควบคุมและชุด PJ+CA แต่เมื่อเก็บรักษาตั้งแต่วันที่ 2 เป็นต้นไป คะแนนของชุด PJ+CA สูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) โดยวันที่ 6 ชุดควบคุมเหลือเพียง 2.77 คะแนน ขณะที่ชุด PJ+CA ยังคงได้ประมาณ 6.02 คะแนน แสดงว่าการใช้ PJ+CA สามารถรักษาความยอมรับของผู้บริโภคได้นานกว่ามะม่วงชุดควบคุม (Figure 5)

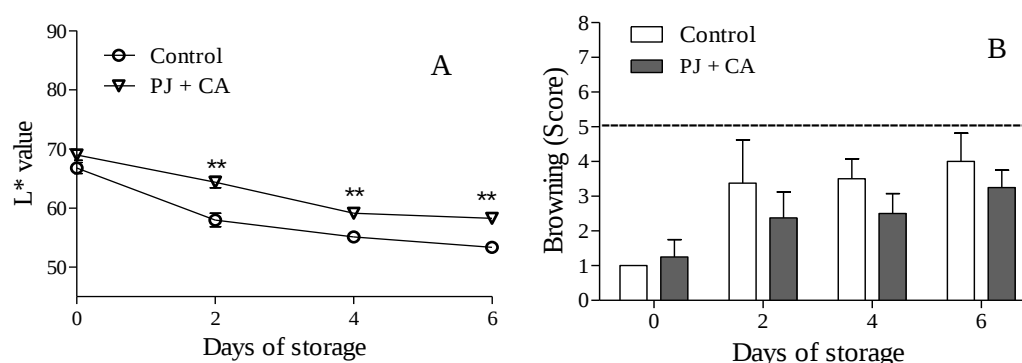


Figure 1 L^* values (A) and browning scores (B) of fresh-cut mango (cv. Nam Dok Mai) treated with distilled water (control) and with 50% pineapple juice supplemented with 2% calcium ascorbate (PJ + CA). Samples were packed in semi-rigid containers with lids and stored at 4 °C for 6 days. Data were means of four replications ($n = 4$) and SD bars. The asterisks show the difference between treatments for each storage period: ** significant difference at $p < 0.01$.

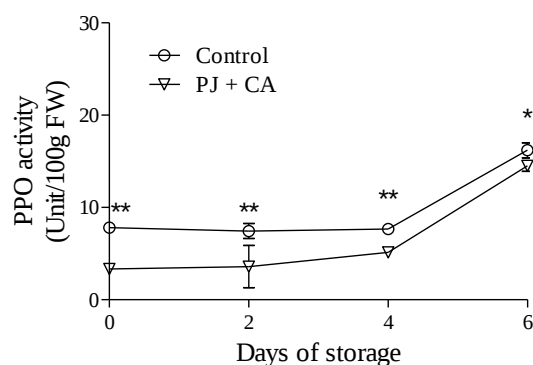


Figure 2 Polyphenol oxidase activity of fresh-cut mango (cv. Nam Dok Mai) treated with distilled water (control) and with 50% pineapple juice supplemented with 2% calcium ascorbate (PJ + CA). Samples were packed in semi-rigid containers with lids and stored at 4 °C for 6 days. Data were means of four replications (n = 4) and SD bars. The asterisks show the difference between treatments for each storage period: * significant difference at $p < 0.05$ and ** significant at $p < 0.01$.

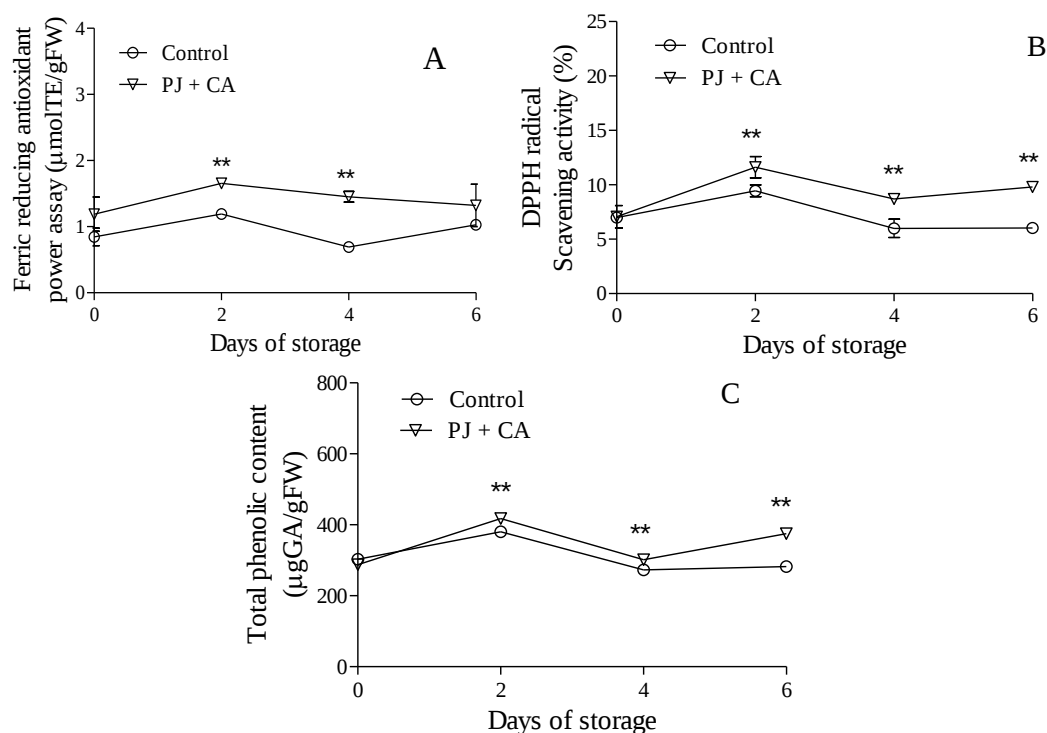


Figure 3 Antioxidant capacity measured by FRAP (A), DPPH (B) methods and total phenolic content (C) of fresh-cut mango (cv. Nam Dok Mai) treated with distilled water (control) and with 50% pineapple juice supplemented with 2% calcium ascorbate (PJ + CA). Samples were packed in semi-rigid containers with lids and stored at 4 °C for 6 days. Data were means of four replications (n = 4) and SD bars. The asterisks show the difference between treatments for each storage period: ** significant difference at $p < 0.01$.

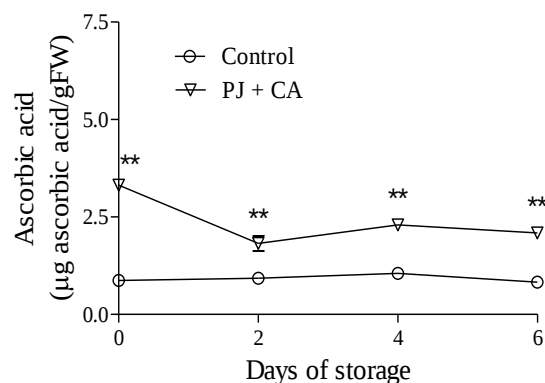


Figure 4 Ascorbic acid of fresh-cut mango (cv. Nam Dok Mai) treated with distilled water (control) and with 50% pineapple juice supplemented with 2% calcium ascorbate (PJ + CA). Samples were packed in semi-rigid containers with lids and stored at 4 °C for 6 days. Data were means of four replications (n = 4) and SD bars. The asterisks show the difference between treatments for each storage period: ** significant difference at $p < 0.01$.

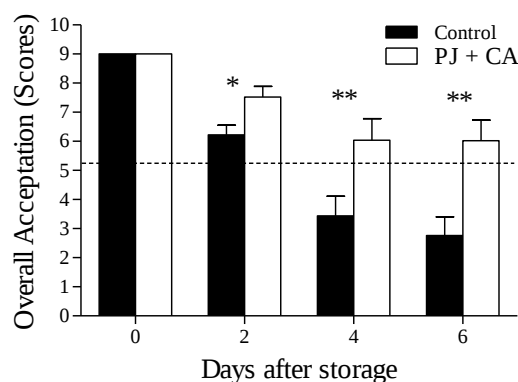


Figure 5 Overall acceptance (Scores) of fresh-cut mango (cv. Nam Dok Mai) treated with distilled water (control) and with 50% pineapple juice supplemented with 2% calcium ascorbate (PJ + CA). Samples were packed in semi-rigid containers with lids and stored at 4 °C for 6 days. Data were means of four replications (n = 4) and SD bars. The asterisks show the difference between treatments for each storage period: * significant difference at $p < 0.05$ and ** significant at $p < 0.01$.

วิจารณ์ผล

มะม่วงตัดแต่งพร้อมบริโภคที่ผ่านการจุ่มน้ำสับปะรดผสมกับแคลเซียมแอสคอร์เบทชะลอการเกิดสีน้ำตาลและกระตุ้นสารต้านอนุมูลอิสระเมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงชุดควบคุม เนื่องจากน้ำสับปะรดอุดมไปด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่สำคัญต่างๆ มากมาย ซึ่งสารสำคัญที่มีผลในการยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล คือ กรดอินทรีย์ เช่น กรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแอสคอร์บิก เป็นต้น (Chaisakdanugull และคณะ, 2000) และสารประกอบฟีนอล ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และกรดอินทรีย์ต่างๆ มีผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างตรงตำแหน่งที่สัมผัสกับกรดที่ต่ำ ทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส โดยค่า pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสอยู่ในช่วง 5-7 (He และ Luo, 2007) ซึ่งกรดอินทรีย์ที่พบมากในน้ำสับปะรด คือ กรดซิตริกซึ่งมีสมบัติเป็นสารคีเลท (Chelating agent) สามารถจับกับทองแดงที่บริเวณเร่งของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส เมื่อทองแดงถูกดึงออกทำให้เอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ (McCord และ Kilara, 1983) และ กรดแอสคอร์บิกซึ่งมีสมบัติเป็นสารรีดิวซ์ โดยทำการรีดิวซ์ o-quinone ให้กลับมามีอยู่ในรูปของสารประกอบฟีนอลทำให้การเกิดสีน้ำตาลลดลง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chaisakdanugull และคณะ (2007) พบว่ากรดอินทรีย์ในน้ำสับปะรดได้แก่ กรดมาลิก และกรดซิตริก สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสได้ถึง 36

เปอร์เซ็นต์ นอกจากกรดอินทรีย์ภายในน้ำสับปรดที่สามารถยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลได้แล้ว ยังมีรายงานว่าเอนไซม์โปรติเอส (protease) สามารถยับยั้งการเกิดอาการสีน้ำตาลได้เช่นกัน (Wen, 2001) เอนไซม์โปรติเอสที่พบมากในสับปรดคือ โบมิเลน (bromelain) ซึ่งเป็นเอนไซม์ในกลุ่มซิสเตอีนโปรติเอส (cysteine protease) หรือ ซัลไฟไฮดริลโปรติเอส (sulfhydryl protease) หรือ ไทออลโปรติเอส (thiol protease) เอนไซม์กลุ่มนี้เป็นเอนไซม์ย่อยโปรตีนที่มีหมู่ซัลไฟไฮดริล (sulfhydryl group, -SH) อยู่ที่บริเวณเร่ง และอาจมีหมู่อิสติดิล (histidyl group) รวมอยู่ด้วย และสามารถทนอุณหภูมิสูง โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้อยู่ในช่วง 60-80 องศาเซลเซียส (Ohtsuki และคณะ, 1995) เอนไซม์โปรติเอสจะยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลโดยเข้าไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสโดยจับหรือเกิดกระบวนการไฮโดรลิซิส (hydrolysis) ตรงตำแหน่งที่จำเพาะ (specific sites) ต่อการทำงานของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (Taoukis และคณะ, 1990)

ประสิทธิภาพของสารละลายแคลเซียมแอสคอร์เบตมาจากไอออนแคลเซียมสามารถเชื่อมโยงสายโพลีกลาคทูโรนิกของเพกทินในผนังเซลล์ (egg-box) ซึ่งช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับโครงข่ายเพกทินและชะลอการนุ่มของเนื้อผล (Sun et al., 2025) นอกจากนี้ การคงสภาพผนังเซลล์ยังช่วยลดการสัมผัสกันระหว่างเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดสกับสารฟีนอลิกภายในเซลล์ ส่งผลให้การเกิดสีน้ำตาลทางเอนไซม์ลดลงทางอ้อม (Pleșoianu et al., 2022) ในส่วนแอสคอร์เบตซึ่งเป็นรูปรีดิวซ์ของกรดแอสคอร์บิก ทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระและสารรีดิวซ์ โดยสามารถรีดิวซ์ o-quinone กลับไปเป็น diphenol ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นเป็นรงควัตถุสีน้ำตาล จึงสามารถยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลในผักและผลไม้สดได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Sierocka et al., 2024) นอกจากนี้แอสคอร์เบตยังช่วยรักษาสี ความสด และคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ (Aguayo et al., 2010) ดังนั้น การรวมกันของแคลเซียมและแอสคอร์เบตในรูปของแคลเซียมแอสคอร์เบตจึงเป็นการเสริมฤทธิ์กัน โดยแคลเซียมช่วยคงโครงสร้างของผนังเซลล์ ในขณะที่แอสคอร์เบตยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้สามารถรักษาความแน่นเนื้อ ลดการเกิดสีน้ำตาล และยืดอายุการเก็บรักษาของมะม่วงสุกตัดแต่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Allegra et al., 2022)

มีรายงานว่าสารละลายแคลเซียมแอสคอร์เบตสามารถรักษาความแน่นเนื้อ ยับยั้งการเกิดสีน้ำตาล และยืดอายุการเก็บรักษาของผักผลไม้สดและผักสด เช่น แอปเปิ้ล (Wang และคณะ, 2007; Aguayo และคณะ, 2010) เมลอน (Silveira และคณะ, 2011) และ มะเขือยาว (Barbagallo และคณะ, 2012) จากงานวิจัยของ Rössle และคณะ (2009) พบว่าแอปเปิ้ลตัดแต่งที่จุ่มด้วยสารละลายแคลเซียมแอสคอร์เบตสามารถชะลอการเปลี่ยนสีผิวของชิ้นแอปเปิ้ลตัดแต่งได้ และช่วยรักษาความแน่นเนื้อในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งแคลเซียมอาจจะเข้าไปรักษาความสมบูรณ์ของเซลล์ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์สามารถรักษาการควบคุมการผ่านเข้าออกของสารต่างๆ ได้ (Degraeve และคณะ, 2003) Fan และคณะ (2005) พบว่าชิ้นแอปเปิ้ลที่จุ่มในสารละลายแคลเซียมแอสคอร์เบต ความเข้มข้นร้อยละ 7 สามารถลดปริมาณสารกลุ่มควิโนน (quinones) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชัน (hydroxylation) เปลี่ยนสารประกอบฟีนอลิกในรูปโมโนฟีนอล (monophenol) ไปเป็นไดฟีนอล (diphenol) และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) โดยมีเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase; PPO) เป็นตัวทำปฏิกิริยา และมีออกซิเจนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนสารกลุ่มไดฟีนอลไปเป็นสารกลุ่มควิโนน (He และ Luo, 2007) ซึ่งสารกลุ่มนี้สามารถเกิดการพอลิเมอเรชันเป็นสารเมลานิน (melanins) หรือสารที่ให้สีน้ำตาลหรือสีดำกับเนื้อเยื่อพืช ดังนั้นการใช้น้ำสับปรดร่วมความเข้มข้น 50% ร่วมกับสารละลายแคลเซียมแอสคอร์เบตความเข้มข้น 2% สามารถชะลอการเกิดสีน้ำตาล และมีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ และมีปริมาณกรดแอสคอร์บิกสูงกว่าชุดทดลองอื่นในมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ตัดแต่งพร้อมบริโภคได้ เมื่อเก็บรักษาในกล่องพลาสติกกึ่งคงรูปที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และมีอายุการเก็บรักษา 6 วัน

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว กองส่งเสริมและประสานเพื่อประโยชน์ทางวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานปลัดกระทรวง การอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์สำหรับการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ The United Graduate School of Agricultural Science (UGSAS), Gifu University, Japan ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์บางส่วนสำหรับการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- Aguayo, E., Requejo-Jackman, C., Stanley, R. and Woolf, A. 2010. Effects of calcium ascorbate treatments and storage atmosphere on antioxidant activity and quality of fresh-cut apple slices. *Postharvest Biol. Technol.* 57: 52–60.
- Allegra, A., Sortino, G., Inglese, P. and Settanni, L. 2022. Calcium ascorbate coating improves postharvest quality of fresh-cut pears. *Horticulturae*. 8(3): 227.

- Barbagallo, R.N., Chisari, M. and Caputa, G. 2012. Effects of calcium citrate and ascorbate as inhibitors of browning and softening in minimally processed 'Birgah' eggplants. *Postharvest Biol. Technol.* 73: 107–114.
- Benzie, I.F.F. and Strain, J.J., 1999. Ferric reducing/antioxidant power assay: direct measure of total antioxidant activity of biological fluids and modified version for simultaneous measurement of total antioxidant power and ascorbic acid concentration. *Meth. Enzymol.* 299: 15-27.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E. and Berset, C., 1995. Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT Food Sci. Technol.* 28: 25-30.
- Chaisakdanugull, C., Theerakulkait, C. and Wrolstad, R.D. 2007. Pineapple juice and its fractions in enzymatic browning inhibition of banana [Musa (AAA group) Gros Michel]. *J. Agric. Food Chem.* 55: 4252–4257.
- Chen, J., Liu, Y., Wang, Z. and Sun, Y. 2024. Advances in processing and preservation technologies for fresh-cut fruits and vegetables: A review. *Horticulturae*. 10(10): 1098.
- Degrave, P., Saurel, R. and Cautel, Y. 2003. Vacuum impregnation pretreatment with pectin methyl esterase to improve firmness of pasteurized fruits. *J. Food Sci.* 68: 716–721.
- Dincer, C. and Cakli, S. 2022. Natural plant extracts and spices as polyphenol oxidase inhibitors in fruit juice systems. *Pol. J. Food Nutr. Sci.* 72(1): 35–44.
- Fan, X., Niemera, B.A., Mettheis, J.P., Zhuang, H. and Olson, D.W. 2005. Quality of fresh-cut apple slices as affected by low-dose ionizing radiation and calcium ascorbate treatment. *J. Food Sci.* 70: 143–148.
- Flurkey, W.H. and Jen, J.J., 1978. Peroxidase and polyphenol oxidase activities in developing peaches. *Journal of Food Science*, 43(6), 1826-1828.
- He, Q. and Luo, Y. 2007. Enzymatic browning and its control in fresh-cut produce. *Stewart Postharvest Solutions*. 6: 1–7.
- Li, Y., Wills, R.B.H. and Golding, J.B. 2015. Sodium chloride, a cost effective partial replacement of calcium ascorbate and ascorbic acid to inhibit surface browning on fresh-cut apple slices. *LWT Food Sci. Technol.* 64: 503–507.
- Lim, J. 2011. Hedonic scaling: A review of methods and theory. *Food Qual. Prefer.* 22(8): 733-747.
- Lozano-de-Gonzalez, P.A., Barrett, D.M., Wrolstad, R.E. and Durst, R.W. 1993. Enzymatic browning inhibited in fresh and dried apple rings by pineapple juice. *J. Food Sci.* 58: 399–404.
- McCord, J.D. and Kilara, A. 1983. Control of enzymatic browning in processed mushrooms (*Agaricus bisporus*). *J. Food Sci.* 48: 1479–1484.
- Ohtsuki, K., Taguchi, K., Sato, K. and Kawabata, M. 1995. Purification of ginger proteases by DEAE-sepharose and isoelectric focusing. *Biochim. Biophys. Acta.* 1243: 181–184.
- Penchaiya, P., Uthairatanakij, A., Srilaong, V., Kanlayanarat, S., & Tijskens, L. M. M. 2015. Measurement of mango firmness by non-destructive limited compression technique. *Acta Hort.* 1088: 73-78.
- Pleșoiu, A.-M., Cătușescu, G. M., Bahrim, G. E. and Vizireanu, C. 2022. Pectin-based edible coating combined with calcium treatment to preserve fresh-cut pears. *Horticulturae*. 8(5): 449.
- Rössle, C., Gormley, T.R. and Butler, F. 2009. Efficacy of Natureseal® AS1 browning inhibitor in fresh-cut fruit salads applications, with emphasis on apple wedges. *J. Hortic. Sci. Biotechnol. ISAFRUIT Special Issue*: 62–67.
- Sierocka, M., Ptaszek, A. and Michalska-Ciechanowska, A. 2024. Natural inhibitors of the polyphenol oxidase activity. *Applied Sciences*. 14(21): 9980.
- Silveira, A.C., Aguayo, E., Chisari, M. and Artes, F. 2011. Calcium salts and heat treatment for quality retention of fresh-cut 'Galia' melon. *Postharvest Biol. Technol.* 62: 77–84.
- Sun, M., Zhang, J., Wang, X., Liu, L. and Zhao, Y. 2025. Effects of different calcium preparations on fresh-cut apples: Firmness and pectin preservation by sorbitol-chelated calcium. *Plants*. 14(9): 1293.
- Taoukis, P.S., Labuza, T.P., Lillemo, J.H. and Lin, S.W. 1990. Inhibition of shrimp melanosis (black spot) by ficin. *Lebensm. Wiss. Technol.* 23: 52–54.
- Wang, H., Feng, H. and Luo, Y. 2007. Control of browning and microbial growth on fresh-cut apples by sequential treatment of sanitizers and calcium ascorbate. *J. Food Sci.* 72: 1–7.
- Wen, L. and Wrolstad, R.E. 2001. Pineapple juice: Phenolic composition and enzymatic browning inhibition. Ph.D. Thesis, Oregon State University, Corvallis, USA.