



ผลของรังสีชนิดก่อไอออนต่อสรีรวิทยาระดับโมเลกุล
และคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง



พงศ์ศรีพี วิจิตรคุณานันท์

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

ผลของรังสีชนิดก่อกำเนิดต่อสรีรวิทยาระดับโมเลกุล
และคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง “ผลของรังสีชนิดก่อไอออนต่อสรีรวิทยาระดับโมเลกุล
และคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง”

ของ พงศ์พี วีจิตรคุณานันท์

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะศักดิ์ ขุ่มพฤษ)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พีระศักดิ์ ฉายประสาท)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร.สุวิมล เจตะวัฒนะ)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(รองศาสตราจารย์ ดร.กวี สุจิตบูล)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัญตา บุญสร้างสม)

อนุมัติ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.วัฒนา พัดเกตุ)
รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	ผลของรังสีชนิดก่อก่อไอออนต่อสรีรวิทยาาระดับโมเลกุลและคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง
ผู้วิจัย	พงศ์พี วีจิตรคุณานันท์
ประธานที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.พีระศักดิ์ ฉายประสาท
กรรมการที่ปรึกษา	ดร.สุวิมล เจตะวัฒนะ
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ ปร.ด. เทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2568
คำสำคัญ	รังสีแกมมา, รังสีเอกซ์, เอทิลีน, การแสดงออกของยีน

บทคัดย่อ

มะม่วง (*Mangifera indica* Linn.) เป็นไม้ผลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่สร้างรายได้ให้กับประเทศไทยเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองซึ่งมีลักษณะเด่น คือ ผิวของเปลือกมีสีเหลืองตั้งแต่ระยะผลอ่อน เนื้อสีเหลือง มีกลิ่นหอม และรสชาติหวาน ปัจจุบันประเทศสหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์ มีข้อกำหนดให้มะม่วงผลสดต้องผ่านกระบวนการฉายรังสีชนิดก่อก่อไอออนเพื่อควบคุมการแพร่ระบาดของแมลงศัตรูพืชไปยังประเทศปลายทาง ซึ่งการดำเนินการปัจจุบัน ประเทศไทยประสบปัญหาที่สำคัญ ได้แก่ ปัญหาในขั้นตอนหลังการเก็บเกี่ยวก่อนการฉายรังสี การเกิดโรคหลังการเก็บเกี่ยว และการปนเปื้อนของไข่แมลงวันผลไม้ รวมถึงด้วงวงเจาะทำลายเมล็ด ทำให้คุณภาพของผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองของไทยลดลง ส่งผลกระทบต่อปริมาณการส่งออกที่จำหน่ายไปยังต่างประเทศให้ลดลงตามไปด้วย ผู้วิจัยจึงนำเทคโนโลยีการฉายรังสีชนิดก่อก่อไอออนในปริมาณ 0.4 กิโลเกรย์ ตามข้อกำหนดสำหรับมาตรฐานการส่งออกของไทยโดยใช้รังสีแกมมา และรังสีเอกซ์มาทดลองกับผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเพื่อศึกษาผลของรังสีต่อคุณภาพผลในระหว่างการเก็บรักษา ศึกษาการใช้การรมสาร 1-Methylcyclopropene (1-MCP) ที่ความเข้มข้นและระยะเวลาการรมที่แตกต่างกันรวมถึงการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศชนิดที่ต่างกันร่วมกับการฉายรังสีเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา นอกจากนี้ ยังศึกษาระดับการแสดงออกของยีน *MIETR1* (ethylene receptor), *MIERS1* (ethylene response sensor) และ *MiACS* (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthase) ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์และรับส่งสัญญาณเอทิลีนในผลมะม่วง เปรียบเทียบระหว่างผลที่ฉายและไม่ฉายรังสีในระหว่างเก็บรักษาด้วยเทคนิค quantitative Realtime PCR ผลการศึกษาพบว่า ผลที่ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์สามารถชะลอการสุกได้ผ่านกลไกการพัฒนาของสีผล สัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ อัตราการ

หายใจ และการผลิตเอทิลีน มีอายุเก็บรักษานาน 12 วัน ที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C ค่ะแนบทดสอบทางประสาทสัมผัสเป็นที่ยอมรับและไม่มีความแตกต่างทางสถิติยกเว้นคะแนนสี การใช้รังสีเอกซ์กับผลมะม่วงสามารถชะลอการสุกแก่ได้เช่นเดียวกับรังสีแกมมา การใช้รังสีแกมมาและรังสีเอกซ์เป็นมาตรการกักกันด้านสุขอนามัยพืชที่เหมาะสม โดยไม่ปรากฏลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ในระหว่างเก็บรักษา ผลการทดลองชี้ให้เห็นถึงการมั่วด้วย 1-MCP ความเข้มข้น 1,000 ppb นาน 24 ชั่วโมงภายหลังการฉายรังสี ไม่ส่งผลต่อลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาโดยผ่านกลไกการชะลอการสูญเสียน้ำหนัก รักษาความแน่นเนื้อ ลดอัตราการหายใจ ลดการผลิตเอทิลีน ชะลอการพัฒนาสีผล มีอายุการเก็บรักษาได้นานถึง 24 วัน ในขณะที่ชุดควบคุม (ไม่รมสาร) มีอายุการเก็บรักษาสั้นเพียง 12 วัน ที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C ผลที่รมด้วยสาร 1-MCP ได้รับคะแนนทางประสาทสัมผัสในระดับดีไม่แตกต่างจากชุดควบคุม (ไม่รมสาร) ยกเว้นค่าสีและรสชาติ การใช้ 1-MCP เป็นทางเลือกใหม่ในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวในมะม่วงสดภายหลังการฉายรังสีเพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและคงคุณภาพสำหรับการขนส่งในระยะทางไกล และยังพบว่าการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศด้วยถุงชนิด WEB1 และ WEB2 สามารถนำมาใช้ก่อนการฉายรังสี โดยรังสีไม่ทำลายคุณสมบัติของถุง ลดการสูญเสียน้ำหนัก ชะลอความแน่นเนื้อและสีของเปลือก รักษาสัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ ลดอัตราการหายใจและการเน่าเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ และภายหลังนำออกจากบรรจุภัณฑ์ยังสามารถพัฒนาการสุกได้อย่างปกติ ยืดอายุการเก็บรักษาได้นานถึง 9 วัน ภายหลังจากจำลองการขนส่ง ที่อุณหภูมิ 27 °C อย่างไรก็ดีตาม การใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศที่มีความสามารถในการซึมผ่านของออกซิเจนสูงและความสามารถในการซึมผ่านของน้ำต่ำ ส่งผลให้ผลมะม่วงพัฒนาการสุกอย่างรวดเร็ว และชักนำให้เกิดเน่าเสียในเปอร์เซ็นต์ที่สูง นอกจากนี้ การฉายรังสีมีผลต่อยีน *MIETR1*, *MIERS1* และ *MIACS* ซึ่งมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการผลิตและส่งสัญญาณเอทิลีน โดยทำให้ระดับการแสดงออกของยีนดังกล่าวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) ส่งผลให้ปริมาณเอทิลีนลดลงตามไปด้วย เมื่อปริมาณการผลิตเอทิลีนลดลงก็จะมีผลกระทบต่อการพัฒนาสี สัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และอัตราการหายใจ ทำให้ผลที่ฉายรังสีสุกแก่ช้าลงได้ การฉายรังสีชนิดกึ่งไอออนนอกจากจะสามารถควบคุมการแพร่ระบาดของแมลงศัตรูพืชแล้วยังมีผลต่อระดับการแสดงออกของยีนอีกด้วย ผลการทดลองครั้งนี้ช่วยแก้ไขปัญหาคคุณภาพมะม่วงเพื่อการส่งออกไปยังสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ขั้นตอนหลังการเก็บเกี่ยวจนถึงคุณภาพภายหลังการฉายรังสีซึ่งจะส่งผลดีต่อเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ

Title	EFFECT OF IONIZING RADIATION ON MOLECULAR PHYSIOLOGY AND POSTHARVEST QUALITY OF ‘NAM DOK MAI SI THONG’ MANGO
Author	Phongrapi Wichitkunan
Advisor	Associate Professor Peerasak Chaiprasart, Ph.D.
Co-Advisor	Suwimol Jetawattana, Ph.D.
Academic Paper	Ph.D. Dissertation in Agricultural Biotechnology, Naresuan University, 2025
Keywords	Gamma ray, X-ray, Ethylene, Gene expression

ABSTRACT

Mango (*Mangifera indica* Linn.) is an economic Thai fruit particularly ‘Nam Dok Mai Si Thong’ cultivar, which is valued for its yellow peel, yellow flesh, fragrance, and sweetness. Export markets such as the United States of America, Australia, and New Zealand require ionizing irradiation to prevent spreading of quarantine pests. However, Thailand faces significant challenges in postharvest issues prior to irradiation, postharvest diseases, and infestation by fruit flies and seed weevils for export. These reduce fruit quality and subsequently lower export volumes. To address these issues, good post-harvest practice combined with ionizing irradiation using gamma rays and x-rays at the required export dose of 0.4 kGy was applied to ‘Nam Dok Mai Si Thong’ mangoes to evaluate its effects on fruit quality during storage. The study also examined the application of 1-Methylcyclopropene (1-MCP) fumigation at various concentrations and exposure durations, as well as the use of Modified Atmosphere Packaging (MAP) in combination with irradiation to extend the storage life of mangoes. Quantitative Realtime PCR (qRT-PCR) was employed to investigate the expression levels of the *MiETR1* (ethylene receptor), *MiERS1* (ethylene response sensor) and *MiACS* (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthase) genes, which are associated with ethylene biosynthesis and signaling pathway, in irradiated and non-irradiated fruit during storage. Expose to either gamma rays or x-rays effectively delayed ripening in

‘Nam Dok Mai Si Thong’ mangoes, as evidenced by slower peel color development, moderated changes in the TSS/TA ratio, and reduced respiration and ethylene production. Irradiated fruit maintained acceptable sensory quality during 12 days of storage at 13 ± 2 °C, with peel color being the only attribute differing significantly relative to control. X-ray irradiation produced effects comparable to gamma irradiation. Both radiations were suitable for phytosanitary treatments, as no adverse physiological or quality defects were observed during storage. The study indicated that fumigation with 1-MCP at 1,000 ppb for 24 hours after irradiation does not affect undesirable characteristics and helps extend storage life up to 24 days through mechanisms that delay weight loss and peel color development, maintain firmness, reduce respiration rate, and decrease ethylene production. Mangoes treated with 1-MCP were well accepted with differences from the control observed only in color and taste. The use of 1-MCP following irradiation offers a practical postharvest option to extend storage life and maintain fruit quality during long-distance transportation. The use of MAP with WEB1 and WEB2 bags can be employed before irradiation without damaging the bag's properties. MAP reduced weight loss, delayed firmness and peel color changes, maintained TSS/TA, lowered respiration, and minimized decay. After unpacking, fruit ripened normally and prolonged storage life for up to 9 days following mock-up transportation at 27 °C. However, MAP with high oxygen permeability and low water permeability accelerated ripening and led to a significantly higher incidence of decay. Additionally, irradiation affects the expression levels of the *MiETR1*, *MiERS1* and *MiACS* genes, leading to their downregulation compared to non-irradiated fruit. These genes play a key role in ethylene biosynthesis and signaling pathway, and their reduced expression results in lower ethylene production in irradiated fruit. Consequently, decreased ethylene levels impact peel color development, TSS/TA, and respiration rate, ultimately delaying fruit ripening. Beyond its role in phytosanitary control by managing insect pests, ionizing radiation also influences gene expression related to fruit ripening. The results of this experiment help solve quality issues for mangoes exported to the United States, from post-harvest stages to post-irradiation quality, which will have a positive impact on the country's overall economy.

ประกาศคุณูปการ

การศึกษาวิจัยเรื่อง “ผลของรังสีชนิดก่อก่อไอออนต่อสรีรวิทยาระดับโมเลกุลและคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง” ได้สำเร็จลุล่วงได้ดี ขอขอบคุณ แหล่งทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 22 รหัสรายโครงการ (sub-code) NRCT5-RGJ63009-108 ที่ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณสำหรับการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการทำให้การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ประสบความสำเร็จ ข้าพเจ้าขอขอบคุณต่อผู้มีส่วนร่วมทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือในกระบวนการวิจัยนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คณาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร.พีระศักดิ์ ฉายประสาท สังกัดคณะเกษตรศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยนเรศวร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.สุวิมล เจตะวัฒนะ สังกัดสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) รวมถึงอาจารย์ที่ปรึกษาต่างประเทศ Prof. Chitose HONSHO สังกัด University of Miyazaki ซึ่งได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ สนับสนุนด้านวิชาการ และชี้แนะแนวทางในการดำเนินการวิจัยอย่างละเอียดรอบคอบ ตลอดจนให้กำลังใจในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำอันมีค่าซึ่งช่วยพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของงานวิจัยนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น คำติชม และข้อเสนอแนะที่ได้รับล้วนเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนาผลงานทางวิชาการ ข้าพเจ้าขอขอบคุณหน่วยงานและห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้อง ทั้งในด้านการสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือที่จำเป็นต่อการทดลอง รวมถึงบุคลากรที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและเทคนิคการทดลอง ณ สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการด้านเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว และศูนย์ฉายรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ เพื่อนนักวิจัยและนักศึกษาร่วมโครงการ ที่ช่วยแลกเปลี่ยนความคิดเห็น แนะนำเทคนิค และให้กำลังใจในช่วงเวลาที่ต้องเผชิญกับความท้าทายต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ครอบครัวและบุคคลอันเป็นที่รัก ที่คอยให้การสนับสนุนทั้งทางร่างกายและจิตใจอย่างต่อเนื่อง ความอดทนและความเข้าใจของท่านเป็นแรงผลักดันสำคัญที่ทำให้ข้าพเจ้ามุ่งมั่นในการศึกษาวิจัยจนสำเร็จลุล่วง ขอขอบคุณทุกท่านอีกครั้งที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้เป็นไปอย่างราบรื่น ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิทยาศาสตร์ และสามารถนำไปต่อยอดเพื่อพัฒนาคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองและมะม่วงสายพันธุ์อื่นในอนาคต

พงศ์พี วีจิตรคุณานันท์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
ประกาศคุุณูปการ.....	จ
บทที่ 1 บทนำ	17
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	17
1.2 จุดมุ่งหมายการศึกษา.....	19
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	19
1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	20
1.5 สมมติฐานงานวิจัย.....	21
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.1 ข้อมูลทั่วไปมะม่วง.....	22
2.2 ข้อมูลทางโภชนาการต่าง ๆ ของมะม่วง.....	22
2.3 รังควาญที่สำคัญในมะม่วง.....	24
2.4 มาตรฐานมะม่วงของประเทศไทย.....	26
2.5 การฉายรังสีในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร.....	27
2.5.1 แหล่งของรังสี.....	28
2.5.2 ชนิดของอาหารฉายรังสี.....	30
2.5.3 ปริมาณรังสีดูดกลืน.....	31
2.5.4 สัญลักษณ์อาหารฉายรังสีและการยอมรับ.....	34
2.5.5 การฉายรังสีชนิดก่อไอออน.....	36

2.5.6 กฎหมายเกี่ยวกับอาหารฉายรังสีในประเทศไทย.....	39
2.6 การฉายรังสีเพื่อสุขอนามัยพืชก่อนการส่งออก.....	41
2.6.1 ผลกระทบทางตรงของรังสีชนิดก่อไอออน.....	44
2.6.2 ผลกระทบทางอ้อมของรังสีชนิดก่อไอออน.....	45
2.7 การฉายรังสีชนิดก่อไอออนต่อคุณภาพผลมะม่วง.....	49
2.7.1 การฉายรังสีชนิดก่อไอออนต่อคุณภาพทางกายภาพและเคมี.....	49
2.7.2 การฉายรังสีชนิดก่อไอออนต่อระดับกิจกรรมเอนไซม์และ ระดับการแสดงออกของยีน.....	51
2.8 สารชะลอการสุกแก่ในผลไม้.....	54
2.9 บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ.....	57
2.10 การตรวจสอบการแสดงออกของยีนด้วยวิธี Quantitative Realtime PCR.....	59
2.11 ยีนที่มีความเกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์และส่งสัญญาณรับรู้ เอทิลีนในผลไม้.....	60
2.12 กระบวนการสุกแก่ในมะม่วงภายหลังการเก็บเกี่ยว.....	64
2.12.1 การเพิ่มขึ้นของเอทิลีน.....	64
2.12.2 การเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจ.....	64
2.12.3 การเปลี่ยนสีของเปลือกและเนื้อผล.....	65
2.12.4 การนิ่มของเนื้อผล.....	65
2.12.5 การเปลี่ยนแปลงด้านองค์ประกอบทางเคมี.....	65
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	67
3.1 ผลของรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ที่มีต่อคุณภาพของผลมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิเย็น.....	67

3.2 อิทธิพลของการใช้สาร 1-Methylcyclopropene (1-MCP) ที่มีต่อคุณภาพ ผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายหลังการฉายรังสีแกมมาเก็บรักษาภายใต้ อุณหภูมิเย็น.....	70
3.3 อิทธิพลของการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศก่อนการฉายรังสีแกมมา ที่มีต่อคุณภาพผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายใต้อุณหภูมิเย็น.....	71
3.4 ระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสุกแก่ในผลมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองภายหลังฉายการรังสีแกมมาในระหว่างเก็บรักษา ด้วยเทคนิค Quantitative Realtime-PCR.....	73
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	76
4.1 ผลของรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ที่มีต่อคุณภาพของผลมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิต่ำ.....	76
4.1.1 การสูญเสียน้ำหนัก.....	76
4.1.2 ความแน่นเนื้อผล.....	76
4.1.3 ค่าความสว่าง ค่าสีแดง และสีเหลืองของผล.....	77
4.1.4 สัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้.....	77
4.1.5 อัตราการหายใจ.....	80
4.1.6 การผลิตเอทิลีน.....	80
4.1.7 เปอร์เซ็นต์การเน่าเสีย.....	81
4.1.8 คะแนนประสาทสัมผัส.....	81
4.1.9 อภิปรายผล.....	82
4.2 อิทธิพลของการใช้สาร 1-Methylcyclopropene (1-MCP) ที่มีต่อคุณภาพผล มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายหลังการฉายรังสีแกมมาเก็บรักษาภายใต้ อุณหภูมิเย็น.....	87
4.2.1 การสูญเสียน้ำหนัก.....	87

4.2.2 ความแน่นเนื้อผล.....	87
4.2.3 ค่าความสว่าง ค่าสีแดง และสีเหลืองของผล.....	88
4.2.4 สัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้.....	89
4.2.5 อัตราการหายใจ.....	91
4.2.6 การผลิตเอทิลีน.....	91
4.2.7 เปอร์เซ็นต์การเน่าเสีย.....	92
4.2.8 คะแนนประสาทสัมผัส.....	92
4.2.9 อภิปรายผล.....	95
4.3 อิทธิพลของการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศก่อนการฉายรังสีแกมมา ที่มีต่อคุณภาพผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายใต้อุณหภูมิเย็น.....	98
4.3.1 การสูญเสียน้ำหนัก.....	98
4.3.2 ความแน่นเนื้อผล.....	98
4.3.3 ค่าความสว่าง ค่าสีแดง และค่าสีเหลืองของผล.....	99
4.3.4 สัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้.....	99
4.3.5 อัตราการหายใจ.....	102
4.3.6 การผลิตเอทิลีน.....	102
4.3.7 เปอร์เซ็นต์การเน่าเสีย.....	103
4.3.8 คะแนนประสาทสัมผัส.....	103
4.3.9 อภิปรายผล.....	106
4.4 ระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสุกแก่ในผลมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองภายหลังฉายการรังสีแกมมาในระหว่างเก็บรักษา ด้วยเทคนิค Quantitative Realtime-PCR.....	110

4.4.1 ความแน่นเนื้อ.....	110
4.4.2 ค่าความสว่าง ค่าสีแดง และสีเหลืองของผล.....	110
4.4.3 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้.....	111
4.4.4 อัตราการหายใจ.....	111
4.4.5 การผลิตเอทิลีน.....	112
4.4.6 ผลการสีกัดอาร์เอ็นเอจากเนื้อมะม่วง.....	114
4.4.7 ระดับการแสดงออกของยีน.....	116
4.4.8 อภิปรายผล.....	119
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	122
5.1 ผลของรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ที่มีต่อคุณภาพของผลมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิต่ำ.....	123
5.2 อิทธิพลของการใช้สาร 1-Methylcyclopropene (1-MCP) ที่มีต่อคุณภาพ ผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายหลังการฉายรังสีแกมมาเก็บรักษาภายใต้ อุณหภูมิเย็น.....	124
5.3 อิทธิพลของการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศก่อนการฉายรังสี แกมมาที่มีต่อคุณภาพผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายใต้อุณหภูมิเย็น.....	124
5.4 ระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสุกแก่ในผลมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองการฉายรังสีแกมมาในระหว่างเก็บรักษาด้วยเทคนิค Quantitative Real time-PCR.....	125
บรรณานุกรม.....	130
ภาคผนวก.....	152
1. สูตรคำนวณการสูญเสียน้ำหนัก.....	152
2. สูตรคำนวณอัตราการหายใจ.....	152

3. การสร้าง Standard Curve สำหรับการวัดอัตราการหายใจของผลไม้โดยใช้ Gas Chromatograph (GC).....	152
4. สูตรคำนวณการผลิตเอทิลีน.....	154
5. การสร้าง Standard Curve สำหรับการวัดปริมาณการผลิตเอทิลีนของผลไม้โดยใช้ Gas Chromatograph (GC).....	154
6. ตารางคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัส.....	156
7. ขั้นตอนหลังการเก็บเกี่ยวของมะม่วงก่อนการฉายรังสีส่งออกสหรัฐอเมริกา.....	157
8. วิธีการสกัดอาร์เอ็นเอด้วยวิธีมาตรฐานด้วยสารละลาย CTAB.....	161
9. วิธีการทำอาร์เอ็นเอให้บริสุทธิ์จาก gDNA โดยใช้ชุดเครื่องมือ TURBO™ DNase Kit.....	162
10. ขั้นตอนและวิธีการใช้เทคนิค RT-PCR เพื่อสังเคราะห์ cDNA.....	163
11. ภาพอาร์เอ็นเอในตัวอย่างมะม่วงฉายรังสีแกมมา (IR) และไม่ฉายรังสี (CK) ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟรีซิสใน 1% agarose gel ในระยะเวลาแตกต่างกัน 0, 7 และ 14 วัน (D0, D7 และ D14) ใช้ DNA marker OmniMARK.....	164
12. ภาพอาร์เอ็นเอภายหลัง DNase treatment ในตัวอย่างมะม่วงฉายรังสีแกมมา (IR) และไม่ฉายรังสี (CK) ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟรีซิสใน 1% agarose gel ในระยะเวลาแตกต่างกัน 0, 7 และ 14 วัน (D0, D7 และ D14) ใช้ DNA marker OmniMARK.....	165
13. สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์และความจำเพาะของผลิตภัณฑ์ของยีน <i>MiETR1</i> และ <i>MiACT</i>	166
14. สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์และความจำเพาะของผลิตภัณฑ์ของยีน <i>MiERS1</i> และ <i>MiACT</i>	167
15. สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์และความจำเพาะของผลิตภัณฑ์ของยีน <i>MiACS</i> และ <i>MiACT</i>	168

16. วิธีเตรียมสารละลาย CTAB buffer lysis.....	169
17. วิธีเตรียมสาร 2% 2-Mercaptoethanol ปริมาตร 1,000 μ L.....	170
18. วิธีเตรียมสาร Chloroform : Isoamyl-alcohol (24:1 v/v) ปริมาตร 100 mL.....	171
19. วิธีเตรียมสารละลาย 10 M Lithium Chloride (LiCl) ปริมาตร 100 mL.....	172
20. วิธีเตรียมสารละลาย 70% ethanol.....	173
21. วิธีเตรียมสารละลาย 3 M Sodium Acetate Trihydrate (pH 5.2).....	174
22. วิธีเตรียมสารละลาย 0.1 N Sodium Hydroxide.....	175
23. วิธีเตรียมสารละลาย TE buffer (Tris-EDTA buffer) 1X.....	176
24. ผลงานตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ (มะม่วงฉายรังสี).....	177
25. ผลงานตีพิมพ์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์.....	181
26. ตารางคำนวณต้นทุนการส่งออกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสำหรับการฉายรังสี.....	182
ประวัติผู้วิจัย.....	184

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 องค์ประกอบหลักทางโภชนาการของผลมะม่วง	23
ตาราง 2 ปริมาณแร่ธาตุที่สำคัญในมะม่วงบริโภคผลสด.....	23
ตาราง 3 ปริมาณวิตามินที่สำคัญในมะม่วงบริโภคผลสด.....	24
ตาราง 4 มะม่วงตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ	27
ตาราง 5 ปริมาณรังสีที่แนะนำให้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ	28
ตาราง 6 วัตถุประสงค์ของการฉายรังสีในอาหารชนิดต่าง ๆ.....	31
ตาราง 7 การฉายรังสีชนิดก่อกำเนิดไอออนในผักและผลไม้ชนิดต่าง ๆ	38
ตาราง 8 การฉายรังสีเพื่อควบคุมศัตรูพืชที่ปริมาณต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้.....	42
ตาราง 9 ผลของการฉายรังสีต่อคุณภาพของผลไม้และผักที่แตกต่างชนิดกัน	46
ตาราง 10 ผลของการใช้ 1-MCP ที่ความเข้มข้นและระยะเวลาการรมในผลไม้ ชนิดต่าง ๆ	56
ตาราง 11 คุณสมบัติบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศที่แตกต่างกัน 4 ชนิด.....	72
ตาราง 12 ตารางแสดงลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีนในกระบวนการสังเคราะห์และส่ง สัญญาณฮอร์โมนเอทิลีน ได้แก่ <i>MiACS</i> , <i>MiETR1</i> , <i>MiERS1</i> และ Actin	74
ตาราง 13 ปริมาณอาร์เอ็นเอที่สกัดได้ด้วยสารละลาย 2% CTAB จากเนื้อ มะม่วงที่ฉายรังสีและไม่ฉายรังสี (ชุดควบคุม)	114
ตาราง 14 ปริมาณอาร์เอ็นเอภายหลัง DNase treatment จากเนื้อมะม่วง ที่ฉายรังสีและไม่ฉายรังสี.....	115

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 สัญลักษณ์ RADURA.....	35
ภาพ 2 กระบวนการสังเคราะห์เอทิลีนในผลไม้.....	63
ภาพ 3 กระบวนการส่งสัญญาณรับรู้เอทิลีนในผลไม้ รูป A เมื่อเอทิลีน จับกับตัวรับ (ethylene receptors), รูป B ในกรณีที่ไม่มีเอทิลีนจับกับตัวรับ	63
ภาพ 4 การสูญเสียน้ำหนัก (A) ความแน่นเนื้อ (B) ค่าความสว่าง (C) ค่าสีแดง (D) ค่าสีเหลือง (E) และสัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (F) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ ปริมาณ 0.4 kGy เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13-15 °C เก็บรักษานาน 12 วัน	79
ภาพ 5 อัตราการหายใจ (A) การผลิตเอทิลีน (B) เปอร์เซ็นต์การเน่าเสีย (C) และคะแนนประสาทสัมผัส (D) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ฉายรังสีแกมมา และรังสีเอกซ์ ปริมาณ 0.4 kGy เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13-15 °C เก็บรักษานาน 12 วัน	82
ภาพ 6 ลักษณะผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ไม่ได้รับการฉายรังสี (ชุดควบคุม; A) ผลที่ได้รับการฉายรังสีด้วยรังสีแกมมา (B) และรังสีเอกซ์ (C) ที่ปริมาณ 0.4 kGy ในวันที่ 12 ของการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 13-15 °C RH 85-95%.....	86
ภาพ 7 การสูญเสียน้ำหนัก (A) ความแน่นเนื้อ (B) ค่าความสว่าง (C) ค่าสีแดง (D) ค่าสีเหลือง (E) และสัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (F) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy (T1: 1-MCP 500 ppb เป็นเวลา 12 ชั่วโมง, T2: 1-MCP 500 ppb เป็นเวลา 24 ชั่วโมง, T3: 1-MCP 1,000 ppb เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และ T4: 1-MCP 1,000 ppb เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) ผลที่ไม่ได้รมสาร (control) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13±2 °C.....	90

ภาพ 8 อัตราการหายใจ (A) การผลิตเอทิลีน (B) เปอร์เซ็นต์การเน่าเสีย (C) และคะแนน
 ประสาทสัมผัส (D) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy
 (T1: 1-MCP 500 ppb เป็นเวลา 12 ชั่วโมง, T2: 1-MCP 500 ppb เป็นเวลา 24 ชั่วโมง,
 T3: 1-MCP 1,000 ppb เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และ T4: 1-MCP 1,000 ppb
 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) ผลที่ไม่ได้รมสาร (control) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C94

ภาพ 9 ลักษณะผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้รับการฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy
 ถูกรมด้วยสาร 1-MCP ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 500 และ 1,000 ppb เป็นเวลา
 12 และ 24 ชั่วโมง โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C เป็นเวลา 12 วัน (กลุ่มควบคุม)
 และ 24 วัน (กลุ่มที่ถูกรมด้วยสาร 1-MCP).....95

ภาพ 10 การสูญเสียน้ำหนัก (A) ความแน่นเนื้อ (B) ค่าความสว่าง (C) ค่าสีแดง (D)
 ค่าสีเหลือง (E) และสัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (F)
 ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy ในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลง
 บรรยากาศแตกต่างกัน ได้แก่ WEB1, WEB2, MAP1 และ MAP2 ผลที่ไม่ได้บรรจุ
 (control) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C เก็บรักษานาน 15 วัน หลังจากนั้นเก็บรักษา
 ที่อุณหภูมิห้อง 27 °C..... 101

ภาพ 11 อัตราการหายใจ (A) การผลิตเอทิลีน (B) เปอร์เซ็นต์การเน่าเสีย (C) และคะแนน
 ประสาทสัมผัส (D) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy ในบรรจุ
 ภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศแตกต่างกัน ได้แก่ WEB1, WEB2, MAP1 และ MAP2
 ผลที่ไม่ได้บรรจุ (control) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C เก็บรักษานาน 15 วัน
 หลังจากนั้นเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง 27 °C..... 104

ภาพ 12 ลักษณะผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้รับการฉายรังสีแกมมา
 ปริมาณ 0.4 kGy ถูกบรรจุในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศแตกต่างกัน
 ได้แก่ WEB1, WEB2, MAP1, MAP2 และผลที่ไม่ได้บรรจุ (control)
 เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13–15 °C เก็บรักษานาน 15 วัน..... 105

ภาพ 13 ความแน่นเนื้อ (A) ค่าความสว่าง (B) ค่าสีแดง (C) ค่าสีเหลือง (D) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (E) ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (F) สัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (G) อัตราการหายใจ (H) และการผลิตเอทิลีน (I) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy (gamma) ผลไม่ฉายรังสี จัดเป็นชุดควบคุม (control) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C เก็บรักษานาน 14 วัน 113

ภาพ 14 ระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์เอทิลีน ได้แก่ *MiETR1* (A), *MiERS1* (B) และ *MiACS* (C) ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C เก็บรักษานาน 14 วัน 118

ภาพ 15 ลักษณะผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้รับการฉายรังสีแกมมาปริมาณ 0.4 kGy (gamma) เปรียบเทียบกับผลที่ไม่ฉายรังสี (control) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C เก็บรักษานาน 14 วัน 118



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

มะม่วง (*Mangifera indica* Linn.) เป็นไม้ผลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่สร้างรายได้ให้กับประเทศไทยเป็นจำนวนมาก สามารถปลูกได้ทุกภาคของประเทศ ซึ่งในประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกมะม่วงมากถึง 2.13 ล้านไร่ ปริมาณผลผลิตสูงถึง 3.13 ล้านตัน (Sangudom et al., 2019) และสามารถส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศเป็นจำนวน 60,329 ตัน/ปี รวมมูลค่าการส่งออก 2,139 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) โดยเฉพาะมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ซึ่งมีลักษณะเด่น คือ ผิวของเปลือกมีสีเหลืองตั้งแต่ติดผลอ่อน เนื้อสีเหลืองมีกลิ่นหอม รสชาติหวานหอม เมื่อสุก เป็นที่ต้องการของตลาดภายในประเทศและต่างประเทศ เช่น สาธารณรัฐเกาหลี ญี่ปุ่น ยุโรป และอเมริกา เป็นต้น (Sangudom et al., 2019; Schulze et al., 2013) การส่งออกไปยังตลาดในแต่ละประเทศมีข้อกำหนดทางด้านสุขอนามัยพืชที่แตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีนต้องผ่านการขึ้นตอนแพคบรรจุที่ดีและปลอดภัย ประเทศญี่ปุ่นมะม่วงผลสดต้องผ่านการอบไอน้ำเพื่อกำจัดไข่หรือแมลงวันผลไม้ตัวเต็มวัยที่อาศัยอยู่ในผลมะม่วง ประเทศสหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย และนิวซีแลนด์มะม่วงผลสดต้องผ่านกระบวนการฉายรังสีชนิดก่อกำเนิดไอออน เพื่อให้ไข่แมลงวันผลไม้ไม่สามารถเจริญเป็นตัวเต็มวัยได้และทำให้ตัวเต็มวัยเป็นหมัน ปัจจุบันการจัดการก่อนส่งออกประเทศไทยประสบปัญหาหลักที่สำคัญ ได้แก่ ขั้นตอนหลังการเก็บเกี่ยวก่อนการฉายรังสี การเกิดโรคหลังการเก็บเกี่ยว เช่น โรคแอนแทรกโนส และการปนเปื้อนของไข่แมลงวันผลไม้ และที่สำคัญมากกว่านั้นคุณภาพผลมะม่วงเมื่อไปถึงปลายทางไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เนื่องจากมีอาการไหม้เน่าเสียหาย จึงส่งผลกระทบต่อ การส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศในปริมาณลดลง ทำให้ประเทศไทยไม่สามารถส่งออกรมะม่วงผลสดไปยังประเทศสหรัฐอเมริกา ได้เป็นเวลานานกว่า 12 ปี นับตั้งแต่ พ.ศ. 2552

จากปัญหาคุณภาพผลมะม่วงเมื่อถึงประเทศปลายทางไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ผู้วิจัยจึงนำเทคโนโลยีการฉายรังสีชนิดก่อกำเนิดไอออน ได้แก่ รังสีแกมมาและรังสีเอกซ์มาใช้กับผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวในปริมาณที่เหมาะสมให้สอดคล้องกับข้อกำหนดมาตรฐานการส่งออกผลไม้ไทยไปยังประเทศสหรัฐอเมริกาที่กำหนดว่าผลไม้จะต้องผ่านกระบวนการฉายรังสีชนิดก่อกำเนิดไอออน ปริมาณ 400 เกรย์ และไม่เกิน 2 เทวา ของปริมาณรังสีที่กำหนดตามมาตรการกักกันพืชในประเทศปลายทางบังคับใช้กับผลไม้จำนวน 8 ชนิด ที่อนุญาตให้ส่งออกโดยต้องผ่านกระบวนการฉายรังสี

ได้แก่ มะม่วง เงาะ ลำไย ลิ้นจี่ มังคุด สับปะรด แก้วมังกร และส้มโอ โดยทั่วไปการฉายรังสีมีผลต่อคุณภาพและการเปลี่ยนแปลงภายในของผลผลิต และผลกระทบของรังสีที่มีต่อคุณภาพผลไม้ขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ ปริมาณรังสีที่ได้รับและชนิดของรังสีที่ใช้ งาน ตัวอย่างเช่น มะม่วงหลังการฉายรังสีแกมมาส่งผลต่อความแน่นเนื้อลดลงหากใช้ปริมาณไม่เหมาะสม ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ลดลง

การฉายรังสีมีผลต่อการพัฒนาการสุกของมะม่วงทำให้มะม่วงที่ฉายรังสีแกมมาชะลอการสุกแก่ โดยมีรายงานงานวิจัยจำนวนมากที่กล่าวถึงการฉายรังสีที่สามารถชะลอการสุกแก่ในแอปเปิล (Martins Melo et al., 2021) สตรอว์เบอร์รี (Din et al., 2021) ฝรั่ง (Jat et al., 2022) และมะม่วงน้ำดอกไม้ (Nguyen, Kato, et al., 2021) โดยรังสีจะทำลายหรือเปลี่ยนแปลงลำดับนิวคลีโอไทด์ของสารพันธุกรรม ส่งผลให้ผลไม้ที่ผ่านการฉายรังสีมีการแสดงออกของยีนเปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตาม การฉายรังสีไม่ทำให้ผลผลิตมีสารกัมมันตรังสีตกค้าง ในทางตรงกันข้ามส่งผลให้ผลผลิตปลอดภัยมากยิ่งขึ้น (Marin-Huachaca et al., 2002) การฉายรังสีอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรสามารถทำได้หลายรูปแบบและชนิด เช่น ผลผลิตทางการเกษตร (ผักและผลไม้สด) อาหารแช่แข็ง อาหารแปรรูป เครื่องเทศ ผลไม้แห้ง ผักดองและผักตัดแต่งพร้อมบริโภค นอกจากนี้ การฉายรังสียังสามารถใช้ร่วมกับเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว เช่น การเก็บรักษาด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม การรมด้วยสารเคมี การเก็บในสภาวะดัดแปลงหรือควบคุมบรรยากาศ หรือใช้ร่วมกับสารเคมีที่มีผลส่งเสริมคุณภาพของผลผลิตให้ดีขึ้น

สำหรับมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองยังคงเป็นมะม่วงสายพันธุ์สำคัญสำหรับการส่งออกของประเทศไทย แม้มีปริมาณส่งออกมาก และมีความต้องการในตลาดต่างประเทศอย่างต่อเนื่อง แต่ยังคงประสบปัญหาคุณภาพผลผลิตก่อนการฉายรังสีไม่สม่ำเสมอ อายุการเก็บรักษาสั้น ส่งผลให้ผลมะม่วงผ่านการฉายรังสีมีคุณภาพต่ำ ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยตระหนักถึงปัญหาและหาแนวทางแก้ไข โดยมุ่งศึกษาผลของการฉายรังสีชนิดกึ่งไอออนต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการเก็บรักษา รวมถึงศึกษาเทคนิคยืดอายุด้วยการรมด้วยสารชะลอการสุกแก่ (1-Methylcyclopropene; 1-MCP) ภายหลังการฉายรังสี ว่าสามารถดำเนินการร่วมและให้ผลเชิงบวกหรือไม่ และอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษารังสีนี้ คือ การใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงสภาพบรรยากาศ (Modified Atmosphere Packaging; MAP) ก่อนการฉายรังสีด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกันตามคุณสมบัติการผ่านเข้าออกของออกซิเจน ไอน้ำ และความหนา นอกจากนี้ ยังศึกษาการแสดงออกของยีนที่สำคัญในกระบวนการสุกแก่ที่มีความเกี่ยวข้องกับการผลิตและการส่งสัญญาณเอทิลีน ได้แก่ *MiETR1*: ethylene receptor, *MiERS1*: ethylene response sensor และ *MiACS*: 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthase ในระหว่างการเก็บรักษา เปรียบเทียบระหว่างผลที่ฉายรังสีและไม่ฉายรังสี ซึ่งผลการวิจัยที่ได้จะช่วยสร้างองค์ความรู้ต่อกระบวนการสุกและการเสื่อมคุณภาพของมะม่วงไทย ภายหลังฉายรังสี พร้อมเสนอแนวทางที่สามารถนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรม ช่วยเสริมความสามารถ

ในการแข่งขันของไทย เพิ่มโอกาสการส่งออกไปยังตลาดที่มีศักยภาพสูง ลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว และสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้บริโภคต่างประเทศ

1.2 จุดมุ่งหมายการศึกษา

1. เพื่อศึกษาผลของรังสีชนิดก่อก่อไอออน ได้แก่ รังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ต่อคุณภาพทางกายภาพเคมีผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการเก็บรักษา
2. เพื่อศึกษาการยืดอายุและคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองโดยใช้การรมด้วยสารชะลอการสุกแก่ (1-MCP) ภายหลังจากฉายรังสีแกมมา
3. เพื่อศึกษาการยืดอายุและคุณภาพการเก็บรักษาของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองโดยใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ (MAP) ก่อนการฉายรังสีแกมมา
4. เพื่อศึกษาการแสดงออกของยีน *MIETR1*, *MIERS1* และ *MIACS* ที่เกี่ยวข้องกับการสุกแก่ในระดับโมเลกุลในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาในระหว่างการเก็บรักษา

1.3 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาผลของการฉายรังสีชนิดก่อก่อไอออน จากแหล่งกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 พลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV และรังสีเอกซ์จากเครื่องฉายรังสีเอกซ์ พลังงาน 5 MeV โดยรังสีชนิดก่อก่อไอออนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานสูง มีผลต่ออะตอมของสารอื่นจนแตกตัวเป็นไอออน ปริมาณในการฉายรังสีที่ 400 เกรย์ อย่างไรก็ตาม โครงการวิจัยในครั้งนี้ไม่ใช้รังสีอิเล็กตรอน (Electron beam; E-beam) ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าเชื้อและกระตุ้นการเปลี่ยนแปลงทางโมเลกุลบางชนิด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์แล้ว ไม่สามารถผ่านวัตถุที่หนาหรือมีความหนาแน่นสูงได้ดีเหมือนรังสีแกมมา จึงเหมาะเฉพาะกับวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาไม่มาก มีแนวโน้มให้ปริมาณรังสีลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านเข้าเนื้อผลไม้ ทำให้บริเวณผิวเปลือกอาจได้รับรังสีมาก ในขณะที่ส่วนลึกเข้าไปได้รับรังสีต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้เกิดความไม่สม่ำเสมอ

มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่นำมาทำการทดลองเป็นเกรดส่งออก มีความสม่ำเสมอของรูปร่าง น้ำหนัก 400-500 กรัม ไม่มีอาการของโรคแอนแทรกโนส มีตำหนิน้อยกว่า 5% ของพื้นที่ผล โดยเก็บเกี่ยวในจังหวัดพิษณุโลก พิจิตร เชียงใหม่ ประจวบคีรีขันธ์ สระแก้ว และนครราชสีมา ซึ่งเป็นแหล่งปลูกที่สำคัญของประเทศ จากนั้นจึงนำมาศึกษาผลของการฉายรังสีต่อคุณภาพทางกายภาพและเคมีของผล การเกิดโรค และการทดสอบทางประสาทสัมผัสในระหว่างการเก็บรักษา ศึกษาผลของการฉายรังสีร่วมกับการรมด้วยสารชะลอการสุกแก่ (1-MCP) ภายหลังจากฉายรังสีที่ความเข้มข้นและระยะเวลาการรมที่แตกต่างกันต่อคุณภาพผลมะม่วงในระหว่างการเก็บรักษาจนกว่าจะหมดสภาพ และศึกษาการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ (MAP) ชนิดที่แตกต่างกันตามคุณสมบัติการผ่านเข้าออกของออกซิเจน ไอน้ำ และความหนา (passive MAP) ก่อนการฉายรังสีต่อคุณภาพหลังการเก็บ

เกี่ยวของผลมะม่วง เพื่อจำลองการขนส่งในระยะทางไกล เป็นระยะเวลานาน 15 วัน จากนั้นจึงนำมาศึกษาอายุการจำหน่ายต่อจนหมดสภาพเก็บรักษา

นอกจากนี้ ยังศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับความสุกในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายหลังการฉายรังสีแกมมา โดยจะสกัด RNA ตามวิธีมาตรฐานด้วยสารละลาย 2% cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) และสังเคราะห์เป็น complementary DNA (cDNA) จากนั้นนำ cDNA ไปวัดระดับการแสดงออกของยีนด้วยเทคนิค quantitative realtime PCR โดยใช้ไพรเมอร์จำเพาะกับยีนที่มีความเกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์และส่งสัญญาณเอทิลีนในผล จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ *MIETR1*, *MIERS1* และ *MIACS* ที่ เปรียบเทียบกับยีนควบคุม *MIACT*

1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

1. รังสีชนิดก่อก่อไอออน (ionizing radiation) คือ พลังงานที่มากในรูปอนุภาคที่มีประจุหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง มีช่วงความถี่ของช่วงคลื่นสูงสุด 1019-1022 เฮิร์ตซ์ (Hz) หรืออนุภาคที่มีพลังงาน ซึ่งสามารถทำให้เกิดกระบวนการไอออนไนเซชันในตัวกลางที่ผ่านไ โดยปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้เป็นอิสระจากอะตอมหรือโมเลกุลเมื่อรังสีวิ่งผ่านอะตอมใดทำให้เกิดอิเล็กตรอนตัวใดตัวหนึ่งที่โคจรอยู่ในวงโคจรรอบนิวเคลียส หลุดกระเด็นออกจากวงโคจรส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ ตัวอย่างรังสีชนิดก่อก่อไอออน เช่น รังสีเอกซ์และรังสีแกมมา เป็นต้น
2. อาหารฉายรังสี (irradiated food) คือ อาหารที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีด้วยปริมาณรังสีที่เหมาะสม ซึ่งไม่ก่อให้เกิดสารกัมมันตรังสีหรือมีรังสีตกค้าง จึงไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค อาหารที่ผ่านการฉายรังสี จะต้องมียุทธลักษณะแสดงข้อความ (RADURA) หรือเครื่องหมายว่าผ่านการฉายรังสีแล้ว พร้อมทั้งระบุวัตถุประสงค์ของการฉายรังสี ชื่อ ที่ตั้งของผู้ผลิต ผู้ฉายรังสี และวันเดือนปีที่ฉายรังสี
3. Realtime polymerase chain reaction คือ เทคนิคที่พัฒนามาจากเทคนิคพีซีอาร์แบบดั้งเดิม (conventional PCR) แต่มีการเพิ่มส่วนของ fluorometer ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง เพื่อให้สามารถตรวจสอบปริมาณผลผลิตพีซีอาร์ได้ โดยการวิเคราะห์ผลจะวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งทำให้ได้ผลที่รวดเร็วและมีความถูกต้องแม่นยำสูง
4. 1-Methylcyclopropene (1-MCP) คือ อนุพันธ์ของไซโคลโพรเพน ซึ่งมีการใช้งานเป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตในพืช มีฤทธิ์แข่งขันกับเอทิลีน อยู่ในรูปก๊าซ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น โดย

ยับยั้งการทำงานของเอทิลีนโดยแย่งพื้นที่ในการจับกับตัวรับเอทิลีน ทำให้พืชตอบสนองต่อเอทิลีนน้อยลงและลดการสร้างเอทิลีนของพืชได้ด้วย

5. Modified Atmosphere Packaging (MAP) คือ เทคนิคการถนอมอาหารเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหารสดหรืออาหารที่แปรรูปขั้นต่ำ (minimally processed food) ทำได้โดยการบรรจุอาหารในบรรจุภัณฑ์ที่มีการปรับสัดส่วนบรรยากาศภายในให้มีอัตราส่วนของก๊าซชนิดต่าง ๆ แตกต่างไปจากบรรยากาศปกติ โดยสัดส่วนของก๊าซที่ใช้อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามระยะเวลา อายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ อัตราส่วนของก๊าซเริ่มต้น และสถานะการเก็บรักษา
6. ยีน (gene) คือ ส่วนหนึ่งของโครโมโซม หรือ ส่วนหนึ่งของดีเอ็นเอที่ทำหน้าที่เป็นสารพันธุกรรมที่สามารถถอดรหัส (transcription) เป็นเอ็มอาร์เอ็นเอ (mRNA) แล้วนำเอ็มอาร์เอ็นเอที่ได้มาแปลรหัส (translation) เป็นสายโพลีเปปไทด์ (polypeptide) ซึ่งเป็นเอนไซม์ โดยยีนทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดลักษณะทางพันธุกรรมต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิต

1.5 สมมติฐานงานวิจัย

1. การฉายรังสีชนิดก่อกัมมันตภาพรังสี ได้แก่ รังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางเคมีของผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษา
2. การรมด้วย 1-Methylcyclopropene ภายหลังการฉายรังสีชนิดก่อกัมมันตภาพรังสีและการใช้บรรจุภัณฑ์สภาพัดแปลงบรรยากาศ (MAP) ก่อนการฉายรังสีสามารถยืดอายุการเก็บรักษาของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองได้
3. การฉายรังสีชนิดก่อกัมมันตภาพรังสีส่งผลให้มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองผลิตเอทิลีนลดลง ชะลอการสุกแก่เนื่องจากการลดลงของระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสุกแก่ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองของยีน *MiETR1*, *MiERS1* และ *MiACS*

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปมะม่วง

มะม่วง (*Mangifera indica* Linn.) จัดอยู่ในวงศ์ Anacardiaceae มะม่วงส่วนใหญ่ที่ปลูกในประเทศไทยจัดอยู่ในกลุ่มอินโดจีน (Indochinese type) ซึ่งต้องผ่านความแห้งแล้งและอากาศเย็นเพียงพอ โดยปกติจะออกดอกระหว่างเดือนธันวาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ โดยมีการติดผลในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนมีนาคม และการเก็บเกี่ยวสามารถได้ทั้งปีขึ้นอยู่กับ การดูแลรักษา การจัดการสวนของผู้ปลูก โดยส่วนใหญ่จะเริ่มเก็บเกี่ยวตั้งแต่เดือนเมษายนถึงเดือนพฤษภาคม (มะม่วงในฤดู) ระยะเวลาเก็บเกี่ยวผลผลิตมะม่วงของประเทศไทยแบ่งเป็นกลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ประมาณเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม ได้แก่ อำเภอบางบาล นครราชสีมา

กลุ่มที่ 2 ประมาณเดือนสิงหาคม – กันยายน ได้แก่ อ่างทอง สิงห์บุรี ชัยนาท สุพรรณบุรี

กลุ่มที่ 3 ประมาณเดือนกันยายน – เมษายน ได้แก่ ประจวบคีรีขันธ์ ราชบุรี

กลุ่มที่ 4 ประมาณเดือนพฤศจิกายน – มิถุนายน ได้แก่ ฉะเชิงเทรา สระแก้ว

กลุ่มที่ 5 ประมาณเดือนมกราคม – กุมภาพันธ์ ได้แก่ พิจิตร

กลุ่มที่ 6 ประมาณเดือนกุมภาพันธ์ – เมษายน ได้แก่ เพชรบูรณ์ พิษณุโลก

กลุ่มที่ 7 ประมาณเดือนพฤษภาคม – ตุลาคม ได้แก่ สุโขทัย เชียงใหม่ เชียงราย

การเก็บเกี่ยวผลมะม่วงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากอีกขั้นตอนหนึ่ง โดยต้องคำนึงถึงอายุการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม เนื่องจากมะม่วงแต่ละพันธุ์มีอายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกันไป กรณีเก็บเกี่ยวผลมะม่วงที่อ่อนเกินไป (110 วันหลังดอกบาน แต่ไม่ถึง 115 วัน) จะทำให้ผลสูญเสียได้ง่าย และเหี่ยวยุบ ผลมีรสเปรี้ยว หากเก็บเกี่ยวผลมะม่วงที่แก่จนเกินไป (มากกว่า 120 วันหลังดอกบาน) จะทำให้เนื้อผลนิ่มเกินไปบอบช้ำง่าย ไม่ทนทานต่อการขนส่ง ดังนั้น การเก็บเกี่ยวผลเมื่อผลอยู่ในระยะที่พอเหมาะจึงมีความสำคัญมาก

2.2 ข้อมูลทางโภชนาการต่าง ๆ ของมะม่วง

มะม่วงเป็นหนึ่งในผลไม้ที่มีความสำคัญทางโภชนาการ เนื่องจากมีสารอาหารที่หลากหลายและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน วิตามิน และแร่ธาตุ นอกจากนี้ยังมีสารพฤกษเคมีหลายชนิด เช่น ฟีนอล แคโรทีนอยด์ และสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อสุขภาพมนุษย์ (Yahia et al., 2023) มะม่วงมีคาร์โบไฮเดรตเชิงโครงสร้าง เช่น เพกติน และเซลลูโลส กรดอะมิโนที่สำคัญ ได้แก่ ไลซีน ลิวซีน ซีสเทอีน วาลีน อาร์จินีน ฟีนอลอะลานีน และเมไทโอนีน

องค์ประกอบของกรดไขมันเพิ่มขึ้นในระหว่างการสุก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดไขมันโอเมก้า 3 และโอเมก้า 6 รงควัตถุที่สำคัญของผลมะม่วง ได้แก่ คลอโรฟิลล์ (เอและบี) และแคโรทีนอยด์ กรดอินทรีย์ที่สำคัญ ได้แก่ กรดมาลิกและกรดซิตริก สารหอมระเหยได้นั้นเป็นกลุ่มที่มีความหลากหลายซึ่งมีหน้าที่ทางเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งมีส่วนทำให้เกิดกลิ่นหอมของผลไม้ในระหว่างขั้นตอนการพัฒนาผล การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีที่สำคัญทางสรีรวิทยาและโครงสร้างที่มีผลต่อองค์ประกอบทางโภชนาการ นอกจากนี้ การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวมีผลอย่างมากต่อแคโรทีนอยด์ สารประกอบฟีนอลิก วิตามินซี ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสต่าง ๆ (Maldonado-Celis et al., 2019) เนื้อมะม่วงมีค่าพลังงานประมาณ 60 ถึง 190 กิโลแคลอรี (หรือ 250 ถึง 795 กิโลจูล) ต่อ 100 กรัม ปริมาณขององค์ประกอบเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับ สายพันธุ์ของมะม่วง รวมถึงปัจจัยต่าง ๆ ก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว (Yahia et al., 2011) ดังที่แสดงอยู่ในตารางที่ 1

ตาราง 1 องค์ประกอบหลักทางโภชนาการของผลมะม่วง

องค์ประกอบ	ปริมาณ (g/100g DW)
น้ำ	78–83
เถ้า	0.34–0.52
ไขมัน	0.30–0.53
โปรตีน	0.36–0.40
คาร์โบไฮเดรต	16.20–17.18
เส้นใย	0.85–1.06
พลังงาน (kcal)	62.1–190

ตาราง 2 ปริมาณแร่ธาตุที่สำคัญในมะม่วงบริโภคผลสด (Yahia et al., 2006)

แร่ธาตุ	ปริมาณ (mg/100g)
Calcium	7–16
Iron	0.09–0.41
Magnesium	8–19
Phosphorus	10–18
Potassium	120–211
Sodium	0–3
Zinc	0.06–0.15
Copper	0.04–0.32

แร่ธาตุ	ปริมาณ (mg/100g)
Manganese	0.03–0.12
Selenium	0–0.6

ตาราง 3 ปริมาณวิตามินที่สำคัญในมะม่วงบรีโกลผลสด

วิตามิน	ปริมาณต่อ 100 กรัม
Ascorbic acid (Vit C)	13.2–92.8 mg
Thiamine (Vit B1)	0.01–0.04 mg
Riboflavine (Vit B2)	0.02–0.07 mg
Niacin (Vit B3)	0.2–1.31 mg
Panthotenic acid (Vit B5)	0.16–0.24 mg
Pyridoxin (Vit B6)	0.05–0.16 mg
Folate	20–69 µg
Vitamin A	54 µg
Vitamin E	0.79–1.02 mg
Vitamin K	4.2 µg

2.3 รงควัตถุที่สำคัญในมะม่วง

สีของผลมะม่วงเป็นดัชนีสำคัญที่ใช้บ่งชี้ระดับความแก่ ระยะความสุก และคุณภาพของผลไม้ เปลือกของมะม่วงในแต่ละสายพันธุ์มีสีเขียวก่อนเข้าสู่ระยะความแก่ และมีการเปลี่ยนแปลงของสีที่แตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ในระหว่างกระบวนการสุก สีของเปลือกอาจเปลี่ยนเป็นสีเขียว เหลือง หรือส้ม และในบางสายพันธุ์อาจพัฒนาเป็นสีแดงอมชมพู ในทางตรงกันข้าม สีของเนื้อมะม่วง (mesocarp/pulp) มีลักษณะค่อนข้างสม่ำเสมอในทุกสายพันธุ์ โดยเริ่มต้นเป็นสีขาวในระยะผลอ่อน และค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีเหลืองหรือสีส้มเมื่อกระบวนการสุกดำเนินไป (Yahia et al., 2023)

- คลอโรฟิลล์ เปลือกของผลมะม่วงที่กำลังเจริญเติบโตมีคลอโรพลาสต์ซึ่งประกอบด้วย รงควัตถุสีเขียว การมีสีเขียวเกิดจากการมีคลอโรฟิลล์ โดยมีการตรวจพบคลอโรฟิลล์สองชนิดในผลมะม่วง ได้แก่ คลอโรฟิลล์ a (สีฟ้า-เขียว) และคลอโรฟิลล์ b (สีเหลือง-เขียว) ในอัตราส่วน 3:1 โดยประมาณ (Sudhakar et al., 2016) ยกตัวอย่างเช่น ในผลมะม่วงพันธุ์ Tommy Atkins คลอโรพลาสต์จะมีไทลาคอยด์ระหว่าง 7 ถึง 10 แผ่นต่อการซ้อนแต่ละชั้น ซึ่งเชื่อมต่อกันผ่านไทลาคอยด์อินเตอร์กรานูลาร์เดียว ในช่วงเริ่มต้นของการสุกผลมะม่วงจะสูญเสียคลอโรฟิลล์ นอกจากนี้ ระดับคลอโรฟิลล์ที่ลดลงในเปลือกผลยังมี

ความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของ β -carotene เมื่อผลมะม่วงสุกขึ้น (Ketsa et al., 1999) ผลมะม่วงมีสีเขียวเนื่องจากมีคลอโรฟิลล์จำนวนมากปกปิดสีเหลืองของแคโรทีนอยด์อยู่ในทางตรงกันข้ามสีเหลืองของแคโรทีนอยด์จะถูกเปิดเผยเมื่อคลอโรฟิลล์สลายตัวในระหว่างการสุก (Charoenchongsuk et al., 2015)

- แคโรทีนอยด์ เป็นรงควัตถุที่ละลายในไขมัน มีสีเหลืองและสีส้ม และพบในปริมาณมากในเนื้อมะม่วงที่สุกและเปลือกของมะม่วงบางสายพันธุ์ แม้ว่ามะม่วงบางพันธุ์ยังคงมีเปลือกสีเขียวเมื่อสุก นอกจากนี้ จุดสีแดงที่ปรากฏบนผิวของมะม่วงบางสายพันธุ์เกิดจากสารแอนโทไซยานินไม่ใช่แคโรทีนอยด์ ในระหว่างกระบวนการเจริญเติบโตและสุกของมะม่วงคลอโรฟิลล์ในคลอโรพลาสต์จะถูกเปลี่ยนเป็นโครโมพลาสต์ที่มีแคโรทีนอยด์ (Ketsa et al., 1999; Yahia et al., 2011) แคโรทีนอยด์บางชนิดที่มีอยู่ก่อนแล้วจะถูกบดบังโดยคลอโรฟิลล์ในช่วงแรกของพัฒนาการของผลไม้ แต่เมื่อผลไม้สุก แคโรทีน เช่น แอลฟาเบต้า และแกมมาแคโรทีน และแซนโทฟิลล์ แอนเธอราแซนทิน ออโรแซนทิน ลูทีน นีโอแซนทิน ไวโอลาแซนทิน และซีแซนทินจะถูกสังเคราะห์ขึ้น ปริมาณแคโรทีนอยด์ในมะม่วงจะแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ (Dar et al., 2016; Liu et al., 2013) โดยพบว่าผลมะม่วงที่สุกมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงกว่าผลมะม่วงที่ยังไม่สุก 6 ถึง 8 เท่า (Haque et al., 2015) ในระยะที่มะม่วงยังไม่สุก ลูทีนเป็นแคโรทีนอยด์หลัก และยังมีแซนโทฟิลล์ชนิดอื่น ๆ เช่น all-trans และ cis-violaxanthin นีโอแซนทิน นีโอโครม ลูทีออกแซนทิน ซีแซนทิน แอนเธอราแซนทิน และออโรแซนทิน ในช่วงเริ่มต้นของการสุก β -cryptoxanthin เป็นแคโรทีนอยด์ที่พบมากที่สุด ขณะที่ α -, β - และ γ -แคโรทีนเป็นสารที่พบมากที่สุดในระยะหลังของการสุก (Ediriweera et al., 2017) มีรายงานว่า all-trans- β -carotene, all-trans-violaxanthin และ 9-cis-violaxanthin เป็นแคโรทีนอยด์ที่พบได้ทั่วไปในช่วงที่ผลไม่สุก และยังระบุได้ว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อปริมาณ β -carotene ในมะม่วงคือสายพันธุ์ของมะม่วงมากกว่าถิ่นกำเนิดหรือช่วงเวลาการเก็บเกี่ยว (Manthey & Penelope, 2009)

2.4 มาตรฐานมะม่วงของประเทศไทย

มะม่วงทุกชั้นคุณภาพต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้ เว้นแต่จะมีข้อกำหนดเฉพาะของแต่ละชั้นคุณภาพและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้มีได้ตามที่ระบุไว้ (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2567) เป็นมะม่วงทั้งผล มีข้อผลหรือไม่มีข้อผลติดอยู่ ถ้ามีข้อผลต้องมีความยาวไม่เกิน 1.5 เซนติเมตร

1. ตรงตามพันธุ์
2. สด
3. สภาพดี ไม่มีรอยชำหรือไม่เน่าเสียที่ทำให้ไม่เหมาะสมกับการบริโภค
4. สะอาด ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้
5. ไม่มีรอยแตก
6. ไม่มีศัตรูพืชที่มีผลกระทบต่อรูปลักษณ์ทั่วไป
7. ไม่มีความเสียหายจากศัตรูพืชที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของเนื้อมะม่วง
8. ไม่มีความชื้นที่ผิดปกติจากภายนอก ทั้งนี้ไม่รวมถึงหยดน้ำที่เกิดหลังจากนำมะม่วงออกจากห้องเย็น
9. ไม่มีความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ หรืออุณหภูมิสูงไม่มีกลิ่น หรือรสชาติที่ผิดปกติ

มะม่วงตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.) แบ่งเป็น 3 ชั้น คุณภาพ ดังนี้

1. ชั้นพิเศษ (Extra Class) มะม่วงมีคุณภาพดีที่สุด มีลักษณะรูปทรง สี และรสชาติตรงตามพันธุ์ ผลปลอดจากตำหนิ ยกเว้นตำหนิเล็กน้อยที่ไม่สามารถมองเห็นได้ชัด และไม่มีผลต่อรูปลักษณ์ทั่วไปของผล คุณภาพระหว่างการเก็บรักษา และการจัดเรียงในภาชนะบรรจุ
2. ชั้นหนึ่ง (Class I) มะม่วงมีคุณภาพดี รูปทรง สี และรสชาติตรงตามพันธุ์ ผลมีตำหนิได้เล็กน้อย ที่เกิดจากการเสียดสีหรือได้รับแดดจัด และรอยด่างที่เกิดจากยาง ตำหนิที่ผิวผลขนาด 1 พื้นที่ไม่เกิน 5 ตร.ซม. ขนาด 2 พื้นที่ไม่เกิน 4 ตร.ซม. ขนาด 3 พื้นที่ไม่เกิน 3 ตร.ซม. และขนาด 4 พื้นที่ไม่เกิน 2 ตร.ซม. มีจุดสนิมประปรายหรือสีเหลืองที่ผิวจากแดดไม่เกิน 30% ของพื้นที่ผิว แต่ต้องไม่มีรอยไหม้
3. ชั้นสอง (Class II) มะม่วงมีคุณภาพชั้นต่ำ มีตำหนิด้านรูปทรง สี และผิว เกิดจากการเสียดสีหรือได้รับแดดจัด และรอยด่างที่เกิดจากยาง ตำหนิที่ผิวผลขนาด 1 พื้นที่ไม่เกิน 7 ตร.ซม. ขนาด 2 พื้นที่ไม่เกิน 6 ตร.ซม. ขนาด 3 พื้นที่ไม่เกิน 5 ตร.ซม. และขนาด 4 พื้นที่ไม่เกิน 4 ตร.ซม. มีจุดสนิมประปรายหรือสีเหลืองที่ผิวจากแดดไม่เกิน 40% ของพื้นที่ผิว แต่ต้องไม่มีรอยไหม้

ตาราง 4 มะม่วงตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ

รหัสขนาด	เกณฑ์ปกติ (กรัม)	ขนาดเล็กหรือใหญ่กว่า เกณฑ์ปกติ (กรัม)	เกณฑ์ความแตกต่าง ของขนาดผลในแต่ละ ภาชนะบรรจุ (กรัม)
1	> 450	350-550	150
2	351-450	301-500	75
3	251-350	150-400	75
4	150-250	125-300	75

2.5 การฉายรังสีในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

อาหารฉายรังสีได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความปลอดภัย ลดความเสี่ยงในการเกิดเชื้อก่อโรคที่ติดมากับอาหาร การฉายรังสีอาหารเป็นกระบวนการหนึ่งของการผลิตอาหารที่ใช้กรรมวิธีการประกอบอาหารและการจัดการที่มีคุณภาพ โดยการใช้พลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดก่อก่อไอออน และฉายไปยังอาหารที่อยู่ในภาชนะบรรจุในปริมาณที่เหมาะสมตามเวลาที่กำหนด เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ การฉายรังสีอาหารจัดเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อน (cold process) มีงานวิจัยเพื่อประเมินและตรวจสอบอย่างกว้างขวางมาเป็นเวลามากกว่า 50 ปี และได้รับการยอมรับจากประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก โดยทั่วไปการฉายรังสีอาหารมีวัตถุประสงค์ในการยืดอายุการเก็บรักษา เช่น ในพวกพืชหัว (root crops) เพื่อยับยั้งการงอกในระหว่างเก็บรักษา ช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียของอาหาร เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค ช่วยชะลอการสุกของผลไม้ ช่วยยืดอายุการเก็บรักษา ชะลอการสุกแก่ ชะลอการเน่าเสียของผัก เช่น แครอท ขึ้นฉ่าย ดอกกะหล่ำ และหอมหัวใหญ่ การเก็บรักษาเนื้อสัตว์และอาหารทะเล เช่น เนื้อหมู เนื้อไก่สด ปลาทูน่า กุ้ง และปลาหมึกสด เป็นต้น อาหารที่ผ่านการฉายรังสีจะไม่สูญเสียคุณค่าด้านโภชนาการและคุณภาพทางประสาทสัมผัส หรือมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยโดยเป็นที่ยอมรับได้ เนื่องจากไม่ผ่านการใช้ความร้อน เช่น ผลไม้ที่ผ่านการฉายรังสีจะยังคงคุณภาพเหมือนเดิม เนื้อสดและเนื้อแช่แข็งสามารถนำมาฉายรังสีได้โดยไม่จำเป็นต้องทำให้สุก การฉายรังสีจะไม่รังสีตกค้างเช่นเดียวกับการฉายเอกซเรย์ในฟันและกระดูก องค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) และองค์การอนามัยโลก (WHO) กำหนดให้ปริมาณรังสีดูดกลืนสำหรับอาหารฉายรังสีมีได้สูงถึง 10 กิโลเกรย์ รับรองว่าปลอดภัยต่อผู้บริโภค ไม่เป็นพิษ ไม่ก่อปัญหาทั้งด้านโภชนาการและจุลชีววิทยา ปริมาณของรังสีที่แนะนำให้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5 (Stevenson & Stewart, 1995)

ตาราง 5 ปริมาณรังสีที่แนะนำให้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ

วัตถุประสงค์การฉายรังสี	(กิโลเกรย์; kGy)
ยับยั้งการงอก	0.05 – 0.15
ชะลอการสุกของผลไม้	0.20 – 0.50
ป้องกันการแพร่ระบาดของแมลง	0.15 – 1.00
ทำลายปรสิต	0.03 – 6.00
ยืดอายุการเก็บรักษาโดยการลดปริมาณจุลินทรีย์	0.50 – 5.00
ทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่สร้างสปอร์	3.00 – 10.00
การทำให้ปลอดเชื้อ	ไม่เกิน 50.00

2.5.1 แหล่งของรังสี

ประเภทของรังสีชนิดก่อกำเนิดที่ใช้ออกกับอาหารมี 3 ชนิด ได้แก่ รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ และรังสีอิเล็กตรอน ประเทศที่รับรองอาหารฉายรังสีที่ผลิตเพื่อการค้าส่วนใหญ่ มีวัตถุประสงค์ในการควบคุมแบคทีเรียและเชื้อราในเครื่องเทศ นอกจากนั้น ยังใช้ในการชะลอการงอกของมันฝรั่งและหัวหอม การถนอมรักษาธัญพืชและแป้ง ผลไม้สด รวมไปถึงเนื้อสัตว์จำพวกสัตว์ปีก เมล็ดพืช ปลา และเนื้อสัตว์ชนิดอื่น ๆ (Lacroix & Follett, 2015)

รังสี (radiation) หมายถึง พลังงานที่แผ่กระจายจากต้นกำเนิดออกไปในอากาศหรือตัวกลางใด ๆ ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น รังสีความร้อน รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา เป็นต้น รวมไปถึงอนุภาคที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแอลฟา รังสีบีตา และรังสีนิวตรอน การจำแนกรังสีตามคุณสมบัติทางกายภาพสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มรังสีที่ไม่ก่อกำเนิดไอออน (non-ionizing radiation) ได้แก่ รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น ความร้อน แสง เสียง คลื่นวิทยุ อัลตราไวโอเลต และไมโครเวฟ อีกกลุ่มคือ รังสีที่ก่อให้เกิดไอออน (ionizing radiation) ซึ่งให้พลังงานสูงสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในอะตอมของสารอื่น ๆ จนถึงขั้นแตกตัวเป็นไอออน ได้แก่ รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา อนุภาคอิเล็กตรอน โดยทั่วไปรังสีที่ก่อให้เกิดไอออนจะมีพลังงานหลายร้อยกิโลอิเล็กตรอนโวลต์หรือมากกว่า (Barkai-Golan & Follett, 2017) รังสีแกมมา อนุภาคอิเล็กตรอน หรือรังสีเอกซ์ ได้รับมาตรฐานความปลอดภัยด้านอาหาร Codex General Standard for Irradiated Foods (CODEX STAN 106) และ International Code of Practice for Radiation Processing of Food (CAC/RCP 19) แหล่งของรังสีที่พบได้บ่อยที่สุดในอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ ได้แก่ โคบอลต์-60 (รังสีแกมมา) ในปัจจุบันขณะนี้มีความสนใจเพิ่มมากขึ้นในเทคโนโลยีที่สามารถทดแทนแหล่งรังสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมการแพทย์และการวิจัย โดยเทคโนโลยีทางเลือกที่ทันสมัยและสามารถใช้ได้ในระดับอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ คือ เครื่องมือที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการผลิตรังสีเอกซ์หรืออนุภาคอิเล็กตรอน (Begum et al., 2020)

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก พลังงานสูง คุณสมบัติที่สำคัญของรังสีแกมมา ได้แก่ ความสามารถเดินทางผ่านวัตถุและสารต่าง ๆ ได้ดี เนื่องจากรังสีแกมมาเป็นรังสีที่ไม่มีมวลและมีพลังงานสูง ทำให้มันสามารถทะลุผ่านวัสดุที่มีความหนา เช่น โลหะหรือสารที่มีความหนาแน่นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับรังสีเอกซ์ ซึ่งแตกต่างจากอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีการทะลุทะลวงต่ำกว่า ถึงแม้ว่ารังสีแกมมาจะมีประโยชน์ในหลายด้าน แต่การสัมผัสกับรังสีแกมมาก็อาจมีผลกระทบต่อสุขภาพ ดังนั้น การใช้รังสีแกมมาในด้านต่าง ๆ จึงต้องมีการควบคุมและมาตรการป้องกันเพื่อให้มั่นใจว่าการใช้งานรังสีจะไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์หรือสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในระหว่างปฏิบัติงาน รังสีแกมมาไม่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่าและไม่มีมวลสัมผัส แต่มีพลังงานสูงพอที่จะทำให้เกิดการไอออไนซ์ของอะตอมในสาร รังสีแกมมาได้มาจากสารกัมมันตรังสีที่มีโคบอลต์-60 (พลังงาน 1.17 และ 1.33 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ) หรือ ซีเซียม-137 (พลังงาน 0.66 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์) เป็นต้น โคบอลต์-60 มีครึ่งชีวิต 5.27 ปี เมื่อสลายตัวจะกลายเป็นธาตุ निकิล ซีเซียม-137 เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันของนิวเคลียร์ มีครึ่งชีวิต 30.07 ปี เมื่อสลายตัวจะกลายเป็นแบเรียม-137 แม้ว่าจะมีครึ่งชีวิตที่ยาวนานกว่าโคบอลต์-60 แต่ไม่เป็นที่นิยมในการฉายรังสีเชิงพาณิชย์ เนื่องจากโคบอลต์-60 ให้พลังงานสูงกว่า และที่สำคัญเกลือของซีเซียม-137 สามารถละลายน้ำได้ อาจทำให้เกิดการปนเปื้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม การสัมผัสกับรังสีแกมมาส่งผลต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากรังสีแกมมาสามารถทำลายโครงสร้างของดีเอ็นเอในเซลล์ ส่งผลให้เกิดความผิดปกติในเซลล์นั้น ๆ การไอออไนซ์ที่เกิดขึ้นจากรังสีแกมมาสามารถทำให้เกิดการกลายพันธุ์ในดีเอ็นเอได้ (Kikuchi et al., 2023)

รังสีเอกซ์ได้จากเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ที่ทำงานด้วยระดับพลังงานที่สูง 5-10 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก มีจุดกำเนิดจากชั้นของอิเล็กตรอนของอะตอมใด ๆ เช่น เกิดจากการยิงอิเล็กตรอนกระทบเป้าที่ทำด้วยโลหะ โดยการยิงอนุภาคอิเล็กตรอนใส่แผ่นโลหะ เช่น ทังสเตน เป็นต้น ไปกระทบอิเล็กตรอนของอะตอมโลหะที่เป็นเป้า ทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกกระทบเปลี่ยนตำแหน่งการโคจรรอบนิวเคลียส เกิดตำแหน่งที่ว่างของอิเล็กตรอนในวงโคจรรอบนิวเคลียสเดิม อิเล็กตรอนตัวอื่นที่อยู่ในตำแหน่งวงโคจรที่มีพลังงานสูงกว่าจะเข้าไปแทนที่ของอิเล็กตรอนเดิม และปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

รังสีอิเล็กตรอนมีจุดกำเนิดมาจากเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนที่ทำงานด้วยระดับพลังงานที่ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 10 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ แต่มีข้อจำกัดในเรื่องการทะลุทะลวงผ่านผลิตภัณฑ์ได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กหรือหนาไม่เกิน 20 เซนติเมตร สามารถแก้ไขได้โดยผ่านกระบวนการฉายรังสีสองรอบ (สลับด้านการฉายรังสี) รังสีอิเล็กตรอนเป็นรังสีแบบอนุภาค ซึ่งมีความสามารถในการทะลุทะลวงขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์

2.5.2 ชนิดของอาหารฉายรังสี

องค์การอาหารและยาในสหรัฐอเมริกา หรือ FDA (Food and Drug Administration) ได้รับรองว่าการฉายรังสีสามารถควบคุมกำจัดแมลงในข้าวสาลี มะเขือเทศ เครื่องเทศ ชา พืชผัก และผลไม้ การฉายรังสีสามารถใช้ในการควบคุมการงอกและชะลอการสุกของผลิตผลทางการเกษตร ในปี ค.ศ. 1985 ได้มีการรับรองว่าการฉายรังสีสามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค *trichinosis* ในเนื้อหมู ได้ มีการรับรองในเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 1990 ว่าวิธีการฉายรังสีสามารถใช้ในการควบคุมเชื้อซัลโมเนลลาและเชื้อแบคทีเรียที่เป็นอันตรายชนิดอื่นในเนื้อไก่ ไก่วง และเนื้อสัตว์ปีกทั้งแบบสดและแช่แข็ง โดยชนิดของอาหารและวัตถุประสงค์ของการฉายรังสีจะเป็นตัวกำหนดปริมาณรังสีที่ถูกต้อง (ตาราง 6) Satin (1993) รายงานว่าในการฉายรังสีอาหารโดยทั่วไป ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะอยู่ระหว่าง 50-10,000 เกรย์ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและวัตถุประสงค์ของการฉายรังสี ซึ่งถ้าเปรียบเทียบการใช้รังสี 10,000 เกรย์ หรือ 10 กิโลเกรย์ จะเทียบเท่ากับพลังงานที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น 2.4 องศาเซลเซียส องค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (FDA) ได้กำหนดว่าปริมาณรังสีสูงสุดที่ใช้กับอาหารต้องไม่เกิน 30 กิโลเกรย์ หลังจากการระบาดของเชื้อ *E. coli* ในผักโขมเมื่อปี ค.ศ. 2006 FDA และได้ออกกฎข้อบังคับฉบับสมบูรณ์ในปี ค.ศ. 2008 ที่อนุญาตให้ใช้การฉายรังสีในผักกาดหอมไฮโดรโปนิกส์และผักโขมสด การลดจำนวนจุลินทรีย์ไข่ทั้งเปลือก การฉายรังสีอาหารทะเล มีศักยภาพในการยืดอายุการเก็บรักษาของปลาแช่เย็น/แช่แข็ง และปรับปรุงคุณภาพของกุ้งแช่แข็งได้อย่างรวดเร็ว และไวรัสตับอักเสบบีในหอยนางรมสด (Todd, 2014) ดังนั้น การฉายรังสีจะไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเกิดความเสียหาย ในปี พ.ศ. 2562 ได้มีแผนฉายรังสีของไทยเจ้าแรกเป็นแผนที่ใช้เทคโนโลยีการฉายรังสีแกมมาเพื่อฆ่าเชื้อโรคและลดจุลินทรีย์ก่อโรค ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 2 กิโลเกรย์ ทำให้ปลอดภัยมากขึ้น สามารถรับประทานได้อย่างปลอดภัย ภายใต้แบรนด์ที่เป็นที่รู้จัก คือ สุทธิลักษณ์ แผนฉายรังสีสามารถเก็บได้นาน 10 วัน ที่อุณหภูมิห้อง หรือ 9 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิตู้เย็น ($5 \pm 2^{\circ}\text{C}$) ซึ่งร่วมมือกับสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) และถือเป็นแบรนด์แรกและแบรนด์เดียวในไทยที่ใช้เทคโนโลยีนี้

การฉายรังสีในอาหารเป็นกระบวนการที่ทำการฉายรังสีชนิดก่อกวนไปยังอาหารเพื่อทำลายเชื้อโรคที่ไม่สามารถสร้างสปอร์และจุลินทรีย์ที่ทำให้เน่าเสีย สำหรับแมลงและปรสิตการฉายรังสีส่งผลให้สารพันธุกรรม (DNA) ถูกทำลายแบบสุ่มทำให้สิ่งมีชีวิตเหล่านี้ไม่สามารถอยู่รอดหรือสืบพันธุ์ได้ต่อไป นอกจากนี้ ยังช่วยยับยั้งการงอกของพืชหัวในมันฝรั่งและหอมแดง โดยทั่วไปอายุการเก็บรักษาของผลไม้และผักที่ผ่านการฉายรังสีจะยาวนานขึ้น การชะลอการสุกของผลไม้ การเพิ่มผลผลิตน้ำผลไม้ การฉายรังสีในปริมาณสูงได้ถูกนำมาใช้ในการฆ่าจุลินทรีย์ในอาหารหรือทำให้ปลอดภัยที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องแช่เย็น อาหารสามารถได้รับการฉายรังสีโดยใช้รังสีชนิดก่อกวน (รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ หรือรังสีอิเล็กตรอน) การฉายรังสีในอาหารโดยส่วนใหญ่ใช้รังสีแกมมาเนื่องจากมี

การแทรกซึมทะลุทะลวงลึกมากกว่ารังสีชนิดอื่น ๆ ซึ่งช่วยให้สามารถฉายรังสีในพาเลทขนาดใหญ่ได้ในระดับอุตสาหกรรม ลดความจำเป็นในการบรรจุใหม่และการจัดการผลิตภัณฑ์ที่ยุ่งยาก มีความปลอดภัยที่ดี ยังสามารถนำมาใช้สำหรับการใช้งานด้านอื่น ๆ ได้ เช่น การฆ่าเชื้ออุปกรณ์ทางการแพทย์ (Todd, 2014)

ตาราง 6 วัตถุประสงค์ของการฉายรังสีในอาหารชนิดต่าง ๆ

ชนิดของอาหาร	วัตถุประสงค์ของการฉายรังสี
เนื้อวัว เนื้อหมู และเนื้อสัตว์ปีก	ทำลายเชื้อจุลินทรีย์และพยาธิ เช่น <i>Salmonella</i> , <i>Clostridium botulinum</i> และ <i>Trichinella</i>
ผัก ผลไม้ อาหาร และเครื่องเทศ	ชะลอการเน่าเสีย ชะลอการเจริญของเชื้อรา ลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์
ธัญพืช เมล็ดข้าว และผลไม้	ควบคุมแมลงในพืชผัก ผลไม้แห้ง เครื่องเทศ และเครื่องปรุงรส
หัวหอม แครอท มะเขือเทศ กระเทียม ชিং	ยับยั้งการงอก
กล้วย มะม่วง มะละกอ ฝรั่ง ผลไม้ไม่เปรี้ยว	ชะลอการสุก
ข้าว และผลไม้	ลดเวลาในการอบแห้ง

ที่มา: (Farkas et al., 2014)

2.5.3 ปริมาณรังสีดูดกลืน

ปริมาณรังสีดูดกลืนในผลิตภัณฑ์ (absorbed dose) คือ ปริมาณพลังงานที่อาหารดูดกลืนไว้ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์อาหารเมื่อได้รับรังสี มีหน่วยเป็นเกรย์ เครื่องมือที่ใช้วัดปริมาณรังสีที่สารหรือวัตถุดูดกลืนไว้จากการได้รับรังสีเรียกว่าเครื่องวัดปริมาณรังสี (dosimeter) ซึ่งมีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการฉายรังสีและปริมาณรังสีที่เลือกใช้งาน ซึ่งเครื่องวัดปริมาณรังสีนี้ จะมีความสำคัญมากในการตรวจสอบหรือควบคุมคุณภาพกระบวนการฉายรังสี เนื่องจากทุกชุดของอาหารที่ผ่านการฉายรังสีจะต้องได้รับปริมาณรังสีตามที่กำหนดไว้ เพื่อให้มั่นใจว่าผลิตภัณฑ์ได้รับปริมาณรังสีในระดับที่ถูกต้องตามมาตรฐานความปลอดภัยที่กำหนดไว้ เครื่องวัดปริมาณรังสีทำหน้าที่เป็นเครื่องมือสำคัญในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการ โดยใช้ตรวจสอบความสม่ำเสมอของรังสีภายในของสินค้า ประเมินความเสถียรของระบบฉายรังสี และยืนยันว่าอาหารหรือวัสดุได้รับปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับการยืดอายุการเก็บรักษา การยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ หรือการกำจัดศัตรูพืชที่ตั้งไว้ตามวัตถุประสงค์ เครื่องวัดปริมาณรังสีใช้ในอุตสาหกรรมฉายรังสีอาหารมีหลายรูปแบบ ได้แก่

- FWT-70-83M เป็น Opti-Chromic Dosimeter ของ Far West Technology เป็น optical waveguide ประเภท radiochromic (เปลี่ยนสีเมื่อได้รับรังสี) ใช้สีย้อมตระกูล aminotriphenyl-methane คือ เมื่อได้รับรังสี สีย้อมจะเปลี่ยนจากใส (ไม่มีสี) ไปเป็นสีน้ำเงินเข้ม ก่อนฉายรังสี dosimeter จะใส หลังจากฉายรังสีจะกลายเป็นสีน้ำเงิน (blue) ยิ่งได้รับรังสีมาก ยิ่งสีเข้มมากขึ้น สำหรับรุ่น FWT-70-83M จะครอบคลุมช่วงปริมาณรังสีประมาณ 0.1-20 กิโลเกรย์ ใช้วิธี photometric dual-wavelength photometry อ่านค่าการดูดกลืนแสง (optical density, OD) ที่สองความยาวคลื่น คือ 600 nm และ 656 nm ภายหลังจากฉายรังสีมีการสอบเทียบ (calibration) กับแหล่งรังสีมาตรฐาน และสร้างกราฟเชิงสัมพันธ์ (response curve) เพื่อแปลงค่าสีไปเป็นปริมาณรังสี มีความไวต่อแสง UV สีย้อมอาจเปลี่ยนสีถ้าได้รับรังสี UV (แสงคลื่นสั้น < 350 nm) ดังนั้น ควรเก็บในที่มืดหรือห่อป้องกันแสง UV (McLaughlin et al., 1989)
- เครื่องวัดปริมาณรังสีชนิดอะลานีน (alanine dosimeter) เป็นอุปกรณ์วัดปริมาณรังสีประเภท solid-state dosimeter ที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมและงานวิจัยด้านการฉายรังสีอาหารและวัสดุ เนื่องจากมีความแม่นยำสูงและทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี อาศัยการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (ESR) ที่เกิดขึ้นในกรดอะมิโนอะลานีน หลังการฉายรังสี มีความเหมาะสมสำหรับการวัด absorbed dose ในช่วงกว้าง ตั้งแต่หลาย 100 เกรย์ ถึง 100 กิโลเกรย์ ทำให้เหมาะกับการควบคุมคุณภาพการฉายรังสีอาหาร การฆ่าเชื้อทางการแพทย์ หรือการตรวจสอบปริมาณรังสีในวัสดุทางอุตสาหกรรม จุดเด่นของ dosimeter ชนิดนี้คือความเสถียรของสัญญาณหลังฉายรังสี ความแม่นยำสูง และสามารถเก็บตัวอย่างได้เป็นระยะเวลานานโดยไม่สูญเสียสัญญาณอย่างมีนัยสำคัญ สามารถเก็บตัวอย่างได้เป็นระยะเวลานาน มากกว่า 1 ปี (Intang et al., 2023)

การทะลุทะลวงผ่านของรังสีในผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร ความหนาแน่น และพื้นที่ผิวของภาชนะบรรจุ ปริมาณรังสีดูดกลืนในผลิตภัณฑ์เป็นปริมาณรังสีที่อธิบายการสะสมพลังงานจากรังสีชนิดก่อก่อไอออนที่ถูกดูดซับภายในผลิตภัณฑ์ (Fisher & Fahey, 2017) ปริมาณรังสีดูดกลืนในผลิตภัณฑ์จะอธิบายข้อมูลและความสัมพันธ์ ดังนี้

- เกรย์ (Gray) คือ หน่วยที่นิยมใช้ในปัจจุบันมากที่สุด โดย 1 เกรย์ มีความหมายว่า ปริมาณรังสีที่อาหารดูดกลืนเทียบเท่ากับพลังงาน 1 จูล ต่อมวลน้ำหนัก 1 กิโลกรัม นอกจากนี้ ยังสามารถเปลี่ยนแปลงหน่วยปริมาณรังสีดูดกลืนตามระบบเอสไอได้ (SI Unit) ตัวอย่างเช่น

1,000 เกรย์ เท่ากับ 1 กิโลเกรย์ (K Gy) 1 Gy เท่ากับ 100 rad เป็นต้น (Windsor & Michaels, 2008)

- แร็ด (Rad) คือ หน่วยของปริมาณรังสีดูดกลืนที่อาหารได้รับเทียบเท่ากับพลังงาน 100 เอิร์ก (ergs) ต่อ 1 กรัม หรือ 100 rad จะเทียบเท่ากับ 1 Gy หน่วยนี้นิยมใช้กันในแถบสหรัฐอเมริกา องค์การสากล เช่น IAEA, WHO, FAO, และ Codex Alimentarius ใช้หน่วย Gray (Gy) แทนแล้ว

ปริมาณรังสีดูดกลืนในผลิตภัณฑ์สามารถกำหนดที่จุดใดจุดหนึ่งหรืออาจเฉลี่ยจากมวลของตัวกลางที่ดูดซับเพื่อเป็นตัวแทนค่าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นภายหลังการฉายรังสีหรือผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์ ในปัจจุบัน dosimeter ที่ใช้ในผลไม้ในกระบวนการฉายรังสีแกมมา เช่น pal-4 opti-chromic FWT-70-83M dosimeters อ่านค่าปริมาณรังสีแกมมาโดยใช้เครื่อง spectrometer และในกระบวนการฉายรังสีเอกซ์และรังสีอิเล็กตรอนใช้ alanine dosimeter อ่านค่าปริมาณรังสีเอกซ์โดยใช้เครื่อง EPR spectrometer optic reader เป็นต้น

Dose Uniformity Ratio (DUR) คือ อัตราส่วนความสม่ำเสมอของปริมาณรังสี หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาณรังสีสูงสุด (Maximum Dose; D_{max}) ต่อปริมาณรังสีต่ำสุด (Minimum Dose; D_{min}) ภายในตัวอย่างหรือโหลดสินค้าเดียวกัน ค่า DUR ใช้ประเมินความสม่ำเสมอของรังสีและความสามารถในการควบคุมคุณภาพการฉายรังสี ค่า DUR ใกล้ 1.0 เท่า แสดงว่าการกระจายรังสีมีความสม่ำเสมอสูง ส่วนค่า DUR ที่สูงกว่า 1.5 เท่า หมายถึง มีความแตกต่างของปริมาณรังสีระหว่างปริมาณรังสีสูงสุดและปริมาณรังสีต่ำสุด ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพหรือความปลอดภัยของอาหารและวัสดุ ความหนาแน่น ขนาดบรรจุภัณฑ์ การจัดเรียงผลิตภัณฑ์ขณะฉายรังสีจะมีผลต่อค่า DUR ด้วย ยกตัวอย่างเช่น หากกล่องอาหารแช่แข็งได้รับปริมาณรังสีสูงสุด 10 กิโลเกรย์ และต่ำสุด 8 กิโลเกรย์ ค่า DUR จะเท่ากับ $10/8 = 1.25$ เท่า ซึ่งหมายถึงปริมาณรังสีสูงสุดมากกว่า 25% เมื่อเทียบกับปริมาณรังสีต่ำสุด สำหรับผลไม้สด เช่น มะม่วง หรือส้มโอ การควบคุม DUR เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากผลไม้มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน ทำให้การกระจายรังสีไม่สม่ำเสมอ หากค่า DUR สูงเกินไป อาจทำให้บางผลไม้ได้รับรังสีเพียงพอในการควบคุมแมลงศัตรูพืช ในขณะที่เดียวกัน ผลไม้บางส่วนอาจได้รับรังสีมากเกินไปจนเกิดความเสียหาย เช่น สีผิวเปลี่ยนหรือเนื้ออ่อนผิดปกติ โดยปกติ DUR ของผลไม้สดไม่ควรเกิน 2 เท่า ตามข้อกำหนดการส่งออก การควบคุมค่า DUR จึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ทุกส่วนของผลิตภัณฑ์ได้รับรังสีเพียงพอและไม่เกิดความเสียหายจากรังสีมากเกินไป DUR จึงเป็นตัวชี้วัดหลักในการประเมินความสม่ำเสมอของการฉายรังสีและใช้ในการควบคุมคุณภาพการฉายรังสีอาหาร วัสดุ และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ (Singh & Datta, 2020)

2.5.4 สัญลักษณ์อาหารฉายรังสีและการยอมรับ

เพื่อระบุผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการฉายรังสีและเพื่อแสดงให้ผู้บริโภคได้ทราบจึงได้มีการสร้างสัญลักษณ์ขึ้น เรียกว่า RADURA (ภาพที่ 1) คำนี้ย่อมาจากคำว่า การแผ่รังสี มีรากฐานมาจากภาษาละติน คือ *duru* มีความหมายว่า คงทนยาวนาน เมื่อนำความหมายมารวมกันมีความหมาย คือ ผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการฉายรังสีจะมีอายุการเก็บรักษาและอายุการวางขายยาวนานขึ้น เนื่องจากรังสีลดจำนวนจุลินทรีย์ในอาหาร และเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของ Codex Alimentarius standard แม้ว่าจุลินทรีย์จะสามารถเข้ามาปนเปื้อนได้ภายนอกของบรรจุภัณฑ์ แต่ไม่สามารถปนเปื้อนมาถึงอาหารได้ เนื่องจากอาหารต้องผ่านการแพคบรรจุให้แล้วเสร็จก่อนนำมาฉายรังสี (Junqueira-Gonçalves et al., 2011) องค์ประกอบของสัญลักษณ์ RADURA มีความหมาย ดังนี้

- จุดวงกลมตรงกลาง หมายถึง อาหารหรือผลิตภัณฑ์
- ใบไม้สองใบอยู่ตรงกลางวงกลม หมายถึง ความปลอดภัยและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมของอาหารที่ผ่านกระบวนการฉายรังสี
- ครึ่งวงกลมด้านล่าง หมายถึง บรรจุภัณฑ์ที่ปิดสนิทของอาหาร ปกป้องผลิตภัณฑ์จากสิ่งแวดล้อมภายนอก
- ครึ่งวงกลมด้านบนแต่ละแฉก หมายถึง ผลิตภัณฑ์อาหารหรือผลผลิตทางการเกษตรนั้นถูกฉายรังสีและบรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ปลอดภัยและพร้อมจำหน่าย
- สีเขียว หมายถึง ความปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



ภาพ 1 สัญลักษณ์ RADURA

เมื่ออาหารผ่านกระบวนการฉายรังสีแล้วต้องมีคำอธิบายบอกรายละเอียดเป็นลายลักษณ์อักษร อาจมีเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามข้อกำหนดของแต่ละประเทศ ตัวอย่างเช่น สหรัฐอเมริกา ต้องมีการติดสัญลักษณ์ RADURA เพื่อบ่งบอกว่าอาหารนั้น ๆ ได้ผ่านกระบวนการฉายรังสีมาแล้ว (Chaudhary et al., 2024) แคนาดาผลิตภัณฑ์อาหารที่มีส่วนประกอบผ่านกระบวนการฉายรังสีมากกว่า 10% จะต้องติดสัญลักษณ์ RADURA และมีคำอธิบายเป็นลายลักษณ์อักษร ได้แก่ ผลกระทบที่ผ่าน/ได้รับ/การฉายรังสี เช่นเดียวกัน นิวซีแลนด์ต้องมีการติดฉลากทุกอย่างที่มาจากผลิตภัณฑ์ฉายรังสี แม้กระทั่งในร้านทั่วไป การติดฉลากหรือสัญลักษณ์เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่บ่งบอกว่าผู้บริโภคจะตัดสินใจซื้อหรือยอมรับในผลิตภัณฑ์นั้นหรือไม่ หากอาหารชนิดนั้น ๆ ผ่านการฉายรังสีมาแล้วก็ตาม และยังเป็นเรื่องง่ายในการสังเกตเพียงแค่สัญลักษณ์ RADURA ก็สามารถเข้าใจได้ว่าอาหารชนิดนั้นผ่านการฉายรังสีมาแล้วนั่นเอง จากการศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์อาหารผ่านกระบวนการฉายรังสี พบว่า มีอัตราการยอมรับร้อยละ 55.8 โดยผู้บริโภคให้เหตุผลว่า อาหารที่ผ่านการฉายรังสีแล้วย่อมมีความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้น เพิ่มความมั่นใจ และความปลอดภัย ในสหรัฐอเมริกา ผู้บริโภคจะเลือกซื้อเนื้อวัวบดที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีร้อยละ 30 และร้อยละ 21 คิดว่าเนื้อวัวบดที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีนั้นควรที่จะต้องเลือกซื้อก่อนเป็นอันดับแรก (Nam et al., 2017)

การศึกษาของ Junqueira-Gonçalves et al. (2011) ได้ทำการสำรวจความเข้าใจความหมายของเครื่องหมาย RADURA กับความคิดเห็นและความรู้สึกของประชาชนในประเทศชิลี มีการสัมภาษณ์ทั้งหมด 497 คน โดยผลการสำรวจพบว่า 76.5% ของผู้สัมภาษณ์ไม่ทราบว่ารังสีสามารถใช้เป็นวิธีการในการถนอมอาหารได้ ในขณะที่ 46% เชื่อว่าการใช้รังสีในการถนอมอาหารหมายถึง อาหารที่มีรังสีหรือมีความเป็นพิษเหมือนกับอาหารที่มีสารกัมมันตภาพรังสีปนเปื้อน อย่างไรก็ตาม 91% ของผู้ตอบแบบสอบถามกล่าวว่าจะยินดีบริโภคอาหารที่ผ่านการฉายรังสีหากพวกเขาทราบว่า “อาหารที่ผ่านการฉายรังสี” ไม่ได้หมายถึง “อาหารที่มีรังสีปนเปื้อน” และการฉายรังสีที่ถูกต้องช่วยเพิ่มความปลอดภัยของอาหาร 95.8% ของผู้สัมภาษณ์ไม่คุ้นเคยกับสัญลักษณ์

“RADURA” แต่ 55.8% กล่าวว่าพวกเขาจะซื้ออาหารที่ผ่านการฉายรังสีโดยอ้างอิงจากสัญลักษณ์ดังกล่าว เพราะพวกเขารู้สึกว่าสัญลักษณ์นี้สร้างความมั่นใจและความปลอดภัย

อุปสรรคปัญหาส่วนใหญ่ คือ ความไม่เข้าใจในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการฉายรังสีในบางประเทศ ยังคงเป็นปัญหาหลักที่ขัดขวางการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ หน่วยงานที่เกี่ยวข้องจำเป็นต้องช่วยให้ผู้บริโภคยอมรับและได้รับข้อมูลที่ถูกต้องเกี่ยวกับอาหารที่ผ่านการฉายรังสี ให้ความรู้เกี่ยวกับประโยชน์ของการฉายรังสีอาหาร เพื่อให้ผู้บริโภคมีความเข้าใจและสามารถสื่อสารบอกข้อดีของการใช้รังสีในการถนอมอาหารได้เช่นกัน (Bustos-Griffin et al., 2012) การยอมรับอาหารที่ผ่านการฉายรังสีของผู้บริโภคเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการให้ความรู้ เพื่อแก้ไขความเข้าใจผิดที่ว่าอาหารฉายรังสีคือเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับนิวเคลียร์หรือการสร้างระเบิด การพัฒนาแหล่งพลังงานของรังสีชนิดก่อก่อไอออนที่ไม่ใช่สารกัมมันตภาพรังสี เช่น เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน และเครื่องเอกซเรย์ จะช่วยในการเปลี่ยนแปลงภาพลักษณ์ให้การฉายรังสีในอาหารถูกยอมรับได้ง่ายมากขึ้น เนื่องจากรังสีดังกล่าวใช้พลังงานต้นกำเนิดจากพลังงานไฟฟ้า ซึ่งคล้ายคลึงกับการใช้เตาไมโครเวฟและโทรทัศน์ (Maherani et al., 2016) ผู้บริโภคมักจะยอมรับเทคโนโลยีการฉายรังสีเมื่อพวกเขาเข้าใจถึงศักยภาพในการควบคุมโรคและลดการเน่าเสียในอาหาร และพวกเขายินดีจ่ายเงินเพิ่มสำหรับอาหารที่ผ่านการฉายรังสี เนื่องจากความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้นจากเดิม (Farkas & Mohácsi-Farkas, 2011) เมื่อผู้บริโภคทั่วโลกเข้าใจและรับรู้ถึงประโยชน์จากการฉายรังสีแล้ว ก็มีแนวโน้มว่าจะเกิดการปรับปรุงกรอบกฎหมายที่เกี่ยวข้องตามมา การเปลี่ยนแปลงนี้อาจเกี่ยวข้องกับการติดป้ายฉลากกำกับ เพื่อแจ้งผู้บริโภคว่าผลิตภัณฑ์นั้นผ่านการฉายรังสีแล้ว ในปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการฉายรังสีเพื่อวัตถุประสงค์ด้านสุขอนามัยพืชติดป้ายว่า "ผ่านการฉายรังสี" ซึ่งมักถูกมองว่าเป็นการติดป้ายที่ไม่จำเป็นและอาจถูกตีความเป็นการแจ้งเตือนมากกว่ารับรองความปลอดภัย (Hallman & Blackburn, 2016)

2.5.5 การฉายรังสีชนิดก่อก่อไอออน

งานวิจัยด้านอาหารฉายรังสีมีการพิสูจน์แล้วว่าปลอดภัยต่อผู้บริโภค อาหารที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณเฉลี่ยไม่เกิน 10 กิโลเกรย์ จะไม่ก่อให้เกิดพิษอันตราย ไม่ก่อให้เกิดปัญหาทางโภชนาการ และจุลชีววิทยา ไม่จำเป็นต้องทดสอบเรื่องความปลอดภัยอีกต่อไป ต่อมาในปี พ.ศ. 2529 สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาของสหรัฐอเมริกาประกาศอนุญาตให้อาหารสดฉายรังสีได้ไม่เกิน 1 กิโลเกรย์ และอาหารแห้งฉายรังสีได้ไม่เกิน 30 กิโลเกรย์ เพื่อจำหน่ายแก่ผู้บริโภค (WHO, 1981) การฉายรังสีในอาหารอาจทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หลายลักษณะ ตัวอย่างเช่น ทำให้เซลล์ูลอสซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่แตกตัวเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ทั้งนี้ เซลูลอสเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ของพืช ดังนั้น ผลไม้และผักบางชนิดจึงอ่อนนุ่มหรือสูญเสียคุณภาพของเนื้อสัมผัสหลังจากผ่านการฉายรังสี การฉายรังสีอาหารที่มีไขมันทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radicals) ที่

สามารถออกซิไดซ์ไขมันและทำให้เกิดการหืน (rancidity) ขึ้นได้ การใช้รังสีปริมาณสูงอาจทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติที่เรียกว่า burnt feathers เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้ ยังทำให้โปรตีนสลายตัวและทำลายวิตามินบางชนิด โดยเฉพาะวิตามินเอ บี ซี และอี อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถกล่าวได้ว่าการฉายรังสีอาหารสามารถกระทำได้อาหารทุกประเภทที่สามารถแพคเกจบรรจุในภาชนะทั้งที่มีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ในสภาพแช่แข็งหรือที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งอาจทำให้สามารถปรับเปลี่ยนและดัดแปลงได้ง่าย การแช่แข็งอาหารก่อนการฉายรังสีทำให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจน จึงทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการเสื่อมจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation) และมีรายงานว่า การฉายรังสีอาหารเป็นวิธีการเดียวที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคในอาหารบางประเภท ยกตัวอย่างเช่น เชื้อซัลโมเนลลาในอาหารแช่แข็ง เป็นต้น ภาชนะบรรจุที่ใช้กับอาหารที่จะนำไปผ่านการฉายรังสีจะต้องเป็นไปตามกฎข้อบังคับเกี่ยวกับความปลอดภัยของอาหาร ตัวภาชนะบรรจุจะต้องทนต่อรังสีและสามารถปกป้องอาหารจากสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ (protective characteristics) และต้องไม่ปลดปล่อยสารพิษถ่ายเทสู่อาหารที่อาจถูกสร้างขึ้นภายหลังจากการฉายรังสี รวมทั้งไม่ทำให้เกิดกลิ่นหรือรสชาติอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลง (Rodrigo, 1998) นอกจากนี้ การฉายรังสีชนิดกึ่งไอออนเป็นมาตรการสุขอนามัยเพื่อใช้ควบคุมศัตรูพืช มีการใช้เทคนิคการฉายรังสีครั้งแรกในเชิงพาณิชย์ในปี ค.ศ. 2004 และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในแต่ละปีเฉลี่ยปีละ 10% โดยปกติการใช้รังสีในปริมาณต่าง ๆ ต้องบรรจุวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น ปริมาณรังสี 300 เกรย์ ใช้สำหรับควบคุมแมลงทุกชนิด ยกเว้นแมลงในระยะดักแด้ และตัวเต็มวัยของแมลงในวงศ์ Lepidoptera (moths) การฉายรังสีไม่ทำให้ลักษณะทางคุณภาพกายเคมีเปลี่ยนแปลงไปหรือเพียงเล็กน้อย จึงเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในผักและผลไม้สด ดังนั้น การฉายรังสีทำให้ลดการใช้สารเคมีในขั้นตอนหลังการเก็บเกี่ยวลดลง และในผักและผลไม้ในแต่ละชนิดจะใช้ปริมาณรังสีที่แตกต่างตามกันไปขึ้นอยู่กับขั้นตอนหลังการเก็บเกี่ยว ความทนทานต่อรังสี และวัตถุประสงค์ เป็นต้น มีหลากหลายประเทศที่ยอมรับเทคนิคการฉายรังสีที่ใช้ในการค้าภายในและต่างประเทศ เพื่อควบคุมสุขอนามัยพืชเกือบทั้งหมด นอกจากนี้ ผักและผลไม้สดภายหลังฉายรังสียังรักษาคุณสมบัติได้ดีกว่าวิธีอื่น ๆ (ลาวก ต้ม และทอด) จึงเป็นที่ยอมรับว่าเทคนิคการฉายรังสีจะเป็นที่ยอมรับและเป็นที่รู้จักมากยิ่งขึ้นในอนาคต (Hallman & Blackburn, 2016)

การฉายรังสีสามารถนำมาใช้กับผลไม้ได้หลากหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น แอปเปิล เงาะ ส้ม มะละกอ สับปะรด และมังคุด เป็นต้น ดังที่แสดงในตารางต่อไปนี้

ตาราง 7 การฉายรังสีชนิดก่อก่อไอออนในผักและผลไม้ชนิดต่าง ๆ

ชนิดผลไม้	ชนิดรังสี	คุณภาพภายหลังฉายรังสี	อ้างอิง
มะละกอ	แกมมา	ลดระดับกิจกรรมของเอนไซม์ PG, PME and β -galactosidase สามารถชะลอการเน่าของผลได้ แต่ไม่มีผลต่อปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด	D'Innocenzo and Lajolo (2001)
ส้ม 'Lane Late'	แกมมา	การเกิดรอยบวม บริเวณผิวเปลือกเสียหาย เมื่อเพิ่มปริมาณรังสี 0.4 ถึง 0.6 กิโลเกรย์ ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักและปริมาณสารระเหยบางชนิดเพิ่มขึ้น รวมถึงการลดลงของแข็งที่ละลายน้ำได้	McDonald et al. (2013)
หน่อไม้	แกมมา	ฉายรังสีปริมาณ 0.5 กิโลเกรย์ ชะลอการผลิตเอทิลีนโดยการควบคุมกิจกรรมของเอนไซม์ ACC synthase (ACS) และ ACC oxidase (ACO) ซึ่งอาจมีส่วนช่วยในการยับยั้งการสังเคราะห์ลิคินิน นอกจากนี้ ยังลดกิจกรรมของเอนไซม์ phenylalanine ammonia-lyase (PAL), cinnamyl alcohol dehydrogenase (CAD) และ peroxidase (POD) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสะสมของลิคินิน ลดลง 12.5% เก็บรักษาเป็นเวลา 28 วัน ที่อุณหภูมิ 2 °C	Zeng et al. (2015)
เห็ดอบแห้ง <i>Boletus edulis</i>	แกมมา	การฉายรังสีแกมมาไม่ได้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี นอกจากนี้ ยังแสดงผลในเชิงบวกเล็กน้อยในการรักษากิจกรรมของสารต้านอนุมูลอิสระและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี	Fernandes et al. (2017)
สับปะรด	แกมมา	ปริมาณ 0.4-0.6 กิโลเกรย์ สามารถเก็บรักษาได้นานถึง 21 วัน พบว่าสัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระกรดแอสคอร์บิกไม่แตกต่างกัน	Jenjob et al. (2017)

ชนิดผลไม้	ชนิดรังสี	คุณภาพภายหลังฉายรังสี	อ้างอิง
แอปเปิล	เอ็กซ์	กิจกรรมเอนไซม์ PE (polyesterase) และ PG (polygalacturonase) ลดลงความแน่นของเนื้อผลลดลง และโดยเฉพาะอย่างยิ่งความเป็นกรดจะลดลงบ้าง แต่ผลกระทบเหล่านี้มักพบในปริมาณรังสีที่สูง >0.8 กิโลเกรย์ ผลแอปเปิลมีความทนทานต่อขนาดรังสีสำหรับสุกก่อนการส่งออก	Hall et al. (2020)
สตรอว์เบอร์รี	แกมมา	ปริมาณรังสี 0.3 กิโลเกรย์ ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า 0.15 และ 0.22 กิโลเกรย์ เนื่องจากมีระดับรังสีที่เข้มข้นกว่า ยืดอายุการเก็บรักษาและลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวได้นาน 10 วัน ที่อุณหภูมิ 10 °C อย่างไรก็ตาม การใช้รังสีในระดับที่สูงกว่า 300 Gy ส่งผลกระทบในทางลบ	Din et al. (2021)

2.5.6 กฎหมายเกี่ยวกับอาหารฉายรังสีในประเทศไทย

1. กฎหมายภายใต้กระทรวงสาธารณสุข (อย.) ประกาศเกี่ยวกับการฉายรังสีอาหาร ปี พ.ศ. 2553 ประเทศไทยอนุญาตให้ใช้การฉายรังสีในอาหารตาม “ประกาศกระทรวงสาธารณสุข” ซึ่งกำหนดว่าอาหารสามารถผ่านการฉายรังสีได้ หากเป็นไปเพื่อ

- การยืดอายุการเก็บรักษา
- การหยุดการงอก (เช่น หอม กระเทียม มันฝรั่ง)
- การชะลอการสุก
- การลดปริมาณจุลินทรีย์
- การกำจัดแมลงศัตรูพืชและเพื่อการกักกันพืช (phytosanitary purpose)

โดยต้องมีปริมาณรังสี (absorbed dose) ที่ปลอดภัยและกำหนดไว้ตามชนิดอาหาร เช่น

- ผัก ผลไม้สด มักอนุญาตในช่วง ≤ 1 กิโลเกรย์
- ประสิดในสัตว์น้ำ ≤ 3 กิโลเกรย์
- การฆ่าเชื้อระดับสูง (sterilization) 10-30 กิโลเกรย์

ข้อบังคับสำคัญ

1. อาหารฉายรังสีต้องไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค
2. องค์ประกอบทางโภชนาการต้องไม่เสียหายเกินสมควร

3. ห้ามทำให้อาหารเกิดการปนเปื้อนกับมันตรังสี
 4. ต้องมี ฉลากระบุว่า “ผ่านการฉายรังสี” หรือ “Treated with Radiation” และมีตราสัญลักษณ์ ราดูรา (RADURA symbol)
2. การควบคุมภายใต้สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.) พ.ร.บ.พลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ สถาบันหรือโรงงานที่ใช้รังสี ต้องอยู่ภายใต้พระราชบัญญัติพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ พ.ศ. 2559 และกฎหมายลูกที่ออกตามมา ซึ่งกำหนดว่า
- สถานที่ต้องได้รับใบอนุญาตใช้วัสดุกัมมันตรังสี หรือ ใบอนุญาตใช้เครื่องกำเนิดรังสี
 - ต้องมีเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยทางรังสี (RSO)
 - ต้องตรวจสอบปริมาณรังสี การบำรุงรักษา และการฝึกอบรมบุคลากรอย่างสม่ำเสมอ
 - ต้องมีมาตรการป้องกันรังสีสำหรับผู้ปฏิบัติงานตามข้อกำหนดของ IAEA
3. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อาหารฉายรังสี (Codex และ มอก.) เช่น
- Codex General Standard for Irradiated Foods (Codex Standard 106)
 - Code of Practice for Radiation Processing of Food
- รวมถึงมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ที่เกี่ยวข้อง เช่น
- มอก. สำหรับระบบฉายรังสี
 - มอก. สำหรับเครื่องกำเนิดรังสีและความปลอดภัยของบุคลากร
4. เงื่อนไขสำคัญสำหรับผลไม้ส่งออกประเทศคู่ค้า เช่น สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย กำหนดปริมาณรังสีขั้นต่ำที่ใช้ควบคุมแมลงศัตรูพืช ได้แก่ ปริมาณรังสีทั่วไป (generic dose) สำหรับกำจัดแมลงศัตรูพืช เท่ากับ 0.4 กิโลเกรย์ (สหรัฐอเมริการับรอง) ประเทศไทยจึงใช้รังสีแกมมาเป็นเทคโนโลยีหลักสำหรับฉายรังสีผลไม้ก่อนส่งออก
- จึงสามารถสรุปได้ว่า การฉายรังสีอาหารในประเทศไทยอยู่ภายใต้การควบคุมของสองหน่วยงานหลัก คือ สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) และสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้การฉายรังสีเป็นไปอย่างปลอดภัยและเป็นมาตรฐานตามหลักสากล เช่น Codex และ IAEA ในส่วนของ อย. มีประกาศกระทรวงสาธารณสุขที่อนุญาตให้อาหารบางประเภทสามารถผ่านการฉายรังสีได้ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ลดเชื้อจุลินทรีย์ ป้องกันการออก และกำจัดแมลงศัตรูพืชสำหรับการส่งออก โดยมีการกำหนดปริมาณรังสีให้เหมาะสมตามประเภทอาหาร อีกทั้งยังบังคับให้มีการติดฉลากบอกว่าอาหารนั้น “ผ่านการฉายรังสี” และต้องมีสัญลักษณ์ RADURA เพื่อให้ผู้บริโภคทราบในด้านความปลอดภัยของสถานประกอบการ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติเป็นผู้กำกับดูแลตามพระราชบัญญัติพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ พ.ศ. 2559 ซึ่งกำหนดให้สถานี่ฉายรังสีต้องมีใบอนุญาตใช้รังสีและมีเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยทางรังสีประจำสถานที่ รวมถึงต้องควบคุมการ

ฉายรังสีและตรวจสอบอุปกรณ์อย่างสม่ำเสมอ สำหรับผลไม้ส่งออก เช่น มะม่วง มังคุด ลำไย ประเทศคู่ค้าอย่างสหรัฐอเมริกา กำหนดปริมาณรังสีระดับ 0.4 กิโลเกรย์ เพื่อป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืช ทำให้ประเทศไทยเลือกใช้รังสีแกมมาเป็นเทคโนโลยีหลัก เนื่องจากผ่านมาตรฐานสากล มีสถานียาฉายรังสีพร้อมใช้งาน และไม่ทำให้คุณภาพผลไม้เสียหาย (Loaharanu, 1990; Roberts, 2000)

2.6 การฉายรังสีเพื่อสุขอนามัยพืชก่อนการส่งออก

การฉายรังสีชนิดก่อกำเนิดเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการควบคุมแมลงวันผลไม้ในผลไม้สดหลายชนิด เนื่องจากสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตและการพัฒนาในช่วงระยะตัวอ่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายงานวิจัยหลายชิ้นพบว่าการฉายรังสีในระดับ 0.80–1.2 กิโลเกรย์ สามารถควบคุมตัวอ่อนของแมลงวันผลไม้สกุล *Anastrepha* ได้สูงถึงประมาณ 99.99% รวมถึงชนิดสำคัญอย่างแมลงวันผลไม้แมกซิกัน (*A. ludens*), แมลงวันผลไม้เมดิเตอร์เรเนียน (*Ceratitis capitata*), แมลงวันผลไม้เวสต์อินดีส (*A. obliqua*) และแมลงวันผลไม้ Wiedemann (*A. serpentina*) นอกจากนี้ การทดลองในระยะตัวเต็มวัยของแมลงเหล่านี้ โดยให้ตัวอ่อนกว่า 100,000 ตัวต่อสายพันธุ์พัฒนาในผลมะม่วง พบว่าการใช้ปริมาณรังสี 0.1 กิโลเกรย์ (สำหรับ *A. ludens*, *A. obliqua*, *A. serpentina*) และ 0.15 กิโลเกรย์ (สำหรับ *C. capitata*) สามารถลดการแพร่ระบาดได้ประมาณ 80% เมื่อเทียบกับผลมะม่วงที่ไม่ได้ฉายรังสี แม้ประสิทธิภาพจะไม่เท่าการควบคุมในระยะตัวอ่อน แต่ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ารังสีสามารถลดความเสี่ยงการปนเปื้อนแมลงในห่วงโซ่ส่งออกได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ปริมาณรังสีที่แนะนำในระดับสากลสำหรับการกักกันแมลงศัตรูพืชในผลไม้สด คือ 0.15 กิโลเกรย์ ซึ่งถือเป็นปริมาณที่ควบคุมแมลงได้ดีและทำให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพผลน้อยที่สุด (Bustos-Griffin et al., 2012)

ในประเทศไทย แมลงวันผลไม้ที่เป็นปัญหาสำคัญในมะม่วงน้ำดอกไม้ ได้แก่ *Bactrocera dorsalis* สำหรับการส่งออกไปยังประเทศคู่ค้า เช่น สหรัฐอเมริกาและออสเตรเลีย มะม่วงต้องผ่านการฉายรังสีในระดับ 0.4 กิโลเกรย์ ตามข้อกำหนดด้านสุขอนามัยพืช โดยพบว่าระดับรังสีนี้สามารถยับยั้งการพัฒนาของตัวอ่อนให้ไม่สามารถเจริญเติบโตเป็นตัวเต็มวัยได้อย่างสมบูรณ์ (Srimartpirom et al., 2018) ซึ่งทำให้มั่นใจได้ว่าผลผลิตที่ส่งออกปลอดจากการปนเปื้อนแมลงศัตรูพืช การศึกษาของ Hernández et al. (2018) ได้ทดสอบการใช้การฉายรังสีร่วมกับการจุ่มน้ำร้อนในมะม่วงพันธุ์ ‘Ataulfo’ ผลการทดลองระบุว่าแมลงวันผลไม้สองชนิด ได้แก่ Mexican fruit fly (*A. ludens*) และ West Indian fruit fly (*A. obliqua*) มีความทนทานต่อรังสีในระดับทั่วไปที่ 0.15 กิโลเกรย์ จึงได้ทดสอบร่วมกับการจุ่มน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 47°C เป็นเวลา 51 นาที พบว่าการใช้วิธีร่วมกันไม่ทำให้สีเปลือก สีเนื้อ ปริมาณน้ำตาล เนื้อสัมผัส ความเป็นกรด-ด่าง หรือน้ำหนักผลเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ช่วยควบคุมแมลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตัวอ่อนระยะที่ 3 ของ *A. ludens* ตาย

ทั้งหมดที่อุณหภูมิ 47 °C ส่วน *A. obliqua* พบการรอดเพียง 3 ตัว จากทั้งหมด 6,890 ตัว ภายใต้กรรมวิธีเดียวกัน อาจเป็นไปได้ว่าการใช้การฉายรังสีร่วมกับการจุ่มน้ำร้อนจึงเป็นหนึ่งในวิธีที่มีศักยภาพสูงในการจัดการแมลงวันผลไม้ในมะม่วง และสามารถลดความเสียหายระหว่างการขนส่งได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับสายพันธุ์แมลงที่มีความทนทานต่อการฉายรังสีเพียงวิธีเดียว

ตาราง 8 การฉายรังสีเพื่อควบคุมศัตรูพืชที่ปริมาณต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ศัตรูพืช	ปริมาณรังสี (Gy)	การอนุญาตและการใช้
1) Tephritidae (fruit flies)	150	อนุญาต
2) Tetranychidae	400	อนุญาต
3) Mites	500	อนุญาต
4) ระยะดักแด้ของ Lepidoptera	400	ยังไม่บรรลุนิยามวัตถุประสงค์
5) ระยะไข่และตัวอ่อนของ Lepidoptera	250	ยังไม่บรรลุนิยามวัตถุประสงค์
6) มะม่วงที่จะส่งไปยังนิวซีแลนด์และมาเลเซีย	250-300	อนุญาต
7) ควบคุมศัตรูพืชสำหรับส่งออกสหรัฐอเมริกา	400	อนุญาต

ที่มา: Hallman and Blackburn (2016); Ihsanullah and Rashid (2017); (Kikuchi et al., 2023)

ในประเทศไทยฉายรังสีมะม่วงผลสด ที่ปริมาณ 0.4 กิโลเกรย์ และต้องไม่เกิน 1.0 กิโลเกรย์ เพื่อให้ครอบคลุมแมลงที่เข้าทำลายผลมะม่วงสด ปกติแล้วการฉายรังสีที่ปริมาณ 90-150 เกรย์ ก็เพียงพอที่จะส่งผลให้แมลงวันผลไม้เป็นหมัน แต่เพื่อให้ครอบคลุมแมลงชนิดอื่น ๆ จึงต้องใช้ปริมาณรังสีสูงสุดที่ปริมาณ 0.4 กิโลเกรย์ ในการควบคุมสุขอนามัยพืช โดยมีจุดประสงค์หลัก คือ เพื่อควบคุมแมลงวันผลไม้ (*Bactrocera dorsalis*) ในระยะตัวอ่อนและตัวเต็มวัย ตัวงวงเจาะผล (*Sternonchetus mangiferae*) และแมลงอื่น ๆ ยกเว้นแมลงจำพวกผีเสื้อในระยะตัวเต็มวัย และแมลงในระยะดักแด้ก่อนส่งออกไปยังสหรัฐอเมริกา (Lacroix & Follett, 2015; Srimartpirom et al., 2018) แมลงในแต่ละชนิดมีความทนทานต่อรังสีแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับระยะการเจริญเติบโตของแมลงชนิดนั้น ๆ อายุ สภาพแวดล้อมที่อยู่อาศัย และสภาวะในบรรจุภัณฑ์ (สัดส่วนออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์) รวมถึงการเก็บรักษาภายหลังการฉายรังสีอีกด้วย รังสีส่งผลต่อเคมีภายในสายดีเอ็นเอโดยตรงของแมลง (ลำดับเบส) ทำให้สายดีเอ็นเอเสียหาย ทำให้แมลงนั้นเป็นหมันหรือเจริญเติบโตไม่ได้จนตายในที่สุด (Lacroix & Follett, 2015)

นอกจากนี้ การฉายรังสีนิยมใช้ในการควบคุมโรคหลังการเก็บเกี่ยวในผลไม้หลากหลายชนิดอีกด้วย เช่น มะม่วง มังคุด ลำไย ลิ้นจี่ และเงาะ เป็นต้น ในการศึกษาของ Santos et al. (2015) ได้

ศึกษาโรคหลังการเก็บเกี่ยวในมะม่วงผลสดที่เกิดจากเชื้อจุลินทรีย์ *Lasiodiplodia theobromae* โดยทั่วไปปกติจะใช้การฉายรังสี บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ จากการทดลองพบว่า การฉายรังสีแกมมาในมะม่วงผลสุกที่ปริมาณ 0.25, 0.35 และ 0.45 กิโลเกรย์ ไม่มีผลกระทบต่อความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ กรดแอสคอร์บิก ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพเนื้อผล และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคอีกด้วย จากการศึกษาของ Sabato et al. (2009) มะม่วงพันธุ์ 'Tommy Atkins' หลังจากการจุ่มน้ำร้อนที่ 41.6 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ร่วมกับการฉายรังสีแกมมา 0.4 หรือ 1.0 กิโลเกรย์ เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 11 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 วัน หลังจากนั้นเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง 22 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 วัน พบว่าผลมะม่วงที่ฉายรังสีมีผลต่อการปรับปรุงของผลมะม่วงและลดการเกิดโรคขั้วผลระหว่างการเก็บรักษา มะม่วงที่ฉายรังสีที่ 1.0 กิโลเกรย์ พบว่า ผลมะม่วงมีความแน่นเนื้อและคุณภาพทางด้านการประสาทสัมผัสน้อยกว่าชุดควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้รังสีแกมมาในระดับต่ำมีประสิทธิภาพในการกำจัดแมลงวันผลไม้ และการใช้น้ำร้อนยังสามารถลดการเกิดโรคแอนแทรคโนส (Ihsanullah & Rashid, 2017)

แหล่งกำเนิดรังสีสำหรับการฉายรังสีเพื่อสุขอนามัยพืชสามารถมาจากไอโซโทปรังสี (เช่น โคบอลต์-60 ซึ่งผลิตรังสีแกมมา) หรือจากแหล่งเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนโดยใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งสามารถผลิตรังสีเอกซ์และอิเล็กตรอนบีม รังสีแกมมาจะถูกปล่อยออกมาเองตามธรรมชาติระหว่างการสลายตัวของกัมมันตรังสีโคบอลต์-60 โดยมีคุณสมบัติในการทะลุผ่านสูง ทำให้เหมาะสำหรับการฉายรังสีผลผลิตทางการเกษตร ถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะถูกบรรจุมาเป็นพาเลทก็ยังสามารถฉายรังสีได้ อย่างไรก็ตาม รังสีแกมมาไม่สามารถปิดการทำงานได้ และสถานที่ฉายรังสีมักจะต้องดำเนินการอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้วัสดุกัมมันตรังสี (Diehl, 1995) รังสีเอกซ์มีความสามารถในการทะลุผ่านสูงเช่นกัน กระบวนการผลิตรังสีเอกซ์เริ่มต้นจากการเร่งอิเล็กตรอนพลังงานสูงให้พุ่งเข้าชนเป้าหมายโลหะ เช่น แทนทาลัม ทังสเตน หรือทอง เพื่อสร้างลำแสงรังสีเอกซ์ ข้อได้เปรียบหลัก ๆ ของรังสีเอกซ์และเหตุผลที่โรงงานฉายรังสีเอกซ์เริ่มแพร่หลายมากขึ้นเนื่องจากเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนที่ผลิตรังสีเอกซ์สามารถปิดได้หลังจากใช้งานได้ แตกต่างจากรังสีแกมมา ทำให้ลดข้อจำกัดและความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับการใช้และการจัดการวัสดุกัมมันตรังสี การฉายรังสีด้วยอิเล็กตรอนบีมใช้ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ถูกเร่งโดยเครื่องเร่งอนุภาค ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงสุดถึง 10 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) อย่างไรก็ตาม เมื่อเทียบกับรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาแล้ว อิเล็กตรอนบีมมีความสามารถในการทะลุผ่านต่ำ โดยมีขีดจำกัดของการทะลุผ่านที่ระดับความลึกเพียงไม่กี่เซนติเมตรสำหรับอิเล็กตรอนที่พลังงาน 10 MeV ดังนั้น อิเล็กตรอนบีมจึงเหมาะสำหรับการฉายรังสีผลิตภัณฑ์ที่ปนเปื้อนบนพื้นผิวในผลิตภัณฑ์หรือผลไม้เปลือกบาง เช่น บลูเบอร์รี่ที่บรรจุในภาชนะแบบบาง อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดด้านการทะลุผ่านทำให้การใช้งานอิเล็กตรอนบีมใน

อุตสาหกรรมผลไม้สดมีข้อจำกัด เนื่องจากต้องใช้ปริมาณรังสีที่สามารถทะลุผ่านบรรจุภัณฑ์ขนาดใหญ่
กล่องกระดาษลูกฟูกหรือพาเลท (Golding & Singh, 2020)

งานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ที่ผ่านมาได้ศึกษาผลกระทบของการฉายรังสีต่อผักและผลไม้สด มัก
พิจารณาผลของรังสีในปริมาณสูงมากกว่า 1.0 กิโลเกรย์ ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แม้ว่าข้อมูล
ดังกล่าวจะมีประโยชน์ทางวิชาการ แต่ระดับรังสีที่สูงเกิน 1.0 กิโลเกรย์ จะไม่ถูกนำมาใช้ในเชิง
พาณิชย์ และไม่ควรมานำมาเปรียบเทียบกับ การฉายรังสีเพื่อสุขอนามัยพืชในปัจจุบัน เนื่องจากในหลาย
ประเทศได้กำหนดให้ระดับรังสีที่ 150 เกรย์ เป็นมาตรฐานทั่วไปสำหรับการควบคุมแมลงวันผลไม้กลุ่ม
Tephritid และ 400 เกรย์ เป็นระดับรังสีมาตรฐานสำหรับการควบคุมแมลงศัตรูพืชทุกชนิด ยกเว้น
ระยะดักแด้และตัวเต็มวัยของแมลงกลุ่ม Lepidoptera (Follett, 2009) นอกจากนี้ ผลการทดลอง
และรายงานทางวิทยาศาสตร์ด้านการฉายรังสีอาหารทั่วไปมักกล่าวถึงการใช้รังสีในปริมาณระดับกลาง
ปริมาณ 1.0-10.0 กิโลเกรย์ ซึ่งมักใช้เพื่อยับยั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย ตลอดจนใช้ในการฆ่า
เชื้อและการกำจัดการปนเปื้อนมากกว่า 10.0 กิโลเกรย์ เป็นที่น่าสังเกตว่าการฉายรังสีในระดับที่ใช้
เพื่อสุขอนามัยพืชไม่ได้ทำให้อาหารเกิดกัมมันตภาพรังสี (Chaudhary et al., 2024) อย่างไรก็ตาม
การฉายรังสีเพื่อสุขอนามัยพืชอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตผลสดบางประการ เช่น การทำให้ผลไม้
อ่อนนุ่มลง เป็นต้น

2.6.1 ผลกระทบทางตรงของรังสีชนิดก่อกัมมันตภาพรังสี

การฉายรังสีเป็นกระบวนการที่ชักนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเซลล์มากมาย สามารถ
ก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงหรือโดยอ้อมต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งนั่นรวมไปถึงผลไม้และผักสด (Duarte et al.,
2023) ผลกระทบของการฉายรังสีต่อผลิตผลสดขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่ได้รับ และความไวต่อรังสีของ
ผลิตผล นอกจากนี้ ยังได้รับอิทธิพลจากปัจจัยหลายประการทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว เช่น ระยะ
ความสุกของผลไม้ขณะทำการฉายรังสี พันธุ์ และสภาวะการเก็บรักษา ซึ่งปัจจุบันยังไม่ได้รับ
การศึกษาอย่างครอบคลุมหรือเข้าใจอย่างลึกซึ้งทั้งหมด การได้รับรังสีระดับสูงโดยตรงสามารถทำให้
เกิดความเสียหายต่อดีเอ็นเอ (DNA) ซึ่งถือเป็นผลกระทบโดยตรงที่สำคัญที่สุดของการฉายรังสี
อย่างไรก็ตาม ดีเอ็นเอในออร์แกเนลล์ เช่น ไมโทคอนเดรียและคลอโรพลาสต์ก็ได้รับผลกระทบจาก
รังสีเช่นเดียวกัน (W. W.-Y. Kam & R. B. Banati, 2013) ความเสียหายจากรังสีนี้ไม่สามารถย้อนกลับ
ได้ และส่งผลให้เกิดปัญหาในการจัดตัวของโครงสร้างโครมาติน ส่งผลต่อกระบวนการถอดรหัส และ
การจำลองแบบดีเอ็นเอ จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการระดับโมเลกุลที่สำคัญและการทำงานของ
เซลล์ (Manova & Gruszka, 2015)

2.6.2 ผลกระทบทางอ้อมของรังสีชนิดก่อก่อไอออน

ผลกระทบทางอ้อมจากการฉายรังสีเกิดจากการสร้างอนุมูลอิสระของออกซิเจน (Reactive Oxygen Species, ROS) ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการแตกตัวของน้ำเมื่อได้รับรังสีชนิดก่อก่อไอออน (radiolysis of water) เนื่องจากผลไม้และผักสดมีปริมาณน้ำสูง การฉายรังสีสามารถทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ ไฮโดรเจนอะตอมอิสระ ($H\cdot$), ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($HO\cdot$), ไฮโดรเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ($HO_2\cdot$) และสารประกอบที่เกิดจากการรวมตัวกันของอนุมูลเหล่านี้ เช่น OH^- , H_3O^+ , H_2 , และ H_2O_2 อนุมูลเหล่านี้สามารถทำให้ระบบต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติของพืชล้มเหลว ส่งผลให้เยื่อหุ้มเซลล์เสียหาย ระบบขนส่งไอออนผิดปกติ กิจกรรมของเอนไซม์ได้รับผลกระทบ การสังเคราะห์โปรตีนถูกขัดขวาง สายดีเอ็นเอถูกทำลาย ซึ่งอาจนำไปสู่การตายของเซลล์ (Das & Roychoudhury, 2014) อย่างไรก็ตาม ROS ยังเป็นโมเลกุลที่มีบทบาทสำคัญในการส่งสัญญาณของพืช โดยสามารถกระตุ้นกลไกการป้องกันตัวเองจากภาวะเครียดและควบคุมความเสียหายจากความเครียดได้ ดังนั้นผลกระทบด้านลบของการฉายรังสีเพื่อสุกของผลไม้จึงมักไม่ปรากฏ เนื่องจากปริมาณรังสีที่ใช้ต่ำ ความทนทานต่อรังสีของผลไม้และผักสดอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง และพืชสามารถปรับกลไกตอบสนองต่อความเครียด (You & Chan, 2015)

การฉายรังสีเพื่อสุกของผลไม้เป็นมาตรการที่ได้รับการยอมรับในตลาดการค้าระหว่างประเทศและในประเทศ โดยส่วนใหญ่สามารถใช้ได้โดยไม่ส่งผลเสียต่อคุณภาพและคุณค่าทางโภชนาการของผลไม้ เช่น มะม่วง และราสเบอร์รี่ อย่างไรก็ตาม ในบางกรณี การฉายรังสีอาจมีผลกระทบที่ไม่แน่นอนต่อผลิตผลบางชนิดภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน การศึกษาเกี่ยวกับผลของการฉายรังสีในปริมาณต่ำต่อคุณภาพและอายุการเก็บรักษาของผลิตผลบางชนิดยังมีจำนวนจำกัด เช่น ผลไม้ตระกูลส้ม (Golding et al., 2024) อย่างไรก็ตาม ฐานข้อมูลนานาชาติเกี่ยวกับความทนทานของสินค้าเกษตรต่อการฉายรังสี (International Database on Commodity Tolerance, IDCT) ซึ่งเป็นโครงการความร่วมมือระหว่างองค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) และทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency: IAEA) ได้รวบรวมข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับผลกระทบของการฉายรังสีต่อผลไม้และผักสด ผลการศึกษาที่สรุปไว้ในตารางที่ 9 แสดงตัวอย่างของผลกระทบทั่วไปของการฉายรังสีต่อคุณภาพของผลไม้บางชนิด

การฉายรังสีจึงเป็นหัวข้อที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางในกระบวนการแปรรูปอาหาร นอกจากนี้ การฉายรังสีเพื่อยับยั้งการงอกของมันฝรั่ง หอมหัวใหญ่ และกระเทียมในระหว่างการเก็บรักษา แม้ว่าความไวต่อรังสีอาจแตกต่างกันไปในแต่ละพันธุ์ของมันฝรั่ง แต่โดยทั่วไปพบว่าปริมาณรังสีปริมาณ 0.1 กิโลเกรย์ สามารถยับยั้งการงอกได้อย่างถาวร (Barkai-Golan & Follett, 2017)

ตาราง 9 ผลของการฉายรังสีต่อคุณภาพของผลไม้และผักที่แตกต่างชนิดกัน

ชนิดพืช	พันธุ์	ปริมาณรังสี (เกรย์)	ผลของการฉายรังสี
แอปเปิล	'Fuji'	0, 377, 1,148	ความแน่นของเนื้อผลเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพหลักเพียงด้านเดียวที่ได้รับผลกระทบ แต่ผู้บริโภคไม่สามารถแยกความแตกต่างในแง่ของรสชาติและลักษณะภายนอกได้
อโวคาโด	'Hass'	0, 100, 200, 400, 800	การทดลองรังสีทุกระดับส่งผลกระทบต่อคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพของผลไม้
กล้วย	'Cavendish'	0, 200, 400, 600, 800, 1000	การฉายรังสีที่ระดับมากกว่า 400 เกรย์ ในกล้วยดิบส่งผลให้เกิดความเสียหายของเนื้อเยื่อและการเปลี่ยนแปลงของอัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีน ในขณะที่การฉายรังสีที่ 200 เกรย์ สามารถชะลอการสุกได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพืช
บลูเบอร์รี่	'Brigitta'	0, 150, 400, 1000	ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผล องค์ประกอบทางโภชนาการ หรือองค์ประกอบทางเคมีโดยรวม
แก้วมังกร	Red-flesh	400-600	ไม่มีผลต่อสีของเนื้อและกลีบหรือคุณภาพ
กีวี	'Haywood' (green flesh), 'Zesy002' (gold flesh)	0, 200, 400, 600, 800	ไม่มีความแตกต่างที่สามารถสังเกตเห็นได้ ไม่พบความแตกต่างต่อคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางประสาทสัมผัส
แมนดาริน	'Fallglo', 'Minneola', 'Murcott', 'Sunburst', 'Temple'	0, 150, 300, 450	มีความแปรปรวนสูงและขึ้นอยู่กับทั้งพันธุ์และปริมาณรังสี โดยการเกิดรอยหลุมที่เปลือก (peel pitting) เมื่อใช้รังสีมากกว่า 150 เกรย์ ในทุกพันธุ์ส่วนใหญ่

ชนิดพืช	พันธุ์	ปริมาณรังสี (เกรย์)	ผลของการฉายรังสี
ส้ม	'Lane Late' navel	0, 200, 400, 600	เกิดรอยหลุมที่เปลือก (peel pitting) เมื่อใช้รังสี มากกว่า 400 เกรย์
เสาวรส	'Sweetheart'	0, 150, 400, 1000	ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพผลและอายุเก็บรักษา
พีช	'July Prince', 'Flame Prince', 'August Lady', 'Blaze Prince', 'Encore', 'Red Globe'	400	ความแน่นเนื้อลดลง ความชุ่มฉ่ำเนื้อผลเพิ่มขึ้น ผู้บริโภคชอบลูกพีชที่ฉายรังสีมากกว่าไม่ฉายรังสี
ลูกแพร์	'Bartlett'	400	ชะลอการสุกแต่มีความเสี่ยงต่อรอยขีดหลังการเก็บ เกี่ยวเพิ่มมากขึ้น
พลับ	'Jiro'	0, 769	ไม่มีผลต่อคุณภาพโดยรวมของผลไม้
สับปะรด	-	50, 100, 150, 250	ไม่มีผลต่อคุณภาพโดยรวมของผลไม้
ส้มโอ	'Chandler', 'Sarawak'	150, 1000	ความแน่นของเนื้อผลได้รับผลกระทบเฉพาะในพันธุ์ 'Chandler'
ราสเบอร์รี่	'Maravilla'	0, 150, 400, 1000	ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพผล สารอาหาร หรือ ส่วนประกอบที่สำคัญ

ชนิดพืช	พันธุ์	ปริมาณรังสี (เกรย์)	ผลของการฉายรังสี
สตรอเบอรี่	'Marquee' and 'Amado'	400	สูญเสียความแน่นของผล แต่ไม่มีผลกระทบต่อความชอบของผู้บริโภค การเจริญเติบโตของเชื้อมะม่วงไม่แตกต่างกับผลที่ไม่ฉายรังสี
องุ่นทานสด	'Sugraone', 'Crimson Seedless'	400, 600, 800	โดยรวมไม่มีผลกระทบ แต่มีความแตกต่างระหว่างพันธุ์ในบางประการ
เชอร์รี่	'Sweetheart'	0, 400	ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพผลและอายุเก็บรักษา
ขึ้นฉ่าย	-	0, 500, 1000, 1500	ช่วยเพิ่มปริมาณวิตามินซี ของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (SSC) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ที่มา: Golding et al. (2024)

ดังนั้น การเข้าใจความผิดปกติทางสรีรวิทยาสามารถช่วยในการจัดการความเสียหายจากการฉายรังสีที่อาจเกิดขึ้นได้ จากรายงานของ Marques et al. (2016) แสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีมะม่วง 'B74' ที่ยังไม่สุกอาจทำให้เกิดความเสียหายที่เลวร้ายลงอย่างรุนแรงและก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีผิว แต่ในการวิจัยแสดงให้เห็นว่าไม่ว่าจะใช้ปริมาณรังสีเท่าใด (300-800 เกรย์)

การฉายรังสีในผลมะม่วงที่กำลังจะสุกหรือมีความสุกแก่ที่ 80-90% จะลดเปอร์เซ็นต์ความเสียหายจากรังสีที่มีต่อเลวร้ายลงได้ 36-47% เมื่อเทียบกับผลที่ยังไม่สุกหรือยังไม่แก่เต็มที่ การฉายรังสีในผลมะม่วงที่กำลังจะสุกหรือมีความสุกแก่ที่ 80-90% จะพบว่าผลยังมีคุณภาพดีเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคกว่า 74-100% ช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงสีผิวในระหว่างการเก็บรักษา ขณะที่ผลฉายรังสีในระยะที่ยังไม่สุกหรือยังไม่แก่เต็มจะมีคุณภาพลดลง ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เนื่องจากผิวเกิดจุดกระขนาดเล็กเกือบทั่วทั้งผล เลวร้ายลงถูกทำลายจากรังสี ดังนั้น ความรุนแรงของรังสีจะลดลงเมื่อฉายรังสีในผลมะม่วงในระยะที่ 80-90% ผลอยู่ในระยะแก่เต็มที่พร้อมที่จะพัฒนากระบวนการสุก (J. R. Marques et al., 2022) ดังนั้น การฉายรังสีในระยะการสุกแก่ที่เหมาะสมต่อผลไม้ชนิดนั้น ๆ จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อลดการสูญเสียคุณภาพจากความผิดปกติที่เกิดจากการฉายรังสีต่อเลวร้ายลงในผลมะม่วง ซึ่งมีความท้าทายเรื่องการขนส่งกระจายสินค้าและอายุการเก็บรักษาที่สั้นลง (Jose R. Marques et al., 2022) นอกจากนี้ การนำเทคนิคหลังการเก็บเกี่ยว เช่น การใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศอาจช่วยลดการเกิดความผิดปกติที่เกิดจากการฉายรังสีได้ ซึ่งจากรายงานของ

Fan et al. (2012) แสดงให้เห็นว่าการบรรจุผักกาด Iceberg ในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ ช่วยลดความผิดปกติที่เกิดจากการฉายรังสี นอกจากนี้ ผลมะละกอที่ผ่านการจุ่มน้ำร้อนก่อนการฉายรังสีที่ปริมาณ 750 เกรย์ ยืดอายุการเก็บรักษาได้เพิ่มขึ้นถึง 3 วัน (Rashid et al., 2015) อย่างไรก็ตาม ยังจำเป็นต้องมีการวิจัยศึกษาเพิ่มเติมต่อปัจจัยที่มีผลต่อความเสียหายจากการฉายรังสี และพัฒนาแนวทางการจัดการที่มีประสิทธิภาพเพื่อลดความเสี่ยงจากความผิดปกติที่เกิดขึ้น

2.7 การฉายรังสีชนิดกึ่งไอออนต่อคุณภาพผลมะม่วง

2.7.1 การฉายรังสีชนิดกึ่งไอออนต่อคุณภาพทางกายภาพและเคมี

การศึกษาอิทธิพลของการฉายรังสีชนิดกึ่งไอออนได้นำการทดลองในมะม่วงหลากหลายสายพันธุ์ ตัวอย่างเช่น การฉายรังสีมะม่วง ‘Tommy Atkins’ ในประเทศบราซิล เพื่อควบคุมสุขอนามัยพืชก่อนการส่งออกยังไปยังตลาดสากล (Sabato et al., 2009) การศึกษาในมะม่วง ‘Alphonso’ จากประเทศอินเดีย ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาปริมาณ 0.40 กิโลเกรย์ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 12 °C ยืดอายุการเก็บรักษาได้นาน 24 ถึง 38 วัน ชะลอการสูญเสียน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญระหว่างเก็บรักษา ส่งผลให้กระบวนการสุกช้าลง และเพิ่มระยะเวลาที่สามารถวางจำหน่ายได้ รวมถึงได้รับคะแนนสูงสุดในด้านสีของเปลือกและเนื้อสัมผัส รสชาติ และความพึงพอใจโดยรวมของผู้เข้าทดสอบ (Yadav et al., 2014) การศึกษาในมะม่วงพันธุ์ ‘Ataulfo’ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณแตกต่างกัน ได้แก่ 0.15, 0.30 และ 0.45 กิโลเกรย์ จากแหล่งกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 พบว่าภายหลังการฉายรังสี ผลมะม่วงเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในด้านกลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสหากปริมาณรังสีไม่เกิน 0.45 กิโลเกรย์ โดยผลมะม่วงที่ผ่านการฉายรังสีถูกประเมินว่ามีรสหวานลดลง มีความฝาดเพิ่มขึ้น ความฉ่ำของเนื้อผลมากขึ้น แต่ให้กลิ่นมะม่วงและกลิ่นน้ำผึ้งที่เด่นชัดอยู่ นอกจากนี้ การฉายรังสีที่ปริมาณ 0.15 กิโลเกรย์ ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสเพียงเล็กน้อย จึงสามารถเสนอให้ใช้รังสีที่ปริมาณ 0.15 กิโลเกรย์ ใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการกักกันพืชเพื่อรักษาคุณภาพผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยวของมะม่วงพันธุ์ ‘Ataulfo’ ได้ (Cancino-Vázquez et al., 2020) การฉายรังสีในมะม่วงพันธุ์ ‘Sensation’ ด้วยรังสีแกมมาที่ปริมาณ 0.15, 0.22 และ 0.30 กิโลเกรย์ ภายหลังการฉายรังสีแล้วมะม่วงถูกเก็บรักษาในห้องเย็นที่ควบคุมอุณหภูมิ 10 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 85-90% ผลการศึกษาพบว่าปริมาณรังสี 0.30 กิโลเกรย์ ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าการฉายรังสี 0.15 และ 0.22 กิโลเกรย์ เนื่องจากช่วยรักษาคุณภาพของผลได้ดี อย่างไรก็ตาม การใช้ปริมาณรังสีที่สูงกว่า 0.30 กิโลเกรย์ ส่งผลกระทบในทางลบต่อคุณภาพของมะม่วงและไม่ได้รับการยอมรับโดยผู้เข้าทดสอบทางประสาทสัมผัส (การชิม) (Din et al., 2021)

มะม่วงจากประเทศไทยต้องผ่านการฉายรังสีส่วนใหญ่จะเป็นพันธุ์ที่นิยมบริโภคตลาดต่างประเทศ เพื่อป้องกันการแพร่ระบาดของแมลงศัตรูพืช ได้แก่ มะม่วงน้ำดอกไม้ (Nguyen, Kato,

et al., 2021; Srimartpirom et al., 2018) มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง มะม่วงน้ำดอกไม้ มะม่วงเขียวเสวย (Wichitkunan, Phakdee, et al., 2023) จากการศึกษาอัตราการสุขอนามัยพืชก่อนการส่งออกในมะม่วงน้ำดอกไม้ พบว่าการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ (MAP) กับมะม่วงที่มีแมลงวันผลไม้หรือแมลงวันทอง (*Bactrocera dorsalis*) ส่งผลให้แมลงมีอัตราการตายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อได้รับการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 0.03, 0.06, 0.09 ถึง 0.12 กิโลเกรย์ ค่าปริมาณรังสีที่สามารถทำให้แมลงตายได้ 99% (LD99) ในกลุ่มที่ไม่ได้ใช้ MAP (ชุดควบคุม) และกลุ่มที่ใช้ MAP ผ่านการฉายรังสีแตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ FF5: low-density polyethylene 5–8% สัดส่วน O₂ และ 8–12% CO₂, CF1 LDPE: สัดส่วน 5–10% O₂ และ 8–10% CO₂, H34M Bioplastic: สัดส่วน 5–10% O₂ และ 10–15% CO₂ เท่ากับ 58.1, 41.6, 43.8 และ 47.4 Gy ตามลำดับ ดังนั้นการใช้ถุง MAP ก่อนการฉายรังสีจึงทำหน้าที่เป็นปัจจัยเสริมประสิทธิภาพของรังสีที่ก่อให้เกิดความเสียหายเพิ่มเติมแก่แมลงมากกว่าการทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันรังสี นอกจากนี้ จากการทดสอบเพื่อยืนยันในระดับอุตสาหกรรมการส่งออก โดยการฉายรังสีปริมาณ 0.15 กิโลเกรย์ ในหนอนแมลงวันผลไม้ (*B. dorsalis*) จำนวน 35,000 ตัว ที่พักตัวอยู่ในผลมะม่วงที่ถูกบรรจุในถุง MAP ประเภท H34M ภายหลังการฉายรังสีไม่พบการรอดชีวิตจนถึงระยะตัวเต็มวัยของแมลง ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า สามารถนำ MAP มาประยุกต์ใช้ได้เชิงพาณิชย์ โดยไม่ลดประสิทธิภาพของกระบวนการฉายรังสีในมาตรการกักกันศัตรูพืชที่ระดับ 0.15 กิโลเกรย์ (Srimartpirom et al., 2018) การฉายรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาที่ปริมาณ 0.4 กิโลเกรย์ ส่งผลให้การผลิตเอทิลีนและอัตราการหายใจของมะม่วงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ชะลอการสุกของผลมะม่วงได้นานถึง 12 วัน และเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13°C เปรียบเทียบกับผลที่ไม่ได้รับการฉายรังสี ทั้งรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาไม่ส่งผลแตกต่างกันต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลมะม่วง นอกจากนี้ การแช่สารป้องกันเชื้อรา (อะซ็อกซีอะโตรบิน) ที่ความเข้มข้น 300 mgL⁻¹ ในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 45 °C ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดอัตราการเกิดโรคแอนแทรคโนสในผลมะม่วงที่ผ่านการฉายรังสีให้น้อยกว่า 5% (Wichitkunan, Phakdee, et al., 2023)

การฉายรังสีเพื่อกักกันศัตรูพืชด้วยรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาควบคู่กับกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการรักษาคุณภาพมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง และสามารถเป็นต้นแบบสำหรับสายพันธุ์มะม่วงอื่น ๆ ที่มุ่งเน้นการส่งออก ช่วยสร้างความเชื่อมั่นในเชิงพาณิชย์ให้กับผู้ส่งออกอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับการทดลองของ Nguyen, Uthairatanakij, et al. (2021) รายงานว่าผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองได้รับการฉายรังสี โดยรังสีผลิตมาจากเครื่อง E-beam linear accelerator (AECL accelerators, Kanata On, Canada) ที่ระดับพลังงาน 10 MeV ด้วย pulse repetition frequency (PRF) 60 Hz ที่ปริมาณ 0.5 กิโลเกรย์ ส่งผลให้มีการผลิตเอทิลีนเพิ่มขึ้นทันทีหลังจากฉายทันที (วันแรก) และมีค่าสูงกว่าผลที่ไม่ได้รับการฉายรังสีอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม ในช่วงวันที่ 4 ถึง 12 ระดับการผลิตเอทิลีนของทั้งสองกลุ่มไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและคงที่ นอกจากนี้ ในวันที่ 16 การผลิตเอทิลีนของผลมะม่วงทั้งสองกลุ่มเพิ่มขึ้น โดยที่ผลมะม่วงที่ไม่ฉายรังสี (ชุดควบคุม) มีอัตราการเพิ่มขึ้นที่รวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับผลมะม่วงที่ฉายรังสี รังสียังส่งผลต่ออัตราการหายใจให้เพิ่มขึ้นประมาณ 1.61 เท่า เมื่อเทียบกับผลมะม่วงที่ไม่ได้รับการฉายรังสีในวันแรก ซึ่งคาดว่าเกิดจากความเครียดที่ได้รับในขณะฉายรังสีด้วยความร้อนและพลังงาน อย่างไรก็ตาม หลังจากวันที่ 8–16 อัตราการหายใจของผลมะม่วงที่ผ่านการฉายรังสีลดลงอย่างรวดเร็วและต่ำกว่าผลควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่าการฉายรังสีเล็กน้อยกระตุ้นการผลิตเอทิลีนและอัตราการหายใจของมะม่วงในระยะแรก แต่ในเวลาต่อมาสามารถควบคุมกระบวนการดังกล่าวได้การศึกษาชี้ให้เห็นว่าผลกระทบดังกล่าวเกิดจากผลของรังสีต่ออัตราการหายใจของผลไม้ ส่งผลให้กระบวนการสุกช้าลง

นอกจากนี้ การฉายรังสียังได้รับการพัฒนาให้เป็นทางเลือกทดแทนการใช้สารเคมี ในการควบคุมโรคหลังการเก็บเกี่ยวอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการนำมะม่วงหลายสายพันธุ์มาศึกษาผลของรังสีชนิดก่อกำเนิดต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวในหลายประเทศทั่วโลกจะมีผลต่อคุณภาพกายภาพเคมีบางประการของผล ได้แก่ อัตราการหายใจ การผลิตเอทิลีน การพัฒนาของสี ความแน่นเนื้อ สัดส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อกรดที่ไทเทรตได้ และอัตราการเน่าเสีย (Yadav et al., 2014) ผลของรังสีจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณรังสีที่ผลได้รับ ชนิดของผลไม้ องค์ประกอบทางเคมีผล เป็นต้น

2.7.2 การฉายรังสีชนิดก่อกำเนิดต่อระดับกิจกรรมเอนไซม์และระดับการแสดงออกของยีน

ที่ผ่านมาพบรายงานการฉายรังสีชนิดก่อกำเนิดที่มีผลกระทบต่อระดับกิจกรรมเอนไซม์ในมะม่วงหรือในผลไม้หลายกรณี เช่น การทดลองของ Nguyen, Kato, et al. (2021) รายงานว่ามะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการฉายรังสีเล็กน้อยที่ปริมาณ 0.5 กิโลเกรย์ จะลดการย่อยสลายของพอลิแซ็กคาไรด์ในผนังเซลล์ของผลมะม่วง ส่งผลให้ความแน่นเนื้อผลและมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้สูง รวมถึงปริมาณเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าผลที่ไม่ฉายรังสี (ชุดควบคุม) การฉายรังสีเล็กน้อยช่วยชะลอการนุ่มตัวของผลมะม่วง โดยการลดการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายผนังเซลล์ ได้แก่ pectin esterase, pectate lyase, β -galactosidase และ cellulase ระหว่างการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การฉายรังสีเล็กน้อยยังทำให้การแสดงออกของยีนที่สำคัญ ได้แก่ *MiPE*, *MiPEL* และ *MiBG* ซึ่งเกี่ยวข้องในกระบวนการนุ่มลงของผลมะม่วงลดลง การเปลี่ยนแปลงของพอลิแซ็กคาไรด์ในผนังเซลล์ระหว่างกระบวนการสุกของผลไม้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงทางเนื้อสัมผัสของเนื้อผลไม้ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความพึงพอใจของผู้บริโภค ความสามารถในการเก็บรักษา การขนส่ง อายุการเก็บรักษา และความต้านทานต่อโรค

ของผลไม้ การอ่อนนุ่มของผลไม้มีสาเหตุหลักมาจากการสลายตัวของโพลีแซ็กคาไรด์ในผนังเซลล์ อันเกิดจากการทำงานของเอนไซม์ไฮโดรไลติกหลายชนิด เช่น pectin esterase, polygalacturonase, pectate lyase, β -galactosidase, and cellulase ซึ่งเป็นเอนไซม์หลักที่พบในมะม่วง (Henrissat et al., 1998) อีกทั้งยังช่วยยับยั้งการผลิตอนุมูลอิสระของออกซิเจน (Reactive Oxygen Species; ROS) ซึ่งเป็นสาเหตุของการย่อยสลายของผนังเซลล์ ดังนั้น จึงอาจจะสรุปได้ว่า การใช้เทคโนโลยีการฉายรังสีอาจเป็นเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่มีประสิทธิภาพและสะดวกในการชะลอการนุ่มผลไม้ระหว่างการเก็บรักษาได้ (Nguyen, Kato, et al., 2021) ROS จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเร่งการสลายตัวของโพลีแซ็กคาไรด์ในผนังเซลล์พืช โดยมีเฉพาะแบบการศึกษาเดียวกันในแก้วมังกร (Xu et al., 2021), ลำไย (Chomkitichai et al., 2014) และมะม่วง (Singh et al., 2012) ดังนั้น การใช้เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่สามารถชะลอการสลายตัวของผนังเซลล์จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการรักษาความแน่นของเนื้อผลไม้และยืดอายุการเก็บรักษา

นอกจากเปลี่ยนแปลงทางเคมีแล้ว การฉายรังสียังส่งผลต่อการทำงานของยีนในระดับชีวโมเลกุล ระดับการถอดรหัสของยีนที่เกี่ยวข้องกับการอ่อนนุ่มผลถูกควบคุมโดยเอทิลีน ซึ่งทำหน้าที่เป็นโมเลกุลสัญญาณที่กระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการนุ่มตัว (Hou et al., 2019) การฉายรังสีอิเล็กตรอนจะกระตุ้นกิจกรรมของเอนไซม์ที่ย่อยสลายคลอโรฟิลล์ โดยเฉพาะเอนไซม์ chlorophyll degrading peroxidase (Chl-POX) ในระยะเริ่มแรกของการเก็บรักษา (วันที่ 1-4) อย่างไรก็ตาม เอนไซม์ดังกล่าวจะมีกิจกรรมลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงปลายระยะการเก็บรักษา เนื่องจากกิจกรรมของเอนไซม์ pheophytinase (PPH) และ Chl-POX ในผลที่ฉายรังสีมีระดับต่ำกว่าผลที่ไม่ฉายรังสีอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งชี้ว่าการฉายรังสีอิเล็กตรอนอาจชะลอการย่อยสลายของคลอโรฟิลล์ โดยการยับยั้งกิจกรรมของ Chl-POX และ PPH ในช่วงกลางถึงท้ายของระยะการเก็บรักษา ส่งผลให้ผลมะม่วงเปลี่ยนแปลงสีผิวหรือเปลือกได้ช้ากว่าปกติ นอกจากนี้ การฉายรังสีอิเล็กตรอนปริมาณ 0.5 กิโลเกรย์ ไม่ส่งผลต่อกิจกรรมของ glutathione reductase (GR), glutathione disulfide (GSSG) ปริมาณวิตามินซี หรือปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Nguyen, Uthairatanakij, et al., 2021) จากงานวิจัยก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่า การฉายรังสีแกมมามีผลในการรักษาปริมาณคลอโรฟิลล์ในผลแอปเปิล (Hussain et al., 2019) มะเขือเทศ (Kumar et al., 2014) พลัม (Hussain et al., 2013) และลูกแพร์ (Wani et al., 2008) ซึ่งอาจเกิดจากผลกระทบของการฉายรังสีต่อเอนไซม์ที่ย่อยสลายคลอโรฟิลล์ ซึ่งทั้งหมดสอดคล้องกับงานวิจัยข้างต้นที่กล่าวมา

Martins Melo et al. (2021) รายงานการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสุกแก่หรือมีความเกี่ยวข้องกับการผลิตเอทิลีนในผลแอปเปิล ‘Granny Smith’ ที่ได้รับการฉายรังสีเอกซ์ในปริมาณแตกต่างกัน ได้แก่ 0.3 และ 1.0 กิโลเกรย์ ตามลำดับ พบว่าการฉายรังสีทั้งสองปริมาณสามารถลดระดับกิจกรรมของเอนไซม์ ACC oxidase (ACO) และการผลิตเอทิลีนได้สำเร็จเมื่อเทียบ

กับผลที่ไม่ฉายรังสี และยังยับยั้งการเพิ่มการแสดงออกของยีน *MdACS1* (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthase) และ *MdAFS1* (α -farnesene synthase) แต่ไม่พบผลกระทบการเปลี่ยนแปลงเดียวกันกับยีน *MdACO1* (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid oxidase) ระดับการแสดงออกของยีน *MdACS1* ที่ลดลงจากการฉายรังสีสอดคล้องกับการผลิตเอทิลีนที่ลดลงที่พบในผลที่ได้รับการฉายรังสี การแสดงออกของยีน *MdACS1* มีความเกี่ยวข้องและเชื่อมโยงกับการสังเคราะห์ผลิตเอทิลีนในผลแอปเปิลที่เข้าสู่กระบวนการสุก การลดระดับการแสดงออกของยีน *MdACS1* ในผลแอปเปิลที่สุกเต็มที่ จะทำให้การผลิตเอทิลีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Dandekari et al., 2004)

การได้รับรังสีแบบเฉียบพลันมีผลโดยตรงต่อนิวเคลียร์ดีเอ็นเอ โดยทำให้เกิดความเสียหายโดยตรงต่อโครงสร้างพันธะบนสายดีเอ็นเอ และถือเป็นผลกระทบหลักจากการฉายรังสี นอกจากนี้ ยังพบผลกระทบเดียวกันกับดีเอ็นเอที่พบในไมโทคอนเดรีย และคลอโรพลาสต์ก็ได้รับความเสียหายคล้ายกัน (W. W. Y. Kam & R. B. Banati, 2013) ความเสียหายที่ไม่สามารถย้อนกลับนี้ส่งผลให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการจัดระเบียบโครงสร้างโครมาติน ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์ และการถอดรหัส ซึ่งมีผลกระทบต่อกระบวนการชีวโมเลกุลที่สำคัญและการทำงานของเซลล์สิ่งมีชีวิต (Manova & Gruszka, 2015) ความเสียหายทางอ้อมจากการฉายรังสีเป็นผลมาจากการเกิดอนุมูลอิสระของออกซิเจน (Reactive Oxygen Species; ROS) ซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการแยกตัวของน้ำ (radiolysis) โดยรังสีจะชักนำการแตกตัวเป็นไอออนของน้ำในผลไม้และผักสดชนิดที่มีปริมาณน้ำสูง การฉายรังสีสามารถทำให้เกิดอนุมูลอิสระ ($H\cdot$, $HO\cdot$ และ $HO_2\cdot$) และผลิตภัณฑ์จากการรวมตัวของอนุมูลอิสระได้เป็น OH^- , H_3O^+ , H_2 และ H_2O_2

และยังมีการค้นพบว่าภายหลังการฉายรังสีแล้วเซลล์จะเกิด Reactive Nitrogen Species (RNS) เป็นอนุมูลอิสระหรือสารที่มีปฏิกิริยาสูง มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น Nitric oxide (NO), Peroxynitrite ($ONOO^-$) และ Nitrogen dioxide ($NO_2\cdot$) กระบวนการนี้มักเริ่มต้นจากโมเลกุลไนตริกออกไซด์ (NO) ซึ่งเป็นก๊าซที่เซลล์สร้างขึ้นเองตามธรรมชาติ ทั้งจากเอนไซม์ nitric oxide synthase (NOS) และจากปฏิกิริยาทางเคมีอื่น ๆ ภายในเซลล์ ทำหน้าที่เป็นสัญญาณทางชีวภาพ คล้ายสารสื่อสารระดับโมเลกุล ที่ส่งข้อมูลระหว่างเซลล์หรือภายในเซลล์เอง ในพืชมีหน้าที่ควบคุมการเจริญเติบโตและตอบสนองต่อความเครียด (Graska et al., 2023)

ไนตริกออกไซด์เป็นโมเลกุลที่มีความเสถียรพอสมควร แต่ในสภาวะที่มีออกซิเจนหรืออนุมูลอิสระของออกซิเจนอยู่ร่วมด้วย NO จะเปลี่ยนไปสู่รูปแบบที่ “จัดการยากขึ้น” และก่อให้เกิดอนุมูลที่มีปฏิกิริยาสูงชนิดต่าง ๆ เมื่อไนตริกออกไซด์พบกับซูเปอร์ออกไซด์ ($O_2\cdot^-$) ซึ่งเป็นหนึ่งใน ROS มันจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วและไม่อาจหลีกเลี่ยง ผลลัพธ์คือการเกิด peroxynitrite ($ONOO^-$) ซึ่งถือเป็นหนึ่งใน RNS ที่ทรงพลังที่สุด Peroxynitrite ไม่ได้ทำหน้าที่เพียงเป็นตัวออกซิไดซ์เท่านั้น แต่ยัง

สามารถไนโตรเลตโปรตีน เปลี่ยนโครงสร้างของกรดอะมิโน และทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ได้อีกด้วย คล้ายกับทำให้สภาพภายในเซลล์ถูกเผาไหม้อย่างช้า ๆ จากปฏิกิริยาเคมีที่ควบคุมไม่ได้ ในขณะเดียวกันไนตริกออกไซด์ยังสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนโดยตรงได้เช่นกัน ทำให้เกิด $\text{NO}_2\cdot$ ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระอีกชนิดหนึ่ง สามารถชักนำการสร้างกรดไนโตรท์ (NO_2^-) และกรดไนเตรด (NO_3^-) กระบวนการเหล่านี้เกิดขึ้นได้ง่ายขึ้นเมื่อเซลล์เผชิญภาวะเครียด เช่น ความร้อนสูง การอักเสบ การขาดออกซิเจน หรือการได้รับรังสีชนิดก่อไอออน ซึ่งล้วนทำให้การเกิด ROS เพิ่มขึ้น และ ROS เหล่านี้ก็ไปกระตุ้นการสร้าง RNS อีกทอดหนึ่ง เกิดเป็นวัฏจักรของความเสียหายเชิงออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อ RNS เกิดขึ้นในระดับสูงเกินควบคุม อนุมูลอิสระเหล่านี้จะเริ่มโจมตีโครงสร้างที่สำคัญของเซลล์ ตั้งแต่ไขมันบนเยื่อหุ้มเซลล์ โปรตีนเอนไซม์ ไปจนถึงสารพันธุกรรม เช่น DNA ซึ่งอาจทำให้เกิดการแตกหักของสาย DNA การกลายพันธุ์ หรือหยุดวงจรของเซลล์ได้ (Santa-Cruz et al., 2010)

อนุมูลอิสระเหล่านี้เมื่อมีปริมาณสูงเกินกว่าที่ระบบต้านอนุมูลอิสระตามกลไกธรรมชาติของเซลล์จะควบคุมได้ จะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อเยื่อหุ้มเซลล์ ระบบขนส่งไอออน กิจกรรมของเอนไซม์ การสังเคราะห์โปรตีน การเชื่อมโยงของโปรตีน และความสมบูรณ์ของดีเอ็นเอ ซึ่งอาจนำไปสู่การตายของเซลล์ได้ในที่สุด (Das & Roychoudhury, 2014)

2.8 สารชะลอการสุกแก่ในผลไม้

1-Methylcyclopropene (1-MCP) คือ สารเคมีที่สังเคราะห์ขึ้น ทำหน้าที่ในการแข่งขันและยับยั้งการทำงานของเอทิลีนโดยจับกับ ethylene receptor โดยจะมีฤทธิ์ไปลดการผลิตเอทิลีนในผลไม้ที่กำลังสุก 1-MCP มีสถานะเป็นก๊าซ ไม่มีกลิ่นและสี มีฤทธิ์เป็นสารตกค้างที่เป็นพิษต่ำ ปลอดภัยต่อมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม และถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นสารยับยั้งสุกในผลไม้หลายชนิด (Du et al., 2024) ผลผลิตทางการเกษตรที่ผ่านการรมด้วย 1-MCP สามารถนำมาบริโภคได้อย่างปลอดภัย ยืดอายุเก็บรักษาในการขนส่งผลไม้ระยะทางไกล เนื่องจากสามารถป้องกันการเสื่อมสภาพของคุณภาพที่ไม่พึงประสงค์ได้ 1-MCP สามารถนำมาใช้ได้ทั้งก่อนการเก็บเกี่ยวและหลังการเก็บเกี่ยว (Kanwal et al., 2020) โดยเป็นสารที่ไม่เป็นพิษ มีความคงตัวสูง และสามารถช่วยรักษาคุณภาพของผลผลิต แม้ว่าจะนำมาใช้กับแอปเปิลเป็นหลัก แต่ก็สามารถใช้กับผักและผลไม้อื่นๆ ได้ อย่างไรก็ตาม บทบาทของเอทิลีนในกระบวนการสุกและเสื่อมสภาพจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ทำให้การตอบสนองต่อ 1-MCP แตกต่างกันไป ผลไม้ประเภท climacteric fruit คือผลไม้ที่ยังสามารถพัฒนาการสุกต่อไปได้หลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนในช่วงสุก ทำให้ผลที่แก่เต็มแล้วสามารถเก็บมาให้พัฒนาให้สุกภายหลังได้ เช่นกล้วย มะม่วง มะเขือเทศ และอะโวคาโด ในทางตรงกันข้าม ผลไม้ประเภท non-climacteric fruit

คือ ผลไม้ที่ไม่สุกต่อหลังการเก็บเกี่ยว อัตราการหายใจคงที่และตอบสนองต่อเอทิลีนต่ำ จึงต้องเก็บเกี่ยวเมื่อสุกหรือใกล้สุกเท่านั้น เช่น ส้ม องุ่น สตรอว์เบอร์รี และมังคุด (Chen et al., 2018)

1-MCP มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 54 และมีสูตรโครงสร้างเป็น C_5H_6 (Watkins, 2006) มีรายงานว่า 1-MCP สามารถนำมาได้ใช้กับพืชได้หลายชนิด เช่น แอปเปิล น้อยหน่า มะเขือเทศ แอปริคอต กล้วย มะม่วง ทูเรียน เป็นต้น (Li et al., 2023) ประโยชน์หลักของ 1-MCP ช่วยรักษาความแน่นเนื้อของผลไม้ ชะลอการสุกและการเสื่อมสภาพ และยืดอายุการเก็บรักษาของผลไม้ ช่วยรักษาน้ำหนักผลไม้ รักษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Y. Xu et al., 2020) การยืดอายุการเก็บรักษาขึ้นอยู่กับระยะเวลาและวิธีการใช้ที่เหมาะสม พันธุกรรม และความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ (Chang & Brecht, 2023)

ในปัจจุบัน การยอมรับเทคโนโลยีการใช้ 1-MCP ที่เพิ่มขึ้นสะท้อนจากข้อเท็จจริงว่าในปี 2011 มากกว่า 50 ประเทศ ประกาศให้การยอมรับและอนุมัติการใช้ 1-MCP ได้สำหรับผักและผลไม้สด นอกจากนี้ในประเทศในเครือสมาชิกสหภาพยุโรป 1-MCP ยังถูกรวมอยู่ในข้อกำหนด Directive 91/414/EEC (2005) ให้เป็นสารประกอบหนึ่งที่สามารถใช้กับผลไม้ได้รวมถึงแอปเปิลด้วย (Rademacher, 2015) อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับแอปเปิล ผลไม้ประเภทโคลแมกเทอริกอื่นๆ (ผลไม้บ่มได้) เช่น อะโวคาโด กล้วย สาลี่ และมะเขือเทศ เป็นต้น ต้องการชะลอการสุกแทนที่จะเป็นการยับยั้งกระบวนการดังกล่าว เพื่อให้แน่ใจว่าผลไม้ที่จำหน่ายมีคุณภาพเหมาะสมด้านสีเนื้อ สีเปลือก ผิวสัมผัส และรสชาติ อย่างไรก็ตาม ปัจจัยสำคัญที่จำกัดการใช้ 1-MCP คือ ต้นทุนเมื่อเทียบกับประโยชน์ที่ได้รับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพืชบางชนิด เนื่องจากต้นทุนของ 1-MCP อาจไม่คุ้มค่าต่อการใช้งาน ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนเป็นสีเหลืองของบรอกโคลี ซึ่งเกิดจากการเก็บรักษาและขนส่งภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากเก็บภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิสูงและสัมผัสกับเอทิลีน สามารถควบคุมได้ด้วยการใช้ 1-MCP อย่างไรก็ตาม การใช้ 1-MCP ในสินค้าที่มีต้นทุนต่ำหรือมูลค่าต่ำจำเป็นต้องคำนึงถึงคัมค่า (Watkins, 2017) การใช้ 1-MCP ในผลไม้ชนิดต่าง ๆ ต่อคุณภาพผลแสดงในตารางดังที่ 10

ตาราง 10 ผลของการใช้ 1-MCP ที่ความเข้มข้นและระยะเวลาการรมในผลไม้ชนิดต่าง ๆ

ผลไม้	ความเข้มข้น	คุณภาพผลในระหว่างเก็บรักษา
มะม่วง 'Hongyu'	1,000 ppb	ยีนที่เกี่ยวข้องกับความอ่อนนุ่มผล (<i>MiPG</i> , <i>MiB-GAL</i> และ <i>MiPE</i>) การสังเคราะห์เอทิลีน (<i>MiACO1</i> และ <i>MiACS6</i>) และยีนที่ตอบสนองต่อเอทิลีน (<i>MiERF8</i>) มีระดับการแสดงออกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ชะลอการหายใจและการผลิตเอทิลีนจากอิทธิพลของการรมสาร 1-MCP นาน 6 ชั่วโมง การวิเคราะห์ความสัมพันธ์พบว่าการผลิตเอทิลีนมีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญกับค่าความแน่นเนื้อของผล แต่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณกับ malondialdehyde และเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับความอ่อนนุ่มผลและการแสดงออกของยีน <i>MiPG</i> และ <i>MiB-GAL</i> ยิ่งไปกว่านั้น ผลการทดสอบ yeast one-hybrid (Y1H) แสดงให้เห็นว่า <i>MiERF2</i> และ <i>MiERF8</i> สามารถจับกับโปรโมเตอร์ของ <i>MiPG</i> ได้โดยตรง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการผลิตเอทิลีนมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำให้อ่อนนุ่มของผล (Li et al., 2022)
กล้วย	25 $\mu\text{g L}^{-1}$	การใช้ 1-MCP ในรูปแบบสารละลายในน้ำ แช่นาน 60 วินาที มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับวิธีการใช้ในรูปแบบก๊าซแบบดั้งเดิมในการยับยั้งกระบวนการสุกของกล้วย (AAA Group) หลังจากการแช่ด้วย 1-MCP พบว่ามีผลต่อการยับยั้งการทำงานของเอทิลีน ชะลอการสุกได้ ซึ่งรวมถึงการชะลอและลดความรุนแรงของกระบวนการหายใจแบบโคแลแมกเทอริก ยับยั้งการเปลี่ยนแปลงของสีและความนุ่มของผล อย่างไรก็ตาม หากรมแก๊สเอทิลีนนาน 24 ชั่วโมง จะทำให้ประสิทธิภาพลดลงอย่างมาก นอกจากนี้ การได้รับเอทิลีนอย่างต่อเนื่องหลังการใช้ 1-MCP ยังช่วยเร่งการเริ่มต้นและการฟื้นตัวของกระบวนการสุกอีกครั้ง ซึ่งสนับสนุนแนวคิดที่ว่าเอทิลีนอาจช่วยกระตุ้นการสร้าง ethylene receptors สรุปผลการทดลองได้ว่า 1-MCP สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้ถึง 37 วัน ขณะที่ชุดควบคุมมีอายุเพียง 15 วัน ที่อุณหภูมิ 20 °C (Chang & Brecht, 2023)

ผลไม้	ความเข้มข้น	คุณภาพผลในระหว่างเก็บรักษา
หม่อน	2-4 $\mu\text{L/L}$	การเก็บรักษาผลหม่อนในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ (MAP) ที่สัดส่วน 5% O_2 , 15% CO_2 และ 80% N_2 ร่วมกับการใช้ 1-MCP มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยว ผลที่ได้รับ 1-MCP มีค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระทั้งหมด และปริมาณฟีนอลทั้งหมดสูงกว่าตัวอย่างควบคุม การใช้ 1-MCP ความเข้มข้น 4 $\mu\text{L/L}$ ในสภาวะบรรจุภัณฑ์ MAP ดังกล่าว เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 3 $^{\circ}\text{C}$ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการรักษาคุณภาพของผลหลังการเก็บเกี่ยว เป็นระยะเวลา 15 วัน (Kizildeniz et al., 2023)
พลัม ‘Qingcui’	1,000 ppb (1 $\mu\text{L/L}$)	การบ่มสุกทั้งในสภาวะที่ได้รับและไม่ได้รับด้วย 1-MCP นาน 12 ชั่วโมง พบว่าสารเมตาโบไลต์ที่เกี่ยวข้องกับการสุกจำนวนมาก รวมถึงสารฟีนอลิก 12 ชนิด ได้รับอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ การวิเคราะห์ทรานสคริปโตมิกส์ยังแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของยีนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตสารฟีนอลิกในกระบวนการสุก เก็บรักษาได้นาน 6 วัน (Du et al., 2024)

2.9 บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ

บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ (Modified atmosphere packaging; MAP) คือ การเก็บรักษาผลผลิตในถุงพลาสติกเจาะรู หรือไม่เจาะรู การห่อหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกและการเก็บรักษาผลผลิตผลในภาชนะบรรจุต่าง ๆ โดยผลผลิตจะอยู่ภายใต้บรรยากาศที่มีอัตราส่วนของแก๊สชนิดต่าง ๆ แตกต่างกันไปจากบรรยากาศปกติ อัตราส่วนนี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามระยะเวลา ซึ่งการดัดแปลงสภาพบรรยากาศภายในภาชนะบรรจุเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่จะช่วยในการยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว เช่น การห่อด้วยฟิล์มพลาสติก การเก็บรักษาในถุงพลาสติกจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์การใช้งาน ชนิดของผลผลิต และข้อกำหนดต่าง ๆ ได้แก่ อัตราการซึมผ่านของออกซิเจน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และความหนา เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและสามารถลดการเกิดโรค ลดปัญหาการควบคุมแมลงศัตรูพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งแมลงวันผลไม้ เป็นต้น (Srimartpirom et al., 2018) การที่จะฉายรังสีร่วมกับการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศได้นั้นต้องขึ้นอยู่กับความต้านทานรังสีของถุงพลาสติก ผลกระทบภายหลังการฉายรังสี เช่น การเกิดสีเหลือง ภายหลังการฉาย ความเป็นพิษต่อผลิตภัณฑ์ การยอมรับของผู้บริโภค ปัจจัยหลักในการทำการบรรจุ

ภัณฑ์สภาพดัดแปลงบรรยากาศเกี่ยวข้องกับ 2 ปัจจัย คือ อัตราการหายใจ และกระบวนการต่าง ๆ ภายในผลผลิต ซึ่งจะแปรผันไปตามอุณหภูมิ อายุการเก็บเกี่ยว อายุการเก็บรักษา องค์ประกอบของบรรยากาศ และการซึมผ่านแก๊สของวัสดุที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์

ในทางปฏิบัติ บรรจุภัณฑ์จะถูกเติมแก๊สผสมที่มีสัดส่วนองค์ประกอบขึ้นอยู่กับประเภทของผลิตภัณฑ์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ อายุการเก็บรักษาที่ต้องการ และสภาวะการเก็บรักษา จากนั้นบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์จะถูกเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจากการหายใจของผลิตภัณฑ์ที่ถูกบรรจุ ความสามารถในการซึมผ่านของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ และการมีอยู่ของสารปรับสภาพบรรยากาศ การใช้ MAP ถูกนำมาใช้กับอาหารที่เน่าเสียง่าย เช่น เนื้อสัตว์ อาหารทะเล และผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี เช่น กาแฟ สำหรับผลิตภัณฑ์เน่าเสียง่าย เช่น เนื้อสัตว์ ปลา และผักผลไม้สด เป็นต้น มักจะต้องเก็บรักษาในสภาวะเย็น วัสดุที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์มักเป็นฟิล์มพลาสติกที่มีความยืดหยุ่น ส่วนแก๊สที่ใช้เติมในบรรจุภัณฑ์มักเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ออกซิเจน และบางครั้งอาจมีการใช้คาร์บอนมอนอกไซด์ ข้อดีและจุดเด่นของ MAP ส่วนใหญ่มาจากการลดปริมาณออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งช่วยชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชันและการเติบโตของจุลินทรีย์ที่ใช้ ออกซิเจน อย่างไรก็ตาม ข้อเสียที่อาจเกิดขึ้นคือการเจริญเติบโตของเชื้อก่อโรคแบบไม่ใช้ออกซิเจน เช่น *Clostridium botulinum* และในบางสายพันธุ์ เช่น *C. botulinum* type E ยังสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะเย็น ดังนั้น ในบางกรณีจึงจำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณออกซิเจนที่เหลืออยู่ในบรรจุภัณฑ์หรือกำหนดค่าการซึมผ่านของฟิล์มต่อออกซิเจนอย่างเหมาะสม เพื่อหาสมดุลระหว่างการลดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการป้องกันสภาวะไร้ออกซิเจนอย่างสุดขีดที่อาจส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายเจริญเติบโตและเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Berk, 2013) เทคโนโลยีที่ทันสมัย เช่น การทำโพลิเมอร์เมทัลโลซีน การเคลือบหลายชั้น และการทำโพลิเมอร์ผสมกัน (coextrusion) ได้รับการพัฒนาเพื่อตอบสนองต่อปัญหาการซึมผ่านของฟิล์มและคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ คุณสมบัติทางแสงและการยึดติดของซีล ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ MAP ในการรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์สด โดยการปรับสมดุลการแลกเปลี่ยนแก๊สและการรักษาบรรยากาศภายในที่เหมาะสม (Vakkalanka et al., 2012)

จากการศึกษาการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศในมะม่วงหลากหลายพันธุ์ พบว่าสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้สำเร็จ แต่จะแตกต่างกันไปตามพันธุ์มะม่วง อายุเก็บเกี่ยว ระยะสุกแก่ ชนิดของบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศที่ใช้ และสภาวะการเก็บรักษา จากการศึกษาของ Phakdee and Chaiprasart (2020) รายงานว่ามะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด WEB (ความหนา 47 μm , oxygen permeability เท่ากับ 3895.95 $\text{cc}^{-1}\text{m}^2\text{d}$, water permeability เท่ากับ 8.58 $\text{g}^{-1}\text{m}^2\text{d}$) รักษาคุณภาพผลด้านความแน่นเนื้อ ลดอัตราการหายใจและการสูญเสียน้ำหนักของผล รักษาปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ค่อนข้างคงที่ ชะลอการพัฒนาของสี และชะลอการสุกแก่ได้ดีกว่าถุง

ชนิดอื่น รวมถึงชุดควบคุม (ไมโครคอนโทรลเลอร์) ที่เก็บรักษาในสภาพบรรยากาศเย็น 13 °C ระยะเวลา 30 วัน ในขณะที่ชุดควบคุมมีอายุการเก็บรักษาได้เพียง 24 วัน นอกจากนี้ บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศมีอิทธิพลต่อกิจกรรมของเอนไซม์ pectin methyl esterase และ polygalacturonases ในเนื้อมะม่วงให้ลดลง ดังนั้น MAP นี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษาของมะม่วงในระหว่างการเก็บรักษาในอุณหภูมิเย็น

มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 กิโลเกรย์ ตามข้อกำหนดการส่งออกประเทศสหรัฐอเมริกา มีอายุการเก็บรักษาเพียง 7 วัน ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 32-35 °C และมีอายุการเก็บรักษานานขึ้นเป็น 12 วัน เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิเหมาะสมที่ 13-15 °C อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์นี้ยังคงแสดงให้เห็นว่าคุณภาพของมะม่วงที่ส่งออกจะลดลงเมื่อส่งขนส่งระยะทางไกล แม้จะผ่านกระบวนการฉายรังสีแล้วก็ตาม จึงต้องใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศมาแก้ปัญหาเหล่านี้ บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศชนิด WEB (ความหนา 47 μm , oxygen permeability เท่ากับ 3895.95 $\text{cc}^{-1}\text{m}^2\text{d}$, water permeability เท่ากับ 8.58 $\text{g}^{-1}\text{m}^2\text{d}$) สามารถชะลอกระบวนการสุกของมะม่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นระยะเวลา 24 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงที่ไม่ได้บรรจุ โดยส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพและเคมี รวมถึงลดอัตราการเกิดโรค ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคในวงกว้าง และสามารถเก็บรักษาในตู้คอนเทนเนอร์ควบคุมอุณหภูมิได้ปกติ นอกจากนี้ การใช้ถุงพลาสติกที่มีอัตราการส่งผ่านออกซิเจนสูง (high oxygen transmission rate) ส่งผลให้กระบวนการสุกของมะม่วงเกิดขึ้นเร็วขึ้น และเพิ่มอัตราการเน่าเสียระหว่างการเก็บรักษา (Wichitkunan, Sirijan, et al., 2023) มะม่วงถูกเก็บรักษาภายใต้สภาวะบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศที่มีสัดส่วนคาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 13 °C เพื่อศึกษาผลกระทบต่อคุณภาพของผล พบว่ามะม่วงที่เก็บรักษาภายใต้สภาวะกรรมวิธี C7 (7% CO_2 + 3% O_2 + 90% N_2) สามารถลดอัตราการหายใจ ยับยั้งการเพิ่มขึ้นของเอนไซม์ ACC synthase รักษาความแน่นของเนื้อผล ยับยั้งการเพิ่มขึ้นของเพกทินที่ละลายน้ำได้และปริมาณ malondialdehyde ช่วยลดการสูญเสียวิตามินซีตั้งแต่วันแรกจนถึงวันที่ 6 ของการเก็บรักษา จนทำให้สามารถชะลอกระบวนการเสื่อมสภาพของผลได้อย่างมีประสิทธิภาพในที่สุด อย่างไรก็ตาม การบรรจุภายใต้สภาวะที่มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า 3% ไม่สามารถรักษาคุณภาพของผลมะม่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุกกรรมวิธี ดังนั้น การใช้บรรจุภัณฑ์ MAP ที่มีสัดส่วน 7% CO_2 + 3% O_2 + 90% N_2 ส่งผลให้มะม่วงมีคุณภาพดีตลอดระยะเวลา 30 วัน ภายใต้อุณหภูมิต่ำ (Wei et al., 2021)

2.10 การตรวจสอบการแสดงออกของยีนด้วยวิธี Quantitative Realtime PCR

Realtime PCR หรือ quantitative PCR (qPCR) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอที่ต้องการศึกษาอย่างจำเพาะ และสามารถติดตามปริมาณการเพิ่มจำนวนของดีเอ็นเอเป้าหมายได้ใน

ทุก ๆ รอบของการเพิ่มจำนวนในขณะที่ปฏิกิริยากำลังดำเนินอยู่จนถึงสิ้นสุดกระบวนการ เทคนิคนี้ทำได้โดยอาศัยการตรวจวัดสัญญาณสารเรืองแสงที่ถูกปล่อยออกมา ปริมาณแสงที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณดีเอ็นเอที่เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาในแต่ละรอบ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอด้วยวิธี Realtime PCR สัญญาณของสารเรืองแสงก็จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณดีเอ็นเอที่เพิ่มขึ้น

Realtime PCR จะแตกต่างจาก conventional PCR เนื่องจากวิธีการธรรมดาไม่สามารถทราบปริมาณดีเอ็นเอที่เพิ่มขึ้นระหว่างขั้นตอนได้ นักวิจัยต้องมีการคำนวณหาในปริมาณที่เหมาะสม เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการเพิ่มจำนวนแล้วต้องทำขั้นตอน gel electrophoresis เพื่อตรวจสอบปริมาณและขนาดของดีเอ็นเอ โดยทั่วไปดีเอ็นเอที่เพิ่มจากการทำปฏิกิริยา PCR จะเพิ่มเป็นลักษณะกราฟรูปตัว S (sigmoid หรือ exponential curve) ในช่วงแรก product จะเพิ่มจำนวนทีละไม่มากนัก (lag phase) เมื่อมีจำนวนมากขึ้นถึงระดับหนึ่งจำนวน product จึงจะเพิ่มแบบทวีคูณอย่างรวดเร็ว (exponential phase) จนกระทั่งไม่มี polymerase หรือ nucleotides เหลืออยู่ ส่งผลให้ปริมาณดีเอ็นเอคงที่ (plateau phase) ข้อดีของการแสดงออกของยีนด้วยวิธี Realtime PCR คือ สามารถติดตามผลได้ขณะอยู่ในขั้นตอน ไม่มีขั้นตอนที่ยุ่งยากภายหลังกระบวนการ การทำงานต่อรอบเร็วกว่า PCR ธรรมดา สามารถตรวจยืนยันผลผลิตทันทีโดยการวิเคราะห์ melting point สามารถใช้ปริมาณ RNA น้อยมาก และค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบถูกกว่าวิธีเดิม (ยกเว้นค่าเครื่อง)

เทคนิค realtime PCR เหมาะกับการตรวจวัดดีเอ็นเอเชิงปริมาณ (quantitative analysis) เช่น วัดปริมาณเชื้อไวรัสในผู้ป่วย (viral load) ตัวอย่างเช่น ไวรัส HIV ที่ทำให้เกิดโรคเอดส์ หรือใช้ในการตรวจหาเชื้อไวรัสไข้หวัดใหญ่สายพันธุ์ใหม่ การวัดระดับการแสดงออกของยีน (gene expression) การขาดหายไป (deletion) หรือการเพิ่มเข้ามา (duplication) ของดีเอ็นเอ เป็นต้น (Gautam & Kumar, 2020) กระบวนการ PCR มักจะถูกลดประสิทธิภาพด้วยสารอินทรีย์ เช่น สารลดแรงตึงผิว โพลีฟีนอล โพลีแซ็กคาไรด์ โปรตีน และสารอนินทรีย์ เช่น ไอออนแคลเซียมและเกลือ ซึ่งอาจมีแหล่งกำเนิดมาจากส่วนประกอบของตัวอย่าง ถูกปนเปื้อนเข้ามาในระหว่างกระบวนการแปรรูปอาหาร หรือขั้นตอนการสกัด DNA/RNA โดยทั่วไป PCR มีความไวต่อสารยับยั้งเหล่านี้ ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพของ PCR ลดลง นอกจากนี้ สารยับยั้งยังอาจรบกวนการทำงานของโพรบเรืองแสงหรือเพิ่มระดับของฟลูออเรสเซนซ์ในเทคนิค Realtime PCR (Kang, 2019)

2.11 ยีนที่มีความเกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์และส่งสัญญาณรับรู้เอทิลินในผลไม้

กระบวนการสร้างเอทิลินในมะม่วงเป็นเสมือนสายพานการผลิตที่ต้องอาศัยยีนสองกลุ่มสำคัญทำงานต่อเนื่องกัน ได้แก่ ยีน *MiACS* (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthase) และ *MiACO* (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid oxidase) ซึ่งทำหน้าที่ประสานกันอย่าง

ใกล้ชิดเพื่อกำหนดปริมาณเอทิลีนที่ผลมะม่วงจะผลิตขึ้นในช่วงสุก *MiACS* เป็นยีนที่ควบคุมการทำงานของเอนไซม์ ACC synthase ซึ่งทำหน้าที่สังเคราะห์เริ่มต้นที่เรียกว่า ACC (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid) ถือเป็นขั้นตอนสำคัญช่วงต้นของเส้นทางสังเคราะห์เอทิลีน ส่วน *MiACO* เป็นยีนที่ควบคุมเอนไซม์ ACC oxidase ซึ่งรับหน้าที่ในขั้นตอนสุดท้าย คือเปลี่ยน ACC ให้กลายเป็นเอทิลีนอย่างสมบูรณ์ เมื่อผลมะม่วงเข้าสู่ระยะสุก ความแสดงออกของ *MiACS* มักเพิ่มขึ้นก่อน ส่งผลให้มีการสะสมของ ACC ในปริมาณมากขึ้น จากนั้น *MiACO* จะทำงานต่อเนื่องเพื่อเร่งให้ ACC ถูกเปลี่ยนเป็นเอทิลีนในระดับที่สูงขึ้น เอทิลีนที่เพิ่มขึ้นนี้จะไปกระตุ้นยีนอื่นๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีเปลือก การนิ่มของเนื้อ และการพัฒนากลิ่นรสตามธรรมชาติของผลมะม่วง ในทางกลับกัน หากการแสดงออกของ *MiACS* และ *MiACO* ถูกยับยั้งพร้อมกัน เช่น ในผลมะม่วงที่ได้รับการฉายรังสีหรือผ่านการรมด้วย 1-MCP ปริมาณ ACC จะไม่สูงขึ้น และแม้จะมี ACC อยู่บ้าง การเปลี่ยนเป็นเอทิลีนก็จะลดลง ผลมะม่วงจึงสุกช้าลง สีเหลืองพัฒนาอย่างช้า ๆ เนื้อแข็งตัวได้นานขึ้น และคุณภาพโดยรวมระหว่างการเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้น (Liu et al., 2024) กลไกการสังเคราะห์เอทิลีนแสดงอยู่ในภาพที่ 2

ยีน *MiETR1* เป็นหนึ่งในยีนที่สำคัญในมะม่วงและผลไม้เขตร้อนอื่น ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการรับรู้ฮอร์โมนเอทิลีน (ethylene) เป็นฮอร์โมนหลักที่ควบคุมกระบวนการสุกแก่ของผลไม้ โดย *MiETR1* ทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณเอทิลีน (ethylene receptor) ซึ่งเปรียบเสมือน “เสาสัญญาณ” ของเซลล์ผลไม้ที่คอยรับสัญญาณจากเอทิลีน เมื่อเอทิลีนจับกับ *MiETR1* ขบวนการถ่ายทอดสัญญาณภายในเซลล์จะถูกกระตุ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในการแสดงออกของยีนหลายชนิดที่เกี่ยวข้องกับการสุกแก่ *MiETR1* เป็นเหมือน “ประตูสื่อสารระหว่างเอทิลีนกับเซลล์ผลไม้” ประตูนี้มีหน้าที่สำคัญในการกำหนดจังหวะและความเข้มของการสุก เช่น การเปลี่ยนสีของผิว การนิ่มของเนื้อ การสลายแป้งเป็นน้ำตาล และการสังเคราะห์สาร กลิ่นรส เมื่อเอทิลีนจับกับ *MiETR1* ประตูจะเปิดให้สัญญาณผ่านไปยังโมเลกุลและเอนไซม์ที่ทำหน้าที่สลายผนังเซลล์และเปลี่ยนองค์ประกอบเคมีของเนื้อผลไม้ กระบวนการเหล่านี้ทำให้ผลไม้ค่อย ๆ เปลี่ยนจากผลดิบแข็งเป็นผลสุกนุ่ม มีกลิ่นหอม และรสหวานฉ่ำ บทบาทของ *MiETR1* จึงไม่ใช่เพียงการตรวจจับเอทิลีน แต่ยังเป็นผู้ควบคุมจังหวะชีวิตของผลไม้ โดยทำงานร่วมกับยีนอื่น ๆ เช่น *MiERS1* (ตัวรับสัญญาณเอทิลีนอีกชนิด) และ *MiACS* (เอนไซม์ที่สร้างเอทิลีน) เพื่อกำหนดว่าเมื่อใดผลไม้จะเริ่มสุก และความเร็วในการสุกจะเป็นอย่างไร เป็นกลไกสำคัญที่นักวิจัยมักศึกษาเมื่อประเมินผลของการจัดการหลังเก็บเกี่ยว เช่น การฉายรังสี การเก็บในอุณหภูมิต่ำ หรือการรม 1-MCP ที่ยับยั้งเอทิลีน (Li et al., 2020b)

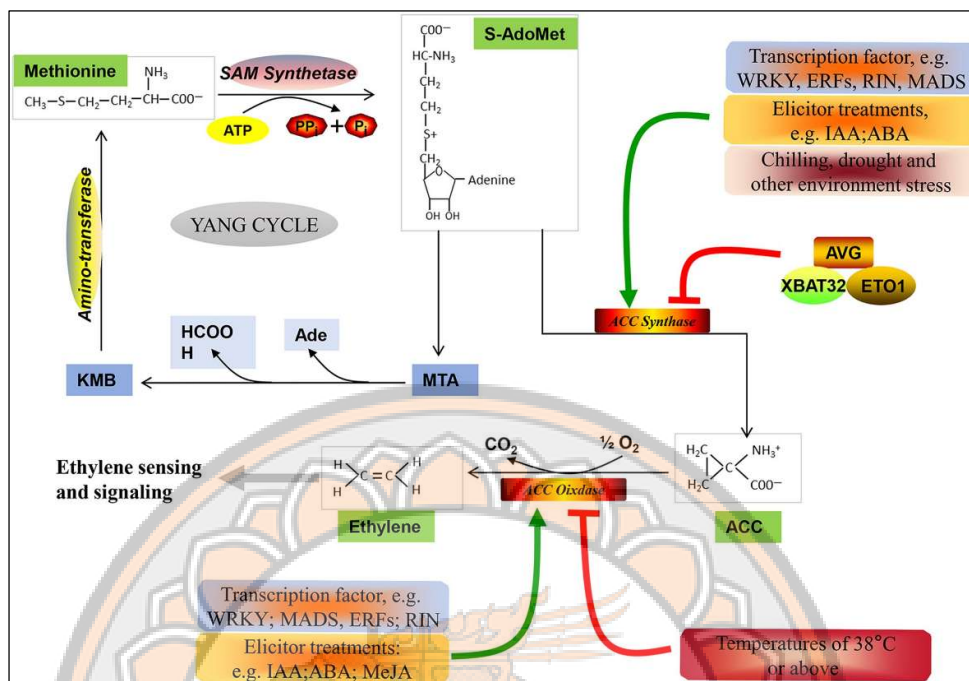
ยีน *MiERS1* เป็นหนึ่งในยีนที่เข้ารหัสตัวรับเอทิลีน (ethylene receptor) ของมะม่วงมีบทบาทสำคัญในกระบวนการสุกของผลไม้ประเภท climacteric การทำงานของยีนนี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับการรับรู้และถ่ายทอดสัญญาณเอทิลีน ซึ่งเป็นฮอร์โมนพืชหลักที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาในช่วงการสุกแก่ ผลิตภัณฑ์ของยีน *MiERS1* คือโปรตีน Ethylene Response Sensor

1 (ERS1) ซึ่งมักแปลเป็นโปรตีนที่ฝังตัวอยู่บนเยื่อหุ้มของเอนโดพลาสมิกเรติคูลัม (ER membrane) โปรตีนดังกล่าวทำหน้าที่เป็นโมเลกุลรับสัญญาณเบื้องต้น เมื่อระดับเอทิลีนในเนื้อผลไม้สูงขึ้นตามระยะของผลไม้ โปรตีน ERS1 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะและลดกิจกรรมการยับยั้งสัญญาณภายในเซลล์ ส่งผลให้เส้นทางการส่งสัญญาณเอทิลีน (ethylene signal transduction pathway) ถูกกระตุ้นอย่างเป็นลำดับขั้น ก่อให้เกิดการทำงานของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสุก เช่น ยีนที่เกี่ยวข้องกับการสลายผนังเซลล์ การสังเคราะห์สารระเหย การเปลี่ยนสี และการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของผลไม้ การแสดงออกของ *MiERS1* จึงเป็นตัวชี้วัดสำคัญของกระบวนการสุก ในแง่ของความสัมพันธ์เชิงหน้าที่ ยีน *MiERS1* มักทำงานสอดคล้องประสานกับยีนรับเอทิลีนอื่น เช่น *MiETR1* เพื่อสร้างเครือข่ายการควบคุมที่มีความยืดหยุ่นและความแม่นยำสูง การทำงานแบบร่วมกันนี้ช่วยให้ผลมะม่วงตอบสนองต่อเอทิลีนอย่างเหมาะสมและควบคุมกระบวนการสุกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในสภาพที่ผลมะม่วงยังไม่เริ่มสุก ระดับเอทิลีนในเนื้อผลยังต่ำมาก โปรตีน ERS1 จะอยู่ในรูปแบบ active receptor ซึ่งทำหน้าที่ยับยั้งสัญญาณการสุก

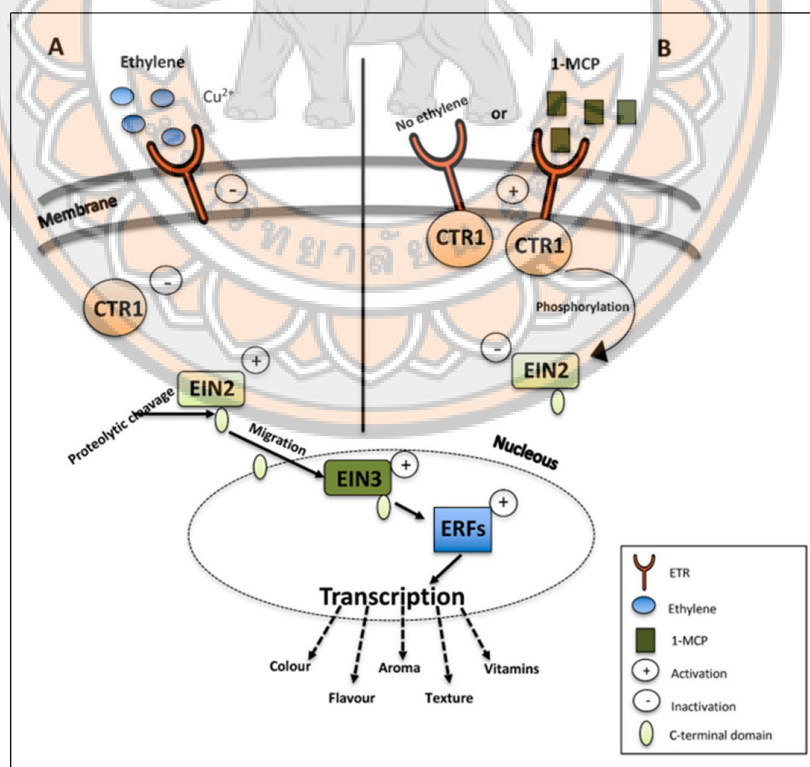
- ERS1 กระตุ้นโปรตีน CTR1 (Constitutive Triple Response 1)
- CTR1 ทำงานเป็น “ตัวกด” ไม่ให้ส่งสัญญาณเอทิลีนส่งไปยังนิวเคลียส

ส่งผลให้ยีน downstream ที่เกี่ยวข้องกับการสุก เช่น ยีนสลายผนังเซลล์ ยีนสร้างสารระเหย หรือยีนสังเคราะห์เอนไซม์ตัดแปลงผนังเซลล์ ยังไม่ถูกกระตุ้น ในทางตรงกันข้าม เมื่อผลมะม่วงเริ่มเข้าสู่ระยะ climacteric การผลิตเอทิลีนภายในผลจะเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เอทิลีนจับเข้ากับโปรตีน ERS1 การจับของเอทิลีนทำให้ ERS1 เปลี่ยนสถานะจาก active → inactive, CTR1 ถูกยกเลิกการกระตุ้น (CTR1 inactive) การยับยั้งสัญญาณถูกยกเลิก กระบวนการสุกเริ่มทำงานทันที ส่งผลให้โปรตีน CTR1 ซึ่งเป็นโคเนสที่ทำหน้าที่ยับยั้งสัญญาณเอทิลีนหมดสภาพการทำงานไปโดยปริยาย การยกเลิกการทำงานของ CTR1 ทำให้โปรตีน EIN2 (Ethylene Insensitive 2) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในเส้นทางการส่งสัญญาณสามารถถูกกระตุ้นได้อย่างเต็มที่ ส่วนปลายของโปรตีน EIN2 จะถูกตัดและเคลื่อนเข้าสู่ นิวเคลียส ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการกระตุ้นปัจจัยการถอดรหัสกลุ่ม EIN3 (Ethylene Insensitive 3) /EILs (EIN3-Like proteins) ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการแสดงออกของยีนเร่งการสุก (Li et al., 2020b) กลไกการส่งสัญญาณรับรู้เอทิลีนแสดงอยู่ในภาพที่ 3

กระบวนการทั้งหมดนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการสุกของมะม่วง ได้แก่ เนื้อผลอ่อนนุ่ม เพิ่มปริมาณน้ำตาล ลดกรดอินทรีย์ เพิ่มสารระเหยให้กลิ่นเฉพาะตัว ผิวผลเปลี่ยนเป็นสีเหลือง การย่อยสลายคลอโรฟิลล์ และสร้างแคโรทีนอยด์



ภาพ 2 กระบวนการสังเคราะห์เอทิลีนในผลไม้ (Liu et al., 2024)



ภาพ 3 กระบวนการส่งสัญญาณรับรู้เอทิลีนในผลไม้ รูป A เมื่อเอทิลีนจับกับตัวรับ (ethylene receptors), รูป B ในกรณีที่ไม่มีเอทิลีนจับกับตัวรับ (Dias et al., 2021)

2.12 กระบวนการสุกแก่ในมะม่วงภายหลังการเก็บเกี่ยว

จากการศึกษาของ Liu et al. (2022) ได้ศึกษากระบวนการสุกของผลมะม่วงภายหลังการเก็บเกี่ยว ไว้ดังนี้

2.12.1 การเพิ่มขึ้นของเอทิลีน

มะม่วงเป็นผลไม้ที่มีการผลิตเอทิลีนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสุก การผลิตเอทิลีนไม่ได้เกิดขึ้นแบบฉับพลัน แต่เป็นกระบวนการที่ค่อย ๆ เพิ่มความเข้มข้นตามพัฒนาการของผล กระบวนการสุกของมะม่วงเริ่มต้นจากการเพิ่มขึ้นของการผลิตฮอร์โมนเอทิลีน ซึ่งเป็นตัวควบคุมหลักของผลไม้กลุ่ม climacteric อย่างมะม่วง การสังเคราะห์เอทิลีนเกิดผ่านเส้นทาง Yang cycle โดยเริ่มจากเมไทโอนีนถูกเปลี่ยนเป็น SAM (S-adenosylmethionine) จากนั้น *MeACS* จะควบคุมเอนไซม์ ACC synthase เพื่อผลิตสาร ACC ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำคัญของเอทิลีน ในขั้นตอนสุดท้าย *MeACO* จะควบคุมเอนไซม์ ACC oxidase เพื่อเปลี่ยน ACC ให้เป็นเอทิลีนอย่างสมบูรณ์ เมื่อมะม่วงเริ่มผลิตเอทิลีนสูงขึ้น การส่งสัญญาณเกี่ยวกับการสุกจะเริ่มทำงานอย่างเป็นระบบผ่านตัวรับเอทิลีน เช่น *MeETR1* และ *MeERS1* ก่อนกระตุ้นยีนอื่น ๆ ให้ทำงานร่วมกันจนผลเริ่มเปลี่ยนสภาพอย่างชัดเจน

ในช่วงที่มีการผลิตเอทิลีนสูงขึ้น (climacteric rise) กิจกรรมของเอนไซม์ ACS เพิ่มขึ้น ทำให้ระดับ ACC ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทิลีนสะสมมากขึ้น จากนั้นเอนไซม์ ACO จะเร่งการเปลี่ยน ACC ให้เป็นเอทิลีน ทำให้ระดับเอทิลีนในเนื้อผลสูงขึ้นอย่างก้าวกระโดด เอทิลีนที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่เพียงแต่ถูกสร้างภายในเซลล์เท่านั้น แต่ยังสามารถแพร่กระจายไปกระตุ้นเซลล์ข้างเคียง ทำให้เกิดการตอบสนองในวงกว้างทั่วทั้งผล เอทิลีนที่เริ่มถูกผลิตขึ้นจะไปกระตุ้นให้ยีนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเอทิลีนชุดเดียวกันทำงานมากขึ้นอีก จึงเกิดเป็นวงจรเร่งการผลิตเอทิลีนอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ผลมะม่วงเข้าสู่กระบวนการสุกเต็มที่เพียงในเวลาไม่นานหลังจากจุดเริ่มต้นของกระบวนการนี้

2.12.2 การเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจ

เมื่อการผลิตเอทิลีนเพิ่มขึ้น อัตราการหายใจของมะม่วงจะสูงขึ้นตามและเข้าสู่ช่วงที่เรียกว่า climacteric peak ซึ่งเป็นช่วงที่ผลมะม่วงต้องการพลังงานสูงสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการสุกทั้งหมด การหายใจที่เพิ่มขึ้นทำให้ผลใช้คาร์โบไฮเดรตมากขึ้น เกิดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูงและเปลี่ยนสมดุลพลังงานในเซลล์ สารประกอบอินทรีย์ในผลจะถูกออกซิไดซ์และย่อยสลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ พร้อมทั้งปล่อยพลังงานจำนวนมากออกมา กระบวนการนี้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัส สี และคุณสมบัติทางชีวเคมีอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการสุกของผลมะม่วง

2.12.3 การเปลี่ยนสีของเปลือกและเนื้อผล

ระหว่างการสุก มะม่วงจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลือง เนื่องจากการสลายตัวของคลอโรฟิลล์และการสะสมของแคโรทีนอยด์ในผิวและเนื้อผล การสลายคลอโรฟิลล์ถูกควบคุมโดยเอนไซม์อย่าง chlorophyllase, peroxidase และ pheophytinase ในขณะเดียวกัน การสังเคราะห์แคโรทีนอยด์เกิดจากยีนที่เกี่ยวข้อง เช่น phytoene synthase; *PSY* และ phytoene desaturase; *PDS* ทำให้ผลมีความเข้มของสีมากขึ้นตามความสุก การเปลี่ยนแปลงนี้สามารถประเมินได้จากค่า L^* , a^* , b^* , hue angle (h°) และ chroma (C^*) โดย hue angle จะลดลงเมื่อผลเหลือง และ chroma จะเพิ่มขึ้นเมื่อความสดของสีเพิ่มขึ้น

2.12.4 การนิ่มของเนื้อผล

หนึ่งในลักษณะเด่นที่สังเกตได้ชัดคือการนิ่มตัวของเนื้อผล ซึ่งเกิดจากการสลายผนังเซลล์และ middle lamella โดยเอนไซม์หลายชนิดที่ถูกกระตุ้นโดยเอทิลีน เช่น polygalacturonase, pectin methylesterase, β -galactosidase และ expansin เอนไซม์เหล่านี้ทำให้โครงสร้างเพกทินและเซลลูโลสถูกย่อยสลาย เนื้อจึงนิ่มลงในระหว่างการสุก ยีนที่เกี่ยวข้อง เช่น *MIpG* และ *MIEXP1* มีบทบาทสำคัญในขั้นตอนนี้ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดคุณภาพในด้านความพร้อมบริโภคของผลมะม่วง

2.12.5 การเปลี่ยนแปลงด้านองค์ประกอบทางเคมี

ในระหว่างการสุก มะม่วงมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ (TSS) เนื่องจากการย่อยแบ่งและการสะสมของน้ำตาลอย่างซูโครส กลูโคส และฟรุกโตส พร้อมทั้งมีการลดลงของปริมาณกรด (titratable acidity) โดยเฉพาะกรดซิตริกและกรดมาลิก ทำให้ผลมีรสหวานมากขึ้นแม้ว่าปริมาณน้ำตาลอาจไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก น้ำตาลที่ละลายน้ำได้ในผลไม้สุกประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด ได้แก่ ไซโลส มอลโทส กลูโคส ฟรุกโตส และซูโครส การเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลละลายน้ำในระหว่างการสุกหลังการเก็บเกี่ยวมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับเมแทบอลิซึมของน้ำตาล ซึ่งรวมถึงการย่อยแบ่ง (hydrolysis of starch) การสะสมน้ำตาลไมรีดิวิซ์ (nonreducing sugars) และการสลายน้ำตาลชนิดไมรีดิวิซ์ให้กลายเป็นน้ำตาลรีดิวิซ์ (reducing sugars) การเปลี่ยนแปลงน้ำตาลในมะม่วงถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงของกิจกรรมเอนไซม์สำคัญหลายชนิดที่เป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา จากการศึกษาค้นพบว่าเอนไซม์ sucrose phosphate synthase มีการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมมากถึงสิบเท่าในช่วงที่มีการสะสมซูโครสอย่างรวดเร็วในมะม่วง ในขณะที่กิจกรรมของ acid invertase เพิ่มขึ้นมากในระยะเริ่มต้นของการสุก และลดลงอย่างมากในระยะหลังของการสุกหลังการเก็บเกี่ยว กิจกรรมของเอนไซม์ fructose-1,6-bisphosphatase เพิ่มขึ้นตามระดับความสุก

สมบูรณ์ของผล นอกจากนี้กิจกรรมของเอนไซม์ในกระบวนการไกลโคไลซิส เช่น hexokinase จะมีกิจกรรมสูงสุดในระยะ climacteric ซึ่งเป็นช่วงที่ผลไม่มีการหายใจสูงสุด

นอกจากนี้ มะม่วงยังสร้างสารระเหย (volatile compounds) เช่น lactones, terpenes และ esters ซึ่งเป็นตัวกำหนดกลิ่นหอมเฉพาะของผลสุก มะม่วงเป็นผลไม้ที่มีกลิ่นหอมโดดเด่น โดยมีสารหอมระเหยมากกว่า 270 ชนิด เช่น เทอร์พีนอยด์ เอสเทอร์ และคีโตน สารประกอบที่มีบทบาทสำคัญต่อกลิ่นหอมของมะม่วง ได้แก่ α -pinene, terpinene, 3-carene, cis- β -ocimene, limonene, benzaldehyde, dimethylstyryl, ethyl acetate, α -humulene, β -serine, acetophenone และสารประกอบอื่น ๆ สารระเหยที่ให้กลิ่นเหล่านี้ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากกรดอะมิโน ไชมันและคาร์โบไฮเดรต ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้น ผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึมของกรดอะมิโน กรดไขมัน แคโรทีนอยด์ และไอโซพรีนอยด์ ภายใต้การเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ กระบวนการเหล่านี้เกิดขึ้นภายใต้การควบคุมของเอทิลีนและยีนในเครือข่ายเกี่ยวข้องกับการสุกทั้งหมด



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ผลของรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ที่มีต่อคุณภาพของผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิเย็น

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของรังสีชนิดก่อกำเนิดไอออนที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ รังสีแกมมา และรังสีเอกซ์ ต่อคุณภาพของผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการเก็บรักษา ผลที่คาดว่าจะได้รับภายหลังการทดลองแล้วเสร็จ คือ การฉายรังสีชนิดก่อกำเนิดไอออนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางเคมีของผลในระหว่างการเก็บรักษา เริ่มจากเก็บเกี่ยวมะม่วงจากสวนที่ได้รับมาตรฐานการปฏิบัติทางการเกษตรที่ดี (Good Agricultural Practice; GAP) คัดเลือกมะม่วงที่มีความสม่ำเสมอด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy (NIR) แบบไม่ทำลาย ตัวอย่าง (Wichitkunanan, Phakdee, et al., 2023) ที่ระยะสุกแก่ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในช่วง 9-12 %Brix ที่ความแน่นยำ 96 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นนำไปล้างทำความสะอาดด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 200 mg L^{-1} และจุ่มด้วยสารละลายอะซอกซิสโตรบิน (azoxystrobin) ความเข้มข้น 500 mg L^{-1} ที่อุณหภูมิ $47-52^{\circ}\text{C}$ นาน 5 นาทีเพื่อป้องกันกำจัดโรคหลังการเก็บเกี่ยว ปล่อยให้แห้งจนสนิท สวมผลมะม่วงด้วยตาข่ายโพลีเอทิลีนชนิดเดียวกับการส่งออก และบรรจุลงในกล่องลูกฟูกขนาด $35 \times 49 \times 11$ เซนติเมตร จำนวน 12-14 ผลต่อกล่อง น้ำหนักรวมสุทธิ 5 กิโลกรัม (ขนาดมาตรฐานส่งออก)

จากนั้น ฉายรังสีแกมมาจากแหล่งกัมมันตรังสีโคบอลต์-60 ที่ระดับพลังงาน 1.25 MeV (Carrier JS 8900 IR-155, Nordion International, Canada) และรังสีเอกซ์ที่ผลิตได้จากเครื่องเร่งอนุภาคระดับพลังงานที่สูง 5 MeV (MB5-50, Mevex, Canada) แก่มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเครื่องมือวัดปริมาณรังสี FWT-70-83M Opti-chromic dosimeters (Far West Technology, USA) และ alanine dosimeter (Aérial CRT, France) ถูกติดตั้งที่ด้านบนและด้านล่างของกล่อง และบนผิวของมะม่วงจำนวน 20 ผล เพื่อใช้ในการวัดปริมาณรังสีที่ดูดซึมจากการฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ตามลำดับ

ปริมาณรังสีดูดกลืนถูกประเมินด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี (spectrophotometry) สำหรับรังสีแกมมา และเครื่องมือ EPR spectrometer optic reader (Aérial CRT, France) สำหรับการวัดปริมาณรังสีดูดกลืนในกรณีรังสีเอกซ์ ตามปริมาณข้อกำหนดการส่งออกผลไม้สดไปยังประเทศสหรัฐอเมริกา 0.4 กิโลเกรย์ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) ดำเนินการฉายรังสี ณ สถาบัน

เทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี ภายหลังการฉายรังสีน้ำกล่อมะม่วงมาเก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85 ± 2 เปอร์เซ็นต์ ณ ห้องควบคุมอุณหภูมิ คณะเกษตรศาสตร์ ฯ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก

การทดลองทั้งหมดวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design) ใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS version 22 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ประกอบด้วย 3 กรรมวิธี ดังนี้

กรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี)

กรรมวิธีที่ 2 ฉายรังสีแกมมา

กรรมวิธีที่ 3 ฉายรังสีเอกซ์

บันทึกผลการทดลองทุก ๆ 3 วัน จนกว่าผลมะม่วงจะหมดสภาพ (เหี่ยว/เกิดโรคหลังการเก็บเกี่ยวในระดับรุนแรง/สุกเนื้อมีละ) ทั้งนี้ จะบันทึกข้อมูลเป็นไปตามรายละเอียด ดังนี้

- 1) **การสูญเสียน้ำหนัก** ผลมะม่วงบางส่วนจะแยกออกมาจากกลุ่มตัวอย่างเพื่อเป็นตัวแทน มะม่วงแต่ละผลจะชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งดิจิทัล (SUPER SS weighing scales, 3S-6K; Thai Scale Co., Ltd., Thailand) บันทึกน้ำหนักตั้งแต่วันแรกจนไปถึงวันสุดท้ายของการเก็บรักษา จากนั้นคำนวณการสูญเสียน้ำหนักของผลมะม่วงโดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น และแสดงผลในรูปเปอร์เซ็นต์ (Barman et al., 2011)
- 2) **ค่าความแน่นเนื้อของผล** ตรวจวัดโดยใช้เครื่องทดสอบแรง EZ-LX HS (Shimadzu Corporation, Japan) ซึ่งติดตั้งหัววัดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร โดยทดสอบที่ความเร็ว 0.25 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็นระยะทาง 10 มิลลิเมตร และแสดงผลในหน่วยนิวตัน (N) ในการทดสอบ มะม่วงแต่ละผลจะนำมาวางไว้ใต้หัววัด บันทึกค่าความแน่นเนื้อสูงสุดที่วัดได้ (Vázquez-Celestino et al., 2016)
- 3) **ค่าสีเนื้อ/สีเปลือก** ค่าสีของผลมะม่วงประเมินโดยใช้เครื่องวัดสีรุ่น CR-20 (Color Reader) (Minolta Konica, Japan) โดยวัดบริเวณส่วนกลางของผลมะม่วงแต่ละผลตำแหน่งละ 2 จุด บันทึกค่าพารามิเตอร์สี ได้แก่ L^* (ความสว่าง), a^* (ระดับสีแดง), และ b^* (ระดับสีเหลือง)
- 4) **ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดไทเทรตได้** ตัวอย่างเนื้อมะม่วงบดด้วยเครื่องปั่นแบบแยกกาก นำน้ำมะม่วงปริมาณ 1 มิลลิลิตร มาใช้ในการวัดค่าของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Soluble Solids; TSS) โดยใช้เครื่อง pocket refractometer PAL-1 (ATAGO, Japan) และแสดงผลเป็นค่า %Brix ปริมาณกรดไทเทรตได้ (Titratable Acidity; TA) ถูกวัดโดยใช้เครื่อง

ไทเทรต EasyPlus Titrator (Mettler Toledo, USA) โดยนำตัวอย่างน้ำมะม่วงปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำกลั่น 38 มิลลิลิตร และทำการไทเทรตจนถึง pH 8.1 ด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 N ผลลัพธ์แสดงเป็นค่าร้อยละของกรดซิตริกเทียบกับค่ามาตรฐาน จากนั้นคำนวณอัตราส่วน TSS/TA เพื่อใช้ในการประเมินสมดุลรสชาติของมะม่วง

5) อัตราการหายใจ ตรวจสอบด้วยวิธีที่รายงานโดย Jongsri et al. (2016) แสดงผลในหน่วย $\text{mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ โดยนำผลมะม่วงแต่ละผลใส่ในภาชนะพลาสติกที่มีความจุ 1.85 ลิตร ปิดผนึกอย่างแน่นหนาด้วยยางซิลิโคน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 27 °C จากนั้นใช้กระบอกฉีดยาปริมาตร 1 มิลลิลิตร ดูดแก๊สตัวอย่างภายในภาชนะออกมาเพื่อตรวจวัดปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากผล โดยใช้เครื่อง GC-8A gas chromatograph (Shimadzu, Japan) ด้วยระบบตรวจจับการนำความร้อน (Thermal Conductivity Detector, TCD) การแยก CO_2 ด้วยคอลัมน์ Porapak Q (ขนาดอนุภาค 50/80 mesh) ที่มีความยาว 2 เมตร ทำจากสแตนเลส อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบใน injection และ detector ที่ระดับ 140 °C ควบคุมอุณหภูมิภายในคอลัมน์ที่ 50 °C ตลอดระยะเวลา นอกจากนี้ ดำเนินการปรับเทียบเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้แก๊สมาตรฐานที่ประกอบด้วย 15% CO_2 , 7% carbon monoxide; CO และ 5% oxygen; O_2 และแก๊สไนโตรเจนเป็นตัวปรับสมดุล

6) การผลิตเอทิลีน ตรวจวัดโดยนำผลบรรจุในภาชนะพลาสติกที่มีความจุ 1.85 ลิตร ซึ่งถูกปิดผนึกอย่างแน่นหนาด้วยซิลิโคน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 27 °C จากนั้น ใช้กระบอกฉีดยาดูดแก๊สตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากภายในภาชนะพลาสติก เพื่อตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สเอทิลีน ปริมาณเอทิลีนวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง GC-2014 gas chromatograph (Shimadzu, Japan) ซึ่งติดตั้งเครื่องตรวจจับไอออนด้วยระบบ Flame Ionization Detector; FID ร่วมกับคอลัมน์ Porapak Q (80/100 mesh) ขนาด 2 เมตร $\times$ 3.17 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 มม. ทำจากสแตนเลส อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ เป็นดังนี้

- Injection ที่อุณหภูมิ 110 °C, total flow ที่ 25 mL/min
- Column ที่อุณหภูมิ 80 °C, equilibration time ที่ 1 min
- Detector ที่อุณหภูมิ 180 °C, sampling rate ที่ 40 msec

การปรับเทียบเครื่องมือดำเนินการโดยใช้แก๊สเอทิลีนมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 100 mg L^{-1} แสดงผลลัพธ์ในหน่วย $\mu\text{L kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (Barman et al., 2011)

7) อัตราการเกิดโรค อาการเกิดโรคตรวจสอบตามวิธีของ Hadthamard et al. (2019) โดยคำนวณอัตราการเกิดอาการโรคแอนแทรกโนสในมะม่วง (หากมีพื้นที่เกิดโรคมากกว่า 5% ของพื้นที่ผลทั้งหมด จะถูกนับว่าเกิดโรค) จากจำนวนผลที่เป็นโรคทั้งหมดเปรียบเทียบกับจำนวนผลมะม่วง

ทั้งหมดในแต่ละกรรมวิธีการทดลองในแต่ละวัน เริ่มจากจุดสีน้ำตาลเข้มหรือดำ ขนาดเล็ก (pinpoint) กระจายบนผิวผล และจะขยายใหญ่เมื่อผลสุก แผลบ่มหรือจมเข้าไป เมื่อโรครุนแรง จุดดำจะขยายเป็นแผลบ่ม เนื้อบริเวณนั้นนิ่มเร็ว และอาจเกิดเป็นวงไม่สม่ำเสมอ

เนื่องจากโรคแอนแทรคโนสในมะม่วง ซึ่งเป็นโรคที่แพร่ระบาดทั่วโลกและสร้างความเสียหายอย่างรุนแรงต่อมะม่วงทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว โรคนี้ส่งผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของต้นมะม่วงที่ติดเชื้อ ทำให้ผลผลิตและคุณภาพของผลไม้ลดลงอย่างมาก (Dofuor et al., 2023)

- 8) การประเมินทางประสาทสัมผัส ดำเนินการตามวิธีที่ดัดแปลงของ Mandha et al. (2022) โดยใช้ผู้ประเมินที่ไม่ผ่านการฝึกอบรมจำนวน 10-20 คน ประกอบด้วยทั้งเพศชายและหญิงในจำนวนที่เท่ากัน โดยแจ้งข้อมูลเกี่ยวกับคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่เกี่ยวข้องเพียงเล็กน้อยก่อนทำการทดสอบ เนื้อมะม่วงแต่ละตัวอย่างถูกตัดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาด 1-2 ลูกบาศก์เซนติเมตร อย่างสม่ำเสมอและวางบนจานกระดาษ ตัวอย่างถูกสุ่มกำหนดรหัสก่อนประเมินและให้ผู้ประเมินเพื่อประเมินลักษณะภายนอก สี กลิ่น รสชาติ และความพึงพอใจโดยรวม ผู้ประเมินใช้ระบบให้คะแนนแบบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) โดยระดับคะแนน 9 = ชอบมากที่สุด ไปจนถึง 1 = ไม่ชอบมากที่สุด การประเมินทั้งหมดดำเนินการในห้องแยกเฉพาะจากห้องปฏิบัติการ

3.2 อิทธิพลของการใช้สาร 1-Methylcyclopropene (1-MCP) ที่มีต่อคุณภาพผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายหลังการฉายรังสีแกมมาเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิเย็น

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการยืดอายุการเก็บรักษาของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองจากการรมด้วย 1-MCP ร่วมกับการฉายรังสี เพื่อประเมินผลกระทบที่เกิดจากการรมด้วย 1-MCP ภายหลังการฉายรังสีแกมมา และความสัมพันธ์กับความสามารถในการยืดอายุการเก็บรักษาของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองได้นานกว่าชุดควบคุม (ไม่รมสาร) การทดลองเริ่มจากเก็บเกี่ยวมะม่วงจากสวนที่ได้รับมาตรฐานการปฏิบัติทางการเกษตรที่ดี (Good Agricultural Practice; GAP) คัดเลือกมะม่วงที่มีความสม่ำเสมอด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy (NIR) แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Wichitkunan, Phakdee, et al., 2023) ที่ระยะสุกแก่ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้อยู่ในช่วงระหว่าง 9-12 %Brix ที่ความแน่นยำ 96 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นนำไปล้างทำความสะอาดด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 200 mg L^{-1} และจุ่มด้วยสารละลายอะซอกซิสโตรบิน (azoxystrobin) ความเข้มข้น 500 mg L^{-1} ที่อุณหภูมิ $47-52^\circ \text{C}$ นาน 5 นาที เพื่อป้องกันกำจัดโรคหลังการเก็บเกี่ยว ผึ่งให้แห้งจนสนิท สวมผลมะม่วงด้วยตาข่ายโฟมชนิดเดียวกับการส่งออกและบรรจุลงในกล่องลูกฟูกขนาด $35 \times 49 \times 11$ เซนติเมตร จำนวน 12-14 ผลต่อกล่อง น้ำหนักรวมสุทธิ 5 กิโลกรัม (ขนาดมาตรฐานส่งออก)

ฉายรังสีแกมมาแก้มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองตามปริมาณข้อกำหนดการส่งออกผลไม้สดไปยังประเทศสหรัฐอเมริกา 0.4 กิโลเกรย์ **เช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.1** ดำเนินการ ณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี

ภายหลังการฉายรังสีมะม่วงจะได้รับการรมด้วย 1-MCP (0.19% tablet, BioLene Co., Ltd., China) ความเข้มข้น 500 และ 1,000 ppb ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 25 ± 1 °C เป็นระยะเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง ภายในภาชนะปิดสนิท โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 5 กรรมวิธี ได้แก่ กลุ่มควบคุม (ไม่การรม), T1: 1-MCP 500 ppb เป็นเวลา 12 ชั่วโมง, T2: 1-MCP 500 ppb เป็นเวลา 24 ชั่วโมง, T3: 1-MCP 1,000 ppb เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และ T4: 1-MCP 1,000 ppb เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากเสร็จสิ้นการรมด้วย 1-MCP นำมะม่วงออกจากภาชนะปิด จากนั้นบรรจุลงในกล่องกระดาษลูกฟูก เก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85 ± 2 เปอร์เซ็นต์ ณ ห้องควบคุมอุณหภูมิ คณะเกษตรศาสตร์ ฯ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก

การทดลองทั้งหมดวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design) ใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS version 22 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% บันทึกผลการทดลองทุก ๆ 3 วัน จนกว่าผลมะม่วงจะหมดสภาพ (เหี่ยว/เกิดโรคหลังการเก็บเกี่ยวในระดับรุนแรง/สุกเนื้อมีและ) วิเคราะห์คุณภาพในระหว่างเก็บรักษา **เช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.1**

3.3 อิทธิพลของการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศก่อนการฉายรังสีแกมมาที่มีต่อคุณภาพผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายใต้อุณหภูมิเย็น

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงด้วยวิธีเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ ผลที่คาดว่าจะได้รับภายหลังการทดลองแล้วเสร็จ คือ การใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศก่อนการฉายรังสีแกมมาสามารถยืดอายุการเก็บรักษาของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองได้ดีกว่าชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) และยังมีคุณภาพดีเมื่อเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลานาน เริ่มการทดลองจากเก็บเกี่ยวมะม่วงจากสวนที่ได้รับมาตรฐานการปฏิบัติทางการเกษตรที่ดี (Good Agricultural Practice; GAP) คัดเลือกมะม่วงที่มีความสม่ำเสมอด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy (NIR) แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Wichitkunan, Sirijan, et al., 2023) ที่ระยะสุกแก่ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้อยู่ในช่วงระหว่าง 9-12 %Brix ที่ความแน่นยำ 96 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นนำไปล้างทำความสะอาดด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 200 mg L^{-1} และจุ่มด้วยสารละลายอะซอกซิสโตรบิน (azoxystrobin) ความเข้มข้น 500 mg L^{-1} ที่อุณหภูมิ $47-52$ °C นาน 5 นาที เพื่อป้องกันกำจัดโรคหลังการเก็บเกี่ยว ผึ่งให้แห้งจนสนิท สวมผลมะม่วงด้วย

ตาข่ายโพลีเอทิลีนเดียวกับการส่งออก บรรจุผลมะม่วงลงในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันดังที่แสดงในตารางที่ 11

ตาราง 11 คุณสมบัติบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศที่แตกต่างกัน 4 ชนิด

Properties	WEB1	WEB2	MAP1	MAP2
OTR (cc/m ² /day)	3,895	9,000 – 10,000	85,000 – 90,000	40,000 – 45,000
WTR (g/m ² /day)	8.58	27 – 31	none	none
Plastic type	polyethylene	polyethylene	polypropylene	polypropylene
Penetration distance (cm)	-	-	15	15
Thickness (μm)	20	25 – 30	30 – 35	30 – 35

OTR = oxygen transmission rate, WTR = water vapor transmission rate, WEB1 = White Ethylene-absorbing Bag 1, WEB2 = White Ethylene-absorbing Bag 2, MAP1 = Modified Atmosphere Packaging 1, MAP2 = Modified Atmosphere Packaging 2

จากนั้นบรรจุลงในกล่องลูกฟูกขนาด 35x49x11 เซนติเมตร จำนวน 12-14 ผลต่อกล่อง น้ำหนักรวมสุทธิ 5 กิโลกรัม (ขนาดมาตรฐานส่งออก) ฉายรังสีแกมมาแก๊สมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองตามปริมาณข้อกำหนดการส่งออกผลไม้สดไปยังประเทศสหรัฐอเมริกา 0.4 กิโลเกรย์ **เช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.1** ดำเนินการ ณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี ภายหลังการฉายรังสีนำมาเก็บรักษาในห้องควบคุมอุณหภูมิ 13±2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85±2 เปอร์เซ็นต์ ณ ห้องควบคุมอุณหภูมิ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก เพื่อจำลองการส่งออกทางเรือในระยะทางไกล เป็นเวลา 15 วัน ก่อนนำมะม่วงออกจากถุงที่บรรจุไว้ และเก็บรักษาต่อในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส จนหมดสภาพวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design) ใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS version 22 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ประกอบด้วย 5 กรรมวิธี ดังนี้

กรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุม (ไม่ใส่ถุง)

กรรมวิธีที่ 2 บรรจุถุงชนิด WEB1

กรรมวิธีที่ 3 บรรจุถุงชนิด WEB2

กรรมวิธีที่ 4 บรรจุถุงชนิด MAP1

กรรมวิธีที่ 5 บรรจุถุงชนิด MAP2

บันทึกผลการทดลองทุก ๆ 3 วัน จนกว่าผลมะม่วงจะหมดสภาพ (เหี่ยว/เกิดโรคหลังการเก็บเกี่ยวในระดับรุนแรง/สุกเน่ามีมละ) โดยจะบันทึกข้อมูลต่าง ๆ **เช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.1**

3.4 ระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสุกแก่ในผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายหลังฉายการรังสีแกมมาในระหว่างเก็บรักษาด้วยเทคนิค Quantitative Realtime-PCR

ศึกษาการแสดงออกของยีน ได้แก่ *MiACS*, *MiETR1* และ *MiERS1* ที่เกี่ยวข้องับกระบวนการสังเคราะห์และส่งสัญญาณเอทิลีนระดับโมเลกุลในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองก่อนและหลังการฉายรังสี คาดว่าภายหลังการฉายรังสีชนิดก่อกำเนิดด้วยรังสีแกมมา ระดับการแสดงออกของยีนทั้งสามชนิดจะเปลี่ยนแปลงไป การผลิตเอทิลีนและอัตราการหายใจลดลง ส่งผลให้มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองชะลอการสุกแก่ได้ดีกว่าผลไม่ฉายรังสี

การทดลองเริ่มจากเก็บเกี่ยวมะม่วงจากสวนที่ได้รับมาตรฐานการปฏิบัติทางการเกษตรที่ดี (Good Agricultural Practice; GAP) คัดเลือกมะม่วงที่มีความสม่ำเสมอด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy (NIR) แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Wichitkunanan, Phakdee, et al., 2023) ที่ระยะสุกแก่ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้อยู่ในช่วงระหว่าง 9-12 %Brix ที่ความแน่นยำ 96 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นนำไปล้างทำความสะอาดด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 200 mg L⁻¹ และจุ่มด้วยสารละลายอะซอกซิสโตรบิน (azoxystrobin) ความเข้มข้น 500 mg L⁻¹ ที่อุณหภูมิ 47-52 °C นาน 5 นาที เพื่อป้องกันกำจัดโรคหลังการเก็บเกี่ยว ผึ่งให้แห้งจนสนิท สวมผลมะม่วงด้วยตาข่ายโพลีเอทิลีนเดียวกับการส่งออก และบรรจุลงในกล่องลูกฟูกขนาด 35x49x11 เซนติเมตร จำนวน 12-14 ผลต่อกล่อง น้ำหนักรวมสุทธิ 5 กิโลกรัม (ขนาดมาตรฐานส่งออก) ฉายรังสีแกมมาให้แก่มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองตามปริมาณข้อกำหนดการส่งออกผลไม้สดไปยังประเทศสหรัฐอเมริกา 0.4 กิโลเกรย์ เช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.1 ดำเนินการ ณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี เปรียบเทียบกับผลที่ฉายและไม่ฉายรังสีแกมมา ดังต่อไปนี้

กรรมวิธีที่ 1 ไม่ฉายรังสี

กรรมวิธีที่ 2 ฉายรังสีแกมมา

ปอกเปลือกและหั่นเนื้อผลจากบริเวณกลางผลทั้งสองด้านให้เป็นแผ่นชิ้นเล็ก แช่ไว้ในไนโตรเจนเหลวจนกว่าจะแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ และเก็บไว้ที่ -80 °C เพื่อรอสำหรับขั้นตอนการสกัดอาร์เอ็นเอ จากนั้นตรวจสอบคุณภาพทุก ๆ 7 วัน ดังเช่นการทดลองที่ 3.1 ได้แก่ ความแน่นเนื้อ ค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ สัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ อัตราการหายใจ และการผลิตเอทิลีน เก็บรักษาภายหลังฉายรังสีนาน 14 วัน ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 13±2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85±2 เปอร์เซ็นต์ ณ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก

สกัดอาร์เอ็นเอด้วยวิธีมาตรฐานจากสาร Cetyltrimethylammonium Bromide (CTAB) (Kiss et al., 2024; Wang & Stegemann, 2010) ตรวจสอบปริมาณและคุณภาพของอาร์เอ็นเอด้วย

เครื่อง NanoDrop 2000 (Thermo Fisher Scientific, MA, USA) และ 1% gel electrophoresis ใช้ตัวอย่างอาร์เอ็นเอ ปริมาตร 5 μ L ร่วมกับ Orange Dye 2 μ L ใช้ DNA ladder ปริมาตร 4 μ L เพื่อเปรียบเทียบขนาดตัวอย่างอาร์เอ็นเอ ปรับกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ค่า 400 V เป็นระยะเวลา 40 นาที โดยโมเลกุลจะถูกผลักดันด้วยสนามไฟฟ้าผ่านเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็กเพื่อดูลักษณะแถบอาร์เอ็นเอเป้าหมาย ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการรันเจล นำเจลมาย้อมสีด้วย ethidium bromide เป็นระยะเวลา 20 นาที และตรวจสอบแถบอาร์เอ็นเอภายใต้แหล่งกำเนิดแสง ultraviolet อาร์เอ็นเอเป้าหมายที่มีปริมาณและคุณภาพสูงถูกคัดเลือก นำมาผ่านกระบวนการกำจัดดีเอ็นเอด้วย DNase treatment เพื่อกำจัด gDNA ที่อาจมีหลงเหลืออยู่ในอาร์เอ็นเอเป้าหมาย ทำให้อาร์เอ็นเอเป้าหมายมีความบริสุทธิ์ โดยใช้ชุดน้ำยา TURBO™ DNase Kit (Thermo Fisher Scientific Inc., USA) ตามขั้นตอนแนะนำของผู้ผลิต ตรวจสอบปริมาณอาร์เอ็นเอด้วยเทคนิคด้วยเครื่องมือ Invitrogen™ Qubit™ 3 Fluorometer Ultraviolet-Visible (UV-Vis) spectrophotometry (Thermo Fisher Scientific Inc., USA) จากนั้นอาร์เอ็นเอเป้าหมาย ปริมาณ 50 ng/ μ L ถูกเปลี่ยนกลับเป็น cDNA โดยใช้ ReverTra Ace® qPCR RT Master Mix with gDNA remover (Code No. FSQ-301) (TOYOBO Co., Ltd., Japan) ตามขั้นตอนแนะนำของผู้ผลิต

การทดลองใช้ลำดับของยีนในการสังเคราะห์และส่งสัญญาณฮอร์โมนเอทิลีน ได้แก่ *MiACS*, *MiETR1*, *MiERS1* และ housekeeping gene (Actin) จากฐานข้อมูล National Center for Biotechnology Information (NCBI) หรืองานวิจัยที่ประสบความสำเร็จในด้านการวิเคราะห์การแสดงออกของยีน ทำการออกแบบไพรเมอร์ที่จำเพาะสำหรับยีนเป็นแหล่งอ้างอิง ดังที่แสดงอยู่ในตารางที่ 12

ตาราง 12 ตารางแสดงลำดับนิวคลีโอไทด์ของไพรเมอร์ส่วนหน้าและหลังของยีนในกระบวนการสังเคราะห์และส่งสัญญาณฮอร์โมนเอทิลีน ได้แก่ *MiACS*, *MiETR1*, *MiERS1* และยีนควบคุม *MiACT*

Genes	Primer	Sequences (5'-3')	Source
<i>MiACS</i>	F	CCCAGAAGCCTCTATCTGCAC	Srivastava et al. (2016)
	R	TTCTGAACTCTGGCAAGCCG	
<i>MiETR1</i>	F	CCTACAACTTCAACTCGGAAGTT	Li et al. (2020a)
	R	TTCATCACCAACAGCATACTCAG	
<i>MiERS1</i>	F	AGAAGCCTTTAGGTCACAGTGA	
	R	TCGGCCTTCAGCTTTTACTTGA	
<i>MiACT</i>	F	CCCTGAAGAGCACCCA	GenBank: JF737036.1
	R	AGTTGTACGACCACTGGC	

ตรวจสอบการแสดงออกของยีนโดยใช้เทคนิค Qualitative Realtime-PCR ร่วมกับไพรเมอร์ที่ออกแบบไว้ ใช้ระบบการวิเคราะห์โดยใช้สีย้อม SYBR Green การแสดงออกของยีนทั้ง 4 ชนิด วิเคราะห์โดยใช้ชุดน้ำยาสำเร็จรูป THUNDERBIRD® SYBR™ qPCR Mix (Code No. QPS-201) (TOYOBO Co., Ltd., Japan) ใช้ปฏิกิริยา Realtime qPCR ที่ปริมาตร 20 μ L ด้วยองค์ประกอบปฏิกิริยา ดังนี้

- THUNDERBIRD® SYBR™ qPCR Mix ปริมาตร 10 μ L
- Forward and reverse primer (10 μ M) ปริมาตร 0.6 μ L
- cDNA template ปริมาตร 2 μ L
- RNase-free water ปริมาตร 6.8 μ L

ดำเนินปฏิกิริยาตามเงื่อนไขอุณหภูมิ ดังต่อไปนี้

- Pre-denaturation ที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 20 วินาที
- Denaturation ที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 3 วินาที และ annealing และ extension ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 20 วินาที จำนวน 40 รอบ
- จากนั้นสิ้นสุดด้วยรอบสุดท้ายที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 วินาที
- วิเคราะห์ melt curve ของผลิตภัณฑ์ PCR ที่ได้ ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 60 วินาที และ 95 °C เป็นเวลา 15 วินาที

คำนวณหาระดับการแสดงออกของยีนด้วยวิธี comparative CT ($\Delta\Delta$ CT) (Livak & Schmittgen, 2001) ใช้ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงในปริมาณ mRNA ของยีนเป้าหมายเปรียบเทียบกับยีนอ้างอิง Actin ดังสมการนี้

$$\Delta\Delta CT = (CT_{\text{target gene}} - CT_{\text{reference gene}})_{\text{treatment}} - (CT_{\text{target gene}} - CT_{\text{reference gene}})_{\text{control}}$$

ใช้วิธีวิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS version 22 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี independent t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลของรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ที่มีต่อคุณภาพของผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิต่ำ

4.1.1 การสูญเสียน้ำหนัก

การสูญเสียน้ำหนักของผลมะม่วงในช่วง 12 วัน ระบุว่าทั้งผลที่ไม่ฉายรังสีและผลที่ฉายรังสีด้วยรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ต่างมีรูปแบบการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่สูญเสียแบบเส้นตรงตามระยะเวลาการเก็บรักษา (ภาพ 4A) โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกรรมวิธีตลอดช่วงการเก็บรักษา แสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีในระดับที่ใช้เพื่อการควบคุมแมลงศัตรูพืช (phytosanitary dose) ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการสูญเสียน้ำหนักในระดับที่มีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับผลที่ไม่ฉายรังสี เมื่อสิ้นสุดการเก็บรักษาในวันที่ 12 พบว่าผลมะม่วงในชุดควบคุมมีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ย 7.20% ขณะที่ผลที่ฉายรังสีแกมมา (Gamma) มีค่าการสูญเสียน้ำหนัก 8.10% และผลที่ฉายรังสีเอกซ์ (X-ray) มีค่าการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุดที่ 8.83% ซึ่งหมายความว่า ผลที่ฉายรังสีเอกซ์มีการสูญเสียน้ำหนักสูงกว่าชุดควบคุม 22.6% และสูงกว่าผลที่ฉายรังสีแกมมา 9.0% แม้ว่าความแตกต่างดังกล่าวจะไม่ถึงระดับนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่สะท้อนแนวโน้มเชิงสรีรวิทยาได้ว่าการฉายรังสีเอกซ์อาจมีผลกระทบต่ออัตราการหายใจหรือการคายน้ำของผลมะม่วงมากกว่า อย่างไรก็ตาม การฉายรังสีทั้งสองชนิดไม่ได้ทำให้การสูญเสียน้ำหนักของผลมะม่วงเพิ่มขึ้นในระดับที่มีนัยสำคัญ

4.1.2 ความแน่นเนื้อผล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้งรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์สามารถช่วยรักษาความแน่นเนื้อของผลมะม่วงได้ดีกว่าชุดควบคุมอย่างชัดเจนในช่วง 3 วันแรกของการเก็บรักษา โดยผลที่ฉายรังสีแกมมามีความแน่นเนื้อมากกว่าชุดควบคุม 30.6% หรือคิดเป็น 1.31 เท่า ขณะที่ผลที่ฉายรังสีเอกซ์มีความแน่นเนื้อมากกว่าชุดควบคุมถึง 52.6% หรือ 1.53 เท่า แสดงให้เห็นว่ารังสีเอกซ์มีประสิทธิภาพสูงกว่าเล็กน้อยในการชะลอการนิ่มของเนื้อผลในช่วงต้นของการเก็บรักษา (ภาพ 4B) ซึ่งคาดว่าผลมะม่วงมีการหายใจและการสลายตัวของเพกตินลดลงในช่วงนี้ ทำให้ผลที่ฉายรังสียังคงค่าความแน่นเนื้อสูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม เมื่อเข้าสู่วันที่ 6-12 ผลมะม่วงทุกกรรมวิธีมีความแน่นเนื้อลดลงสู่ระดับต่ำเช่นเดียวกัน เนื่องจากเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสลายผนังเซลล์ เช่น polygalacturonase (PG), pectin methylesterase (PME) และ β -galactosidase

ทำงานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามระยะการสุกของผลไม้ ทำให้ผลที่ฉายรังสีไม่สามารถคงความแน่นเนื้อในระยะยาวได้ โดยเฉพาะเมื่อการเก็บรักษายาวนานเกิน 9-12 วัน โดยเมื่อสิ้นสุดการเก็บรักษาในวันที่ 12 ผลไม้ฉายรังสีมีค่าความแน่นเนื้อ 1.90 N ขณะที่ผลที่ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์มีค่า 2.00 N และ 2.10 N ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ

4.1.3 ค่าความสว่าง ค่าสีแดง และสีเหลืองของผล

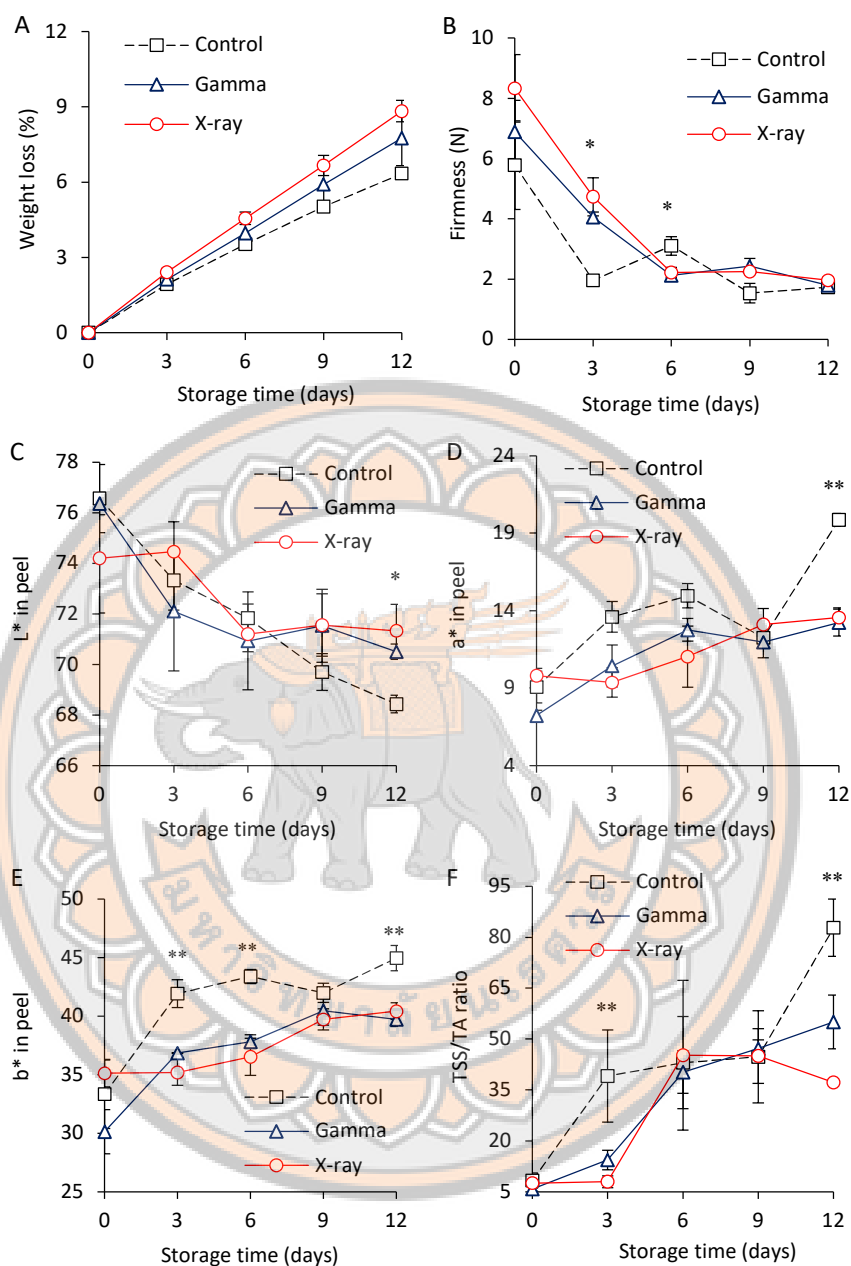
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีทั้งรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์มีประสิทธิภาพในการชะลอการเปลี่ยนแปลงค่าสีของผิวมะม่วงระหว่างการเก็บรักษาอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาค่า L^* (ความสว่าง) พบว่าผลที่ฉายรังสีสามารถคงความสว่างของผิวผลได้ดีกว่าชุดควบคุม (ภาพ 4C) โดยในวันที่ 12 ค่า L^* ของผลที่ฉายรังสีสูงกว่าชุดควบคุมประมาณ 3-5% แสดงให้เห็นการชะลอการเปลี่ยนแปลงจากความสว่างไปสู่ความคล้ำของสีเปลือกเมื่อเก็บรักษา สำหรับค่า a^* ซึ่งบ่งบอกค่าสีแดง จากผลการทดลองพบว่า ผลที่ฉายรังสีแกมมาและเอกซ์มีการเพิ่มขึ้นของค่า a^* ช้ากว่าอย่างชัดเจน โดยในวันที่ 12 ของการเก็บรักษา ค่า a^* ของผลที่ฉายรังสีแกมมาและเอกซ์ต่ำกว่าผลไม้ฉายรังสีถึง 36-40% หรือคิดเป็น 0.60-0.64 เท่า (ภาพ 4D) ค่าสีเหลือง (b^*) ของผลมะม่วงในทุกกรรมวิธีเริ่มต้นใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกันทางสถิติภายหลังการฉายรังสีทันที อย่างไรก็ตาม ตั้งแต่วันที่ 3 ถึงวันที่ 6 พบว่าค่า b^* ของชุดควบคุมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ไปอยู่ที่ประมาณ 41.9-43.4 หน่วย ในขณะที่ผลที่ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์มีค่า b^* ต่ำกว่าอย่างชัดเจน โดยผลที่ฉายรังสีแกมมามีค่าอยู่ที่ประมาณ 36.5-37.5 หน่วย และผลที่ฉายรังสีเอกซ์อยู่ที่ 35.0-36.8 หน่วย เมื่อคำนวณเชิงปริมาณพบว่าค่า b^* ของชุดควบคุมสูงกว่าผลที่ฉายรังสีแกมมาประมาณ 15-19% (หรือ 1.15-1.19 เท่า) และสูงกว่าผลที่ฉายรังสีเอกซ์ประมาณ 18-23% (หรือ 1.18-1.23 เท่า) เมื่อสิ้นสุดการเก็บรักษาในวันที่ 12 ชุดควบคุมมีค่า b^* สูงถึง 44.9 หน่วย ในขณะที่ผลที่ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์มีค่าต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (39-40 หน่วย) โดยมีค่า b^* ต่ำกว่าชุดควบคุมประมาณ 10-13% (ภาพ 4E) สรุปได้ว่าการฉายรังสีช่วยรักษาความสว่าง ชะลอการเปลี่ยนแปลงค่าสีแดงและสีเหลืองของผิวผล ส่งผลให้ผลมะม่วงเปลี่ยนสีจากเหลืองอ่อนไปเป็นเหลืองเข้มได้ช้าลง สะท้อนการเสื่อมคุณภาพช้ากว่าชุดควบคุมอย่างชัดเจนในระหว่างการเก็บรักษา

4.1.4 สัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้

ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (TSS/TA) ของผลมะม่วงในทุกกรรมวิธี ได้แก่ ผลที่ฉายรังสีแกมมา รังสีเอกซ์ และชุดควบคุม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในวันแรกของการเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม ในวันที่ 3 พบว่าชุดควบคุมมีค่า TSS/TA เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เป็น 39.1 ขณะที่ผลที่ฉายรังสีมีค่าต่ำกว่าชัดเจน โดยอยู่ที่ 7.97-14.36 (ภาพ 4F) ซึ่งหมายความว่าค่า TSS/TA ของชุดควบคุมสูงกว่าผลที่

ฉายรังสีประมาณ 172-390% (หรือ 2.7-4.9 เท่า) แสดงถึงการพัฒนากระบวนการสุกของผลที่ไม่ฉายรังสีในช่วงแรกของการเก็บรักษา แต่ต่อมาระหว่างวันที่ 6 ถึงวันที่ 9 ค่า TSS/TA ของทุกกรรมวิธีไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาเช่นเดียวกัน เมื่อสิ้นสุดการเก็บรักษาในวันที่ 12 ของการเก็บรักษา ผลที่ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ยังคงมีส่วน TSS/TA ต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเท่ากับ 37.2 และ 55.0 ตามลำดับ ในขณะที่ชุดควบคุมเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 82.7 ซึ่งหมายความว่าค่า TSS/TA ของผลที่ฉายรังสีแกมมาและเอกซ์เรย์ต่ำกว่าชุดควบคุมประมาณ 33-55% ซึ่งสะท้อนว่าการฉายรังสีสามารถชะลอการเพิ่มขึ้นของค่า TSS/TA ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อันเป็นผลมาจากการเพิ่มของ TSS ที่ช้ากว่าเล็กน้อยและการลดลงของปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ที่ช้ากว่าเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ส่งผลให้ผลที่ฉายรังสีทั้งสองชนิดมีรสชาติหวานน้อยกว่าในระยะสุกจัด ผลการทดลองนี้สนับสนุนว่าการฉายรังสีชะลอกระบวนการสุกผ่านการลดการผลิตเอทิลีน ทำให้การสะสมน้ำตาลและเมตาบอไลต์อื่นเกิดขึ้นช้ากว่าในผลที่ฉายรังสี





ภาพ 4 การสูญเสียน้ำหนัก (A) ความแน่นเนื้อ (B) ค่าความสว่าง (C) ค่าสีแดง (D) ค่าสีเหลือง (E) และสัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (F) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ ปริมาณ 0.4 kGy เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13–15 °C เก็บรักษานาน 12 วัน ข้อมูลที่แสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และเครื่องหมายดอกจัน (*, **) แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (* $P \leq 0.05$ และ ** $P \leq 0.01$)

4.1.5 อัตราการหายใจ

ภายหลังการฉายรังสีทันที (Day 0) พบว่าผลมะม่วงที่ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์มีอัตราการหายใจลดลงอย่างชัดเจน โดยมีค่าเท่ากับ 46.1 และ 53.9 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$ ตามลำดับ ขณะที่ชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) มีอัตราการหายใจสูงกว่าทั้งสองกรรมวิธีอย่างเด่นชัดที่ 64.9 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$ โดยผลที่ฉายรังสีแกมมา มีอัตราการหายใจต่ำกว่าชุดควบคุมประมาณ 29% (0.71 เท่า) และผลที่ฉายรังสีเอกซ์ต่ำกว่าชุดควบคุมประมาณ 17% (0.83 เท่า) (ภาพ 5A) ซึ่งตลอดระยะเวลาเก็บรักษา อัตราการหายใจของผลที่ฉายรังสีทั้งสองชนิดลดลงเพียงเล็กน้อยและค่อนข้างคงที่ โดยไม่พบความแตกต่างระหว่างรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ โดยในวันที่ 9 ของการเก็บรักษา ผลไม่ฉายรังสีมีค่าเพิ่มขึ้นสูงถึง 71.4 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$ ซึ่งสูงกว่าผลที่ฉายรังสีแกมมาประมาณ 49-55% และสูงกว่าผลที่ฉายรังสีเอกซ์ประมาณ 35-40% ($p \leq 0.01$) สะท้อนให้เห็นถึงการพัฒนากระบวนการสุกของผลที่ไม่ฉายรังสีเกิดเร็วกว่าผลฉายรังสีทั้งสองชนิด เมื่อถึงวันที่ 12 ของการเก็บรักษา อัตราการหายใจของทุกกรรมวิธีมีค่าใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างทางสถิติ โดยชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ย 42.9 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$ ขณะที่ผลที่ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 47.7 และ 34.9 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองในช่วงต้นและกลางของการเก็บรักษา ซึ่งเป็นช่วงสำคัญของการเปลี่ยนแปลงสรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยว พบว่าการฉายรังสีทั้งสองชนิดสามารถลดอัตราการหายใจของผลมะม่วงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมได้อย่างมีนัยสำคัญ รังสีชนิดก่อก่อไอออนส่งผลต่อการหายใจและการสุกของผลมะม่วงหลังการเก็บเกี่ยว

4.1.6 การผลิตเอทิลีน

การตรวจสอบการผลิตเอทิลีน พบว่าตั้งแต่วันแรกจนถึงวันที่ 3 ของการเก็บรักษา ความเข้มข้นการผลิตเอทิลีนของผลมะม่วงในทุกกรรมวิธีไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยผลที่ฉายรังสีแกมมา รังสีเอกซ์ และชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ย 0.10, 0.12 และ 0.13 $\mu\text{l}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$ ตามลำดับ (ภาพ 5B) แต่เมื่อเก็บรักษานานถึง 6 วัน การผลิตเอทิลีนเพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุดของแต่ละกรรมวิธี โดยผลชุดควบคุมมีค่าสูงที่สุดที่ 0.47 $\mu\text{l}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$ ซึ่งสูงกว่าผลที่ฉายรังสีแกมมาประมาณ 15% (1.15 เท่า) และสูงกว่าผลที่ฉายรังสีเอกซ์ประมาณ 17% (1.17 เท่า) ($p \leq 0.01$) จากนั้นเมื่อถึงวันที่ 9 ของการเก็บรักษา การผลิตเอทิลีนลดลงในทุกกรรมวิธีจึงไม่พบความแตกต่างทางสถิติ และเมื่อถึงวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (วันที่ 12) การผลิตเอทิลีนของชุดควบคุมเพิ่มขึ้นอีกครั้งเป็น 0.38 $\mu\text{l}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$ ซึ่งสูงกว่าผลที่ฉายรังสีแกมมาประมาณ 22% (1.22 เท่า) และสูงกว่าผลที่ฉายรังสีเอกซ์ประมาณ 15% (1.15 เท่า) ($p \leq 0.05$) และยังพบว่าผลที่ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ยังคงมีค่าการผลิตเอทิลีนไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเท่ากับ 0.31 และ 0.33 $\mu\text{l}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}$ ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์มีผลกระทบต่อการผลิตเอทิลีนในระหว่างเก็บรักษา โดยเอทิลีนเป็น

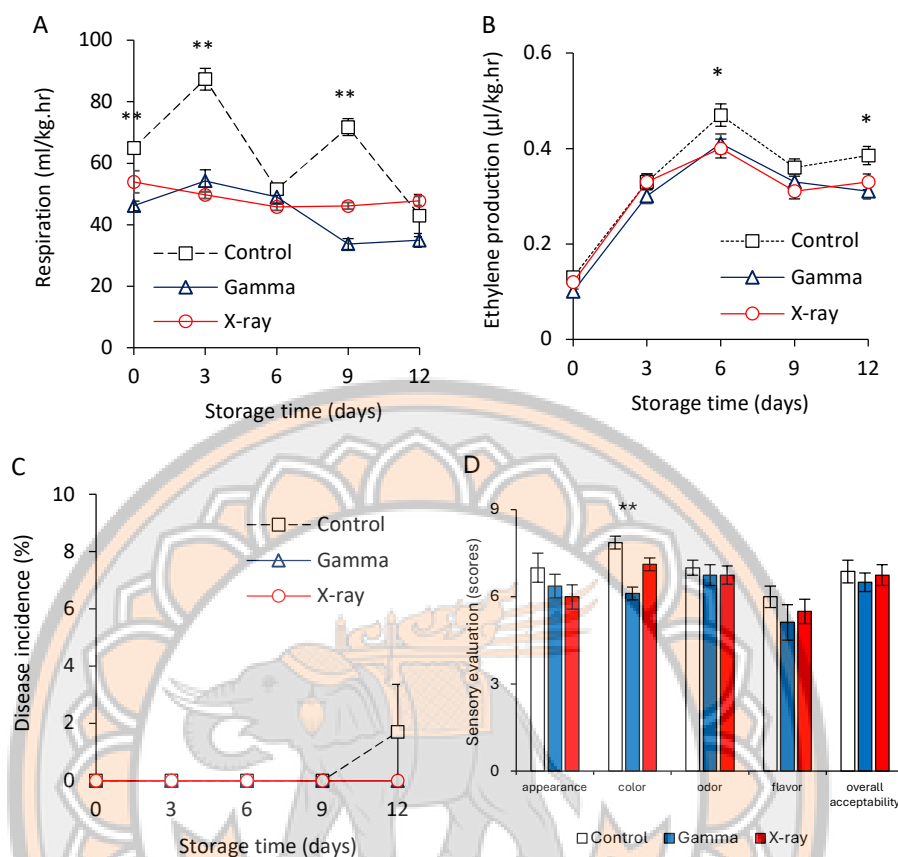
ฮอร์โมนที่สำคัญซึ่งเป็นตัวกระตุ้นการสุก หากลดปริมาณการผลิตเอทิลีนได้จะช่วยชะลอกระบวนการสุกของผลมะม่วงเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ไม่ผ่านการฉายรังสี การลดลงของการผลิตเอทิลีนในผลที่ฉายรังสีคาดว่าเกี่ยวข้องกับการยับยั้งการแสดงออกของยีนในเส้นทางการสังเคราะห์และส่งสัญญาณเอทิลีน เช่น *ETR1*, *ERS1*, *ACS* และ *ACO* ซึ่งจะมีการทดลองในการทดลองที่ 3.4 ต่อไป

4.1.7 เพอร์เซ็นต์การเน่าเสีย

ตั้งแต่วันแรกจนถึงวันที่ 9 ของการเก็บรักษา ไม่พบการเน่าเสียจากโรคแอนแทรกโนสในทุกกรรมวิธี และไม่ปรากฏความแตกต่างทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การเน่าเสียระหว่างผลที่ฉายรังสีแกมมา ผลที่ฉายรังสีเอกซ์ และชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) (ภาพที่ 5C) อย่างไรก็ตาม เมื่อถึงวันที่ 12 ของการเก็บรักษา ชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) เริ่มแสดงอาการเน่าเสียโดยมีค่าเฉลี่ย 1.7% ในขณะที่ผลที่ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ ไม่พบอาการเน่าเสียเลย ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ที่การฉายรังสีในระดับต่ำอาจมีส่วนช่วยลดการพัฒนาของเชื้อราในช่วงปลายของการเก็บรักษา ทั้งนี้ การที่พบอาการเน่าเสียเพียงระดับต่ำมากในชุดควบคุมและไม่พบเลยในผลที่ฉายรังสีทั้งสองชนิด อาจมีความเกี่ยวข้องกับการบวนการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมก่อนการส่งออก เช่น การประเมินความสมบูรณ์ของผลด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบไม่ทำลาย (NIR meter) การใช้น้ำร้อนร่วมกับสารป้องกันกำจัดเชื้อราชนิดดูดซึม รวมถึงการเก็บรักษาที่อุณหภูมิเหมาะสม 13 ± 2 °C การจัดการดังกล่าวช่วยลดการปนเปื้อนของเชื้อราในระยะก่อนการเก็บรักษา ส่งผลให้ระดับการเกิดโรคโดยรวมของผลมะม่วงในงานทดลองนี้อยู่ในระดับต่ำมากในทุกกรรมวิธี

4.1.8 คะแนนประสาทสัมผัส

การทดสอบทางประสาทสัมผัสจะเริ่มจากเก็บตัวอย่างในวันที่ 12 ของการเก็บรักษา จากนั้นทำการปอกเปลือกและหั่นเป็นชิ้นตามที่กำหนดในแผนการทดลองที่ 3.1 จากผลการทดลองพบว่า ลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ และการยอมรับโดยรวมในชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) มีคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสไม่แตกต่างจากผลที่ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ (ภาพที่ 5D) อย่างไรก็ตาม พบว่าชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) ได้รับคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านสีสูงกว่าผลที่ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($*P \leq 0.05$) โดยชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.8 คะแนน ขณะที่ผลที่ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.1 และ 7.1 คะแนน ตามลำดับ ผลที่ผ่านการฉายรังสีทั้งสองชนิดแสดงเนื้อสีเหลืองอ่อนกว่าชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) ในระยะสุกเต็มที่ ซึ่งคาดว่ารังสีชะลอกระบวนการสุกของผลไม้ การศึกษาของเราแสดงให้เห็นว่าผลที่ฉายรังสีได้รับการยอมรับในระดับที่ใกล้เคียงกันจากผู้ทดสอบ อย่างไรก็ตาม ผลที่ฉายรังสีมีรสเปรี้ยวมากกว่ากลุ่มควบคุมเล็กน้อย ในขณะที่ผู้ทดสอบให้คะแนนด้านรสชาติเท่ากัน อาจเนื่องมาจากความชอบส่วนบุคคล



ภาพ 5 อัตราการหายใจ (A) การผลิตเอทิลีน (B) เปอร์เซ็นต์การเน่าเสีย (C) และคะแนนประสาทสัมผัส (D) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ ปริมาณ 0.4 kGy เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13–15 °C เก็บรักษานาน 12 วัน ข้อมูลที่แสดงอยู่ในรูปค่าเฉลี่ย ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และเครื่องหมายดอกจัน (*, **) แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (* $P \leq 0.05$ และ ** $P \leq 0.01$)

4.1.9 อภิปรายผล

จากการศึกษาของ Miller et al. (2000) รายงานว่าการฉายรังสีแกมมาที่ 0.45 kGy ในส้ม (*Citrus sinensis* L.) เช่น 'Ambersweet', 'Hamlin', 'Navel Pineapple' และ 'Valencia' มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักที่ไม่แตกต่างกันระหว่างการเก็บรักษา นอกจากนี้ มะม่วงพันธุ์ 'Ataulfo' ภายหลังการฉายรังสีที่ปริมาณ 0.15-0.30 กิโลเกรย์ มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักไม่แตกต่างกันทางสถิติ และไม่พบความแตกต่างระหว่างมะม่วงกลุ่มฉายรังสีแกมมากับชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) ในด้านการสูญเสียน้ำหนัก (Gómez-Simuta et al., 2017) ได้มีรายงานว่าการสูญเสียน้ำหนักเป็นผลโดยตรงจากการสูญเสียน้ำจากกระบวนการหายใจของผลไม้ ส่งผลให้ผลไม้มีลักษณะ

เหี่ยววัน โดยเฉพาะในผลไม้ประเภท climacteric (Perotti et al., 2023) ในการทดลองครั้งนี้ การฉายรังสีไม่สามารถรักษาการสูญเสียน้ำหนักได้เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม ยังมีรายงานว่า การฉายรังสีนั้นสามารถรักษาหรือชะลอการสูญเสียน้ำหนักของผลไม้เชือกเทศได้สำเร็จ โดยต้องฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 1.0-4.0 กิโลเกรย์ ผลที่ฉายรังสีมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุดเฉลี่ย 1.85% เมื่อเปรียบเทียบกับผลไม้ที่ไม่ได้รับรังสี (กลุ่มควบคุม) มีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ย 22.93% ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 25 วัน (Gyimah et al., 2020) ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าการฉายรังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์ช่วยชะลอความอ่อนนุ่มของผลได้ดีกว่าชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nguyen, Kato, et al. (2021) รายงานว่าการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณ 0.5 กิโลเกรย์ ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 องศาเซลเซียส สามารถรักษาความแน่นเนื้อของผลมะม่วงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการฉายรังสีส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการอ่อนตัวของผลลดลง ได้แก่ pectin esterase, β -galactosidase, pectate lyase และ cellulase ยกเว้นแต่ polygalacturonase โดยเอนไซม์เหล่านี้มีผลเกี่ยวข้องต่อการอ่อนตัวของผลอย่างชัดเจนในผลไม้หลายชนิดรวมไปถึงมะม่วง จะเห็นได้ว่ารังสีชนิดก่อกำเนิดไอออนมีผลต่อระดับกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับความอ่อนนุ่มและการสุกแก่ของผล ทำให้ผลที่ผ่านการฉายรังสีชะลอการสุกแก่ได้สำเร็จ ความอ่อนนุ่มของผลมีความเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของเอนไซม์หลายชนิด เช่น cellulase, polygalacturonase และ pectin esterase (Tharanathan et al., 2006) การศึกษาในมะม่วง 'Tommy Atkins' ที่ผ่านการฉายรังสีที่ 0.4 กิโลเกรย์ พบว่ามีเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับผลที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (Cruz et al., 2012) อย่างไรก็ตาม การฉายรังสีในปริมาณสูงมากกว่า 1.0 กิโลเกรย์ จะส่งผลให้ความแน่นเนื้อของผลมะม่วงลดลงทันทีหลังการฉายรังสี ทำให้ความแน่นเนื้อลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่งผลให้มีความแน่นเนื้อต่ำกว่าชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) ในระหว่างเก็บรักษา (Silva et al., 2012) การทดลองครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีสามารถชะลอการเพิ่มขึ้นของ TSS/TA ratio ได้สำเร็จในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง โดยชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) มี ปริมาณ TSS/TA ratio มากกว่าเกือบ 1.5 เท่า ส่งผลให้ชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) มีรสชาติหวานกว่า การที่ปริมาณ TSS/TA ratio เป็นผลมาจากที่ผลมีอัตราการใช้และการผลิตเอทิลีนลดลง ส่งผลให้ผลให้กระบวนการสุกแก่เกิดได้ช้ากว่าชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) (ภาพ 5A และ 5B) อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่าภายหลังการฉายรังสีในมะม่วง 'Tommy Atkins' ที่ปริมาณ 0.4-1.0 กิโลเกรย์ ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Cruz et al., 2012) ผลการศึกษาเหล่านี้แสดงให้เห็นว่ามะม่วงที่ผ่านการฉายรังสีที่ 0.4-1.0 กิโลเกรย์ มีความแตกต่างของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้อาจขึ้นอยู่กับระยะสุกแก่และพันธุ์ การฉายรังสีชนิดก่อกำเนิดไอออนยังมีผลต่อการพัฒนาสีของผล ซึ่งมีรายงานหลายฉบับได้รายงานไว้ว่ารังสีมีอิทธิพลต่อกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ ส่งผลให้ผลไม้ที่ผ่านการฉายรังสีชะลอการเปลี่ยนแปลงสี

เปลือก ยกตัวอย่างเช่น ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ระยะสุกแก่ 80% (100 วันหลังติดผล) ได้รับการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณ 0.5 กิโลเกรย์ พบว่าผลที่ฉายรังสีสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ย่อยสลายคลอโรฟิลล์ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเอนไซม์ pheophytinase และ chlorophyll degrading peroxidase ในช่วงการเก็บรักษานานถึง 16 วัน ส่งผลให้มีปริมาณคลอโรฟิลล์สะสมอยู่บริเวณเปลือกผลมากกว่าชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) อย่างไรก็ตาม การฉายรังสีไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์ chlorophyllase และ magnesium de-chelataase (Nguyen, Uthairatanakij, et al., 2021) สอดคล้องกับการทดลองในครั้งนี้ พบว่าผลที่ฉายรังสีชะลอการเปลี่ยนแปลงสีทั้งค่าสีแดงและสีเหลืองได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) เกิดการเปลี่ยนแปลงสีได้เร็วกว่ามากว่า ส่งผลให้มีสีเปลือกที่เหลืองเข้มปนสีส้ม งานวิจัยก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีแกมมาช่วยรักษาปริมาณคลอโรฟิลล์ในมะเขือเทศ (Kumar et al., 2014) พลัม (Hussain et al., 2013) และลูกแพร์ (Wani et al., 2008) ซึ่งอาจเกิดจากผลของการฉายรังสีต่อเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายคลอโรฟิลล์ในระหว่างเก็บรักษา และอาจเกิดจากการสะสมของปริมาณอนุมูลอิสระ ได้แก่ hydrogen peroxide (H_2O_2) และ superoxide radical $O_2^{\cdot-}$ (Rontani & Galeron, 2016; Tahergorabi et al., 2012)

นอกจากนี้ การฉายรังสียังช่วยลดอัตราการหายใจและการผลิตเอทิลินได้สำเร็จในผักและผลไม้หลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น เห็ดทรัฟเฟิลที่ผ่านการฉายรังสีอิเล็กตรอนและรังสีแกมมาที่ปริมาณ 1.5 และ 2.5 กิโลเกรย์ สามารถชะลอกระบวนการเสื่อมสภาพและลดอัตราการหายใจระหว่างการเก็บรักษาตั้งแต่วันที่ 3 ถึงวันที่ 7 ของการเก็บรักษา ซึ่งปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวอย่างที่ฉายรังสีอิเล็กตรอนและรังสีแกมมาลดลงต่ำกว่ากลุ่มที่ไม่ฉายรังสีถึง 19% และ 35% ตามลำดับ (Rivera et al., 2011) สำหรับมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ผ่านการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ 0.5 กิโลเกรย์ จากเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูง ส่งผลให้มีอัตราการหายใจลดลงอย่างมีนัยสำคัญจากวันที่ 8 ถึงวันที่ 16 ของระยะเวลาการเก็บรักษา โดยมีปริมาณ CO_2 ประมาณ 30-40 mL/kg.hr ในขณะที่ผลที่ไม่ผ่านการฉายรังสีมีอัตราการหายใจสูงสุดเท่ากับ 54 mL/kg.hr อย่างไรก็ตาม อัตราการหายใจของผลที่ผ่านการฉายรังสีเพิ่มขึ้นทันทีหลังจากได้รับการฉายรังสี จากนั้นอัตราการหายใจจะถูกยับยั้งและค่อย ๆ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจนกระทั่งสิ้นสุดการเก็บรักษา (Nguyen, Uthairatanakij, et al., 2021) ในทำนองเดียวกัน ผลมะม่วงที่ได้รับรังสี 0.5 ถึง 0.95 กิโลเกรย์ มีอัตราการหายใจลดลง แต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติที่สังเกตได้ในค่าการประเมินทางประสาทสัมผัส (Lacroix et al., 1993) มะม่วง 'Tommy Atkins' ได้รับการฉายรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดโคบอลต์-60 ในปริมาณ 0.2, 0.4 และ 0.6 กิโลเกรย์ ตามลำดับ พบว่าผลมะม่วงที่ได้รับรังสีจะมีดัชนีความสุกที่ล่าช้าเมื่อเปรียบเทียบกับผลมะม่วงที่ไม่ได้รับรังสี เนื่องจากอัตราการหายใจที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญในระหว่างเก็บรักษา (da Silva et al., 2011) ยังมีรายงานการฉายรังสีแกมมาในมะม่วงเมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุม

(ไม่ฉายรังสี) จากผลการทดลองพบว่าปริมาณความเข้มข้นของ CO₂ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในผลไม้ที่ได้รับรังสีปริมาณ 1.0 และ 1.5 กิโลเกรย์ ทันทีหลังการฉายรังสี (วันที่ 0) อย่างไรก็ตาม เมื่อสิ้นสุดการเก็บรักษาใน วันที่ 21 พบว่าผลที่ได้รับรังสีปริมาณ 1.0 และ 1.5 กิโลเกรย์ มีอัตราการหายใจต่ำกว่าและมีระยะสุกต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับรังสีปริมาณ 3.1 กิโลเกรย์ การเพิ่มขึ้นของการหายใจยังบ่งชี้ว่า climacteric peak เริ่มต้นก่อนกำหนดในตัวอย่างที่ได้รับรังสีในปริมาณสูงเนื่องจากได้รับความเครียดภายหลังการฉาย จึงสรุปได้ว่าผลไม้ที่ได้รับรังสีปริมาณ 1.0 และ 1.5 กิโลเกรย์ มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้นเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 12 °C (Moreno et al., 2006) นอกจากนี้ อัตราการหายใจยังแสดงให้เห็นว่าลดลงตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นในพืชชนิดอื่น ๆ เช่น เห็ดฟาง (Hou et al., 2018)

การศึกษาในปัจจุบันพบว่าการผลิตเอทิลีนในมะม่วงที่ได้รับการฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์สามารถยับยั้งการผลิตเอทิลีนได้ดีกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษาเหล่านี้สอดคล้องกับรายงานของ Nguyen, Uthairatanakij, et al. (2021) ที่พบว่ามะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ผ่านการฉายรังสีอิเล็กตรอนที่ปริมาณ 0.5 กิโลเกรย์ และเก็บรักษาในห้องเย็นอุณหภูมิ 13 °C สามารถลดการผลิตเอทิลีนได้อย่างมีนัยสำคัญระหว่างการเก็บรักษา เมื่อเทียบกับผลที่ไม่ผ่านการฉายรังสีในวันที่ 16 ของการเก็บรักษา ซึ่งบ่งชี้ว่ารังสีชนิดก่อกวนสามารถลดการผลิตเอทิลีนของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองได้อย่างเห็นได้ชัดเจน ปริมาณการสังเคราะห์เมไทโอนีนที่ลดลงมีผลเกี่ยวข้องกับการยับยั้งการสร้างเอทิลีนภายในเห็ดฟางที่ได้รับการฉายรังสี โดยเมไทโอนีนเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการสังเคราะห์เอทิลีนในพืช (Pattyn et al., 2021; Xie et al., 2005) จากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าการฉายรังสียับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ACC synthase และเอนไซม์ ACC oxidase ได้อย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงมีผลต่อระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องในระหว่างการเก็บรักษา ส่งผลให้การผลิตเอทิลีนในมะละกอลดลง (D'Innocenzo & Lajolo, 2001) และหน่อไม้ (Zeng et al., 2015) เอนไซม์ ACC oxidase เป็นเอนไซม์สำคัญในเส้นทางการสังเคราะห์เอทิลีน เนื่องจากเอนไซม์นี้เร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนสุดท้ายของการสังเคราะห์เอทิลีน มะม่วงเป็นผลไม้เขตร้อน ประเภทโคลแมคเทอริกที่พัฒนาการสุกต่อหลังจากเก็บเกี่ยวได้ มีระยะการสุกแก่ออย่างรวดเร็วหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งจะเกิดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา (Sivakumar et al., 2011) ระยะการสุกของผลไม้ทำให้อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนเพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บรักษา จากนั้นจะลดลงเมื่อสุกเต็มที่หรือสุกเกินไป ในขณะที่ระยะสุกเต็มที่ผลมะม่วงจะมีการผลิตเอทิลีนและอัตราการหายใจสูง ซึ่งเรียกว่า climacteric peak (Ibarra-Garza et al., 2015) เปอร์เซ็นต์การเน่าเสียในการทดลองครั้งนี้มีอัตราการเกิดต่ำ อาจเนื่องมาจากขั้นตอนหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมก่อนการฉายรังสี ได้แก่ การแช่น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 47-55 °C นาน 5 นาที ร่วมกับสารป้องกันเชื้อราชนิดดูดซึมเข้มข้น 300 ppm เพื่อควบคุมโรคหลังการเก็บเกี่ยว ดังที่มีรายงานก่อนหน้านี้ว่ามะม่วง 'Carabao' ที่ได้รับ

การแช่น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 53 °C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อควบคุมโรคหลังการเก็บเกี่ยว ส่งผลให้สามารถลดอัตราการเกิดโรคแอนแทรกโนสและโรคเชื้อผลเน่าได้อย่างมีประสิทธิภาพประมาณ 52.63% และ 60.86% ตามลำดับ วิธีการควบคุมโรคด้วยการแช่น้ำร้อน คือการยับยั้งเชื้อรา ไม่สามารถฆ่าเชื้อราได้ทั้งหมด โดยอาการเน่าจากเชื้อโรคจะเจริญเติบโตและปรากฏในช่วงหลังของการเก็บรักษา (Alvandia & Acda, 2015) มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมีคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ และการยอมรับโดยรวมในชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) ผลที่ฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์เล็กน้อยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับการศึกษาของ Din et al. (2021) ได้รายงานวามะม่วง ‘Sensation’ ฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 0.15-0.30 กิโลเกรย์ ภายหลังการฉายรังสีได้รับคะแนนทดสอบการชิมได้ไม่แตกต่างกันทางสถิติจากผู้เข้าร่วมทดสอบ และยังพบอีกว่าชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) ได้รับคะแนนทดสอบการชิมได้ต่ำกว่าผลที่ฉายรังสีตั้งแต่วันที่ 7 จนถึงวันที่ 28 ของการเก็บรักษา โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.6 คะแนน ขณะที่ผลที่ฉายรังสีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.5 คะแนน อย่างไรก็ตาม คะแนนทดสอบการชิมจะลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา อาจเนื่องมาจากเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มเกินไป การได้รับรังสีสามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อดีเอ็นเอ (DNA) ได้โดยตรง ซึ่งนับเป็นผลกระทบหลักที่สำคัญที่สุดของการฉายรังสี นอกจากนี้ ออร์แกนอลที่มีดีเอ็นเอเป็นองค์ประกอบ เช่น ไมโทคอนเดรียและคลอโรพลาสต์ ก็ไวต่อรังสีและเกิดความเสียหายได้เช่นเดียวกัน ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักไม่สามารถฟื้นคืนสภาพเดิมได้ ส่งผลให้เกิดความผิดปกติในการจัดระเบียบโครมาติน การถอดรหัส และการจำลองดีเอ็นเอ ซึ่งกระทบต่อกระบวนการระดับโมเลกุลที่สำคัญและการทำงานของเซลล์ (Manova & Gruszka, 2015)

ประเทศไทยได้รับอนุญาตและรับรองจากหน่วยงาน APHIS, USDA สำหรับผลไม้สดจำนวน 8 ชนิดที่ได้ออกไป สำหรับส่งออกเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตาม รังสีเอกซ์และอิเล็กทรอนิกส์ยังไม่ได้รับการรับรองจากหน่วยงาน APHIS, USDA สำหรับผลไม้สด ถึงแม้ว่าจะมีมาตรฐานและความปลอดภัยเช่นเดียวกันกับรังสีแกมมา ซึ่งได้เดินเครื่องฉายรังสีและเปิดให้บริการในปี พ.ศ. 2563 ซึ่งจะต้องให้สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) เป็นผู้ประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่อไป



ภาพ 6 ลักษณะผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ไม่ได้รับการฉายรังสี (ชุดควบคุม; A) ผลที่ได้รับการฉายรังสีด้วยรังสีแกมมา (B) และรังสีเอกซ์ (C) ที่ปริมาณ 0.4 kGy ในวันที่ 12 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13-15 °C RH 85-95%

4.2 อิทธิพลของการใช้สาร 1-Methylcyclopropene (1-MCP) ที่มีต่อคุณภาพผลมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองภายหลังการฉายรังสีแกมมาเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิเย็น

4.2.1 การสูญเสียน้ำหนัก

โดยภายหลังการรมด้วย 1-MCP ทุกกรรมวิธีมีการสูญเสียน้ำหนักไม่แตกต่างกันทางสถิติ ในช่วง 6 วันแรกของการเก็บรักษา แสดงในภาพ 8A จนกระทั่งวันที่ 9 ซึ่งเป็นช่วงที่อัตราการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน พบว่าชุดควบคุม (ไม่รมสาร) และผลที่รมสาร 1-MCP กรรมวิธี T1 (500 ppb นาน 12 ชม.) และ T2 (500 ppb นาน 24 ชม.) มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ย 7.12%, 6.65% และ 6.30% ตามลำดับ ในขณะที่ผลที่รมสาร 1-MCP ในระดับสูงกว่า ได้แก่ กรรมวิธี T3 (1,000 ppb นาน 12 ชม.) และ T4 (1,000 ppb นาน 24 ชม.) มีแนวโน้มชะลอการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียน้ำหนักได้ดีกว่าอย่างชัดเจน ในช่วงวันที่ 12 ถึงวันที่ 21 ของการเก็บรักษา ไม่พบความแตกต่างทางสถิติของอัตราการสูญเสียน้ำหนักระหว่างผลที่ผ่านการรม 1-MCP ทุกกรรมวิธี อย่างไรก็ตาม เมื่อถึงวันที่ 24 ของการเก็บรักษา พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยผลที่รม 1-MCP กรรมวิธี T3 (1,000 ppb นาน 12 ชั่วโมง) และ T4 (1,000 ppb นาน 24 ชั่วโมง) สามารถชะลอการสูญเสียน้ำหนักได้ดีกว่าอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกรรมวิธี T1 (500 ppb นาน 12 ชั่วโมง) และ T2 (500 ppb นาน 24 ชั่วโมง) โดย T3 และ T4 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยเพียง 13.2% และ 12.7% ในขณะที่ T1 และ T2 มีค่าประมาณ 14.8% และ 14.3% ตามลำดับ คิดเป็นการลดลงที่ดีกว่า 7.7–14.2% หรือเทียบเป็นอัตราส่วน 0.86–0.89 เท่า การใช้ 1-MCP ในความเข้มข้นสูง (1,000 ppb) มีประสิทธิภาพมากกว่าในการลดการสูญเสียน้ำหนัก ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการยับยั้งการตอบสนองต่อเอทิลีน ทั้งนี้ ผลมะม่วงในทุกกรรมวิธีมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บรักษา ซึ่งเป็นลักษณะปกติของผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว

4.2.2 ความแน่นเนื้อผล

ในวันแรกของการเก็บรักษา ความแน่นเนื้อของผลมะม่วงในทุกกรรมวิธีไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ภาพ 8B) อย่างไรก็ตาม เมื่อถึงวันที่ 3 ของการเก็บรักษา พบความแตกต่างอย่างเด่นชัด โดยผลที่รมสาร 1-MCP กรรมวิธี T4 (1,000 ppb นาน 24 ชั่วโมง) สามารถรักษาความแน่นเนื้อได้ดีที่สุด มีค่าเฉลี่ย 7.4 N ซึ่งสูงกว่าความแน่นเนื้อของชุดควบคุมที่ 2.9 N ถึง 155% หรือประมาณ 2.55 เท่า นอกจากนี้ T4 ยังมีความแน่นเนื้อสูงกว่า T1 (500 ppb 12 ชม.), T2 (500 ppb 24 ชม.) และ T3 (1,000 ppb 12 ชม.) อย่างชัดเจน โดยมากกว่าเฉลี่ยประมาณ 1.3–2.0 เท่า สะท้อนประสิทธิภาพของความเข้มข้นและระยะเวลาการสัมผัสสาร 1-MCP ในการยับยั้งการสูญเสียความแน่นเนื้อในช่วงต้นของการเก็บรักษา เมื่อถึงวันที่ 9 ของการเก็บรักษา พบว่าชุดควบคุม (ไม่รมสาร) และผลที่รมสาร 1-MCP กรรมวิธี T1 (500 ppb นาน 12 ชั่วโมง) มีความแน่นเนื้อลดลงอย่างมีนัยสำคัญและลดลงต่ำ

กว่า 2 N ซึ่งบ่งชี้ว่าการใช้ 1-MCP ระดับต่ำไม่เพียงพอในการรักษาความอ่อนนุ่มผล ขณะที่ผลที่รมสารในระดับสูงขึ้น ได้แก่ T3 (1,000 ppb 12 ชม.) และ T4 (1,000 ppb 24 ชม.) สามารถชะลอการลดลงของความแน่นเนื้อไว้ได้ โดยยังคงค่ามากกว่า 2 N อย่างมีนัยสำคัญ ในวันที่ 12 ของการเก็บรักษา กรรมวิธี T4 (1,000 ppb นาน 24 ชั่วโมง) ยังคงแสดงประสิทธิภาพสูงสุดในการคงความแน่นเนื้อของผล โดยมีค่าเฉลี่ย 4.7 N สูงกว่าชุดควบคุมและทุกกรรมวิธีอื่นอย่างชัดเจน (สูงกว่า T1 ประมาณ 2.3 เท่า, และสูงกว่า T2-T3 ประมาณ 1.4-1.8 เท่า) บ่งชี้ได้ว่าความเข้มข้น 1-MCP ที่สูงขึ้นและระยะเวลาการรมมีบทบาทสำคัญต่อการรักษาโครงสร้างผนังเซลล์และการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์สลายเพกติน เช่น polygalacturonase (PG) และ pectin methylesterase (PME) ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับการสูญเสียความแน่นเนื้อในผลไม้ อย่างไรก็ตาม ในช่วงวันที่ 15 ถึงวันที่ 24 ความแตกต่างของความแน่นเนื้อระหว่างทุกกรรมวิธีไม่ปรากฏความแตกต่างทางสถิติ โดยความแน่นเนื้อมีแนวโน้มลดลงต่อเนื่องตามธรรมชาติของการสุกและการสลายผนังเซลล์

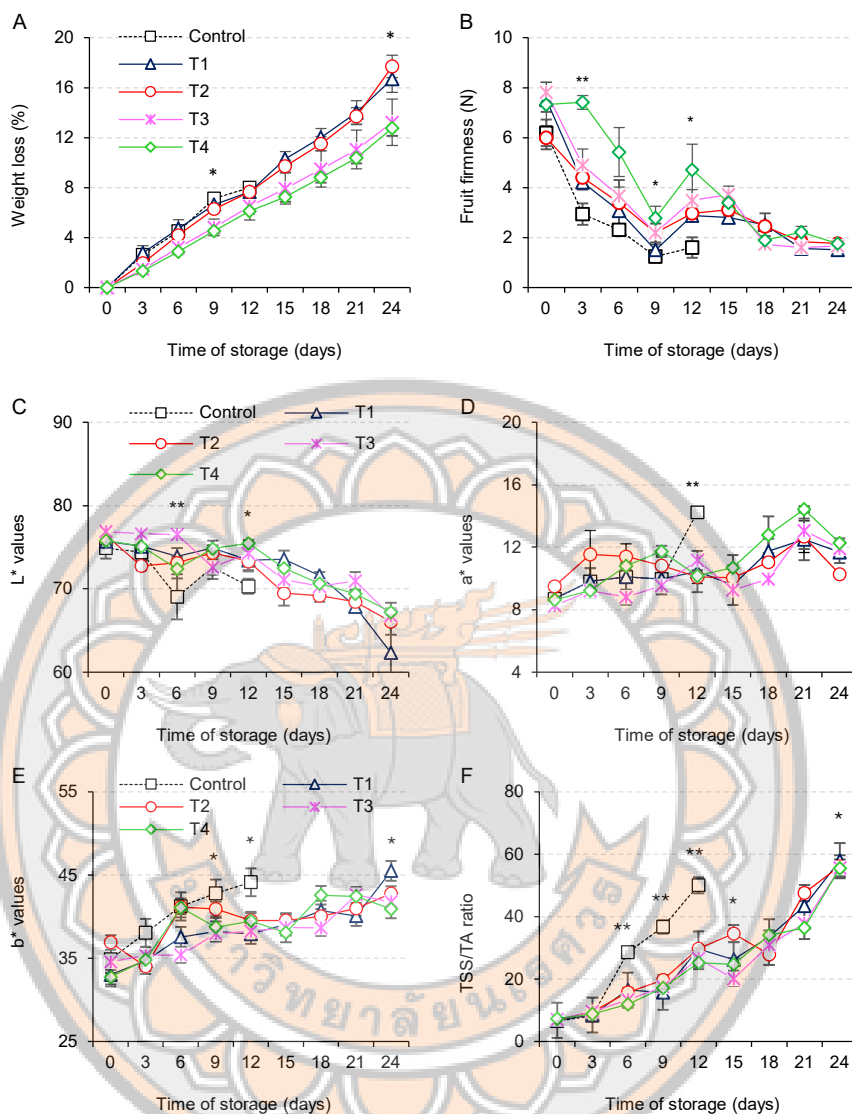
4.2.3 ค่าความสว่าง ค่าสีแดง และสีเหลืองของผล

จากผลการทดลองพบว่าในช่วงวันแรกจนถึงวันที่ 3 ของการเก็บรักษา ค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ของผลมะม่วงในทุกกรรมวิธีไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ภาพ 8C, 8D และ 8E) สะท้อนว่าสาร 1-MCP ยังไม่มีผลกระทบให้เกิดความแตกต่างด้านการเปลี่ยนแปลงสีในระยะเริ่มต้นของการเก็บรักษา เมื่อถึงวันที่ 6 พบว่าชุดควบคุม (ไม่รมสาร) มีค่า L^* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเหลือ 69.0 หน่วย ขณะที่ผลที่รม 1-MCP ทุกกรรมวิธียังคงรักษาค่าความสว่างได้ดีกว่า โดยเฉพาะกรรมวิธีความเข้มข้นสูง (1,000 ppb) หลังจากนั้นเมื่อถึงวันที่ 12 ของการเก็บรักษา ชุดควบคุมยังคงมีค่า L^* ต่ำที่สุด (70.3 หน่วย) ในขณะที่กรรมวิธี T3 (1,000 ppb นาน 12 ชม.) และ T4 (1,000 ppb นาน 24 ชม.) มีค่า L^* เท่ากับ 74.2 และ 75.4 หน่วย ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมประมาณ 5.5% (1.06 เท่า) และ 7.3% (1.07 เท่า) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ตั้งแต่วันที่ 15 จนถึงวันที่ 24 ความแตกต่างของ L^* ระหว่างกรรมวิธีไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าผลของ 1-MCP ต่อการรักษาความสว่างจะเห็นได้ชัดเจนช่วงต้นถึงระยะกลางของการเก็บรักษาเท่านั้นระหว่างผลที่รม 1-MCP เข้มข้น 500 และ 1,000 ppb ค่าสีแดง (a^*) พบว่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตามระยะเวลาและการสุกของผล และไม่แตกต่างกันทางสถิติระหว่างกรรมวิธีในช่วงวันแรกถึงวันที่ 9 แต่เมื่อถึงวันที่ 12 ของการเก็บรักษา ชุดควบคุมมีค่า a^* สูงที่สุดที่ 14.2 หน่วย ขณะที่ผลที่รม 1-MCP มีค่าเพียง 10.1-11.1 หน่วย ต่ำกว่าชุดควบคุมประมาณ 21-29% (1.21-1.41 เท่า) บ่งชี้ให้เห็นว่าผลที่รม 1-MCP มีการพัฒนาค่าสีแดงช้ากว่าชุดควบคุมอย่างเด่นชัด อย่างไรก็ตาม หลังจากวันที่ 15 ถึงวันที่ 24 ค่าสีแดงยังคงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างกรรมวิธี ในทำนองเดียวกัน ค่าสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บรักษา โดยไม่แตกต่างกันในช่วงวันแรกถึงวันที่ 3 ของการเก็บรักษา จนถึง

วันที่ 6 พบว่าชุดควบคุม (41.2 หน่วย) รวมถึง T2 (41.1 หน่วย) และ T4 (41.0 หน่วย) มีค่า b^* สูงขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ เมื่อถึงวันที่ 9 และวันที่ 12 ชุดควบคุมยังคงมีค่า b^* สูงที่สุดที่ 42.8 และ 44.1 หน่วย ตามลำดับ สูงกว่ากลุ่มที่รมสารประมาณ 5–9% (1.05–1.09 เท่า) และแม้ค่าสีเหลืองจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงวันที่ 21 แต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติในช่วงนี้ อย่างไรก็ตาม เมื่อถึงวันที่ 24 ของการเก็บรักษา พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยกรรมวิธี T1 (500 ppb นาน 12 ชม.) มีค่า b^* สูงที่สุดที่ 45.5 หน่วย ขณะที่ T3 (41.8 หน่วย) และ T4 (40.9 หน่วย) มีค่า b^* ต่ำกว่า T1 ประมาณ 8.9% และ 11.3% ตามลำดับ 1-MCP โดยเฉพาะความเข้มข้น 1,000 ppb มีประสิทธิภาพสูงสุดในการชะลอการพัฒนาสีแดงและเหลือง รวมทั้งช่วยรักษาความสว่างของผลในระหว่างเก็บรักษา ทำให้ผลมะม่วงที่ผ่านการรมด้วย 1-MCP ชะลอการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกจากสีเหลืองอ่อนไปเป็นสีเหลืองเข้มได้ช้ากว่าผลที่ไม่รม

4.2.4 สัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้

จากผลการทดลองพบว่า ในช่วงวันแรกจนถึงวันที่ 3 ของการเก็บรักษา ค่าอัตราส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (TSS/TA ratio) ของผลมะม่วงทุกกรรมวิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สะท้อนว่าการรมสาร 1-MCP ยังไม่ส่งผลต่อความหวานและความเป็นกรดในระยะต้นของการเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม ตั้งแต่วันที่ 6 ถึงวันที่ 12 ของการเก็บรักษา พบความแตกต่างเด่นชัด โดยชุดควบคุม (ไม่รมสาร) มีค่า TSS/TA ratio สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเฉลี่ย 28.6, 36.8 และ 50.1 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่ากลุ่มที่รมสาร 1-MCP ทุกกรรมวิธีประมาณ 20–40% หรือมากกว่า 1.3–1.6 เท่า แสดงถึงการสุกที่รวดเร็วกว่าในผลที่ไม่รมสาร รมสาร 1-MCP ทุกระดับสามารถชะลอการเพิ่มของ TSS/TA ratio ได้อย่างชัดเจน โดยอัตราการเพิ่มของค่า TSS/TA ratio ในกลุ่มที่รมสารยังคงเป็นไปอย่างช้าและต่อเนื่อง เมื่อถึงวันที่ 15 พบว่าในกลุ่มที่รมสาร 1-MCP กรรมวิธี T2 (500 ppb นาน 24 ชั่วโมง) มีค่า TSS/TA ratio เพิ่มสูงที่สุดมีค่าเฉลี่ย 34.6 สูงกว่ากรรมวิธีอื่นประมาณ 12–18% ในทางตรงกันข้าม กรรมวิธี T3 (1,000 ppb นาน 12 ชั่วโมง) และ T4 (1,000 ppb นาน 24 ชั่วโมง) ยังคงรักษาความสามารถในการชะลอการเพิ่มขึ้นของค่า TSS/TA ratio ได้ดีที่สุด เมื่อถึงช่วงวันที่ 18–21 ของการเก็บรักษา ไม่พบความแตกต่างของค่า TSS/TA ratio ระหว่างผลที่รมสาร 1-MCP ทุกกรรมวิธี ซึ่งบ่งชี้ว่าผลกระทบจาก 1-MCP เริ่มมีความใกล้เคียงกันมากขึ้นในระยะปลายของการเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม TSS/TA ratio ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามกลไกการสุกตามธรรมชาติของผล จนเมื่อถึงวันที่ 24 พบว่าผลที่รมสาร 1-MCP กรรมวิธี T1 (500 ppb นาน 12 ชั่วโมง) มีค่า TSS/TA ratio สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเฉลี่ย 57.9 สูงกว่ากรรมวิธี T3 และ T4 ประมาณ 1.2 เท่า สะท้อนว่าผลมะม่วงที่ถูกรมด้วย 1-MCP เข้มข้น 500 ppb เข้าสู่ระยะสุกได้รวดเร็วกว่า



ภาพ 7 การสูญเสียน้ำหนัก (A) ความแน่นเนื้อ (B) ค่าความสว่าง (C) ค่าสีแดง (D) ค่าสีเหลือง (E) และสัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (F) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy (T1: 1-MCP 500 ppb เป็นเวลา 12 ชั่วโมง, T2: 1-MCP 500 ppb เป็นเวลา 24 ชั่วโมง, T3: 1-MCP 1,000 ppb เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และ T4: 1-MCP 1,000 ppb เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) ผลที่ไม่ได้รมสาร (control) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C แสดงข้อมูล ค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และเครื่องหมายดอกจัน (*, **) แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (* $P \leq 0.05$ และ ** $P \leq 0.01$)

4.2.5 อัตราการหายใจ

จากผลการทดลองพบว่า ในช่วงวันแรกจนถึงวันที่ 6 ของการเก็บรักษา อัตราการหายใจของผลมะม่วงในทุกกรรมวิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บรักษา (ภาพ 8A) อย่างไรก็ตาม เมื่อถึงวันที่ 9 พบว่าชุดควบคุม (ไม่รมสาร) แสดงอัตราการหายใจสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเฉลี่ย $58.6 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{hr}^{-1}$ ซึ่งสูงกว่ากลุ่มที่รมสาร 1-MCP ประมาณ 1.6–1.8 เท่า ในขณะที่ผลที่รมสาร 1-MCP ทุกกรรมวิธีมีอัตราการหายใจต่ำกว่าอย่างชัดเจน โดยเฉพาะกรรมวิธี T2 (500 ppb นาน 24 ชั่วโมง), T3 (1,000 ppb นาน 12 ชั่วโมง) และ T4 (1,000 ppb นาน 24 ชั่วโมง) ที่มีค่าเฉลี่ยเพียง 35.2, 34.3 และ $32.0 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{hr}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของ 1-MCP ในการชะลอกิจกรรมเมตาบอลิซึมของผลอย่างมีนัยสำคัญภายในช่วง climacteric peak ต่อมาในวันที่ 12 ของการเก็บรักษา อัตราการหายใจในทุกกรรมวิธีลดลง ก่อนจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งในวันที่ 15 โดยพบว่ากลุ่มที่รมสาร 1-MCP กรรมวิธี T1 (500 ppb นาน 12 ชม.) และ T2 (500 ppb นาน 24 ชม.) มีค่าอัตราการหายใจเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มที่ได้รับสาร 1-MCP ความเข้มข้น 1,000 ppb อย่างชัดเจนสูงกว่าประมาณ 20-30% สะท้อนว่ากลุ่มที่ได้รับการความเข้มข้นสูงยังคงควบคุมอัตราการหายใจได้ดีกว่าในระยะนี้ หลังจากนั้น อัตราการหายใจมีแนวโน้มลดลงต่อเนื่องและเข้าสู่ภาวะคงที่ในช่วงวันที่ 21-24 ของการเก็บรักษา

4.2.6 การผลิตเอทิลีน

จากผลการทดลองพบว่า ในช่วงวันแรกจนถึงวันที่ 6 ของการเก็บรักษา ปริมาณการผลิตเอทิลีนของผลมะม่วงในทุกกรรมวิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และยังคงเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ตามระยะเวลาเก็บรักษา (ภาพ 8B) เมื่อถึงวันที่ 9 พบว่าชุดควบคุม (ไม่รมสาร) มีการผลิตเอทิลีนสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเฉลี่ย $0.46 \mu\text{L.kg}^{-1}.\text{hr}^{-1}$ ซึ่งสูงกว่ากลุ่มที่รมสาร 1-MCP ประมาณ 21-28% แสดงถึงการเข้าสู่ช่วง climacteric ได้รวดเร็วกว่าอย่างเด่นชัด ในขณะที่ผลที่รมสาร 1-MCP มีอัตราการผลิตเอทิลีนต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะกรรมวิธี T2 (500 ppb นาน 24 ชม.), T3 (1,000 ppb นาน 12 ชม.) และ T4 (1,000 ppb นาน 24 ชม.) ที่มีค่าเฉลี่ย 0.36, 0.35 และ $0.33 \mu\text{L.kg}^{-1}.\text{hr}^{-1}$ ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นผลกระทบของ 1-MCP ในการยับยั้งกระบวนการสุกได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเข้าสู่วันที่ 15 ของการเก็บรักษา ปริมาณการผลิตเอทิลีนของผลที่รมสาร 1-MCP กรรมวิธี T1 (500 ppb นาน 12 ชม.) เพิ่มขึ้นจนเป็นค่าสูงสุดในกลุ่ม 1-MCP โดยมีค่าเฉลี่ย $0.45 \mu\text{L.kg}^{-1}.\text{hr}^{-1}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่า T2-T4 ประมาณ 10-18% หลังจากนั้นในช่วงวันที่ 18-24 ปริมาณการผลิตเอทิลีนในผลที่รมสาร 1-MCP ทุกกรรมวิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และคงอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน แสดงว่าประสิทธิภาพ 1-MCP เริ่มลดลงในระยะปลายของการเก็บรักษา

4.2.7 เปอร์เซ็นต์การเน่าเสีย

จากผลการทดลองที่แสดงในภาพ 8C พบว่าโรคที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษา คือ โรคแอนแทรกโนส โดยตั้งแต่วันแรกจนถึงวันที่ 12 ของการเก็บรักษา ยังไม่พบอาการของโรคในทุกกรรมวิธี แสดงว่าระยะสั้นของการเก็บรักษาไม่เพียงพอให้เชื้อสาเหตุโรคเริ่มพัฒนาอาการได้ เนื่องจากผลได้ผ่านขั้นตอนหลังการเก็บเกี่ยวอย่างเหมาะสม แต่เมื่อเข้าสู่วันที่ 15 ของการเก็บรักษา เริ่มพบอาการของโรคในผลที่รมสาร 1-MCP ทุกกรรมวิธี โดยผลที่รมสาร 1-MCP กรรมวิธี T2 (500 ppb นาน 24 ชั่วโมง) มีอัตราการเกิดโรคสูงที่สุดเท่ากับ 6.0% ซึ่งสูงกว่ากรรมวิธีอื่นสามเท่า ตามค่าเฉลี่ยในวันเดียวกัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาเก็บรักษา ต่อมาในวันที่ 18 ของการเก็บรักษา กรรมวิธี T2 (500 ppb นาน 24 ชั่วโมง) ยังคงมีเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคสูงที่สุด (8.0%) เมื่อเทียบกับกรรมวิธีอื่น จนเมื่อเก็บนานขึ้น 21 วัน อัตราการเกิดโรคจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลที่รมสาร 1-MCP กรรมวิธี T1 (500 ppb นาน 12 ชั่วโมง) และ T2 (500 ppb นาน 24 ชั่วโมง) มีเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคเท่ากับ 9.4% และ 9.6% ตามลำดับ โดยกรรมวิธี T3 (1,000 ppb นาน 12 ชั่วโมง) และ T4 (1,000 ppb นาน 24 ชั่วโมง) สามารถชะลอการเกิดโรคได้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญ มีเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคเพียง 7.4% และ 8.2% ตามลำดับ เมื่อถึงวันที่ 24 ซึ่งเป็นระยะท้ายของการเก็บรักษา พบว่าเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคเพิ่มขึ้นอย่างมากในทุกกรรมวิธี โดยผลที่รมสาร 1-MCP กรรมวิธี T2 ยังคงมีเปอร์เซ็นต์การเน่าเสียสูงที่สุดเท่ากับ 16.8% ซึ่งมากกว่ากรรมวิธี T3 และ T4 ประมาณ 18-40% แสดงถึงการใช้ 1-MCP ความเข้มข้น 1,000 ppb มีประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดโรคแอนแทรกโนสได้ดีกว่าความเข้มข้น 500 ppb

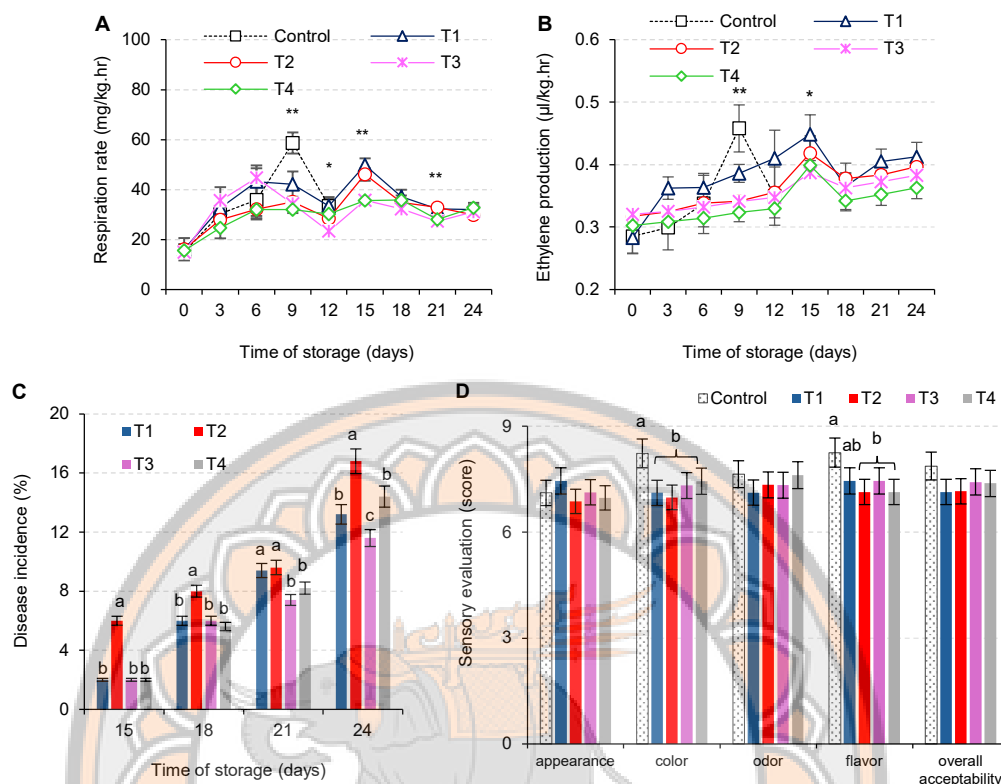
4.2.8 คะแนนประสาทสัมผัส

จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า ลักษณะปรากฏ (appearance), กลิ่น (odor), และการยอมรับโดยรวม (overall acceptability) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดควบคุมและทุกกรรมวิธีที่รมสาร 1-MCP ตามที่แสดงในภาพ 8D ซึ่งคะแนนเฉลี่ยของการประเมินอยู่ในช่วงประมาณ 7.0-8.0 คะแนน สะท้อนว่าคุณภาพการบริโภคยังอยู่ในระดับที่ผู้ทดสอบยอมรับได้ดี อย่างไรก็ตาม ในด้าน สี (color) พบว่าชุดควบคุม (ไม่รมสาร) ได้คะแนนสูงที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย 8.23 คะแนน ซึ่งสูงกว่าค่าที่อ่านได้จากกราฟของกลุ่มที่รมสาร 1-MCP ทุกกรรมวิธีประมาณ 0.3-0.6 คะแนน (กลุ่ม T1-T4 มีคะแนนอยู่ในช่วงประมาณ 7.6-7.9 คะแนน) สะท้อนว่าผู้บริโภครับรู้สีของผลไม้ที่สุกตามธรรมชาติมีความน่าดึงดูดมากกว่า ในด้าน รสชาติ (flavor) พบว่าชุดควบคุม (ไม่รมสาร) ได้คะแนนเฉลี่ย 8.25 คะแนน ซึ่งสูงกว่ากรรมวิธี T1-T4 อย่างมีนัยสำคัญ (คะแนนของกลุ่มที่รมสารอยู่ในช่วงประมาณ 7.6-7.9 คะแนนเช่นเดียวกัน) โดยมีความแตกต่างเฉลี่ยประมาณ 0.35-0.65

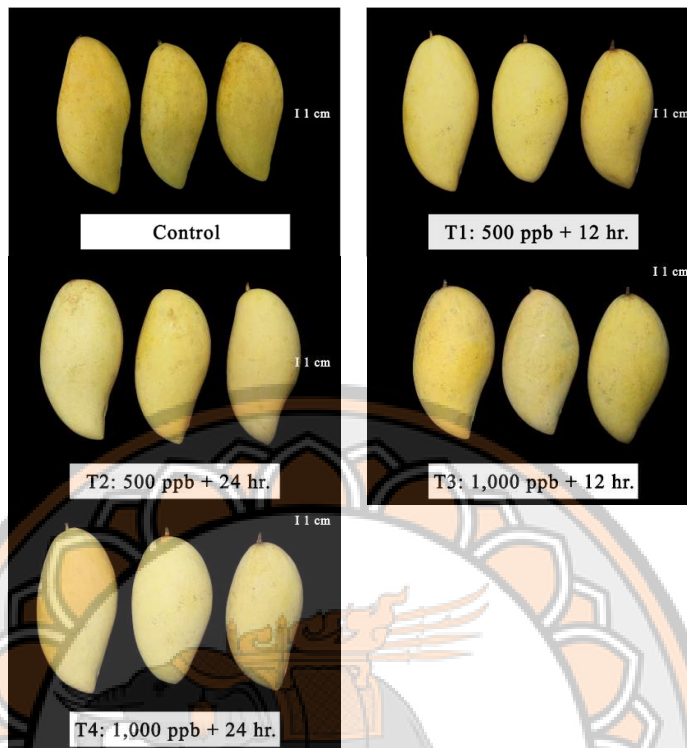
คะแนน แสดงให้เห็นว่าผู้ทดสอบให้ความชอบต่อรสชาติของผลที่สุกโดยธรรมชาติซึ่งหวานมากกว่าผลที่ชะลอการสุกด้วย 1-MCP

แม้ว่าชุดควบคุมจะได้คะแนนสีและรสชาติสูงกว่า แต่ผลการประเมินโดยรวมพบว่าผลที่รมสาร 1-MCP ทุกกรรมวิธียังคงได้รับคะแนนอยู่ในระดับดีและยอมรับได้ (acceptable) ซึ่งบ่งชี้ว่าการรมสาร 1-MCP ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพประสาทสัมผัสในระดับที่ทำให้ผู้บริโภคปฏิเสธผลิตภัณฑ์ (ภาพ 9)





ภาพ 8 อัตราการหายใจ (A) การผลิตเอทิลีน (B) เปอร์เซ็นต์การเน่าเสีย (C) และคะแนนประสาทสัมผัส (D) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy (T1: 1-MCP 500 ppb เป็นเวลา 12 ชั่วโมง, T2: 1-MCP 500 ppb เป็นเวลา 24 ชั่วโมง, T3: 1-MCP 1,000 ppb เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และ T4: 1-MCP 1,000 ppb เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) ผลที่ไม่ได้รมสาร (control) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และเครื่องหมายดอกจัน (*, **) แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (* $P \leq 0.05$ และ ** $P \leq 0.01$)



ภาพ 9 ลักษณะผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้รับการฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy ถูกรมด้วยสาร 1-MCP ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 500 และ 1,000 ppb เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C เป็นเวลา 12 วัน (กลุ่มควบคุม) และ 24 วัน (กลุ่มที่ถูกรมด้วยสาร 1-MCP)

4.2.9 อภิปรายผล

จากการทดลองที่ 1 ได้รายงานว่าการฉายรังสีนั้นสามารถชะลอการสุกได้ในผลมะม่วงไม่น้อยกว่า 12 วัน หลังการฉายที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C อย่างไรก็ตาม เมื่อต้องการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้น หรือคงคุณภาพไว้ให้นานที่สุดจำเป็นต้องใช้เทคนิคหลังการเก็บเกี่ยวอื่น ๆ เข้ามาใช้ร่วมกับการฉายรังสี เนื่องจากมะม่วงเป็นผลไม้ประเภทหายใจแบบ climacteric ซึ่งสุกและเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วหลังการเก็บเกี่ยว ผู้วิจัยจึงใช้การรมด้วยสารชะลอการสุกแก่ (1-MCP) ที่ความเข้มข้นและระยะเวลาที่เหมาะสม ภายหลังการฉายรังสีสำหรับยืดอายุผลมะม่วงเมื่อไปถึงประเทศปลายทางในระหว่างเก็บรักษา รวมถึงเลือกใช้รังสีชนิดก่อก่อไอออน ได้แก่ รังสีแกมมา เพื่อนำมาใช้ในการทดลอง เนื่องจากได้รับการรับรองจากหน่วยงานตรวจสอบสุขภาพพืชและสัตว์ (APHIS, USDA) แล้วว่าสามารถนำมาใช้ในการส่งออกผลไม้สดจากประเทศไทยได้ในระดับอุตสาหกรรม

มีการศึกษาการใช้การรมด้วยสาร 1-MCP ในผลไม้หลากหลายชนิด วัตถุประสงค์ในการใช้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาในระหว่างเก็บรักษาหรือขนส่งเป็นระยะเวลานาน มีงานวิจัยหลายชิ้นได้รายงานว่าการรมด้วยสาร 1-MCP สามารถยืดอายุผลไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีผลต่อการชะลอการ

อ่อนนุ่มผล ชะลอการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ TSS หรือ TSS/TA ratio ได้ (Du et al., 2024) เนื่องจาก 1-MCP นั้นเป็นตัวแข่งขันกับเอทิลีน หากมี 1-MCP จะมีผลให้เอทิลีนผลิตได้น้อยลง และยังส่งผลต่ออัตราการหายใจอีกด้วย จนในที่สุดผลไม้ที่ได้รับ 1-MCP จะพัฒนาการสุกได้ช้ากว่าปกติ (Yanhong Xu et al., 2020) มะม่วงเป็นผลไม้ประเภทหายใจแบบ climacteric ซึ่งสุกและเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วหลังการเก็บเกี่ยว หากผลมะม่วงได้รับการรมด้วย 1-MCP ที่ความเข้มข้น 1,000 ppb รมนาน 24 ชั่วโมง จะสามารถควบคุมกระบวนการสังเคราะห์เอทิลีนและลดอัตราการหายใจได้ โดย 1-MCP ไปมีผลต่อระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตเอทิลีนในมะม่วง ได้แก่ *MiETR1* และ *MiERS1* ได้อย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องไปกับกิจกรรมของเอนไซม์ ACC oxidase (ACO) และ ACC synthase (ACS) ถูกกดลง อย่างไรก็ตาม ระดับการแสดงออกของยีน *MiETR1* และ *MiERS1* เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาและแสดงออกในระดับสูงสุดในวันที่ 6 ของการเก็บรักษา (Li et al., 2020a) นั้นบ่งบอกได้ว่าผลที่ผ่านการรมด้วย 1-MCP แล้วในปริมาณและระยะเวลาที่เหมาะสมยังสามารถพัฒนาการสุกต่อได้อีก ในทางตรงกันข้าม สารละลายเอทิลอนจะชักนำหรือส่งเสริมการปลดปล่อยเอทิลีนและกิจกรรมของเอนไซม์ที่ย่อยสลายผนังเซลล์

การตรวจสอบระดับการแสดงออกของยีนด้วยปฏิกิริยาแลมบ์ดาไลโซเฟสเชิงปริมาณแบบเรียลไทม์ยังบ่งชี้ว่ายีนที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายผนังเซลล์ ได้แก่ *MiPG*, *MiB-GAL* และ *MiPE* การสังเคราะห์เอทิลีน (*MiACO1* และ *MiACS6*) และปัจจัยตอบสนองต่อเอทิลีน (*MiERF8*) ได้รับการชักนำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญด้วยสารละลายเอทิลอนที่ความเข้มข้น 0.8 g L^{-1} การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ยังบ่งชี้ว่าการผลิตเอทิลีนมีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญกับความแน่นเนื้อผล แต่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณ malondialdehyde (MDA) กิจกรรมของเอนไซม์ที่ย่อยสลายผนังเซลล์ การแสดงออกของยีนดังกล่าว และมีบทบาทสำคัญในการควบคุมการสุกและการอ่อนตัวของมะม่วงหลังการเก็บเกี่ยว (Li et al., 2022) ผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นสอดคล้องกับรายงานของ Hasan et al. (2024) ได้รายงานว่าผลของ 1-MCP และสถานะการเก็บรักษาในการควบคุมคุณภาพของผลมะม่วงจะแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า 1-MCP ช่วยรักษาคุณภาพของผลไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยชะลอการสูญเสียน้ำหนัก ความแน่นเนื้อ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด และปริมาณกรดไทเทรตได้ ซึ่งใช้เป็นดัชนีบ่งบอกคุณภาพระหว่างการเก็บรักษา การรมด้วยสาร 1-MCP ทำให้ชะลอการเปลี่ยนแปลงของสีและสารฤทธิ์ทางชีวภาพได้มากกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (ไม่รมสาร) และยังพบว่าสถานะการเก็บรักษาส่งผลอย่างมากต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวและอายุการเก็บรักษา โดย 1-MCP ที่ความเข้มข้น $1.0 \text{ }\mu\text{L/L}$ ช่วยรักษาคุณภาพของผลไม้ไว้ในช่วงระยะเวลาการเก็บรักษาสูงสุด 14, 34 และ 46 วัน ในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ($29\pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $65\pm 2\% \text{ RH}$) การเก็บรักษาในอุณหภูมิเย็นจัด ($3\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and $80\pm 2\% \text{ RH}$) และการเก็บรักษาในสถานะเย็น ($10\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and $90\% \text{ RH}$) ตามลำดับ การรมสารด้วย 1-MCP ที่ความเข้มข้น $1.0 \text{ }\mu\text{L/L}$ เก็บรักษาในสถานะเย็น

(10 ± 1 °C and 90% RH) เหมาะสมที่สุดสำหรับการรักษาอายุการจัดเก็บหลังการเก็บเกี่ยวของผลมะม่วง สามารถลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว ยืดอายุในระหว่างการขนส่งและรักษาคุณภาพผลมะม่วงไว้ได้ก่อนถึงมือผู้บริโภค ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการประยุกต์ใช้ 1-MCP ภายหลังการฉายรังสีแกมมา เพื่อยืดอายุเก็บรักษา ซึ่งได้มีผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยในข้างต้น มีอายุเก็บรักษา 24 วัน ในอุณหภูมิเย็น (13 ± 2 °C) และยังมีรายงานว่า การประยุกต์ใช้ 1-MCP ภายหลังการฉายรังสีแกมมา สามารถกระทำได้โดยที่ยังสามารถรักษาคุณภาพด้านต่าง ๆ ได้ดีกว่าชุดควบคุม (Sen et al., 2021)



4.3 อิทธิพลของการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศก่อนการฉายรังสีแกมมาที่มีต่อคุณภาพผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายใต้อุณหภูมิเย็น

4.3.1 การสูญเสียน้ำหนัก

จากผลการทดลองที่แสดงในภาพ 10A การสูญเสียน้ำหนักของผลมะม่วงฉายรังสีใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ เก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิ $13 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ $85 \pm 2\%$ นาน 15 วัน เพื่อจำลองการขนส่งและจำลองอายุการวางจำหน่ายอีก 6 วัน ที่อุณหภูมิ $27 \pm 2^{\circ}\text{C}$ รวม 24 วัน พบว่าเมื่อครบ 15 วัน และนำผลออกจากถุงบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ ชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) มีการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 29.3% ซึ่งสูงกว่ากลุ่มที่บรรจุในถุงพลาสติกทุกชนิดกว่า 2-3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของ WEB1 (13.03%), WEB2 (12.89%), MAP1 (14.17%) และ MAP2 (11.90%) แสดงให้เห็นว่าการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศสามารถลดการสูญเสียน้ำหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะผลที่บรรจุในถุงชนิด WEB2 ที่ลดการสูญเสียน้ำหนักลงได้มากที่สุด จากนั้นนำผลมะม่วงออกสู่สภาวะจำลองการวางจำหน่ายในวันที่ 18-24 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $27 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ซึ่งไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างผลที่บรรจุในถุงชนิด WEB1 และ WEB2 โดยทั้งสองกรรมวิธีมีแนวโน้มสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยผลที่บรรจุในถุงชนิด WEB1 อยู่ในช่วง 14.3-24.5% และผลที่บรรจุในถุงชนิด WEB2 อยู่ในช่วง 14.7-26.5%

4.3.2 ความแน่นเนื้อผล

ความแน่นเนื้อของผลมะม่วงในทุกกรรมวิธี ได้แก่ WEB1, WEB2, MAP1, MAP2 และชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในวันแรกของการเก็บรักษา ภาพ 10B แสดงว่าก่อนการบรรจุและเก็บรักษา คุณภาพเนื้อสัมผัสของผลยังคงอยู่ในระดับเดียวกัน แต่เมื่อสิ้นสุดการจำลองการขนส่งในวันที่ 15 พบว่าความแน่นเนื้อของผลลดลงอย่างรวดเร็วในทุกกรรมวิธี ความแน่นเนื้อเฉลี่ยลดลงจากค่าตั้งต้นประมาณ 8-10 N เหลือไม่ถึง 1.0 N (ลดลงมากกว่า 85-95%) สอดคล้องกับกระบวนการสูญเสียเพกตินในระหว่างการสุกของผลไม้ โดยพบว่าผลที่บรรจุในถุง WEB1 ซึ่งมีค่า OTR ต่ำกว่าถุงชนิด MAP สามารถรักษาความแน่นเนื้อได้สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยมีค่าเฉลี่ย 0.80 N ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (0.42 N) และสูงกว่า WEB2 (0.38 N) ประมาณ 2 เท่า แสดงถึงประสิทธิภาพของ WEB1 ในการชะลอการสูญเสียความแน่นเนื้อ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่บรรจุในถุง MAP1 และ MAP2 แสดงการสูญเสียความแน่นเนื้อมากกว่าผลที่บรรจุในถุง WEB1 และ WEB2 อย่างชัดเจน คาดว่าเกิดจากระดับความชื้นสัมพัทธ์และการสะสมเอทิลีนภายในบรรจุภัณฑ์ที่สูงกว่า ทำให้เร่งกระบวนการสุกและความอ่อนนุ่มผลมากขึ้น เมื่อถึงวันที่ 21 ความแตกต่างระหว่างทั้งสองกรรมวิธีเริ่มเด่นชัด โดยผลที่บรรจุในถุง WEB1 ยังคงรักษาความแน่นเนื้อได้สูง

กว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) โดยมีค่าเฉลี่ย 0.95 N ขณะที่ WEB2 มีค่าเฉลี่ยเพียง 0.61 N ซึ่งแตกต่างกันประมาณ 36% ก่อนที่จะกลับมาใกล้เคียงกันในวันที่ 24 ซึ่งเป็นวันสุดท้ายของการเก็บรักษา จะสังเกตได้ว่าระหว่างวันที่ 15 ถึงวันที่ 24 ความแน่นเนื้อจะลดลงเล็กน้อยและจะคงที่

4.3.3 ค่าความสว่าง ค่าสีแดง และค่าสีเหลืองของผล

จากผลการทดลองพบว่าในวันแรกของการเก็บรักษา ค่าความสว่างของสีเปลือก (L^*) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยผลมะม่วงทุกรวมวิธีมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 74.13-76.85 หน่วย ในขณะที่ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ของชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) มีค่าสูงกว่าอย่างสังเกตได้ตั้งแต่วันแรกของการทดสอบ (ภาพ 10C) สะท้อนว่าชุดควบคุมมีแนวโน้มการสุกที่รวดเร็วกว่าผลที่บรรจุในถุงทั้งสี่ชนิด เมื่อเสร็จสิ้นการจำลองการขนส่งในวันที่ 15 พบว่าผลที่บรรจุด้วยถุงชนิด WEB1 และ WEB2 สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยชะลอการลดลงของค่าความสว่าง (L^*) และชะลอการเพิ่มขึ้นของค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ได้ดีกว่ากรรมวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ตามที่แสดงในภาพ 10D และ 10E ในทางตรงกันข้าม ชุดควบคุมและผลที่บรรจุในถุง MAP1 และ MAP2 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีที่รวดเร็วกว่าโดยมีค่าความเข้มของสีแดงและสีเหลืองเพิ่มขึ้นสูงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่บรรจุในถุงชนิด WEB1 และ WEB2 โดยผลที่บรรจุในถุง MAP1 มีค่าเฉลี่ย a^* และ b^* เท่ากับ 13.1 และ 44.1 หน่วย ตามลำดับ และผลที่บรรจุในถุง MAP2 มีค่าเฉลี่ย a^* และ b^* เท่ากับ 12.3 และ 46.8 หน่วย เมื่อถึงวันที่ 18 ของการเก็บรักษา ไม่พบความแตกต่างทางสถิติในค่าความสว่าง สีแดง และสีเหลืองในระหว่างทุกรวมวิธี

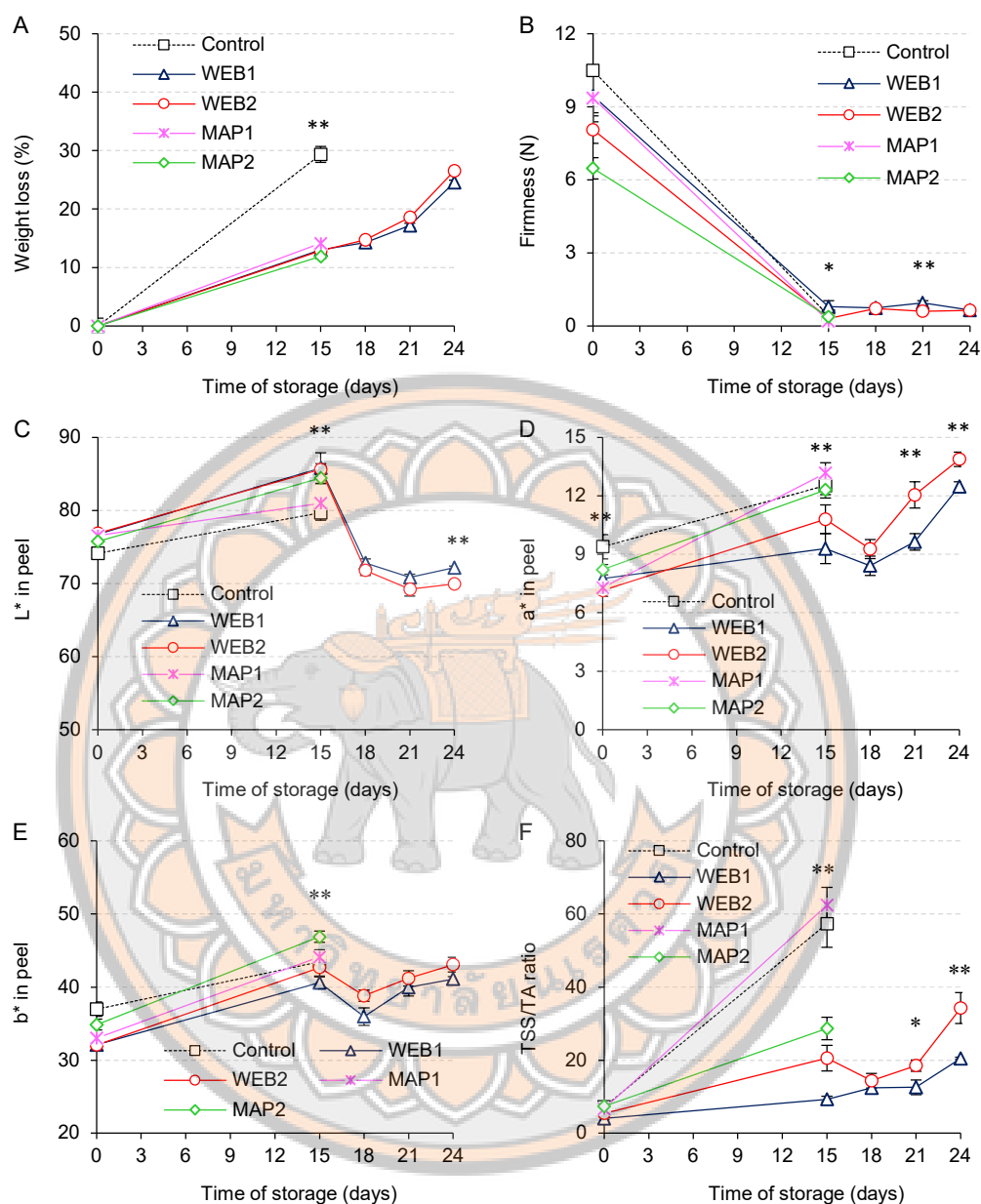
เมื่อเข้าสู่ช่วงวันที่ 21 ถึงวันที่ 24 ค่าความสว่าง (L^*) ของผลทุกรวมวิธีลดลงอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยพบว่าผลที่บรรจุในถุง WEB2 สามารถชะลอการเพิ่มของค่า b^* (สีเหลือง) ได้ดีกว่า WEB1 ในระยะท้ายของการเก็บรักษา ในขณะที่ผลที่บรรจุในถุง WEB1 ชะลอการลดลงของค่า L^* ได้ดีกว่า WEB2 ในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าถุงพลาสติกชนิด WEB1 และ WEB2 มีประสิทธิภาพสูงในการรักษาค่าความสว่างและชะลอการพัฒนาของค่าสีแดงและสีเหลืองหลังการจำลองการขนส่งนาน 15 วัน ทำให้ผลมะม่วงค่อย ๆ เปลี่ยนสีจากเหลืองอ่อนเป็นเหลืองเข้มตามธรรมชาติของการสุก เมื่อเทียบกับผลที่บรรจุในถุง MAP1 MAP2 และชุดควบคุมซึ่งมีอัตราการพัฒนาสีที่เร็วกว่าอย่างชัดเจน

4.3.4 สัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้

ในวันแรกของการเก็บรักษาผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด WEB1 WEB2 MAP1 MAP2 และชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของ TSS/TA ratio (ภาพ 11F) ต่อมาเมื่อจำลองการขนส่งนาน 15 วัน ผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด MAP2 WEB2 และ WEB1

สามารถชะลอการเพิ่มขึ้นของ TSS/TA ratio ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.6, 20.5 และ 9.3 ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม ชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) และผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด MAP1 มีปริมาณ TSS/TA ratio สูงที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 57.3 และ 62.4 ตามลำดับ จนเมื่อเก็บรักษาได้นาน 18 วัน พบว่าผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด WEB1 และ WEB2 มีปริมาณ TSS/TA ratio ที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.9 และ 14.35 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม สัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ยังคงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา นอกจากนี้ เมื่อเก็บรักษานาน 21 ถึง 24 วันของการเก็บรักษา ปริมาณสัดส่วน TSS/TA ยังคงเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด WEB2 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 18.5 และ 34.2 ตามลำดับ ขณะที่ผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด WEB1 มีค่าเฉลี่ยปริมาณสัดส่วน TSS/TA ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 12.5 และ 20.4 ตามลำดับ ในการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด WEB1 และ WEB2 และผ่านการฉายรังสีแกมมา สามารถชะลอการเพิ่มขึ้นของปริมาณสัดส่วน TSS/TA ได้ในระหว่างการเก็บรักษามากกว่าชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) รวมถึงผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด MAP1 และ MAP2 โดยทั้งสามกรรมวิธีที่กล่าวมานี้ เมื่อเก็บรักษานาน 15 วัน ผลก็ได้เข้าสู่กระบวนการสุกเรียบร้อยแล้ว





ภาพ 10 การสูญเสียน้ำหนัก (A) ความแน่นเนื้อ (B) ค่าความสว่าง (C) ค่าสีแดง (D) ค่าสีเหลือง (E) และสัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (F) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy ในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศแตกต่างกัน ได้แก่ WEB1, WEB2, MAP1 และ MAP2 ผลที่ไม่ได้บรรจุ (control) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C เก็บรักษานาน 15 วัน หลังจากนั้นเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง 27 °C แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และเครื่องหมายดอกจัน (*, **) แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (* $P \leq 0.05$ และ ** $P \leq 0.01$)

4.3.5 อัตราการหายใจ

จากผลการทดลองที่แสดงในภาพ 11A พบว่า ในวันแรกของการเก็บรักษาหลังการฉายรังสี อัตราการหายใจของผลมะม่วงที่บรรจุในถุง MAP1 และ MAP2 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและแตกต่างจากกรรมวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 303.5 และ 264.5 $\text{mL.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าผลที่บรรจุในถุงชนิด WEB1 WEB2 และชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเพียง 79.1-96.1 $\text{mL.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ประมาณ 3.2-3.8 เท่า ในกรณีของ MAP1 และประมาณ 2.8-3.3 เท่า ในกรณีของ MAP2 แสดงให้เห็นว่าถุง MAP ซึ่งมีค่าอัตราการซึมผ่านออกซิเจนสูงกว่าถุงชนิด WEB1 และ WEB2 (ตารางที่ 11) มีผลกระตุ้นกระบวนการหายใจของผลมากกว่า หลังการจำลองการขนส่งเป็นเวลา 15 วัน พบว่าอัตราการหายใจของผลในทุกกรรมวิธีลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะชุดควบคุมที่ลดลงเหลือเพียง 19.3 $\text{mL.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ซึ่งสะท้อนถึงการลดลงของกิจกรรมเมตาบอลิซึมเมื่ออยู่ในระยะสุกเกิน เมื่อเข้าสู่วันที่ 18 ของการเก็บรักษา พบว่าผลที่บรรจุในถุง WEB2 มีอัตราการหายใจสูงกว่า WEB1 อย่างมีนัยสำคัญ โดย WEB2 มีค่าเฉลี่ย 40.4 $\text{mL.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ในขณะที่ WEB1 มีค่า 20.6 $\text{mL.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ซึ่งสูงกว่าประมาณ 96% หลังจากนั้นในวันที่ 21 พบว่าอัตราการหายใจในผลที่บรรจุถุง WEB ทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดย WEB1 และ WEB2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 51.1 และ 96.2 $\text{mL.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งผลที่บรรจุในถุง WEB2 ยังคงสูงกว่าผลที่บรรจุในถุง WEB1 ถึงประมาณ 88% ก่อนที่อัตราการหายใจในทั้งสองกรรมวิธีจะลดลงอีกครั้งเมื่อถึงวันที่ 24 ของการเก็บรักษา

นอกจากนี้ ยังพบว่าอัตราการหายใจที่สูงมากในผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด MAP1 และ MAP2 มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนของวัสดุบรรจุภัณฑ์ โดย MAP1 และ MAP2 มีค่าอัตราการซึมผ่านออกซิเจนสูงถึง 80,000-90,000 $\text{cc/m}^2/\text{day}$ ซึ่งสูงกว่าถุงพลาสติกชนิด WEB1 (3,895 $\text{cc/m}^2/\text{day}$) และ WEB2 (10,000 $\text{cc/m}^2/\text{day}$) หลายเท่าตัว ส่งผลให้ผลไม่ภายในบรรจุภัณฑ์ MAP ได้รับออกซิเจนมากกว่า จึงเกิดกิจกรรมเมตาบอลิซึมและการหายใจในอัตราสูงในช่วงแรกของการเก็บรักษา ถุงบรรจุแบบดัดแปลงบรรยากาศชนิด WEB1 และ WEB2 มีประสิทธิภาพในการลดอัตราการหายใจของผลมะม่วงได้ดี ทั้งในช่วงจำลองการขนส่งและระหว่างการเก็บรักษาหลังจากนำออกจากถุง โดยผลยังคงสามารถดำเนินกระบวนการสุกต่อเนื่องได้ปกติ

4.3.6 การผลิตเอทิลีน

จากข้อมูลในภาพ 11B พบว่าที่วันเริ่มต้นของการเก็บรักษา (วันที่ 0) ผลมะม่วงทุกกรรมวิธี ชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง), WEB1, WEB2, MAP1 และ MAP2 มีอัตราการผลิตเอทิลีนไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.19-0.27 $\mu\text{L.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ แสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีและการบรรจุภัณฑ์ยังไม่ส่งผลต่อการผลิตเอทิลีนในช่วงเริ่มต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเก็บรักษานาน 15 วัน ผลที่บรรจุในถุง WEB1 และ WEB2 มีอัตราการผลิตเอทิลีนเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.01$) มีค่าเฉลี่ย 0.39

และ $0.40 \mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าผลที่บรรจุในถุง MAP1 MAP2 และชุดควบคุมอย่างชัดเจน สะท้อนว่าผลที่บรรจุในถุงชนิด MAP1 MAP2 และชุดควบคุมอยู่ในระยะสุกเกินไปแล้ว ในระหว่างการจำลองการขนส่งนาน 15 วัน ส่งผลให้การผลิตเอทิลีนลดลงตามลักษณะปกติของผลไม้ climacteric ที่เมื่อสุกเต็มที่แล้วอัตราการผลิตเอทิลีนจะเริ่มลดลง ในขณะที่ผลที่บรรจุในถุงชนิด WEB1 และ WEB2 มีการชะลอการสุกและการผลิตเอทิลีนในระหว่างจำลองการขนส่ง จึงยังคงสามารถสุกต่อหลังจากนำออกจากถุง ส่งผลให้อัตราการผลิตเอทิลีนสูงกว่ากลุ่มอื่นในวันที่ 15 ต่อมาในช่วงวันที่ 18-21 ของการเก็บรักษา อัตราการผลิตเอทิลีนในผลที่บรรจุด้วยถุง WEB1 และ WEB2 ลดลงตามการพัฒนาการสุก โดยพบว่าผลที่บรรจุด้วยถุง WEB2 ผลิตเอทิลีนสูงกว่า WEB1 ประมาณ 26-32% อย่างไรก็ดี เมื่อถึงวันที่ 24 ของการเก็บรักษา อัตราการผลิตเอทิลีนของผลที่บรรจุในถุง WEB1 และ WEB2 ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

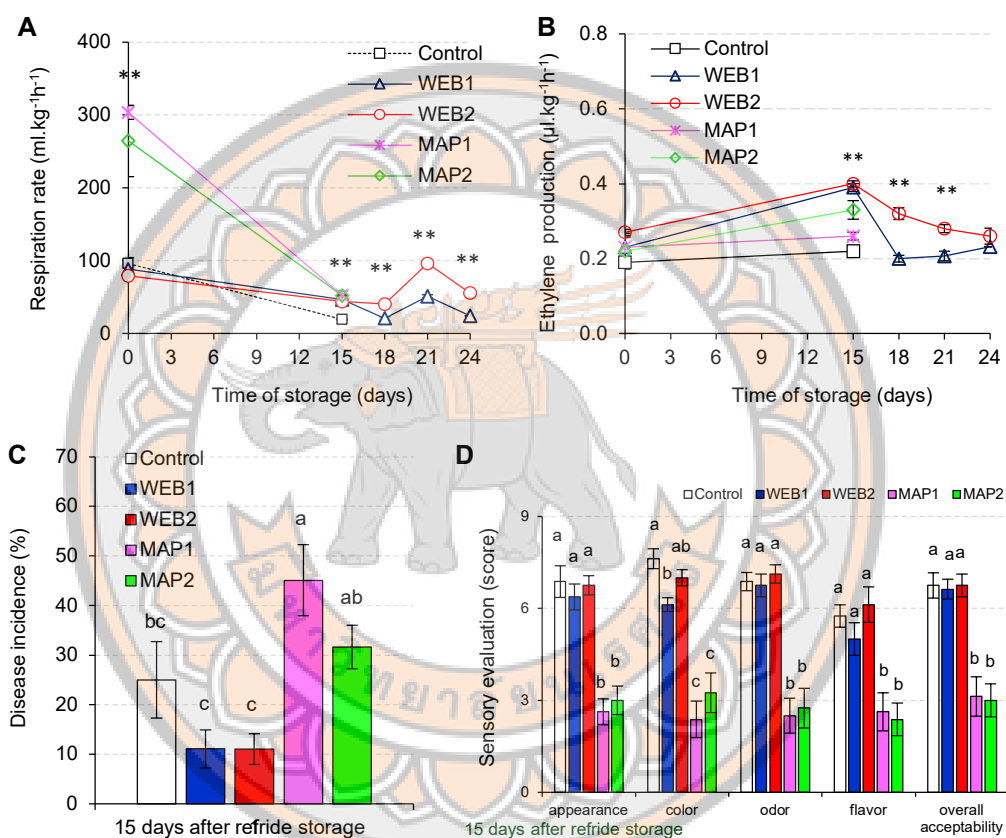
4.3.7 เปอร์เซ็นต์การเน่าเสีย

ดังที่แสดงในภาพ 11C จากการทดลองจะพบว่าโรคที่พบได้ในระหว่างเก็บรักษาหรือหลังการเก็บเกี่ยวคือโรคแอนแทรคโนส ผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด MAP1 และ MAP2 เกิดการเน่าเสียอย่างรวดเร็วหลังจากจำลองการขนส่งนาน 15 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) โดยมีค่าเฉลี่ยการเน่าเสียเท่ากับ 45.1% และ 31.6% ตามลำดับ ตามด้วยชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) มีเปอร์เซ็นต์การเน่าเสียเท่ากับ 25.03% ในขณะที่ผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด WEB1 และ WEB2 สามารถลดเปอร์เซ็นต์การเน่าเสียได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.08% และ 11.03% ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด MAP1 และ MAP2 มีเปอร์เซ็นต์การเน่าเสียกว่าชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) เป็นผลมาจากคุณสมบัติของบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ ถุงพลาสติกชนิด MAP1 และ MAP2 มีไม่อัตราการซึมผ่านของน้ำ จึงมีโอกาสดังบรรจุอากาศภายในถุงจะเกิดความชื้นสูง ซึ่งอาจจะชักนำให้เชื้อเจริญเติบโตได้ดี รวมถึงมีอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนที่สูง จึงทำให้ผลสุกอย่างรวดเร็ว เมื่อผลสุกเปลือกก็จะมีสีขาวหรือความอ่อนแอต่อโรคมากกว่า

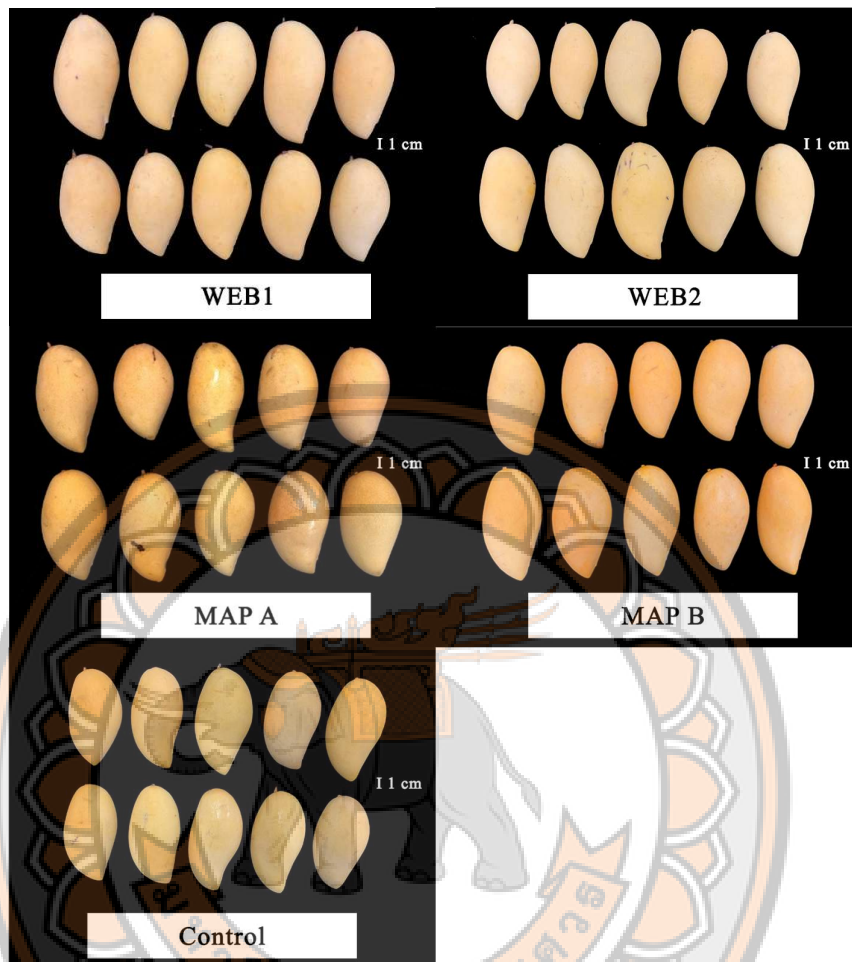
4.3.8 คะแนนประสาทสัมผัส

ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสทดสอบในวันที่ 15 ของการเก็บรักษา พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในคุณภาพทางประสาทสัมผัสทุกด้าน ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และการยอมรับโดยรวม ($P \leq 0.01$) (ภาพ 11D) ผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด MAP1 และ MAP2 ได้คะแนนประสาทสัมผัสต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และการยอมรับโดยรวม โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.3 ถึง 3.0 คะแนนเท่านั้น ในทางตรงกันข้ามผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด WEB1 WEB2 และชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) มีคะแนนประสาทสัมผัสไม่แตกต่างกันทางสถิติในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ และการยอมรับโดยรวม โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่

ในช่วง 5.0 ถึง 7.13 คะแนน อย่างไรก็ตาม ชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) ได้คะแนนด้านสีสูงกว่าเล็กน้อย มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.63 เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด WEB1 และ WEB2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยคะแนนเท่ากับ 6.1 และ 7.0 คะแนน ตามลำดับ ($P \leq 0.05$) คาดว่าคะแนนทางประสาทสัมผัส ค่าสีขึ้นอยู่กับความเข้มของสีเปลือกและสีเนื้อ ซึ่งชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) มีค่าสีเหลืองและสีแดงสูงกว่าผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด WEB1 และ WEB2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพ 12)



ภาพ 11 อัตราการหายใจ (A) การผลิตเอทิลีน (B) เปอร์เซ็นต์การเน่าเสีย (C) และคะแนนประสาทสัมผัส (D) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy ในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศแตกต่างกัน ได้แก่ WEB1, WEB2, MAP1 และ MAP2 ผลที่ไม่ได้บรรจุ (control) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13±2 °C เก็บรักษานาน 15 วัน หลังจากนั้นเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง 27 °C แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ย ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน เครื่องหมายดอกจัน (*, **) และตัวอักษรแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$ และ $P \leq 0.01$)



ภาพ 12 ลักษณะผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้รับการฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy ถูกบรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ดัดแปลงบรรยากาศแตกต่างกัน ได้แก่ WEB1 WEB2 MAP1 MAP2 และผลที่ไม่ได้บรรจุ (control) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13–15 °C เก็บรักษานาน 15 วัน

4.3.9 อภิปรายผล

Modified Atmosphere Packaging (MAP) หรือบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ปรับสัดส่วนก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสมกับชนิดของผลิตภัณฑ์ เพื่อสร้างสภาวะแวดล้อมที่ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและคงคุณภาพของสินค้าให้นานที่สุด ภายในบรรจุภัณฑ์จะถูกปรับปริมาณออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจนให้แตกต่างจากบรรยากาศปกติ เพื่อชะลอกระบวนการหายใจของผลผลิต ลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และจำกัดการเจริญของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสีย ในบางผลิตภัณฑ์อาจเติมคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ หรือใช้ไนโตรเจนเป็นก๊าซเฉื่อยเพื่อแทนที่ออกซิเจนและช่วยรักษาสภาพของบรรจุภัณฑ์ให้คงที่ (active MAP) เทคโนโลยีนี้อาจใช้การปรับก๊าซโดยตรงหรืออาศัยคุณสมบัติการซึมผ่านของฟิล์มร่วมกับอัตราการหายใจของผลผลิตเพื่อให้ระดับก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์เกิดการสมดุลขึ้นเองตามธรรมชาติ (passive MAP) ด้วยหลักการดังกล่าว MAP จึงมีบทบาทสำคัญในการรักษาความสด ความกรอบ สี และคุณค่าทางโภชนาการของผลผลิต ลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว และลดความจำเป็นในการใช้สารเคมี การใช้งานมีความหลากหลาย ทั้งในผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ ไปจนถึงผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมบริโภค เทคโนโลยีนี้จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญในระบบการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวและอุตสาหกรรมอาหารสมัยใหม่ ช่วยให้ผลิตภัณฑ์สามารถคงคุณภาพได้ยาวนานขึ้นภายใต้สภาวะที่ปลอดภัยและเหมาะสมต่อผู้บริโภค (Berk, 2013) ถึงแม้ว่าภายหลังการฉายรังสีแล้วนำผลไม้มาวางจำหน่ายด้วยสารชะลอการสุกแก่ 1-MCP จะสามารถยืดอายุผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองได้นาน 24 วัน ที่อุณหภูมิ $13 \pm 2^{\circ}\text{C}$ แต่ยังคงต้องศึกษาเทคนิคอื่น ๆ ร่วมด้วยเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในช่วงการขนส่งทางอากาศในระยะทางไกล เพื่อเป็นทางเลือกแก่ผู้ประกอบการใช้ในการส่งออกมะม่วงผลสดจากไทยไปสหรัฐอเมริกา

อย่างไรก็ตาม การส่งออกผลไม้สดไปยังสหรัฐอเมริกาต้องปฏิบัติตามระเบียบของ USDA-APHIS ซึ่งมีวัตถุประสงค์ควบคุมศัตรูพืชกักกันอย่างเข้มงวด โดยเฉพาะแมลงวันผลไม้ที่เป็นปัญหาใหญ่ในผลไม้เขตร้อน ระเบียบกำหนดอย่างชัดเจนว่าผลไม้จะต้องได้รับการฉายรังสีในภาชนะที่มีการระบายอากาศเพียงพอ (adequate aeration) เพื่อให้แน่ใจว่ารังสีจะเข้าถึงได้ทั่วถึงและไม่ให้เกิดการสะสมของก๊าซที่อาจรบกวนประสิทธิภาพของการฆ่าแมลง การใช้ MAP ซึ่งทำงานโดยการปรับอัตราก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์และลดการแลกเปลี่ยนอากาศ จึงไม่สนับสนุนหลักการดังกล่าวเพราะบรรจุภัณฑ์ MAP เป็นระบบกึ่งปิดหรือปิด ที่ควบคุมอัตราการซึมผ่านของก๊าซอย่างเฉพาะเจาะจง และเมื่อใช้ร่วมกับการฉายรังสีอาจทำให้บรรยากาศภายในช่องเปลี่ยนแปลงจนส่งผลต่อความแม่นยำของกระบวนการกำจัดแมลง โดยเฉพาะในภาวะออกซิเจนต่ำ ซึ่งอาจกระตุ้นให้แมลงบางชนิดเข้าสู่ภาวะเมตาบอลิซึมต่ำ (metabolic suppression) ทำให้ประสิทธิภาพของการฉายรังสีลดลง และเพิ่มความเสี่ยงด้านสุขอนามัยพืชต่อประเทศผู้นำเข้า สหรัฐอเมริกาจึงไม่แนะนำให้ใช้บรรจุภัณฑ์ที่อาจ

สร้าง “microenvironment” ที่พฤษภาคมของแมลง แม้เพียงระยะเวลาสั้น ๆ ก่อนถึงจุดตรวจ (Follett et al., 2013)

อย่างไรก็ดี ได้มีการศึกษาการใช้ MAP และการฉายรังสีแกมมาร่วมกันเพื่อศึกษาอิทธิพลร่วมกันต่อการเจริญเติบโตของแมลงวันผลไม้ จากการศึกษามาตรการสุขอนามัยพืชก่อนการส่งออกในมะม่วงน้ำดอกไม้ พบว่า การใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ (MAP) ร่วมกับการฉายรังสีแกมมาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดแมลงวันผลไม้ (*Bactrocera dorsalis*) ได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อมะม่วงที่ปนเปื้อนแมลงได้รับการฉายรังสีในช่วง 0.03–0.12 กิโลเกรย์ พบว่าแมลงมีอัตราการตายสูงขึ้นในสภาพ MAP เมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ใช้ MAP ค่าปริมาณรังสีที่ทำให้แมลงตายได้ 99% (LD₉₉) ในชุดควบคุมและบรรจุภัณฑ์ MAP ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ FF5, CF1 LDPE และ H34M เท่ากับ 58.1, 41.6, 43.8 และ 47.4 เกรย์ ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นว่า MAP ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันรังสี แต่กลับเสริมให้รังสีสร้างความเสียหายต่อแมลงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ในการทดสอบเชิงพาณิชย์ที่ปริมาณรังสี 0.15 กิโลเกรย์ โดยใช้มะม่วงที่มีหนอนแมลงวันผลไม้รวม 35,000 ตัว บรรจุในถุง MAP ประเภท H34M ไม่พบการรอดชีวิตของแมลงจนถึงระยะตัวเต็มวัย การทดลองนี้จึงยืนยันว่าการใช้ MAP สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับการฉายรังสีในระดับเชิงพาณิชย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ลดทอนผลของรังสีภายใต้มาตรการกักกันศัตรูพืชที่ปริมาณ 0.15 กิโลเกรย์ (Srimartpirom et al., 2018)

จากผลการทดลองในครั้งนี้ จะพบว่าในทุกกรรมมีการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียน้ำหนักตามระยะเวลาการเก็บรักษา การเพิ่มขึ้นของการสูญเสียน้ำหนักถือเป็นสาเหตุหลักของการสูญเสียคุณภาพหรือการเสื่อมสภาพ การเน่าเสีย และการเสื่อมของผักและผลไม้ (do Nascimento Nunes & Emond, 2007) การสูญเสียน้ำหนักของผลไม้มีความสัมพันธ์กับอัตราการหายใจและการคายน้ำของผลไม้ ซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลิตผลทางการเกษตร (Perumal et al., 2021) ในการศึกษาครั้งนี้ ชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) แสดงการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และมีการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดถึง 29.37% ในขณะที่ผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด WEB1 WEB2 MAP1 และ MAP2 สามารถรักษาการสูญเสียน้ำหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการสูญเสียน้ำหนักเพียง 11.90-14.17% หลังจากจำลองการขนส่งนาน 15 วัน ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Phakdee and Chaiprasart (2020) ที่รายงานวามะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่เก็บรักษาด้วยบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศโดยใช้ถุง polypropylene (WEB) และถุง commercially bags (GEB) ที่มีอัตราการซึมผ่านออกซิเจนและน้ำแตกต่างกัน สามารถรักษาการสูญเสียน้ำหนักได้ดีกว่าชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) ระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 30 วัน ที่อุณหภูมิ 13-15 °C ผลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด WEB และ GEB สูญเสียน้ำหนักไม่เกิน 6% ตลอดระยะเวลาเก็บรักษา และยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Perumal et al. (2021) ที่รายงานว่าผลมะม่วง ‘Totapuri’ และพันธุ์ ‘Banganapalli’ ที่บรรจุในถุง biorientated polypropylene สามารถรักษาการสูญเสียน้ำหนักได้ที่ 8.55% และ

7.05% ตามลำดับ ยืดอายุการเก็บรักษาได้นาน 18-20 วัน ที่อุณหภูมิ 20 °C ขณะที่ชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) สูญเสียน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11% และมีอายุเก็บรักษาเพียง 9-10 วัน ที่อุณหภูมิ 20 °C รวมถึงแสดงอาการการเกิดโรคแอนแทรกโนสร่วมด้วย เนื่องจากผลที่สุกแล้วจะอ่อนแอต่อโรคหลังการเก็บเกี่ยว ผลการการศึกษาในครั้งนี้ ค้นพบว่าการบรรจุผลมะม่วงในถุงพลาสติกชนิด WEB1 และ WEB2 ชะลอการสูญเสียน้ำหนักได้ดีเป็นเวลานาน 15 วัน และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อจำลองอายุเก็บรักษาต่ออีก 9 วัน สามารถคาดได้ว่าบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศสามารถลดกระบวนการเมแทบอลิซึมทางสรีรวิทยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการสูญเสียน้ำหนัก (Wei et al., 2021) ตามรายงานของ Rodriguez and Zoffoli (2016) ได้รายงานว่าการบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศรักษาความแน่นเนื้อของผลลูเบอร์รี่ได้สำเร็จ ซึ่งเป็นผลไม้ประเภท non-climacteric โดยใช้ถุงพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำหนา 60 มิลลิเมตร และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้นานถึง 45 วัน ที่อุณหภูมิ 0 °C ความแน่นเนื้อของลูเบอร์รี่ ‘Brigitta’, ‘O’Neal’, ‘Duke’, ‘Legacy’, ‘Elliott’ และ ‘Aurora’ highbush ถูกชะลอความอ่อนนุ่มได้สำเร็จในระหว่างเก็บรักษา ลดการสูญเสียน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญในผลที่ถูกบรรจุด้วยบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศที่มีคุณสมบัติ low-density polyethylene film หนา 60 μm พร้อมกับอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน $3,237 \text{ cc} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ และอัตราการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ $7,833 \text{ cc} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ขนาด $58 \text{ cm} \times 32 \text{ cm}$ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Özkaya et al. (2016) ได้ทำการศึกษาผลของบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศต่อคุณภาพผลเนคทารีน ‘Maria Aurelia’ ซึ่งเป็นผลไม้ประเภท climacteric โดยบรรจุน้ำหนัก 5 กิโลกรัม/ถุง โดยถุงมีคุณสมบัติอัตราการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ $5,000\text{--}18,000 \text{ cm}^3/\text{m}^2/\text{day}^{-1}$; อัตราการซึมผ่านของน้ำ $10 \text{ g mm}/\text{m}^2/\text{day}^{-1}$ และระยะการเจาะรู 3 mm^2 เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) เก็บรักษาเป็นเวลานาน 40 วัน ที่อุณหภูมิ 0 °C จากนั้นจำลองการวางจำหน่ายนาน 2 วัน จากการทดลองพบว่าบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศรักษาความแน่นเนื้อผลได้ดีอย่างมีนัยสำคัญ พร้อมทั้งยังมีผลต่อกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการอ่อนนุ่มผล ได้แก่ polyphenol oxidase, polygalacturonase และ pectin methyl esterase นอกจากนี้ ยังชะลอการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ อัตราการหายใจ การผลิตเอทิลีน และการเปลี่ยนแปลงสีได้ตลอดระยะเวลาจากผลข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศที่มีคุณสมบัติเหมาะสมจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตได้ โดยต้องคำนึงถึงอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ รวมไปถึงการเจาะรู ผลการทดลองสอดคล้องในผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่บรรจุด้วยถุงชนิด WEB1 และ WEB2 มีประสิทธิภาพในการลดการผลิตเอทิลีนและอัตราการหายใจในผล ส่งผลให้มีความแน่นเนื้อสูงกว่าชุดควบคุม การบรรจุแบบ MAP มีประสิทธิภาพในการลดกิจกรรมของเอนไซม์เพคตินเอสเทอเรส และพอลิกลาแลคทูโรเนส ซึ่งส่งผลให้การเน่าของผลช้าลง เนื่องจากเอนไซม์เหล่านี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับ

การอ่อนนุ่มของผนังเซลล์ระหว่างการเก็บรักษา (Phakdee et al., 2024) การใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศยังสามารถชะลอการพัฒนาของสีผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่บรรจุถุง) การเปลี่ยนแปลงสีของผลมะม่วงที่ไม่บรรจุด้วยบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ (ชุดควบคุม) ระหว่างการเก็บรักษาจะสูญเสียค่าความสว่างระหว่างกระบวนการสุกและค่อย ๆ เปลี่ยนสีจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีเหลืองเข้มเมื่อสุก มีการพัฒนาสีเหลืองและสีแดงอย่างต่อเนื่องระหว่างการเก็บรักษาซึ่งสามารถวัดเชิงปริมาณได้จากค่า a^* และค่า b^* ที่เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาเก็บรักษา (Ebrahimi & Rastegar, 2020; Wei et al., 2021) มะม่วง 'Alphonso' ที่ถูกบรรจุในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ โดยใช้ฟิล์มชนิดโพลิโพรพิลีน (Oriented Polypropylene) ที่มีความหนา 40 μm และมีอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน (Oxygen Transmission Rate: OTR) $2,700 \text{ cm}^3/\text{m}^2/\text{day}^{-1}$ สามารถรักษาชะลอการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสีเหลืองและสีแดงของเปลือกมะม่วงได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงที่ไม่ได้รับการบรรจุ ซึ่งมีค่าสีเหลืองและสีแดงสูงขึ้นระหว่างการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Ramayya et al., 2012) การใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศส่งผลให้กระบวนการสังเคราะห์แอนโทไซยานินและแคโรทีนอยด์ให้เกิดขึ้นช้าลงซึ่งทำให้สีแดงและสีเหลืองของเปลือกและเนื้อมะม่วงลดลง (Artés-Hernández et al., 2006) ทั้งนี้เป็นไปได้ว่ามะม่วงที่บรรจุใน MAP ได้รับออกซิเจนน้อยลง โดยออกซิเจนมีบทบาทในการเร่งอัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีน ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของสีเกิดขึ้นช้าลง

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่ากลไกการการยืดอายุของบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ คือ การลดการสัมผัสระหว่างผักหรือผลไม้ต่อบรรยากาศปกติ โดยใช้ถุงชนิดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ ปริมาณออกซิเจนที่สูงในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ มักจะส่งผลให้อัตราการหายใจเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ปริมาณออกซิเจนต่ำจะช่วยลดอัตราการหายใจลง อย่างไรก็ตาม หากปริมาณออกซิเจนต่ำมากเกินไปหรือมีระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง อาจชักนำให้เกิดกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Olveira-Bouzas et al., 2021) นอกจากนี้ บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศสามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์ ACC synthase ได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นเอนไซม์จำกัดปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์เอทิลีน ซึ่ง S-adenosyl-methionine (SAM) จะถูกเปลี่ยนเป็น 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) โดยเอนไซม์ ACC synthase ในช่วงระหว่างการเก็บรักษา (Wei et al., 2021) นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศสามารถลดอัตราการเกิดโรคได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยแสดงการเกิดโรคเพียง 2.2% เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (non-packed) ภายในระยะเวลาเก็บรักษา 24 วัน (Aglar et al., 2017) เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ ช่วยลดระดับออกซิเจน เนื่องจากเชื้อก่อโรคมักมีข้อจำกัดในการใช้ออกซิเจน ส่งผลให้สัดส่วนของการเน่าเสียลดลง (Giacalone & Chiabrando, 2015) และยังคงคาดการณ์ได้ว่าการใช้

บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศช่วยลดการสัมผัสกันระหว่างผลในระหว่างขนส่งหรือเก็บรักษา จึงช่วยลดการกระจายสปอร์ของโรคแอนแทรกโนสได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.4 ระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสุกแก่ในผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายหลังการฉายรังสีแกมมาในระหว่างเก็บรักษาด้วยเทคนิค Quantitative Realtime-PCR

4.4.1 ความแน่นเนื้อ

ความแน่นเนื้อของผลที่ฉายรังสีและชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในวันแรกของการเก็บรักษา (ภาพ 13A) โดยผลที่ฉายรังสีมีความแน่นเนื้อเท่ากับ 7.4 N ชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) มีความแน่นเนื้อเท่ากับ 6.0 N จนเมื่อเก็บรักษานานขึ้นในวันที่ 7 ถึงวันที่ 14 ของการเก็บรักษา พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างผลที่ฉายรังสีและชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) โดยในวันที่ 14 ของการเก็บรักษา ผลที่ฉายรังสีและชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) มีค่าเฉลี่ยความแน่นเนื้อเท่ากับ 1.9 และ 1.8 N ตามลำดับ นอกจากนี้ ความแน่นเนื้อจะลดลงตามระยะเวลาเก็บรักษา

4.4.2 ค่าความสว่าง ค่าสีแดง และสีเหลืองของผล

จากผลการทดลองพบว่า ในวันแรกของการเก็บรักษาค่าความสว่าง (L^*) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญในผลที่ฉายรังสีและชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 77.2 และ 79.0 หน่วย ตามลำดับ (ภาพ 13B) จนเมื่อมาถึงวันที่ 7 ของการเก็บรักษา พบว่าค่าความสว่างมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลที่ฉายรังสีรักษาค่าความสว่างได้มากกว่าชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 77.0 และ 73.2 ตามลำดับ จากนั้นภายหลังเก็บรักษาได้นาน 14 วัน ค่าความสว่างยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องในผลที่ฉายรังสีและชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) และยังพบว่าผลที่ฉายรังสียังคงรักษาค่าความสว่างได้มากกว่าชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 70.9 และ 68.8 หน่วย ตามลำดับ ในกรณีของค่าสีแดงและค่าสีเหลือง ผลการทดลองพบว่ามีแนวโน้มที่จะสามารถรักษาหรือชะลอการเปลี่ยนแปลงได้ในผลที่ฉายรังสี เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) โดยจะพบว่าผลที่ฉายรังสีสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงค่าสีแดงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในวันที่ 7 ถึงวันที่ 14 ของการเก็บรักษา (ภาพ 13C) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.6 และ 13.3 หน่วย ตามลำดับ เช่นเดียวกับค่าสีเหลือง จะพบว่าผลที่ฉายรังสีสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงค่าสีเหลืองได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในวันที่ 7 ถึงวันที่ 14 ของการเก็บรักษา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 35.8 และ 40.2 หน่วย ตามลำดับ (ภาพ 13D) และยังพบว่าค่าสีแดงและสีเหลืองจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาในผลที่ฉายรังสี แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสีผลที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาช้ากว่าผลไม่ฉายรังสีในระหว่างเก็บรักษาอย่างชัดเจน ผลที่ฉายรังสีชะลอการสุกผ่านกลไกการพัฒนาสีในระหว่างเก็บรักษา

4.4.3 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้

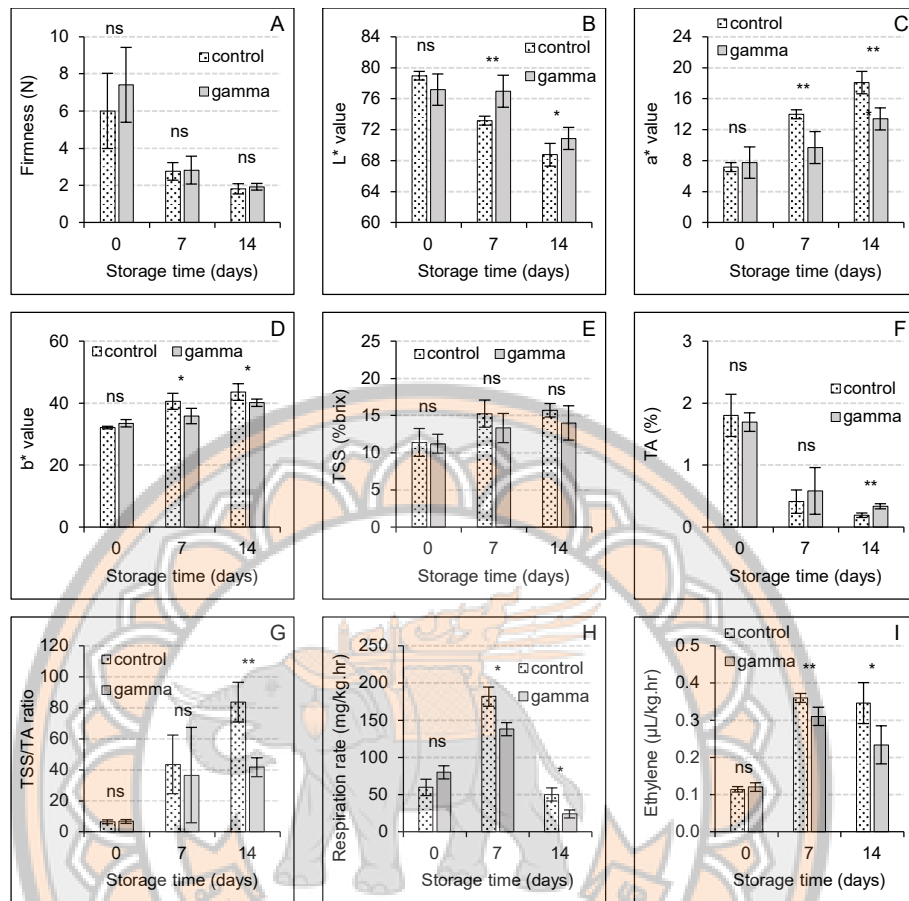
จากผลการทดลองพบว่า ในวันแรกจนถึงวันที่ 14 ของการเก็บรักษา ไม่พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) ระหว่างผลที่ฉายรังสีและชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) โดยในวันสุดท้ายพบว่าผลที่ฉายรังสีและชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) มีค่าเฉลี่ยปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 14.0 และ 15.7 %brix ตามลำดับ และยังพบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บรักษา (ภาพ 13E) ในวันแรกจนถึงวันที่ 7 ของการเก็บรักษา ไม่พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (ภาพ 13F) โดยปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเก็บรักษานาน 7 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.41 และ 0.58% ในผลที่ฉายรังสีและชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อถึงวันที่ 14 ของการเก็บรักษา พบว่าผลที่ฉายรังสีจะชะลอการลดลงของปริมาณกรดที่ไทเทรตได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.33% และสังเกตได้ว่าปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จะลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา นอกจากนี้ ในวันแรกจนถึงวันที่ 7 ของการเก็บรักษา ไม่พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญของสัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (TSS/TA ratio) (ภาพ 13G) อย่างไรก็ตามเมื่อถึงวันที่ 14 ของการเก็บรักษา พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณ TSS/TA ratio โดยผลที่ฉายรังสีจะชะลอการเพิ่มขึ้นของ ปริมาณ TSS/TA ratio ได้มากกว่าชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 41.6 และ 83.7 ตามลำดับ

4.4.4 อัตราการหายใจ

จากผลการทดลองพบว่าในวันแรกของการเก็บรักษา อัตราการหายใจของผลมะม่วงที่ฉายรังสีไม่แตกต่างจากชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 79.8 และ 59.6 $\text{ml.kg}^{-1}.\text{hr}^{-1}$ ตามลำดับ (ภาพ 13H) แสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีไม่มีผลกระทบต่ออัตราการหายใจในช่วงเริ่มต้นของการเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม เมื่อเก็บรักษานาน 7 วัน พบความแตกต่างอย่างเด่นชัด โดยผลที่ฉายรังสีมีอัตราการหายใจลดลงเหลือ 138.1 $\text{ml.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ในขณะที่ชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) แสดงอัตราการหายใจสูงขึ้นถึง 181.8 $\text{ml.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ซึ่งสูงกว่าผลฉายรังสีประมาณ 31.6% สะท้อนว่าการฉายรังสีมีผลลดกิจกรรมการหายใจของผลในช่วงกลางการเก็บรักษาที่สัมพันธ์กับเมตาบอลิซึมของผล เมื่อเข้าสู่วันที่ 14 ของการเก็บรักษา อัตราการหายใจของผลทั้งสองกรรมวิธีลดลง โดยผลที่ฉายรังสีมีค่าเฉลี่ยเพียง 24.0 $\text{ml.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุม (50.2 $\text{ml.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$) ประมาณ 52.2% อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้รับการฉายรังสีมีการชะลอการหายใจได้มีประสิทธิภาพกว่าอย่างชัดเจนในช่วง 7-14 วัน ของการเก็บรักษา

4.4.5 การผลิตเอทิลีน

จากผลการทดลองที่แสดงในภาพ 13I พบว่าในวันแรกของการเก็บรักษา อัตราการผลิตเอทิลีนของผลมะม่วงที่ฉายรังสีแกมมาไม่แตกต่างจากชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย 0.11 และ 0.12 $\mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนว่าการฉายรังสีไม่ได้กระตุ้นหรือยับยั้งการผลิตเอทิลีนในช่วงเริ่มต้นของการเก็บรักษา จนเมื่อเข้าสู่วันที่ 7 ของการเก็บรักษา พบว่าการผลิตเอทิลีนเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทั้งสองกรรมวิธี โดยผลที่ฉายรังสีแกมมามีค่าเฉลี่ย 0.31 $\mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ขณะที่ชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าที่ 0.36 $\mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ผลฉายรังสีแกมมามีการผลิตเอทิลีนต่ำกว่าชุดควบคุมประมาณ 13.9% เมื่อเข้าสู่วันที่ 14 ของการเก็บรักษา การผลิตเอทิลีนในชุดควบคุมยังคงอยู่ในระดับใกล้เคียงกับวันที่ 7 ที่ค่าเฉลี่ย 0.34 $\mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ขณะที่ผลที่ฉายรังสีแกมมาแสดงระดับการผลิตเอทิลีนลดลงอย่างชัดเจนได้เท่ากับ 25.8% ผลการทดลองบ่งชี้ว่าการฉายรังสีแกมมามีผลต่อกระทบอัตราการผลิตเอทิลีนในช่วงกลางและท้ายของการเก็บรักษา สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 4.1.6 ที่ได้รายงานไว้ว่าผลมะม่วงที่ฉายรังสีแกมมาและเอกซมีการผลิตเอทิลีนลดลงในวันที่ 6 และ 12 อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) และคาดว่าจะสอดคล้องกับระดับการแสดงออกของยีนในกระบวนการสังเคราะห์และส่งสัญญาณเอทิลีนที่ลดลงในผลการทดลองที่ 4.4.7



ภาพ 13 ความแน่นเนื้อ (A) ค่าความสว่าง (B) ค่าสีแดง (C) ค่าสีเหลือง (D) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (E) ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (F) สัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (G) อัตราการหายใจ (H) และการผลิตเอทิลีน (I) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy (gamma) ผลไม่ฉายรังสีจัดเป็นชุดควบคุม (control) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ $13 \pm 2^\circ\text{C}$ เก็บรักษานาน 14 วัน แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และเครื่องหมายดอกจัน (*, **) แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($*P \leq 0.05$ และ $**P \leq 0.01$)

4.4.6 ผลการสกัดอาร์เอ็นเอจากเนื้อมะม่วง

สำหรับการวิเคราะห์อาร์เอ็นเอในตัวอย่างมะม่วงฉายรังสีและไม่ฉายรังสี (ชุดควบคุม) ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟรีซิสใน 1% agarose gel พบว่าอาร์เอ็นเอที่สามารถสกัดได้เป็นอาร์เอ็นเอที่มีคุณภาพดี เนื่องจากการปรากฏแถบอาร์เอ็นเอ 2 แถบหลัก คือ 28S rRNA และ 18S rRNA อย่างชัดเจนสมบูรณ์ ไม่มีการแตกหัก (ภาพผนวกที่ 11) โดยผลการทดลองสอดคล้องกับการวัดอาร์เอ็นเอจากค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่อง NanoDrop 2000 (Thermo Fisher Scientific, MA, USA) ปริมาณความเข้มข้นของอาร์เอ็นเอที่สามารถสกัดได้มีปริมาณอาร์เอ็นเอที่เพียงพอต่อการนำไปทำ RT-qPCR ได้โดยมีปริมาณอาร์เอ็นเอที่สกัดจะแสดงอยู่ในตาราง ดังต่อไปนี้

ตาราง 13 ปริมาณอาร์เอ็นเอที่สกัดได้ด้วยสารละลาย 2% CTAB จากเนื้อมะม่วงที่ฉายรังสีและไม่ฉายรังสี (ชุดควบคุม)

ตัวอย่าง	ปริมาณอาร์เอ็นเอ (ng/ μ L) ในแต่ละระยะเวลาเก็บรักษา (วัน)		
	0	7	14
ไม่ฉายรังสี	453.9	375.7	1346.4
	497.1	612.2	1435.2
	388.5	576.2	1033.8
ค่าเฉลี่ย	624.5	521.2	915.0
ฉายรังสี	742.7	668.9	910.4
	746.3	296.1	374.6
	918.4	598.3	389.4
ค่าเฉลี่ย	802.5	521.1	558.1

จากนั้นอาร์เอ็นเอจะถูกบำบัดด้วย DNase treatment เพื่อกำจัด gDNA ที่หลงเหลืออยู่ในอาร์เอ็นเอเป้าหมาย ทำให้อาร์เอ็นเอเป้าหมายมีความบริสุทธิ์ โดยใช้ชุดน้ำยาสำเร็จรูป TURBO™ DNase Kit (Thermo Fisher Scientific Inc., USA) ตามขั้นตอนที่ผู้ผลิตแนะนำ (*แผนการทดลองที่ 3.4*) ตรวจสอบปริมาณอาร์เอ็นเอด้วยเทคนิคการเรืองด้วยแสงจากชุดน้ำยาสำเร็จรูปและเครื่องมือ Invitrogen™ Qubit™ 3 Fluorometer Ultraviolet-Visible (UV-Vis) spectrophotometry (Thermo Fisher Scientific Inc., USA) โดยมีปริมาณอาร์เอ็นเอจะแสดงอยู่ในตาราง ดังต่อไปนี้

ตาราง 14 ปริมาณอาร์เอ็นเอภายหลัง DNase treatment จากเนื้อมะม่วงที่ฉายรังสีและไม่ฉายรังสี

ตัวอย่าง	ปริมาณอาร์เอ็นเอ (ng/ μ L) ในแต่ละระยะเวลาเก็บรักษา (วัน)		
	0	7	14
ไม่ฉายรังสี	99.8	104	510
	60.8	106.6	449
	96.7	135	222
ค่าเฉลี่ย	85.8	115.2	393.7
ฉายรังสี	231	106	107
	188	124	173
	321	110	99.2
ค่าเฉลี่ย	246.7	113.3	126.4

เมื่อได้อาร์เอ็นเอที่มีคุณภาพดีแล้ว นำไปสังเคราะห์เป็น cDNA เพื่อนำไปวิเคราะห์ RT-qPCR พบว่าอาร์เอ็นเอที่สกัดได้สามารถใช้วัดการแสดงออกของยีนได้ โดยมีค่า Cycle Threshold (Ct) ที่ใกล้เคียงกันในแต่ละซ้ำ อย่างไรก็ตาม เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาพีซีอาร์ สามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟจุดหลอมเหลว (melting curve) หลังจากการขยาย DNA เสร็จสิ้น (หลังรอบสุดท้ายของ PCR) อุณหภูมิของระบบจะถูกเพิ่มขึ้นทีละน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สาย DNA ที่จับกัน (double-stranded DNA, dsDNA) จะเริ่มแยกจากกัน (denaturation) เครื่องมือจะตรวจวัดสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์แบบเรียลไทม์ โดยใช้สารเรืองแสง เช่น SYBR Green ซึ่งสามารถจับกับ dsDNA ได้ แต่ไม่สามารถจับกับสายเดี่ยว (single-stranded DNA, ssDNA) เมื่อ DNA หลอมละลาย (denature) สารเรืองแสงจะหลุดออกและสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์จะลดลง ผลลัพธ์จะแสดงเป็นกราฟ melting curve ซึ่งใช้ตรวจสอบว่ามีเพียงผลิตภัณฑ์ PCR ที่ต้องการหรือมีการปนเปื้อน เช่น primer dimer หรือผลิตภัณฑ์ไม่จำเพาะหรือไม่ ภายหลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยาพบว่ายีน *MiETR1*, *MiERS1* และ *MiACS* สามารถเกิดปฏิกิริยาพีซีอาร์ได้ดีและมีความจำเพาะกับไพรเมอร์ เพราะมีการปรากฏยอดกราฟจุดหลอมเหลวเพียงอุณหภูมิเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับยีนควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่ากราฟที่แสดงการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลิตภัณฑ์ PCR แบบเรียลไทม์ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบของปฏิกิริยา (cycle number) กับระดับความเข้มของสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence signal) ที่เกิดขึ้นจากการสะสมของผลิตภัณฑ์มีรูปร่างของกราฟที่ดี มีช่วง exponential ชัดเจน และมีความคลาดเคลื่อนระหว่างตัวอย่างในกรรมวิธีเดียวกันต่ำ (ภาคผนวก 13-15)

4.4.7 ระดับการแสดงออกของยีน

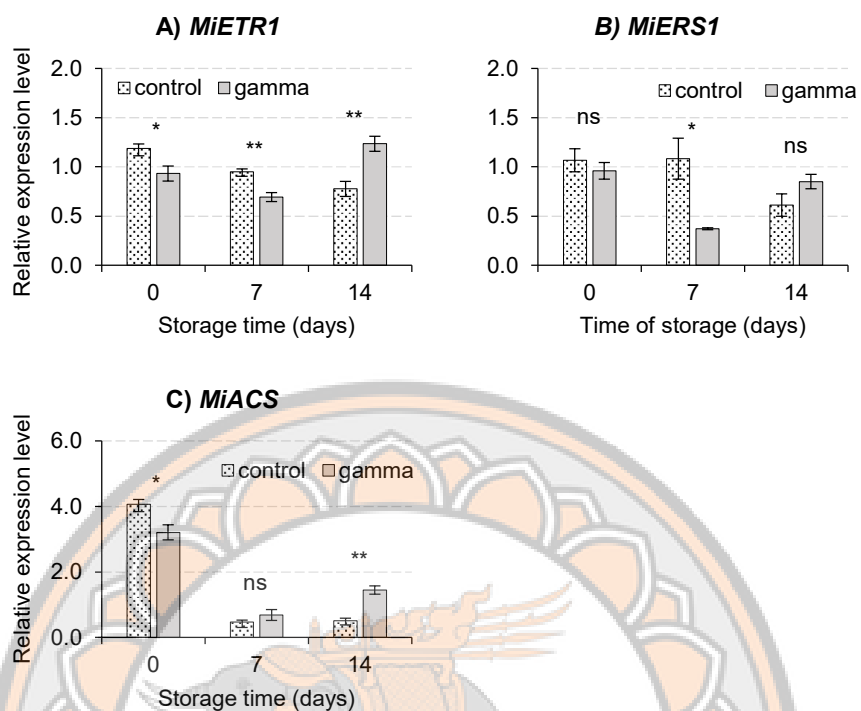
จากผลการทดลองพบว่าการฉายรังสีแกมมาส่งผลต่อระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์และการส่งสัญญาณเอทิลีนของผลมะม่วงอย่างมีนัยสำคัญ (ภาพ 14) โดยระดับการแสดงออกของยีน *MiETR1* ในผลที่ฉายรังสีลดลงอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่วันแรกจนถึงวันที่ 7 ของการเก็บรักษาเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) โดยมีค่าเฉลี่ยการแสดงออกเท่ากับ 0.93 ในวันแรก และลดลงเหลือ 0.69 ในวันที่ 7 (ภาพ 14A) เมื่อคิดเป็นร้อยละในวันแรกจะพบว่าผลที่ฉายรังสีมีระดับการแสดงออกของยีน *MiETR1* ลดลง 21.2% (0.93 เทียบกับ 1.18) และในวันที่ 7 ความแตกต่างดังกล่าวเพิ่มมากขึ้นเป็น 34.3% (0.69 เทียบกับ 0.95) ซึ่งเมื่อเทียบกับยีนอ้างอิงแล้ว (*MiACT*) แสดงว่าการฉายรังสีแกมมาทำให้ระดับการแสดงออกของ *MiETR1* ลดต่ำกว่า baseline (ค่าปกติ) ประมาณ 7% และ 31% ตามลำดับ ขณะที่ชุดควบคุมยังคงมีระดับการแสดงออกใกล้เคียงกับยีนอ้างอิง อย่างไรก็ตาม เมื่อเก็บรักษานานถึง 14 วัน ระดับการแสดงออกของยีน *MiETR1* ในผลที่ฉายรังสีเพิ่มสูงขึ้นอีก คาดว่าเป็นการซ่อมแซมของเซลล์ภายหลังการฉายรังสี

จากผลการศึกษาการแสดงออกของยีน *MiERS1* (ภาพ 14B) พบว่าในวันแรกของการเก็บรักษา ระดับการแสดงออกของยีนในผลที่ฉายรังสีแกมมาไม่แตกต่างจากชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าการแสดงออกอยู่ในช่วงใกล้เคียง 1.0 เมื่อเทียบกับยีนอ้างอิง อย่างไรก็ตาม เมื่อเก็บรักษานาน 7 วัน พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลที่ฉายรังสีมีระดับการแสดงออกของยีน *MiERS1* ลดลงเหลือ 0.37 ซึ่งต่ำกว่ายีนอ้างอิงถึง 63% และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลที่ฉายรังสีและไม่ฉายรังสี พบว่าผลที่ฉายรังสีระดับการแสดงออกของยีน *MiERS1* ลดลง 65.2% แสดงถึงการยับยั้งการทำงานของยีนตัวรับเอทิลีนภายหลังการฉายรังสี ในขณะที่ชุดควบคุมมีระดับการแสดงออกของยีน *MiERS1* อยู่ในช่วง 1.1 สอดคล้องกับปริมาณการผลิตเอทิลีนในผลมะม่วงในวันที่ 7 ของการเก็บรักษาที่ลดลงในผลที่ฉายรังสีแกมมาในยีน *MiETR1* และ *MiERS1* ต่อมาในวันที่ 14 ของการเก็บรักษา ระดับการแสดงออกของยีน *MiERS1* ในผลที่ฉายรังสีแกมมาเพิ่มกลับมาใกล้เคียงระดับยีนอ้างอิงอีกครั้ง และไม่แตกต่างจากชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการยับยั้งการตอบสนองต่อเอทิลีนในผลฉายรังสีเป็นเพียงชั่วคราว และผลกลับเข้าสู่สภาวะการควบคุมยีนตามธรรมชาติของกระบวนการสุกในมะม่วง

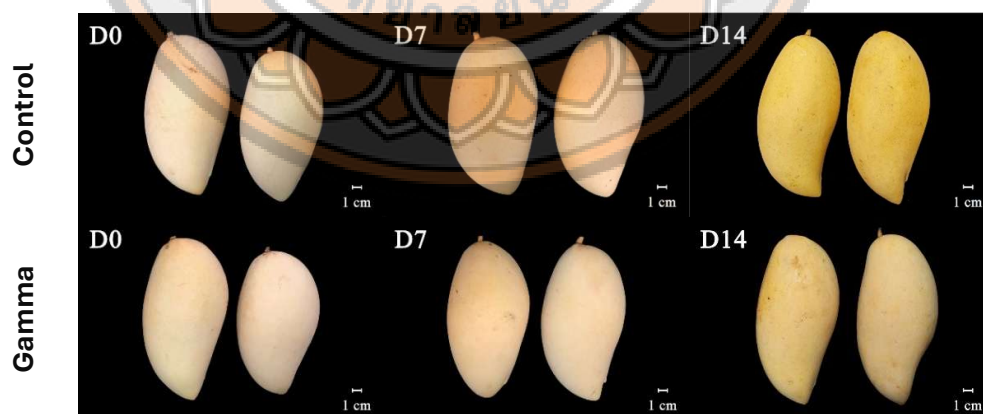
การฉายรังสีแกมมาส่งผลชัดเจนต่อระดับการแสดงออกของยีน *MiACS* (ภาพ 14C) ซึ่งเป็นยีนสำคัญในขั้นตอนการสังเคราะห์เอทิลีน (ethylene biosynthesis) โดยภายหลังการฉายรังสีทันที (วันที่ 0) ระดับการแสดงออกของยีนในผลที่ฉายรังสีแกมมาลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยเมื่อเทียบเป็นร้อยละจะพบว่าผลที่ฉายรังสีมีระดับการแสดงออกลดลง 21.9% (3.2) เมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่มีระดับการแสดงออกสูงกว่าอย่างชัดเจนที่ประมาณ 4.1 และพบว่าระดับการแสดงออกของยีน *MiACS* ในทุกกรรมวิธี ณ วันแรกยังคงสูงกว่ายีนอ้างอิงประมาณ 3 เท่า ต่อมาเมื่อเข้าสู่วันที่ 7

ของการเก็บรักษา ระดับการแสดงออกของ *MiACS* ลดลงในทั้งสองกรรมวิธีจนอยู่ในช่วงประมาณ 0.5-0.7 และไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างผลที่ฉายรังสีและชุดควบคุม คาดได้ว่ายีน *MiACS* จะมีระดับการแสดงออกของยีนที่สูงในช่วงที่ผลพัฒนาการสุกเริ่มแรก แต่เมื่อเข้าสู่กระบวนการสุกแล้วจะมีระดับการแสดงออกลดลง จนเมื่อถึงวันที่ 14 ระดับการแสดงออกของยีน *MiACS* ในผลฉายรังสีกลับเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าผลฉายรังสีเข้าสู่กระบวนการสุกแก่ได้ช้ากว่าผลที่ไม่ฉายรังสี





ภาพ 14 ระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์เอทิลิน ได้แก่ *MiETR1* (A), *MiERS1* (B) และ *MiACS* (C) ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C เก็บรักษานาน 14 วัน แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และเครื่องหมายดอกจัน (*, **) แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (* $P \leq 0.05$ และ ** $P \leq 0.01$)



ภาพ 15 ลักษณะผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้รับการฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 0.4 kGy (gamma) เปรียบเทียบกับผลที่ไม่ฉายรังสี (control) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C เก็บรักษานาน 14 วัน โดย D0: ภายหลังฉายรังสีวันแรก, D7: ภายหลังฉายรังสีมาแล้ว 7 วัน, D14: ภายหลังฉายรังสีมาแล้ว 14 วัน

4.4.8 อภิปรายผล

ในผลไม้จะมีฮอร์โมนเอทิลีนทำหน้าที่ควบคุมกระบวนการตอบสนองที่ซับซ้อนหลายขั้นตอน ในระหว่างการเจริญเติบโตพัฒนา กระบวนการสุก และความเสื่อมสภาพของผล ซึ่งการผลิตเอทิลีนจะมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง เช่น ACC synthase และ ACC oxidase และจะมียีนที่เกี่ยวข้องที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมของเอนไซม์หลายชนิด เช่น *MiETR1*, *MiERS1*, *MiACO*, *MiERF* และ *MiACS* (Busatto et al., 2022) เอนไซม์เหล่านี้มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการสุก ความอ่อนนุ่มผล มีรายงานว่า การใช้ 1-MCP ช่วยชะลอการสุกหรือเสื่อมสภาพของมะม่วงโดยการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์และระดับการแสดงออกของยีนที่มีบทบาทในกระบวนการสังเคราะห์เอทิลีน (Li et al., 2020b) ไม่เพียงแต่ 1-MCP เท่านั้นที่สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์และระดับการแสดงออกของยีนได้ ยังพบรายงานหลายการวิจัยกล่าวถึงผลของรังสีที่มีต่อระดับกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์และระดับการแสดงออกของยีน ดังนั้น การฉายรังสีสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ACC oxidase (D'Innocenzo & Lajolo, 2001) และ ACC synthase (Martins Melo et al., 2021) ส่งผลให้การสังเคราะห์เอทิลีนลดลง ซึ่งนำไปสู่การชะลอการสุกของผลไม้ ปริมาณการผลิตเอทิลีนที่ลดลงและการชะลอการสุกเป็นผลมาจากการฉายรังสี ซึ่งมีการรายงานไว้ในผลไม้ประเภท climacteric (ผลไม้ที่ยังสามารถสุกต่อได้หลังจากเก็บเกี่ยวแล้ว) หลายชนิด เช่น มะม่วง (Din et al., 2021; Nguyen, Uthairatanakij, et al., 2021) ฝรั่ง (Jat et al., 2022) และมังคุด (Syauqi et al., 2021) เป็นต้น

ทันทีหลังการฉายรังสี พบว่าการแสดงออก (express) ของยีน *MiACS* ซึ่งเป็นยีนที่เข้ารหัสเอนไซม์ ACC synthase ในเส้นทางการสังเคราะห์เอทิลีนลดลงอย่างเด่นชัด ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น บ่งชี้ว่ารังสีแกมมามีผลรบกวนการผลิตเอทิลีนโดยตรงที่ต้นทางในกระบวนการสังเคราะห์ ผ่านการจำกัดการผลิต 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid; ACC ส่งผลให้การสังเคราะห์เอทิลีนในขั้นถัดไปลดลง และทำให้การเริ่มต้นของกระบวนการสุกช้าลง ยีน *MiACS* มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับระดับปริมาณของเอนไซม์ ส่งผลต่อกิจกรรมของเอนไซม์ ACC synthase ซึ่งทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเปลี่ยน S-adenosyl-L-methionine (SAM) ให้เป็น ACC ในเส้นทางการสังเคราะห์เอทิลีน (Song et al., 2023) เอนไซม์ ACC synthase เป็นตัวควบคุมสำคัญของปริมาณเอทิลีนในพืช และจัดเป็นกลุ่มยีนหลายสมาชิก (multigene family) ซึ่งมีการแสดงออกในเนื้อเยื่อพืชและระยะพัฒนาการหลายช่วง (Hong et al., 2014) พบรูปแบบการยับยั้งเช่นเดียวกันในยีน *MiETR1* ซึ่งเป็นตัวรับเอทิลีนที่มีบทบาทสำคัญในขั้นตอนเริ่มต้นของการรับรู้สัญญาณเอทิลีนในเนื้อเยื่อของผล การลดลงทันทีของระดับการแสดงออกของ *MiETR1* หลังการฉายรังสีบ่งบอกถึงการรับรู้สัญญาณต่อเอทิลีนภายในผลที่ลดลง แม้ในกรณีที่ยังมีเอทิลีนในระดับต่ำอยู่ เนื้อเยื่อที่ผ่านการฉายรังสีอาจไม่สามารถกระตุ้นการทำงานของสัญญาณผ่านตัวรับและเอนไซม์ CTR1 ได้อย่างเต็มที่ ซึ่งจำเป็นต่อการกระตุ้นการตอบสนองที่เกี่ยวข้องกับการสุกของผลไม้ การลดทอนความสามารถในการรับรู้เอทิลีนนี้สามารถ

อธิบายถึงการพัฒนาศีและการผลิตเอทิลีนที่ช้าลง อัตราส่วน TSS/TA ratio ที่ลดลง และการสลายตัวของกรดอินทรีย์ที่ล่าช้าในระหว่างการเก็บรักษา

ยีน *MiERS1* ซึ่งเป็นยีนที่ทำหน้าที่คล้ายกับ *MiETR1* ตัวรับในเส้นทางการส่งสัญญาณเอทิลีน ยังพบว่าการลดระดับการแสดงออกอย่างชัดเจน โดยปรากฏให้เห็นชัดในวันที่ 7 ของการเก็บรักษา ด้วยบทบาทของ *MiERS1* ในการควบคุมการรับส่งสัญญาณเอทิลีน การลดระดับการแสดงออกของยีนนี้จึงบ่งชี้ถึงการส่งผ่านสัญญาณเอทิลีนที่ลดลงในช่วงกลางของการเก็บรักษา ซึ่งยังทำให้กระบวนการสุกถูกยับยั้งมากยิ่งขึ้น ภายในวันที่ 14 พบว่ายีนทั้งสามชนิดมีระดับการแสดงออกเพิ่มมากขึ้นในผลที่ผ่านการฉายรังสี อย่างไรก็ตาม การผลิตเอทิลีนยังคงอยู่ในระดับต่ำกว่ากลุ่มควบคุมอย่างต่อเนื่อง ความไม่สอดคล้องกันระหว่างระดับการแสดงออกของยีนกับปริมาณเอทิลีนดังกล่าว บ่งชี้ว่า กระบวนการสังเคราะห์เอทิลีนและการส่งสัญญาณเอทิลีนของผลไม่มียีนอีกหลายตำแหน่งที่เกี่ยวข้องอยู่ด้วย ทั้งในด้านการถอดรหัส การทำงานของเอนไซม์ และอาจรวมถึงตัวรับสัญญาณในเซลล์ ระดับการแสดงออกของยีน *MiACS*, *MiETR1* และ *MiERS1* ภายหลังการฉายรังสีที่ลดลงเป็นหลักฐานเชิงกลไกที่ชัดเจนว่า รังสีแกมมาชะลอการสุกของมะม่วงผ่านการยับยั้งกระบวนการสำคัญสามด้านพร้อมกัน ได้แก่ การสังเคราะห์เอทิลีน การรับรู้และการส่งสัญญาณเอทิลีน

การฉายรังสีในลูกแพร์ ‘Bartlett’ ด้วยรังสีเอกซ์ ปริมาณ 0.4-0.8 กิโลเกรย์ ทำให้ผลแพร์มีความทนทานต่อการช้ำและการเน่าเสียเพิ่มขึ้น ช่วยยืดอายุการเก็บรักษา ในระหว่างการจำลองสภาวะวางจำหน่ายในตลาด (Sea et al., 2015) งานวิจัยศึกษาพื้นฐานทางการเปลี่ยนแปลงทรานสคริปโตมิกส์ โมเลกุล RNA ทั้งหมด ที่สร้างขึ้นจากจีโนมในเซลล์ ในระหว่างการสุกของมะเขือเทศ โดยใช้เทคนิค RNA sequencing พบว่าการฉายรังสีแกมมาสามารถชะลอการสุกของมะเขือเทศได้ โดยการยับยั้งการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์เอทิลีน การอ่อนนุ่มผล การสังเคราะห์รงควัตถุ (Yoon et al., 2023) นอกจากนี้ การฉายรังสียังสามารถยับยั้งการทำงานของยีนที่เกี่ยวข้องกับฮอร์โมนออกซิน (auxin) ซึ่งเป็นฮอร์โมนพืชที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งเซลล์และกระตุ้นการผลิตเอทิลีน ซึ่งเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลให้การสุกของผลไม่ล่าช้า (Li et al., 2017) ในผลไม้ชนิดอื่นที่ผ่านการฉายรังสีชนิดก่อกำเนิดไอออนเช่นเดียวกันการศึกษาผลของการฉายรังสีเอกซ์ต่อระดับกิจกรรมของเอนไซม์และระดับการแสดงออกของยีน การทดลองในแอปเปิ้ลที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0-1 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลานาน 90 และ 180 วัน โดยเมื่อครบระยะเวลาเก็บรักษาแอปเปิ้ลมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง 22 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน พบว่ารังสีที่ปริมาณ 0.3 กิโลเกรย์ สามารถควบคุมยับยั้งการเพิ่มขึ้นของระดับการแสดงออกของยีน *AFS1* ในวันที่ 90 ของการเก็บรักษา ขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีมากขึ้นเป็น 1.0 กิโลเกรย์ จะสามารถยับยั้งการเพิ่มขึ้นของระดับการแสดงออกของยีน *AFS1* ได้มากกว่ารังสีที่ปริมาณ 0.3 กิโลเกรย์ เป็นระยะเวลา 180 วันของการเก็บรักษา และยังพบว่า การฉายรังสีทั้งสองปริมาณยังช่วยลดการสังเคราะห์เอนไซม์ α -farnesene ได้มากกว่า 50% เมื่อ

เปรียบเทียบกับผลที่ไม่ฉายรังสี (ชุดควบคุม) พร้อมกับลดระดับกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ ACC oxidase ส่งผลให้ปริมาณการผลิตเอทิลีนลดลง เมื่อเทียบกับผลที่ไม่ฉายรังสี (ชุดควบคุม) นอกจากนี้ การฉายรังสีลดการเพิ่มขึ้นของระดับการแสดงออกของยีน *ACS1* ในระหว่างเก็บรักษา ระดับการแสดงออกของยีน *ACO1* มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณรังสีที่ได้รับ แต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติต่อระดับการแสดงออกของยีน *ACO1* ตลอดระยะเวลาเก็บรักษา ดังนั้น การฉายรังสีที่ปริมาณ 0.3-1.0 กิโลเกรย์ ช่วยลดอาการผิดปกติทางสรีระบริเวณเปลือกผล (superficial scald) และชะลอการสุกได้ในแอปเปิล ‘Granny Smith’ ผ่านกลไกการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์และระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์เอทิลีนและ α -farnesene (Martins Melo et al., 2021) จากผลรายงานเหล่านี้สอดคล้องกับการทดลองในครั้งนี้ว่า การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 0.4 กิโลเกรย์ ชะลอการสุกแก่ในผลมะม่วง โดยไปมีผลต่อระดับการแสดงออกของยีน *MiETR1*, *MiERS1* และ *MiACS* ส่งผลให้มีการผลิตเอทิลีนลดลง สามารถชะลอกระบวนการสุกได้ในที่สุด

การฉายรังสีเป็นกระบวนการที่ชักนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุล สามารถก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงหรือโดยอ้อมต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งนั้นรวมไปถึงผลไม้และผักสด (Duarte et al., 2023) ผลกระทบของการฉายรังสีต่อผลิตผลสดขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่ได้รับ พลังงานของรังสี และความไวต่อรังสีของผลิตผล นอกจากนี้ ยังได้รับอิทธิพลจากปัจจัยหลายประการทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว เช่น ระยะความสุกของผลไม้ขณะทำการฉายรังสี พันธุ์ และสภาวะการเก็บรักษา การได้รับรังสีระดับสูงโดยตรงสามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อดีเอ็นเอ (DNA) ซึ่งถือเป็นผลกระทบโดยตรงที่สำคัญที่สุดของการฉายรังสี ส่งผลให้มีระดับกิจกรรมของเอนไซม์หรือระดับการแสดงออกของยีนที่เปลี่ยนแปลงไป (W. W.-Y. Kam & R. B. Banati, 2013) ผลกระทบเหล่านี้จากรังสีนี้ไม่สามารถย้อนกลับได้และส่งผลให้เกิดปัญหาในการจัดระเบียบโครมาติน กระบวนการถอดรหัส และการจำลองแบบดีเอ็นเอ ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการระดับโมเลกุลที่สำคัญและการทำงานของเซลล์ (Manova & Gruszka, 2015)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การฉายรังสีในผลไม้สดของไทยเป็นเทคโนโลยีสำคัญที่นำมาใช้เพื่อควบคุมศัตรูพืชหลังการเก็บเกี่ยว ยืดอายุการเก็บรักษา และยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยของผลผลิตสำหรับการส่งออก โดยเฉพาะตลาดที่มีข้อกำหนดด้านสุขอนามัยพืชที่เข้มงวด ได้แก่ ประเทศสหรัฐอเมริกา การฉายรังสีชนิดก่อก่อไอออนในปริมาณรังสีที่เหมาะสมจะช่วยหยุดการพัฒนาของไข่และตัวอ่อนแมลง โดยไม่ทำให้เกิดความร้อนหรือทำลายคุณภาพของผลไม้ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถคงสภาพความสด สี กลิ่น และเนื้อสัมผัสของผลไม้ได้ดี ทั้งยังมีความปลอดภัยสูงซึ่งได้รับการรับรองจากองค์การอนามัยโลก องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ ขั้นตอนเพื่อการส่งออกมะม่วงในแต่ละประเทศที่นำเข้าจะมีข้อกำหนดทางมาตรการสุขอนามัยพืชแตกต่างกันไป เช่น วิธีอบไอน้ำหรือการจุ่มน้ำร้อนตามสภาวะที่กำหนด สำหรับการส่งมะม่วงผลสดจากไทยไปประเทศสหรัฐอเมริกา มีข้อกำหนดว่ามะม่วงจะต้องผ่านการฉายรังสีตามปริมาณที่กำหนด 0.4 กิโลเกรย์ ด้วยการใช้รังสีชนิดก่อก่อไอออน ได้แก่ รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ หรือรังสีอิเล็กตรอน

อย่างไรก็ดี ที่ผ่านมามาประเทศไทยเคยส่งมะม่วงผลสดไปสหรัฐอเมริกาได้ในปี 2550 แต่ไม่ประสบความสำเร็จด้านการตลาดจึงได้หยุดไป เพราะปัญหาคุณภาพด้านรูปลักษณ์และเนื้อมะม่วงที่ไม่ได้คุณภาพตามความต้องการของผู้นำเข้า ความเสียหายที่เกิดขึ้นก่อนและหลังกระบวนการฉายรังสี การเกิดโรคหลังการเก็บเกี่ยว รวมทั้งการปนเปื้อนของไข่แมลงวันผลไม้และความเสียหายจากด้วงวงเจาะเมล็ด ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่ทำให้คุณภาพผลผลิตลดลงและส่งผลกระทบต่อ การส่งออก ในงบประมาณปี 2561 โครงการวิจัยเรื่อง “การศึกษาวิจัยมะม่วงให้ได้คุณภาพมาตรฐานส่งออก” สนับสนุนงบประมาณโดยสำนักงานพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานชีวภาพ (องค์การมหาชน) ได้ประสบความสำเร็จในการปลดล็อกการฉายรังสีในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง มะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์ 4 และเขียวเสวยผลสดในเรื่องคุณภาพได้สำเร็จ สามารถส่งมะม่วงไปวางจำหน่ายในตลาดสหรัฐอเมริกาได้จริง มีอายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 12 วัน โดยที่ไม่มีอาการผิดปกติและสามารถสุกได้ปกติ เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค และโครงการวิจัยเรื่อง “การศึกษามลของการฉายรังสีต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวมะม่วงมหาชนกและส้มโอเพื่อการส่งออกประเทศสหรัฐอเมริกา” ในงบประมาณปี 2565 สามารถส่งออกส้มโอ 5 สายพันธุ์ ได้แก่ ทองดี ขาวน้ำผึ้ง ขาวแตงกวา ขาวใหญ่ และทับทิมสยาม รวมถึงมะม่วงมหาชนกผลสดจากประเทศไทยไปสหรัฐอเมริกาได้อย่างมีคุณภาพซึ่งจะต้องผ่านขั้นตอนหลังการเก็บเกี่ยวที่ดีและผ่านการฉายรังสี โดยมีกระบวนการวัดการกระจายของปริมาณรังสีดูดกลืนใน

บรรจุกัญชีที่ได้รับการรับรองจากหน่วยงาน Animal and Plant Health Inspection Service กระทรวงเกษตรของสหรัฐอเมริกา เมื่อไปถึงปลายทางมีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค มีอายุเก็บรักษานาน 12 วัน สำหรับมะม่วงมหาชนก และเก็บรักษาได้นาน 50-60 วัน สำหรับส้มโอทั้งห้าสายพันธุ์

จากความสำเร็จที่ผ่านมาผู้วิจัยจึงประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการฉายรังสีชนิดก่อก่อไอออนในปริมาณ 0.4 กิโลเกรย์ ตามมาตรฐานการส่งออกของไทย โดยใช้ทั้งรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 ซึ่งมีพลังงานเฉลี่ย 1.25 MeV และจากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์พลังงาน 5 MeV ตามลำดับ มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของรังสีต่อคุณภาพผลมะม่วงระหว่างการเก็บรักษา พร้อมทั้งศึกษาผลของการรมสารชะลอการสุก 1-Methylcyclopropene (1-MCP) ภายหลังการฉายรังสีในความเข้มข้นและระยะเวลาที่แตกต่างกัน รวมถึงการใช้บรรจุกัญชีดัดแปลงบรรยากาศชนิดต่าง ๆ ร่วมกับการฉายรังสีเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา นอกจากนี้ การวิจัยยังศึกษาระดับการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์และการส่งสัญญาณเอทิลีน ได้แก่ *MiETR1*, *MiERS1* และ *MiACS* ในผลมะม่วงที่ได้รับและไม่ได้รับการฉายรังสี โดยใช้เทคนิค quantitative realtime PCR เพื่อทำความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษาอย่างเป็นระบบเชิงลึก ต่อมาปัญหาด้านคุณภาพของมะม่วงที่ผ่านการฉายรังสีนี้ได้รับการแก้ไขด้วยการนำความรู้เรื่องกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่ดีมาใช้ร่วมกับกระบวนการฉายรังสี ไทยจึงสามารถส่งมะม่วงไปยังสหรัฐทางอากาศได้อีกครั้ง โดยมะม่วงยังคงมีคุณภาพดีเมื่อไปถึงปลายทางและจะสามารถสรุปผลการทดลอง ได้ดังนี้

5.1 ผลของรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ที่มีต่อคุณภาพของผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างการเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิต่ำ

การฉายรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ตามข้อกำหนดการส่งออก 0.4 กิโลเกรย์ ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองจำเป็นต้องมีกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมเพื่อลดลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ รักษาคุณภาพ และเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาด้วยเทคนิคประเมินคุณภาพแบบไม่ทำลายผลผลิต ประเมินความสุกที่ระดับ 80% (9-12 %Brix) ด้วยเทคนิค NIR ร่วมกับการจุ่มในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 47-52 °C นาน 5 นาที ร่วมกับสารป้องกันกำจัดเชื้อรา เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับผลมะม่วงก่อนการฉายรังสี การฉายรังสีสามารถชะลอการสุกได้ ผ่านกลไกการพัฒนาของสีผล สัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ อัตราการหายใจ และการผลิตเอทิลีน มีอายุเก็บรักษานาน 12 วัน ที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C คะแนนทดสอบทางประสาทสัมผัสเป็นที่ยอมรับและไม่มีความแตกต่างกันเมื่อเทียบกับผลที่ไม่ฉายรังสี ยกเว้นในด้านคะแนนสี การใช้รังสีแกมมาและรังสีเอกซ์เหมาะสมเป็นมาตรการกักกันด้านสุขอนามัยพืชที่ไม่ส่งผลกระทบทางด้านลบต่อคุณภาพผลมะม่วง ซึ่งสร้างความเชื่อมั่นในระดับเชิงพาณิชย์แก่ผู้ส่งออก ในอนาคตหากรังสีเอกซ์ได้รับการรับรองจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องแล้ว

การฉายรังสีเอกซ์จะสามารถใช้เป็นแนวทางใหม่สำหรับมาตรการสุขอนามัยพืชในมะม่วงผลสดก่อนการส่งออกสำหรับผู้ประกอบการ ซึ่งใช้ระยะเวลาการฉายรังสีน้อยกว่ารังสีแกมมา ลดต้นทุนการจัดการ

5.2 อิทธิพลของการใช้สาร 1-Methylcyclopropene (1-MCP) ที่มีต่อคุณภาพผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายหลังการฉายรังสีแกมมาเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิเย็น

งานวิจัยชี้ให้เห็นได้ว่าการใช้ 1-Methylcyclopropene (1-MCP) สามารถกระทำได้ภายหลังการฉายรังสีแกมมาตามข้อกำหนดการส่งออกระหว่างประเทศ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาในผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง การฉายรังสีร่วมกับการรมด้วยสาร 1-MCP ที่ความเข้มข้น 1,000 ppb นาน 24 ชั่วโมง ได้ผลในการยืดอายุผลมะม่วงฉายรังสีมากที่สุด ไม่ส่งผลต่อลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ ชะลอการสูญเสียน้ำหนัก รักษาความแน่นเนื้อ ลดอัตราการหายใจ ลดการผลิตเอทิลีนผ่านการแข่งขันและยับยั้งการจับตัวกับตัวรับเอทิลีน (receptor) ชะลอการพัฒนาสีผล ยืดอายุการเก็บรักษาได้นานถึง 24 วัน คิดเป็นสองเท่าของชุดควบคุม (ไม่รมสาร) ที่มีอายุการเก็บรักษาสั้นเพียง 12 วัน ที่อุณหภูมิ $13 \pm 2^{\circ}\text{C}$ นอกจากนี้ ผลมะม่วงที่ผ่านการรม 1-MCP ได้รับคะแนนทางประสาทสัมผัสในระดับดีไม่แตกต่างจากชุดควบคุม (ไม่รมสาร) ยกเว้นค่าสีและรสชาติ การใช้ 1-MCP ยังมีผลต่ออัตราการเกิดโรคแอนแทรกโนส ดังนั้น การใช้ 1-MCP จึงเป็นแนวทางแนะนำการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวในมะม่วงสดภายหลังการฉายรังสี เพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและคงคุณภาพที่ดีสำหรับการขนส่งในระยะทางไกล ลดการสูญเสียในระหว่างขนส่งและเก็บรักษา วางจำหน่ายได้ยาวนานขึ้น เมื่อไปถึงตลาดปลายทางยังคงความแน่นเนื้อได้ดีไม่เน่าและเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค

5.3 อิทธิพลของการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศก่อนการฉายรังสีแกมมาที่มีต่อคุณภาพผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายใต้อุณหภูมิเย็น

บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศด้วยถุงชนิด WEB1 และ WEB2 เมื่อนำมาใช้ร่วมกับการฉายรังสีสำหรับมาตรการสุขอนามัยพืช ช่วยรักษาคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการเก็บรักษา ยืดอายุการเก็บรักษาได้นานถึง 24 วัน บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศด้วยถุงชนิด WEB1 และ WEB2 ใช้ได้ก่อนการฉายรังสี โดยไม่ทำลายคุณสมบัติของถุง การบรรจุมะม่วงด้วยถุงทั้งสองชนิด ช่วยลดการสูญเสียน้ำหนัก ชะลอความแน่นเนื้อและสีของเปลือก รักษาสัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ ลดอัตราการหายใจและการเน่าเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายหลังจากการจำลองการขนส่งนำผลออกจากบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศ พบว่าผลยังสามารถพัฒนาการสุกได้อย่างปกติ อย่างไรก็ตาม การใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศที่มีความสามารถในการซึมผ่านของออกซิเจนสูงร่วมกับความสามารถในการซึมผ่านของน้ำต่ำ ส่งผลให้ผลมะม่วงพัฒนาการสุกอย่างรวดเร็วและชักนำให้เกิดเน่าเสียในเปอร์เซ็นต์ที่สูง ไม่เหมาะสมต่อการส่งออก ผู้ประกอบการส่งออกจึงต้องเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศที่มีคุณสมบัติเหมาะสม เพื่อลดความเสียหายระหว่างขนส่ง

และรักษาคุณภาพผลมะม่วง ผลไม่เหี่ยวจากการสูญเสีย น้ำ เนื้อไม่เละ เกิดโรคดำ ทำให้ผลมะม่วงเมื่อไปถึงปลายทางแล้วเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคมากขึ้น เมื่อซื้อไปแล้วมีอายุเก็บได้นานขึ้นจากเดิม

5.4 ระดับการส่งออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสุกแก่ในผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองการฉายรังสีแกมมาในระหว่างเก็บรักษาด้วยเทคนิค Quantitative Real time-PCR

การฉายรังสีแกมมาตามข้อกำหนดการส่งออกที่ปริมาณ 0.4 กิโลเกรย์ ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีมีระดับการแสดงออกยีน *MiETR1*, *MiERS1* และ *MiACS* เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ไม่ฉายรังสี) เนื่องจากยีนทั้งสามชนิดนี้เกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์และการส่งสัญญาณเอทิลีนในผลมะม่วง การลดระดับการแสดงออกของยีนจึงส่งผลให้ปริมาณการผลิตเอทิลีนลดลงตามไปด้วยในมะม่วง ดังนั้น เมื่อปริมาณการผลิตเอทิลีนลดลงจึงมีผลชะลอกระบวนการเสื่อมในระหว่างเก็บรักษาได้แก่ การพัฒนาสี สัดส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และอัตราการหายใจ มีอายุเก็บรักษาได้นาน 14 วัน ที่อุณหภูมิ 13 ± 2 °C อย่างไรก็ดี ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของการฉายรังสีต่อผลกระทบทางพันธุกรรมระดับโมเลกุลในด้านอื่น ๆ เช่น ความแน่นเนื้อ การพัฒนาของสี และการสังเคราะห์กลิ่นหอมระเหย เป็นต้น

อย่างไรก็ดี ในการส่งออกมะม่วงผลสดจากประเทศไทยไปยังสหรัฐอเมริกาทางอากาศนั้น คณะวิจัยเรื่อง “การศึกษาวิจัยมะม่วงให้ได้คุณภาพมาตรฐานส่งออก” ซึ่งได้รับทุนจากสำนักงานพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานชีวภาพ (องค์การมหาชน) ในปี 2561 ได้ประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ภายใต้เงื่อนไขการส่งออกแบบ FOB (Free on Board) มุ่งเน้นการวิเคราะห์ต้นทุนและรายได้ที่ผู้ส่งออกต้องรับผิดชอบเฉพาะภายในประเทศจนถึงจุดที่สินค้าถูกบรรทุกขึ้นเครื่องบิน โดยผู้ซื้อในต่างประเทศจะเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายทั้งหมดหลังจากนั้น ได้แก่ ค่าขนส่งทางอากาศ ค่าประกันภัย ภาษีนำเข้า ค่าดำเนินการศุลกากรขาเข้า และค่าขนส่งภายในประเทศปลายทาง ดังนั้น ผลการวิเคราะห์ภายใต้ FOB จะสะท้อนผลตอบแทนที่ผู้ส่งออกไทยได้รับอย่างแท้จริงจากกระบวนการผลิตและการจัดการภายในประเทศ

การวิเคราะห์ผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ของการส่งออกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองผลสดที่ผ่านการฉายรังสี ส่งออกจากประเทศไทยไปยังสหรัฐอเมริกาด้วยตู้คาร์โกชนิด EXTRA LD-3 (8-Contour, Type E) ในปี พ.ศ. 2562 เมื่อพิจารณาจากต้นทุนต่อหน่วย รายได้ต่อหน่วย และจำนวนกล่องที่สามารถบรรจุได้ต่อเที่ยวบิน โดยตู้ดังกล่าวมีขนาดภายใน $61.5 \times 60.4 \times 64$ นิ้ว และรองรับน้ำหนักรวมได้สูงสุด (Max Gross Weight) ประมาณ 1,588 กิโลกรัม ใช้กล่องขนาดมาตรฐานส่งออก $32 \times 49 \times 11$ เซนติเมตร บรรจุมะม่วงผลสดได้น้ำหนักสุทธิ 5 กิโลกรัม ทำให้สามารถบรรจุกล่องสินค้าได้มากถึง 270 กล่องต่อเที่ยวบิน ซึ่งถือว่าใช้ประสิทธิภาพของพื้นที่ภายในตู้ได้เกือบเต็มความจุ ต้นทุนการผลิตไม่รวมค่าขนส่งทางอากาศคิดเป็นค่าเฉลี่ย 762 บาทต่อกล่อง (ภาคผนวกที่ 25) ผู้ส่งออกไทยจะจำหน่ายให้แก่ผู้นำเข้าในสหรัฐอเมริกาอยู่ที่ราคา 950-1,100 บาทต่อกล่อง โดยเป็นราคาที่ผู้นำเข้ายอมรับได้ ทำให้สินค้าหนึ่งกล่องมีส่วนต่างรายได้สุทธิ (Gross Margin) เท่ากับ 238

บาทต่อกล่อง อัตราค่าไรซันตันอยู่ระหว่างประมาณ 21.6-25.1% เมื่อพิจารณาจำนวนกล่องที่สามารถบรรจุได้ต่อตู้ พบว่ารายได้สุทธิรวมเท่ากับ 238 บาท $\times$ 270 กล่อง = 64,260 บาทต่อตู้ จากการศึกษาวิจัยเรื่อง “การศึกษาวิจัยมะม่วงให้ได้คุณภาพมาตรฐานส่งออก” ได้ดำเนินการส่งออกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองผลสดในปี พ.ศ. 2562 ที่ผ่านมามีรายได้รายงานไว้ว่าเมื่อวางจำหน่ายในตลาดสหรัฐอเมริกาจะมีราคาสูงถึง 9-12 เหรียญสหรัฐต่อผล

เมื่อเปรียบเทียบราคาจำหน่ายของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองจากประเทศไทยกับมะม่วงพันธุ์อื่นที่วางจำหน่ายในตลาดสหรัฐอเมริกา พบว่ามะม่วงไทยจัดอยู่ในกลุ่มสินค้าพรีเมียมอย่างชัดเจน โดยราคาขายปลีกของมะม่วงทั่วไปในสหรัฐ เช่น มะม่วงพันธุ์ Tommy Atkins, Kent และ Haden ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลผลิตจากเม็กซิโก เปรู หรือเอกวาดอร์ มักอยู่ที่ประมาณ 0.75-2.50 เหรียญสหรัฐต่อผล ขณะที่มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสามารถวางจำหน่ายได้ในช่วงราคาสูงกว่าอย่างมากคือประมาณ 9-12 เหรียญสหรัฐต่อผล อย่างไรก็ตาม มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองยังมีข้อจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงพันธุ์อื่นในตลาดสหรัฐ เนื่องจากคู่แข่งหลักอย่างมะม่วงจากประเทศในอเมริกาใต้มีต้นทุนการผลิตและการขนส่งต่ำกว่าอย่างมาก สามารถขนส่งทางเรือและทางบกในปริมาณมากได้อย่างคุ้มค่า ขณะที่มะม่วงไทยต้องพึ่งพาการขนส่งทางอากาศเพื่อรักษาคุณภาพความสด ทำให้มีต้นทุนขนส่งสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ มะม่วงพันธุ์ทั่วไปในตลาดสหรัฐมีระบบกระจายสินค้าที่พัฒนาแล้ว ทำให้มีความต่อเนื่องของปริมาณผลผลิตในตลาดตลอดทั้งปี ซึ่งต่างจากมะม่วงไทยที่มีฤดูกาลผลิตชัดเจนหรือผลผลิตมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองนอกฤดูกาลคุณภาพส่งออกมีปริมาณต่ำกว่าความต้องการส่งออกไปยังต่างประเทศ จึงอาจแข่งขันในตลาดเชิงปริมาณได้ยากกว่า (Galán Saúco, 2004; ProducePay, 2023)

การวิเคราะห์ในครั้งนี้นี้ยังไม่ได้รวมภาษีนำเข้าสหรัฐอเมริกา ค่าธรรมเนียมศุลกากร ค่าดำเนินการพิธีการนำเข้า (customs brokerage) และค่าขนส่งภายในประเทศปลายทาง ซึ่งจะต้องอยู่ในความรับผิดชอบของผู้นำเข้าเอง แม้ว่าต้นทุนค่าขนส่งทางอากาศและภาษีนำเข้าไม่ได้อยู่ในความรับผิดชอบของผู้ส่งออกภายใต้เงื่อนไข FOB แต่ความผันผวนของต้นทุนดังกล่าวยังสามารถส่งผลกระทบต่อความสามารถทางการทำตลาด เช่น หากค่าขนส่งเพิ่มขึ้นจาก 150 บาท/กิโลกรัมเป็น 200 บาท/กิโลกรัม ผู้ซื้อในสหรัฐอเมริกาอาจเผชิญต้นทุนที่สูงขึ้น ส่งผลให้มีอำนาจต่อรองราคารับซื้อแบบ FOB ที่ลดลง ซึ่งอาจลดกำไรต่อกล่องของผู้ส่งออก แม้ผู้ส่งออกเองจะไม่ได้แบกรับต้นทุนค่าระวางโดยตรงก็ตาม

การประยุกต์ใช้สารยับยั้งเอทิลีน 1-MCP ในการชะลอการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองฉายรังสีสามารถทำได้ผ่านการรมภายในห้องรมที่มีปริมาตรแน่นอน โดยการคำนวณความเข้มข้นเป้าหมายที่ 1,000 ppb จำเป็นต้องกำหนดมวลของสารออกฤทธิ์ที่ต้องการภายในห้องเย็นขนาด 2.4 $\times$ 2.4 $\times$ 2.4 เมตร ซึ่งมีปริมาตรรวม 13.824 ลูกบาศก์เมตร เมื่อคำนวณจะพบว่าปริมาตรอากาศในห้องดังกล่าวต้องใช้ 1-MCP ประมาณ 16 กรัม ซึ่งมีสารออกฤทธิ์ในสัดส่วน 0.19% (w/w) จึงจะได้ความเข้มข้น

1,000 ppb ที่สม่ำเสมอทั่วทั้งห้อง กระปุกสารมีปริมาณสุทธิ 80 กรัม การใช้ผลิตภัณฑ์ 16 กรัมต่อครั้ง คิดเป็นสัดส่วนประมาณ 20.1% ของปริมาณทั้งกระปุก ทำให้ต้นทุนการรวมคิดเป็นมูลค่าประมาณ 704 บาทต่อครั้ง เมื่อพิจารณาว่าห้องรมดังกล่าวสามารถรองรับมะม่วงได้สูงสุดประมาณ 1,300 กิโลกรัม ต้นทุนการใช้ 1-MCP จะคิดเป็นเพียง 0.54 บาทต่อกิโลกรัม หรือเทียบเท่าประมาณ 2.7 บาทต่อกล่อง บรรจุมาตรฐานแบบ 5 กิโลกรัม ซึ่งถือเป็นต้นทุนที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับประโยชน์ด้านการคงคุณภาพ ชะลอการสุก และลดความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวที่เกิดจากการใช้สาร 1-MCP ทำให้มีความคุ้มค่าอย่างยิ่งในการนำไปใช้ในการรักษาคุณภาพผลผลิตเพื่อการส่งออก

การเพิ่มอายุยืดอายุสำหรับมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเพื่อการส่งออก แม้จะทำให้ต้นทุนการผลิตต่อกล่องเพิ่มขึ้นจาก 762 บาทเป็น 774 บาทต่อกล่อง (เพิ่มขึ้น 12 บาทต่อกล่อง หรือประมาณ 1.57%) แต่ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นนี้ถือว่าต่ำมากเมื่อเทียบกับประโยชน์ที่ได้รับจากการยืดอายุการเก็บรักษา และการลดการสูญเสียของผลผลิต อายุยืดอายุสามารถเก็บรักษาได้นานถึง 24 วัน ช่วยลดการสูญเสียของผลผลิตได้ถึง 90% ในระหว่างการขนส่งและการจำหน่าย เมื่อคำนวณในเชิงเศรษฐศาสตร์ หากมะม่วงมีอัตราการสูญเสียเฉลี่ย 10% หมายความว่าในกล่องละ 12 ผล จะมีผลเน่าเสียประมาณ 1-2 ผล แต่ละผลมีราคาจำหน่ายในตลาดสหรัฐอยู่ที่ 9-12 เหรียญสหรัฐต่อผล (ประมาณ 330-440 บาท/ผล) จึงเทียบเท่ากับการประหยัดต้นทุนความเสียหายประมาณ 330-440 บาทต่อกล่อง หรือมากกว่า 27-36 เท่า ของต้นทุนอายุยืดอายุที่เพิ่มขึ้นเพียง 12 บาทต่อกล่องเท่านั้น ประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์จึงมีความคุ้มค่าอย่างชัดเจน เพราะช่วยรักษาคุณภาพผลผลิต ดังนั้น แม้การใช้ถุงยืดอายุจะเพิ่มต้นทุนเพียงเล็กน้อย แต่ด้วยความสามารถในการยืดอายุผลผลิตออกไป 24 วัน และลดการสูญเสียได้ถึง 90% ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจึงนับเป็นการลงทุนที่ให้ผลตอบแทนสูงในมุมเศรษฐศาสตร์ ช่วยเสริมเสถียรภาพด้านคุณภาพ ลดความเสี่ยงจากการเน่าเสียระหว่างการขนส่งและเก็บรักษา เพิ่มศักยภาพในการรักษาราคาจำหน่ายในตลาดพรีเมียมของสหรัฐอเมริกา

การทดลองในครั้งนี้ นอกจากแก้ไขปัญหาทางเทคนิคได้แล้ว สามารถนำไปเป็นแบบอย่างในการพัฒนากรรมวิธีหลังการเก็บเกี่ยวในผลไม้ชนิดอื่นได้ ยกตัวอย่างเช่น การฉายรังสีในมะม่วงมหาชนก มังคุด และสับปะรด การฉายรังสีจะช่วยยืดอายุหรือชะลอการสุกแก่ได้ดีกว่าผลที่ไม่ฉายรังสี ส่งผลให้ผลที่ฉายรังสีมีลักษณะที่ปรากฏเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคเมื่อไปถึงปลายทาง ยืดอายุเก็บรักษาได้จากเดิม 2-5 วัน ขึ้นกับชนิดของผลไม้และสภาวะเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม การฉายรังสีในส้มโอพบว่ารังสีไม่มีผลกระทบต่อด้านลบใด ๆ ทางกายภาพและเคมีของผล พร้อมทั้งการฉายรังสีร่วมกับการรมสาร 1-MCP และการใช้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศซึ่งจะช่วยรักษาคุณภาพผลผลิตไว้ได้นานยิ่งขึ้นเมื่อต้องการขนส่งในระยะทางไกล ซึ่งเป็นแนวทางที่ช่วยลดต้นทุนการส่งออก นอกจากนี้ เทคโนโลยีเหล่านี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับผลไม้ฉายรังสีชนิดอื่นได้ เช่น เงาะ ลำไย ลิ้นจี่ มังคุด สับปะรด แก้วมังกร และส้มโอ อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ 1-MCP และความเหมาะสมของชนิด

บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงบรรยากาศที่ใช้ ในขณะเดียวกัน การศึกษาการส่งออกของยีนในระดับโมเลกุลที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์และส่งสัญญาณเอทิลีนจะช่วยเสริมองค์ความรู้ด้านชีววิทยาหลังการเก็บเกี่ยวและเป็นหลักฐานงานวิจัยเพื่อต่อยอดว่ารังสีอาจจะมีผลต่อยีนในกระบวนการอื่น ๆ หรือไม่ในผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารหอมระเหยหรือรงควัตถุที่สำคัญในเปลือกและเนื้อ โครงการวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางที่สามารถนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรมการส่งออกผลไม้สดจากไทยสู่สหรัฐอเมริกา ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อประเทศอย่างมีนัยสำคัญทางด้านเศรษฐกิจการส่งออก โดยเทคโนโลยีดังกล่าวช่วยลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว รักษาคุณภาพผลผลิตให้เป็นไปตามข้อกำหนดของประเทศคู่ค้า เสริมความสามารถในการแข่งขันตลาดส่งออกผลไม้สดมูลค่าสูง และขยายปริมาณการส่งออกได้อย่างต่อเนื่อง อันจะส่งผลดีต่อเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ





บรรณานุกรม

- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. (2567). มาตรฐานสินค้าเกษตร: มะม่วง.
https://acfs-backend.acfs.go.th/storage/ProductStandards/Files//20241111142055_324736.pdf
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2562). การนำเข้าและส่งออก.
<https://impexpth.oae.go.th/export>
- Aglar, E., Ozturk, B., Guler, S. K., Karakaya, O., Uzun, S., & Saracoglu, O. (2017). Effect of modified atmosphere packaging and ‘Parka’ treatments on fruit quality characteristics of sweet cherry fruits (*Prunus avium* L. ‘0900 Ziraat’) during cold storage and shelf life. *Scientia Horticulturae*, 222, 162-168.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.05.024>
- Alvindia, D. G., & Acda, M. A. (2015). Revisiting the efficacy of hot water treatment in managing anthracnose and stem-end rot diseases of mango cv. ‘Carabao’. *Crop Protection*, 67, 96-101.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.09.016>
- Artés-Hernández, F., Tomás-Barberán, F., & Artés, F. (2006). Modified atmosphere packaging preserves quality of SO₂-free ‘Superior Seedless’ table grapes. *Postharvest Biology and Technology*, 39, 146-154.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2005.10.006>
- Barkai-Golan, R., & Follett, P. A. (2017). *Irradiation for quality improvement, microbial safety and phytosanitation of fresh produce*. Academic Press.
- Barman, K., Asrey, R., & Pal, R. K. (2011). Putrescine and carnauba wax pretreatments alleviate chilling injury, enhance shelf life and preserve pomegranate fruit quality during cold storage. *Scientia Horticulturae*, 130(4), 795-800.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.09.005>
- Begum, T., Follett, P. A., Hossain, F., Christopher, L., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2020). Microbicidal effectiveness of irradiation from Gamma and X-ray sources at different dose rates against the foodborne illness pathogens *Escherichia coli*,

- Salmonella Typhimurium* and *Listeria monocytogenes* in rice. *LWT*, 132, 109841. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109841>
- Berk, Z. (2013). Chapter 27 - Food Packaging. In Z. Berk (Ed.), *Food Process Engineering and Technology (Second Edition)* (pp. 621-636). Academic Press.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415923-5.00027-7>
- Busatto, N., Vittani, L., Farneti, B., Khomenko, I., Caffini, M., Faccini, S., Boschetti, M., & Costa, F. (2022). Physiological and molecular characterization of the late ripening stages in *Mangifera indica* cv Keitt. *Postharvest Biology and Technology*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111746>
- Bustos-Griffin, E., Hallman, G. J., & Griffin, R. L. (2012). Current and potential trade in horticultural products irradiated for phytosanitary purposes. *Radiation Physics and Chemistry*, 81(8), 1203-1207.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2011.12.049>
- Cancino-Vázquez, R., Salvador-Figueroa, M., Hernández-Ortiz, E., Grajales-Conesa, J., & Vázquez-Ovando, A. (2020). Gamma irradiation of mango 'Ataulfo' at low dose: Effect on texture, taste, and odor fruit. *Food Science and Technology Research*, 26(1), 59-64. <https://doi.org/10.3136/FSTR.26.59>
- Chang, L.-Y., & Brecht, J. K. (2023). Responses of 1-methylcyclopropene (1-MCP)-treated banana fruit to pre- and post-treatment ethylene exposure. *Scientia Horticulturae*, 309, 111636-111636.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111636>
- Charoenchongsuk, N., Ikeda, K., Itai, A., Oikawa, A., & Murayama, H. (2015). Comparison of the expression of chlorophyll-degradation-related genes during ripening between stay-green and yellow-pear cultivars. *Scientia Horticulturae*, 181, 89-94.
- Chaudhary, S., Kumar, S., Kumar, V., Singh, B., & Dhiman, A. (2024). Irradiation: A tool for the sustainability of fruit and vegetable supply chain-Advancements and future trends. *Radiation Physics and Chemistry*, 217, 111511.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111511>
- Chen, Y., Grimplet, J., David, K., Castellarin, S. D., Terol, J., Wong, D. C. J., Luo, Z., Schaffer, R., Celton, J.-M., Talon, M., Gambetta, G. A., & Chervin, C. (2018). Ethylene receptors and related proteins in climacteric and non-climacteric

fruits. *Plant Science*, 276, 63-72.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.07.012>

Chomkitichai, W., Chumyam, A., Rachtanapun, P., Uthaibutra, J., & Saengnil, K. (2014).

Reduction of reactive oxygen species production and membrane damage during storage of 'Daw' longan fruit by chlorine dioxide. *Scientia Horticulturae*, 170, 143-149. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.02.036>

Cruz, J. N., Soares, C. A., Fabbri, A. D. T., Cordenunsi, B. R., & Sabato, S. F. (2012). Effect of quarantine treatments on the carbohydrate and organic acid content of mangoes (cv. Tommy Atkins). *Radiation Physics and Chemistry*, 81(8), 1059-1063. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.02.026>

D'Innocenzo, M., & Lajolo, F. M. (2001). EFFECT OF GAMMA IRRADIATION ON SOFTENING CHANGES AND ENZYME ACTIVITIES DURING RIPENING OF PAPAYA FRUIT. *Journal of Food Biochemistry*, 25(5), 425-438.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2001.tb00750.x>

da Silva, J. M., Correia, L. C. d. S. A., de Moura, N. P., Salgado, P. L., Maciel, M. I. S., & Villar, H. P. (2011). Study of visual, sensorial and physicochemical characteristics of Tommy Atkins mangoes submitted to ionising radiation as a method of postharvest conservation. *International Journal of Postharvest Technology and Innovation*, 2(3), 260-273.

<https://doi.org/10.1504/IJPTI.2011.043326>

Dandekari, A. M., Teo, G., Defilippi, B. G., Uratsu, S. L., Passey, A. J., Kader, A. A., Stow, J. R., Colgan, R. J., & James, D. J. (2004). Effect of down-regulation of ethylene biosynthesis on fruit flavor complex in apple fruit. *Transgenic Res*, 13(4), 373-384. <https://doi.org/10.1023/b:trag.0000040037.90435.45>

Dar, M. S., Oak, P., Chidley, H., Deshpande, A., Giri, A., & Gupta, V. (2016). Nutrient and flavor content of mango (*Mangifera indica* L.) cultivars: an appurtenance to the list of staple foods. In *Nutritional composition of fruit cultivars* (pp. 445-467). Elsevier.

Das, K., & Roychoudhury, A. (2014). Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Frontiers*

in *Environmental Science*, 2(DEC), Article 53.

<https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00053>

Dias, C., Ribeiro, T., Rodrigues, A. C., Ferrante, A., Vasconcelos, M. W., & Pintado, M. (2021). Improving the ripening process after 1-MCP application: Implications and strategies. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 382-396.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.012>

Diehl, J. F. (1995). *Safety of irradiated foods*. CRC Press.

Din, A., Jahangir Chughtai, M. F., Mehmood, T., Khaliq, A., Nadeem, M., Ahsan, S., Amir, R. M., Abrar, M., Saeed, K., & Manzoor, M. S. (2021). Shelf Life Extension of Mango Fruit by using Non-Preservative Technique. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 232-241. <https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1868381>

do Nascimento Nunes, M. C., & Emond, J.-P. (2007). Relationship between weight loss and visual quality of fruits and vegetables. *Proceeding of the Florida State Horticultural Society*, 120, 235-245.

Dofuor, A. K., Quartey, N. K., Osabutey, A. F., Antwi-Agyakwa, A. K., Asante, K., Boateng, B. O., Ablormeti, F. K., Lutuf, H., Osei-Owusu, J., Osei, J. H. N., Ekloh, W., Loh, S. K., Honger, J. O., Aidoo, O. F., & Ninsin, K. D. (2023). Mango anthracnose disease: the current situation and direction for future research. *Front Microbiol*, 14, 1168203. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1168203>

Du, L., Kou, L., Liu, D., Hu, W., Yu, Y., Luo, G., Lai, B., & Cai, J. (2024). Integrated analysis of nutritional quality changes and molecular regulation in 'Qingcui' plum fruit treated with 1-MCP during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 207, 112591-112591.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112591>

Duarte, G. T., Volkova, P. Y., Fiengo Perez, F., & Horemans, N. (2023). Chronic ionizing radiation of plants: An evolutionary factor from direct damage to non-target effects. *Plants*, 12(5), 1178.

Ebrahimi, F., & Rastegar, S. (2020). Preservation of mango fruit with guar-based edible coatings enriched with *Spirulina platensis* and Aloe vera extract during storage at ambient temperature. *Scientia Horticulturae*, 265, 109258-109258.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109258>

- Ediriweera, M. K., Tennekoon, K. H., & Samarakoon, S. R. (2017). A Review on Ethnopharmacological Applications, Pharmacological Activities, and Bioactive Compounds of *Mangifera indica* (Mango). *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2017(1), 6949835.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2017/6949835>
- Fan, X., Sokorai, K. J., Niemira, B. A., Mills, R. S., & Zhen, M. Y. (2012). Quality of gamma ray-irradiated iceberg lettuce and treatments to minimize irradiation-induced disorders. *HortScience*, 47(8), 1108-1112.
- Farkas, J., Ehlermann, D. A. E., & Mohácsi-Farkas, C. (2014). Food Technologies: Food Irradiation. In Y. Motarjemi (Ed.), *Encyclopedia of Food Safety* (pp. 178-186). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378612-8.00259-6>
- Farkas, J., & Mohácsi-Farkas, C. (2011). History and future of food irradiation. *Trends in Food Science & Technology*, 22(2-3), 121-126.
- Fernandes, Â., Barreira, J. C. M., Günaydi, T., Alkan, H., Antonio, A. L., Oliveira, M. B. P., Martins, A., & Ferreira, I. C. F. R. (2017). Effect of gamma irradiation and extended storage on selected chemical constituents and antioxidant activities of sliced mushroom. *Food Control*, 72, 328-337.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.04.044>
- Fisher, D. R., & Fahey, F. H. (2017). Appropriate Use of Effective Dose in Radiation Protection and Risk Assessment. *Health Phys*, 113(2), 102-109.
<https://doi.org/10.1097/hp.0000000000000674>
- Follett, P. A. (2009). Generic radiation quarantine treatments: the next steps. *Journal of Economic Entomology*, 102(4), 1399-1406.
- Follett, P. A., Wall, M., & Bailey, W. (2013). Influence of modified atmosphere packaging on radiation tolerance in the phytosanitary pest melon fly (Diptera: Tephritidae). *J Econ Entomol*, 106(5), 2020-2026.
<https://doi.org/10.1603/ec13117>
- Galán Saúco, V. (2004). MANGO PRODUCTION AND WORLD MARKET: CURRENT SITUATION AND FUTURE PROSPECTS.

- Gautam, A. K., & Kumar, S. (2020). Chapter 12 - Techniques for the Detection, Identification, and Diagnosis of Agricultural Pathogens and Diseases. In C. Egbuna & B. Sawicka (Eds.), *Natural Remedies for Pest, Disease and Weed Control* (pp. 135-142). Academic Press.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819304-4.00012-9>
- Giacalone, G., & Chiabrand, V. (2015). MODIFIED ATMOSPHERE PACKAGING OF SWEET CHERRIES WITH DIFFERENT PACKAGING SYSTEMS: EFFECT ON ORGANOLEPTIC QUALITY.
- Golding, J., & Singh, S. P. (2020). Advances in the use of irradiation for the market access of fresh horticultural produce. In *Advances in postharvest management of horticultural produce* (pp. 251-272). Burleigh Dodds Science Publishing.
- Golding, J. B., Uthairatanakij, A., Ornelas-Paz, J. d. J., & Prakash, A. (2024). Phytosanitary irradiation effects on fresh produce quality – A review. *Postharvest Biology and Technology*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.112855>
- Gómez-Simuta, Y., Hernández, E., Aceituno-Medina, M., Liedo, P., Escobar-López, A., Montoya, P., Bravo, B., Hallman, G. J., Bustos, M. E., & Toledo, J. (2017). Tolerance of mango cv. 'Ataulfo' to irradiation with Co-60 vs. hydrothermal phytosanitary treatment. *Radiation Physics and Chemistry*, 139, 27-32.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.05.015>
- Graska, J., Fidler, J., Gietler, M., Prabucka, B., Nykiel, M., & Labudda, M. (2023). Nitric Oxide in Plant Functioning: Metabolism, Signaling, and Responses to Infestation with Ecdysozoa Parasites. *Biology (Basel)*, 12(7).
<https://doi.org/10.3390/biology12070927>
- Gyimah, L. A., Amoatey, H. M., Boatin, R., Appiah, V., & Odai, B. T. (2020). The impact of gamma irradiation and storage on the physicochemical properties of tomato fruits in Ghana. *Food Quality and Safety*, 4(3), 151-157.
<https://doi.org/10.1093/FQSAFE/FYAA017>
- Hadthamard, N., Chaumpluk, P., Buanong, M., Boonyarittongchai, P., & Wongs-Aree, C. (2019). Effects of multilayer coating of chitosan and polystyrene sulfonate on quality of 'Nam Dok Mai No.4' mango. 13, 42-48.

- Hall, M., Redpath, S. P., Sanxter, S., Wall, M., Follett, P. A., Silva, S., Postler, M., Wohlers, M., Jamieson, L. E., & Woolf, A. B. (2020). Exploring X-ray treatments for disinfesting apples. *Acta Horticulturae*, 1275, 93-98.
- Hallman, G. J., & Blackburn, C. M. (2016). Phytosanitary irradiation. *Foods*, 5(1), 1-10. <https://doi.org/10.3390/foods5010008>
- Haque, S., Begum, P., Khatun, M., & Islam, S. N. (2015). Total carotenoid content in some mango (*Mangifera indica*) varieties of Bangladesh. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 6(11), 4875-4878. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029756720&partnerID=40&md5=e6cdc6e4951113a3eb02ecb94187db67>
- Hasan, M. K., Alam, A., Islam, M. R., Akhtaruzzaman, M., & Biswas, M. (2024). Evaluating the potential of 1-methylcyclopropene treatments on physicochemical properties, bioactive compounds, and shelf life of mango fruits under different storage conditions. *Heliyon*, 10(15), e34695. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34695>
- Henrissat, B., Teeri, T. T., & Warren, R. A. (1998). A scheme for designating enzymes that hydrolyse the polysaccharides in the cell walls of plants. *FEBS Lett*, 425(2), 352-354. [https://doi.org/10.1016/s0014-5793\(98\)00265-8](https://doi.org/10.1016/s0014-5793(98)00265-8)
- Hernández, E., Aceituno-Medina, M., Toledo, J., Gómez-Simuta, Y., Villarreal-Fuentes, J. M., Carrasco, M., Liedo, P., Hallman, G. J., & Montoya, P. (2018). Generic Irradiation and Hot Water Phytosanitary Treatments for Mango Fruits cv. ‘Ataulfo’ niño Infested by *Anastrepha ludens* and *Anastrepha obliqua* (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology*, 111(5), 2110-2119. <https://doi.org/10.1093/jee/toy198>
- Hong, K., Gong, D., Xu, H., Wang, S., Jia, Z., Chen, J., & Zhang, L. (2014). Effects of salicylic acid and nitric oxide pretreatment on the expression of genes involved in the ethylene signalling pathway and the quality of postharvest mango fruit. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 42(3), 205-216. <https://doi.org/10.1080/01140671.2014.892012>
- Hou, L., Lin, J., Ma, L., Qu, S., Li, H., & Jiang, N. (2018). Effect of ⁶⁰Co gamma irradiation on postharvest quality and selected enzyme activities of *Volvariella volvacea*.

Scientia Horticulturae, 235, 382-390.

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.074>

Hou, Y., Wu, F., Zhao, Y., Shi, L., & Zhu, X. (2019). Cloning and expression analysis of polygalacturonase and pectin methylesterase genes during softening in apricot (*Prunus armeniaca* L.) fruit. *Scientia Horticulturae*, 256, 108607.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108607>

Hussain, P. R., Dar, M. A., & Wani, A. M. (2013). Impact of radiation processing on quality during storage and post-refrigeration decay of plum (*Prunus domestica* L.) cv. Santarozza. *Radiation Physics and Chemistry*, 85, 234-242.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.01.020>

Hussain, P. R., Rather, S. A., Suradkar, P. P., & Ayob, O. (2019). Gamma irradiation treatment of quince fruit (*Cydonia oblonga* Mill): effect on post-harvest retention of storage quality and inhibition of fungal decay. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 12(1), 118-131.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/16878507.2019.1618588>

Ibarra-Garza, I. P., Ramos-Parra, P. A., Hernández-Brenes, C., & Jacobo-Velázquez, D. A. (2015). Effects of postharvest ripening on the nutraceutical and physicochemical properties of mango (*Mangifera indica* L. cv Keitt).

Postharvest Biology and Technology, 103, 45-54.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.02.014>

Ihsanullah, I., & Rashid, A. (2017). Current activities in food irradiation as a sanitary and phytosanitary treatment in the Asia and the Pacific Region and a comparison with advanced countries. *Food Control*, 72, 345-359.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.03.011>

Intang, A., Oonsiri, P., Kingkaew, S., Chatchumnan, N., Tangboonduangjit, P., Stansook, N., Changkaew, P., Khachonkham, S., Funsian, A., Rattanaareeyakorn, W., Turathong, S., Krongkietlearts, K., Seenukhroah, A., Chaisuttee, R., Sirichotwatcharakit, C., & Oonsiri, S. (2023). Investigation of alanine dosimeter for output measurement in radiotherapy: Results from multicenter in Thailand. *Journal of Associated Medical Sciences*, 56(2), 106-116.

<https://doi.org/10.12982/JAMS.2023.039>

- Jat, L., Lakhawat, S. S., Singh, V., Meena, R., Choudhary, J. L., & Gathala, S. (2022). Postharvest γ -irradiation treatment enhance nutritional and antioxidant potential of Indian jujube (*Ziziphus mauritiana* Lamk) fruit. *Scientia Horticulturae*, 301. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111127>
- Jenjob, A., Uthairatanakij, A., Jitareerat, P., Wongs-Aree, C., & Aiamla-Or, S. (2017). Effect of harvest seasonal and gamma irradiation on the physicochemical changes in pineapple fruit cv. Pattavia during stimulated sea shipment. *Food Science & Nutrition*, 5(5), 997-1003. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fsn3.485>
- Jongsri, P., Wangsomboondee, T., Rojsitthisak, P., & Seraypheap, K. (2016). Effect of molecular weights of chitosan coating on postharvest quality and physicochemical characteristics of mango fruit. *LWT*, 73, 28-36. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.05.038>
- Junqueira-Gonçalves, M. P., Galotto, M. J., Valenzuela, X., Dinten, C. M., Aguirre, P., & Miltz, J. (2011). Perception and view of consumers on food irradiation and the Radura symbol. *Radiation Physics and Chemistry*, 80(1), 119-122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2010.08.001>
- Kam, W. W.-Y., & Banati, R. B. (2013). Effects of ionizing radiation on mitochondria. *Free Radical Biology and Medicine*, 65, 607-619.
- Kam, W. W. Y., & Banati, R. B. (2013). Effects of ionizing radiation on mitochondria. *Free Radical Biology and Medicine*, 65, 607-619. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2013.07.024>
- Kang, T. S. (2019). Basic principles for developing real-time PCR methods used in food analysis: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 574-585. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.037>
- Kanwal, R., Ashraf, H., Sultan, M., Babu, I., Yasmin, Z., Nadeem, M., Asghar, M., Shamshiri, R. R., Ibrahim, S. M., & Ahmad, N. (2020). Effect of 1-methyl cyclopropane and modified atmosphere packaging on the storage of okra (*Abelmoschus esculentus* L.): Theory and experiments. *Sustainability*, 12(18), 7547.

- Ketsa, S., Phakawatmongkol, W., & Subhadrabhandhu, S. (1999). Peel Enzymatic Activity and Colour Changes in Ripening Mango Fruit. *Journal of Plant Physiology*, 154(3), 363-366. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(99\)80181-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0176-1617(99)80181-3)
- Kikuchi, M., Seito, H., Kobayashi, Y., Todoriki, S., Yaginuma, K., Kishimoto, H., Mochizuki, M., & Mishiro, K. (2023). Effects of γ -irradiation as phytosanitary treatment on the quality of Japanese fruits and the survival of their regulated pests. *Radiation Physics and Chemistry*, 208, 110918. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110918>
- Kiss, T., Karácsony, Z., Gomba-Tóth, A., Szabadi, K. L., Spitzmüller, Z., Hegyi-Kaló, J., Cels, T., Otto, M., Golen, R., Hegyi, Á. I., Geml, J., & Váczy, K. Z. (2024). A modified CTAB method for the extraction of high-quality RNA from mono-and dicotyledonous plants rich in secondary metabolites. *Plant Methods*, 20(1), 62. <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01198-z>
- Kızıldeniz, T., Hepsağ, F., & Hayoğlu, İ. (2023). Improving mulberry shelf-life with 1-Methylcyclopropene and modified atmosphere packaging. *Biochemical Systematics and Ecology*, 106, 104578-104578. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bse.2022.104578>
- Kumar, M., Ahuja, S., Dahuja, A., Kumar, R., & Singh, B. (2014). Gamma radiation protects fruit quality in tomato by inhibiting the production of reactive oxygen species (ROS) and ethylene. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 301(3), 871-880. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3234-7>
- Lacroix, M., & Follett, P. (2015). Combination irradiation treatments for food safety and phytosanitary uses. *Stewart Postharvest Review*, 11. <https://doi.org/10.2212/spr.2015.3.4>
- Lacroix, M., Gagnon, M., Pringsulaka, V., Jobin, M., Latreille, B., Nouchpramool, K., Prachasitthisak, Y., Charoen, S., Adulyatham, P., Lettre, J., & Grad, B. (1993). Effect of gamma irradiation with or without hot water dip and transportation from Thailand to Canada on nutritional qualities, ripening index and sensorial characteristics of Thai mangoes (Nahng Glahng Wahn variety). *Radiation*

Physics and Chemistry - RADIAT PHYS CHEM, 42, 273-277.

[https://doi.org/10.1016/0969-806X\(93\)90248-5](https://doi.org/10.1016/0969-806X(93)90248-5)

Li, J., Tao, X., Bu, J., Ying, T., Mao, L., & Luo, Z. (2017). Global transcriptome profiling analysis of ethylene-auxin interaction during tomato fruit ripening.

Postharvest Biology and Technology, 130, 28-38.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.03.021>

Li, L., Shuai, L., Sun, J., Li, C., Yi, P., Zhou, Z., He, X., Ling, D., Sheng, J., Kong, K.-W.,

Zheng, F., Li, J., Liu, G., Xin, M., Li, Z., & Tang, Y. (2020a). The Role of 1-Methylcyclopropene in the regulation of ethylene biosynthesis and ethylene receptor gene expression in *Mangifera indica* L. (Mango Fruit). *Food Science & Nutrition*, 8(2), 1284-1294.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fsn3.1417>

Li, R., Ma, J., Gu, H., Jia, W., Shao, Y., & Li, W. (2022). 1-Methylcyclopropene counteracts ethylene promotion of fruit softening and roles of MiERF2/8 and MiPG in postharvest mangoes. *Frontiers in Plant Science*, 13.

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.971050>

Li, X., Xiong, T., Zhu, Q., Zhou, Y., Lei, Q., Lu, H., Chen, W., Li, X., & Zhu, X. (2023).

Combination of 1-MCP and modified atmosphere packaging (MAP) maintains banana fruit quality under high temperature storage by improving antioxidant system and cell wall structure. *Postharvest Biology and Technology*, 198.

<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112265>

Liu, B., Xin, Q., Zhang, M., Chen, J., Lu, Q., Zhou, X., Li, X., Zhang, W., Feng, W., Pei, H., & Sun, J. (2022). Research Progress on Mango Post-Harvest Ripening Physiology and the Regulatory Technologies. *Foods*, 12(1).

<https://doi.org/10.3390/foods12010173>

Liu, F.-X., Fu, S.-F., Bi, X.-F., Chen, F., Liao, X.-J., Hu, X.-S., & Wu, J.-H. (2013). Physico-chemical and antioxidant properties of four mango (*Mangifera indica* L.) cultivars in China. *Food Chemistry*, 138(1), 396-405.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.111>

Liu, M., Wang, C., Ji, H., Sun, M., Liu, T., Wang, J., Cao, H., & Zhu, Q. (2024). Ethylene biosynthesis and signal transduction during ripening and softening in non-

climacteric fruits: an overview. *Frontiers in Plant Science*, 15.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1368692>

Livak, K. J., & Schmittgen, T. D. (2001). Analysis of Relative Gene Expression Data Using Real-Time Quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta CT}$ Method. *Methods*, 25(4), 402-408.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1006/meth.2001.1262>

Loaharanu, P. (1990). Prospects of international trade in irradiated foods. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry*, 35(1), 223-231.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/1359-0197\(90\)90089-Z](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/1359-0197(90)90089-Z)

Maherani, B., Hossain, F., Criado, P., Ben-Fadhel, Y., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2016).

World market development and consumer acceptance of irradiation technology. *Foods*, 5(4), 1-21, Article 79. <https://doi.org/10.3390/foods5040079>

Maldonado-Celis, M. E., Yahia, E. M., Bedoya, R., Landázuri, P., Loango, N., Aguillón, J., Restrepo, B., & Guerrero Ospina, J. C. (2019). Chemical Composition of Mango (*Mangifera indica* L.) Fruit: Nutritional and Phytochemical Compounds. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 1073.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01073>

Mandha, J., Shumoy, H., Devaere, J., Schouteten, J., Gellynck, X., Winne, A., Matemu, A., & Raes, K. (2022). Effect of Lactic Acid Fermentation on Volatile Compounds and Sensory Characteristics of Mango (*Mangifera indica*) Juices.

Foods, 11, 383. <https://doi.org/10.3390/foods11030383>

Manova, V., & Gruszka, D. (2015). DNA damage and repair in plants – From models to crops. *Frontiers in Plant Science*, 6, 885.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00885>

Manthey, J. A., & Penelope, P. V. (2009). Influences of harvest date and location on the levels of β -carotene, ascorbic acid, total phenols, the in vitro antioxidant capacity, and phenolic profiles of five commercial varieties of mango (*Mangifera indica* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(22), 10825-10830. <https://doi.org/10.1021/jf902606h>

Marin-Huachaca, N. S., Lamy-Freund, M. T., Mancini-Filho, J., Delincée, H., &

Villavicencio, A. L. C. H. (2002). Detection of irradiated fresh fruits treated by

e-beam or gamma rays. *Radiation Physics and Chemistry*, 63(3), 419-422.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(01\)00618-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0969-806X(01)00618-1)

Marques, J. R., Hofman, P. J., & Macnish, A. J. (2016). Postharvest handling practices and irradiation increase lenticel discolouration in 'B74' mango fruit. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 91(5), 542-548.

Marques, J. R., Joyce, D. C., Hofman, P. J., & Davies, J. B. (2022). Irradiation-induced lenticel discolouration in 'B74' mango fruit is modulated by ripeness. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 97(5), 665-672.

<https://doi.org/10.1080/14620316.2022.2049013>

Martins Melo, A. A., Olabode, P. N., Atamian, H. S., Nyakundi, B., Pacioles, C. T., & Prakash, A. (2021). Irradiation reduces superficial scald by downregulating ethylene and α -farnesene biosynthetic enzymes in 'Granny Smith' apples. *Radiation Physics and Chemistry*, 189.

<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109650>

McDonald, H., Arpaia, M. L., Caporaso, F., Obenland, D., Were, L., Rakovski, C., & Prakash, A. (2013). Effect of gamma irradiation treatment at phytosanitary dose levels on the quality of 'Lane Late' navel oranges. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 91-99.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.06.018>

McLaughlin, W. L., Khan, H. M., Warasawas, W., Al-Sheikhly, M., & Radak, B. B. (1989). Optical waveguide dosimetry for gamma-radiation in the dose range 10^1 – 10^4 Gy. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry*, 33(1), 39-46.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/1359-0197\(89\)90092-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/1359-0197(89)90092-1)

Miller, W. R., McDonald, R. E., & Chaparro, J. (2000). Tolerance of Selected Orange and Mandarin Hybrid Fruit to Low-dose Irradiation for Quarantine Purposes. *HortScience HortSci*, 35(7), 1288-1291.

<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.35.7.1288>

Moreno, M., Castell-Perez, M. E., Gomes, C., Da Silva, P. F., & Moreira, R. G. (2006). Effects of Electron Beam Irradiation on Physical, Textural, and Microstructural Properties of "Tommy Atkins" Mangoes (*Mangifera indica* L.). *Journal of Food*

Science, 71(2), E80-E86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.tb08900.x>

- Nam, K. C., Jo, C., & Ahn, D. U. (2017). Irradiation of meat and meat products. In *Emerging Technologies in Meat Processing* (pp. 7-36). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118350676.ch2>
- Nguyen, T. T., Kato, M., Ma, G., Zhang, L., Uthairatanakij, A., Srilaong, V., Laohakunjit, N., & Jitareerat, P. (2021). Electron beam radiation delayed the disassembly of cell wall polysaccharides in harvested mangoes. *Postharvest Biology and Technology*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111544>
- Nguyen, T. T., Uthairatanakij, A., Srilaong, V., Laohakunjit, N., Kato, M., & Jitareerat, P. (2021). Impact of electron beam irradiation on the chlorophyll degradation and antioxidant capacity of mango fruit. *Applied Biological Chemistry*, 64(1). <https://doi.org/10.1186/s13765-021-00592-8>
- Olveira-Bouzas, V., Pita-Calvo, C., Lourdes Vázquez-Odériz, M., & Ángeles Romero-Rodríguez, M. (2021). Evaluation of a modified atmosphere packaging system in pallets to extend the shelf-life of the stored tomato at cooling temperature. *Food Chemistry*, 364, 130309-130309. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130309>
- Özkaya, O., Yildirim, D., Dündar, Ö., & Tükel, S. S. (2016). Effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) and modified atmosphere packaging on postharvest storage quality of nectarine fruit. *Scientia Horticulturae*, 198, 454-461. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.016>
- Pattyn, J., Vaughan-Hirsch, J., & Van de Poel, B. (2021). The regulation of ethylene biosynthesis: a complex multilevel control circuitry. *New Phytologist*, 229(2), 770-782. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/nph.16873>
- Perotti, M. F., Posé, D., & Martín-Pizarro, C. (2023). Non-climacteric fruit development and ripening regulation: ‘the phytohormones show’. *Journal of Experimental Botany*, 74(20), 6237-6253. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad271>
- Perumal, A. B., Nambiar, R. B., Sellamuthu, P. S., & Emmanuel, R. S. (2021). Use of modified atmosphere packaging combined with essential oils for prolonging

- post-harvest shelf life of mango (cv. Banganapalli and cv. Totapuri). *LWT*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111662>
- Phakdee, N., & Chaiprasart, P. (2020). Modified Atmosphere Storage Extends the Shelf Life of 'Nam Dok Mai Sri Tong' Mango Fruit. *International Journal of Fruit Science*, 20(3), 495-505. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1653245>
- Phakdee, N., Intha, N., Pathaichindachote, W., & Chaiprasart, P. (2024). 'Nam Dok Mai Sri Tong' mango storage life is extended using controlled atmospheres. *Acta Horticulturae*, 5-12. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2024.1386.2>
- ProducePay. (2023, 14 March 2023). *Mango market situation in the United States and Latin America*. https://producepay.com/blog/mango-market-situation-in-the-united-states-and-latin-america/?utm_source=chatgpt.com
- Rademacher, W. (2015). Plant growth regulators: backgrounds and uses in plant production. *Journal of plant growth regulation*, 34, 845-872.
- Ramayya, N., Niranjana, K., & Duncan, E. (2012). Effects of modified atmosphere packaging on quality of 'Alphonso' Mangoes. *Journal of Food Science and Technology*, 49(6), 721-728. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0215-x>
- Rashid, M. H. A., Grout, B. W. W., Continella, A., & Mahmud, T. M. M. (2015). Low-dose gamma irradiation following hot water immersion of papaya (*Carica papaya* linn.) fruits provides additional control of postharvest fungal infection to extend shelf life. *Radiation Physics and Chemistry*, 110, 77-81.
- Rivera, C. S., Venturini, M. E., Marco, P., Oria, R., & Blanco, D. (2011). Effects of electron-beam and gamma irradiation treatments on the microbial populations, respiratory activity and sensory characteristics of Tuber melanosporum truffles packaged under modified atmospheres. *Food Microbiology*, 28(7), 1252-1260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fm.2011.05.002>
- Roberts, P. B. (2000). Regulatory aspects of food irradiation in the Asia-Pacific region. *Radiation Physics and Chemistry*, 57(3), 219-221. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(99\)00384-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0969-806X(99)00384-9)
- Rodrigo, M. (1998). Book reviews : Nonthermal Preservation of Foods. G.V. Barbosa-Canóvas, U.R. Pothakamury, E. Palou, E. Enrique y B.G. Swanson. Publicado en

1997 por Marcel Dekker Inc., 270 Madison Avenue, New York 10016, USA. 296 pp. ISBN 0 8247 9979 8. *Food Science and Technology International*, 4(4), 292-292. <https://doi.org/10.1177/108201329800400410>

Rodriguez, J., & Zoffoli, J. P. (2016). Effect of sulfur dioxide and modified atmosphere packaging on blueberry postharvest quality. *Postharvest Biology and Technology*, 117, 230-238.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.03.008>

Rontani, J.-F., & Galeron, M.-A. (2016). Autoxidation of chlorophyll phytyl side chain in senescent phototrophic organisms: A potential source of isophytol in the environment. *Organic Geochemistry*, 97, 35-40.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2016.03.008>

Sabato, S. F., Silva, J. M. d., Cruz, J. N. d., Salmieri, S., Rela, P. R., & Lacroix, M. (2009). Study of physical-chemical and sensorial properties of irradiated Tommy Atkins mangoes (*Mangifera indica* L.) in an international consignment. *Food Control*, 20(3), 284-288.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.05.005>

Sangudom, T., Wattanawan, C., Makkumrai, W., Chatbanyong, R., & Tongtao, S. (2019). Improvement on the supply chain of Thai mango for exporting.

Acta Horticulturae, 1244, 209-214. DOI: 10.17660/ActaHortic.2019.1244.31

Santa-Cruz, D. M., Pacienza, N. A., Polizio, A. H., Balestrasse, K. B., Tomaro, M. L., & Yannarelli, G. G. (2010). Nitric oxide synthase-like dependent NO production enhances heme oxygenase up-regulation in ultraviolet-B-irradiated soybean plants. *Phytochemistry*, 71(14), 1700-1707.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2010.07.009>

Santos, A. M., Lins, S. R., Silva, J. M., & Oliveira, S. M. (2015). Low doses of gamma radiation in the management of postharvest *Lasiodiplodia theobromae* in mangos. *Braz J Microbiol*, 46(3), 841-847. <https://doi.org/10.1590/s1517-838246320140363>

Satin, M. (1993). *Food Irradiation. A Guidebook*.

Schulze, K., Spreer, W., Keil, A., Ongprasert, S., & Müller, J. (2013). Mango (*Mangifera indica* L. cv. Nam Dokmai) production in Northern Thailand—Costs and returns

under extreme weather conditions and different irrigation treatments.

Agricultural Water Management, 126, 46-55.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.04.010>

Sea, S., Rakovski, C., & Prakash, A. (2015). Ripening Quality of 'Bartlett' Pears (*Pyrus communis* L.) Subjected to Phytosanitary X-ray Irradiation Treatment Followed by Simulated Retail Display. *HortScience horts*, 50(2), 279-287.

<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.2.279>

Sen, C. A. O., Fangjing, G., Liangjie, B. A., Chao, M. A., Ning, J. I., Rui, W., & Guoxia, T. A. N. (2021). Effects of Combined Treatment of 1-MCP and $^{60}\text{Co-}\gamma$ Irradiation With Modified Amosphere Package on Postharvest Quality of Loquat Fruits. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 35(1), 103-110.

<https://doi.org/10.11869/j.jssn.100-8551.2021.01.0103>

Silva, J. M., Villar, H. P., & Pimentel, R. M. M. (2012). Structure of the cell wall of mango after application of ionizing radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 81(11), 1770-1775.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.05.021>

Singh, M., & Datta, D. (2020). Development of an algorithm for gamma dose mapping in irradiated product using TOPSIS and its validation. *Radiation Physics and Chemistry*, 177, 109123.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109123>

Singh, O. P., Usha, K., Saboki, E., Srivastav, M., Dahuja, A., & Singh, B. (2012). Enzymatic reactive oxygen species (ROS) scavenging system in mango varieties resistant and susceptible to malformation. *Scientia Horticulturae*, 138, 81-89.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.12.031>

Sivakumar, D., Jiang, Y., & Yahia, E. M. (2011). Maintaining mango (*Mangifera indica* L.) fruit quality during the export chain. *Food Research International*, 44(5), 1254-1263. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.022>

Song, M., Wang, H., Fan, Z., Huang, H., & Ma, H. (2023). Advances in sequencing and key character analysis of mango (*Mangifera indica* L.). *Horticulture Research*, 10(2), uhac259. <https://doi.org/10.1093/hr/uhac259>

- Srimartpirom, M., Burikam, I., Limohpasmanee, W., Kongratarnporn, T., Thannarin, T., Bunsiri, A., & Follett, P. A. (2018). Low-dose irradiation with modified atmosphere packaging for mango against the oriental fruit fly (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology*, 111(1), 135-140.
<https://doi.org/10.1093/jee/tox335>
- Srivastava, S., Singh, R. K., Pathak, G., Goel, R., Asif, M. H., Sane, A. P., & Sane, V. A. (2016). Comparative transcriptome analysis of unripe and mid-ripe fruit of *Mangifera indica* (var. "Dashehari") unravels ripening associated genes. *Scientific Reports*, 6(1), 32557. <https://doi.org/10.1038/srep32557>
- Stevenson, M. H., & Stewart, E. M. (1995). Identification of irradiated food: The current status. *Radiation Physics and Chemistry*, 46(4, Part 1), 653-658.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0969-806X\(95\)00236-O](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0969-806X(95)00236-O)
- Sudhakar, P., Latha, P., & Reddy, P. (2016). *Phenotyping crop plants for physiological and biochemical traits*. Academic Press.
- Syauqi, A., Dadang, D., Harahap, I. S., & Indarwatmi, M. (2021). Gamma irradiation against mealybug *Dysmicoccus lepelleyi* (Betrem) (Hemiptera: Pseudococcidae) on mangosteen fruit (*Garcinia mangostana* L.) as a quarantine treatment. *Radiation Physics and Chemistry*, 179, 108954-108954.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108954>
- Tahergorabi, R., Matak, K. E., & Jaczynski, J. (2012). Application of electron beam to inactivate *Salmonella* in food: Recent developments. *Food Research International*, 45(2), 685-694.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.003>
- Tharanathan, R. N., Yashoda, H. M., & Prabha, T. N. (2006). Mango (*Mangifera indica* L.), "The King of Fruits"—An Overview. *Food Reviews International*, 22(2), 95-123.
<https://doi.org/10.1080/87559120600574493>
- Todd, E. C. D. (2014). Foodborne Diseases: Overview of Emerging Food Technologies. In Y. Motarjemi (Ed.), *Encyclopedia of Food Safety* (pp. 253-261). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378612-8.00416-9>
- Vakkalanka, M., Sr., D'Souza, T., Ray, S., Yam, K. L., & Mir, N. (2012). 7 - Emerging packaging technologies for fresh produce. In K. L. Yam & D. S. Lee (Eds.),

Emerging Food Packaging Technologies (pp. 109-133). Woodhead Publishing.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857095664.1.109>

Vázquez-Celestino, D., Ramos-Sotelo, H., Rivera-Pastrana, D. M., Vázquez-Barrios, M. E., & Mercado-Silva, E. M. (2016). Effects of waxing, microperforated polyethylene bag, 1-methylcyclopropene and nitric oxide on firmness and shrivel and weight loss of 'Manila' mango fruit during ripening. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 398-405.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.09.030>

Wang, L., & Stegemann, J. P. (2010). Extraction of high quality RNA from polysaccharide matrices using cetyltrimethylammonium bromide. *Biomaterials*, 31(7), 1612-1618.

<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.11.024>

Wani, A. M., Hussain, P. R., Meena, R. S., & Dar, M. A. (2008). Effect of gamma-irradiation and refrigerated storage on the improvement of quality and shelf life of pear (*Pyrus communis* L., Cv. Bartlett/William). *Radiation Physics and Chemistry*, 77(8), 983-989.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2008.04.005>

Watkins, C. B. (2006). The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables. *Biotechnology Advances*, 24(4), 389-409.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.01.005>

Watkins, C. B. (2017). Transport of Fresh Produce. In B. Thomas, B. G. Murray, & D. J. Murphy (Eds.), *Encyclopedia of Applied Plant Sciences (Second Edition)* (pp. 351-360). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00218-5>

Wei, S., Mei, J., & Xie, J. (2021). Effects of different carbon dioxide-modified atmosphere packaging and low-temperature storage at 13°C on the quality and metabolism in mango (*Mangifera indica* L.). *Agriculture (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/agriculture11070636>

WHO. (1981). "Wholesomeness of Irradiated Food" Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee, Technical Report Series No. 659, Geneva.

- Wichitkunan, P., Phakdee, N., Saeng-On, B., Jetawattana, S., & Chaiprasart, P. (2023). Effects of X-ray and gamma ray irradiation on the physico-chemical qualities of 'Nam Doc Mai Si Thong' mango (*Mangifera indica* L.). *Acta Horticulturae*, 1364, 11-26. DOI: 10.17660/ActaHortic.2023.1364.2
- Wichitkunan, P., Sirijan, M., Phakdee, N., Saeng-On, B., Jetawattana, S., Shamsub, H., & Chaiprasart, P. (2023). Integrated effects of packaging and gamma irradiation on 'Nam Doc Mai Si Thong' mango shelf-life (*Mangifera indica* L.). *Acta Horticulturae*, 1364, 101-112.
- Windsor, R. E., & Michaels, M. (2008). CHAPTER 21 - Radiation Safety – Theory and Practical Concerns. In C. W. Slipman, R. Derby, F. A. Simeone, T. G. Mayer, L. H. Chou, D. A. Lenrow, S. Abdi, & K. R. Chin (Eds.), *Interventional Spine* (pp. 229-238). W.B. Saunders. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7216-2872-1.50026-1>
- Xie, F., Xie, B., Lin, Y., Yi, H., & Fu, R. (2005). Effect of ^{60}Co - γ Ray irradiation on the physiological and biochemical indexes and the fresh-keeping of *V. volcacea*. *Acta Edulis Fungi*, 12, 41-46. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85044008218&partnerID=40&md5=f2d144f91711f43827ea50d03ab8de46>
- Xu, Y., Cai, Z., Ba, L., Qin, Y., Su, X., Luo, D., Shan, W., Kuang, J., Lu, W., Li, L., Chen, J., & Zhao, Y. (2021). Maintenance of Postharvest Quality and Reactive Oxygen Species Homeostasis of Pitaya Fruit by Essential Oil p-Anisaldehyde Treatment. *Foods*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/foods10102434>
- Xu, Y., Li, S., Huan, C., Jiang, T., Zheng, X., & Brecht, J. K. (2020). Effects of 1-methylcyclopropene treatment on quality and anthocyanin biosynthesis in plum (*Prunus salicina* cv. Taoxingli) fruit during storage at a non-chilling temperature. *Postharvest Biology and Technology*, 169, 111291. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111291>
- Yadav, M. K., Patel, N. L., Chaudhary, A. D., & Modi, P. K. (2014). Optimization of Irradiation and Storage Temperature for Maintaining Physiological Changes, Marketable Fruits, and Sensory Acceptance of Alphonso Mango (*Mangifera*

indica). *Agricultural Research*, 3(4), 360-369. <https://doi.org/10.1007/s40003-014-0126-6>

- Yahia, E., Ornelas-Paz, J. d. J., & Ariza, R. (2006). The Mango (in Spanish). Trillas, Mexico. In: 224p.
- Yahia, E. M., De Jesus Ornelas-Paz, J., & Gonzalez-Aguilar, G. A. (2011). 2 - Nutritional and health-promoting properties of tropical and subtropical fruits. In E. M. Yahia (Ed.), *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits* (pp. 21-78). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9780857093622.21>
- Yahia, E. M., Ornelas-Paz, J. d. J., Brecht, J. K., García-Solís, P., & Maldonado Celis, M. E. (2023). The contribution of mango fruit (*Mangifera indica* L.) to human nutrition and health. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(7).
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104860>
- Yoon, K.-N., Yoon, Y.-S., Hong, H.-J., Park, J.-H., Song, B.-S., Eun, J.-B., & Kim, J.-K. (2023). Gamma irradiation delays tomato (*Solanum lycopersicum*) ripening by inducing transcriptional changes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(13), 6640-6653.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.12760>
- You, J., & Chan, Z. (2015). ROS regulation during abiotic stress responses in crop plants. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1092.
- Zeng, F., Luo, Z., Xie, J., & Feng, S. (2015). Gamma radiation control quality and lignification of bamboo shoots (*Phyllostachys praecox* f. prevernalis.) stored at low temperature. *Postharvest Biology and Technology*, 102, 17-24.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.02.004>



ขั้นตอนการประเมินคุณภาพและวิธีการเตรียมสารสำหรับการทดลอง

1. สูตรคำนวณการสูญเสียน้ำหนัก

การคำนวณการสูญเสียน้ำหนักต้องใช้ค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- น้ำหนักเริ่มต้น (g)
- น้ำหนัก ณ วันที่ทำการทดลอง (g)

$$\frac{(\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนัก ณ วันที่ทำการทดลอง}) \times 100}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}}$$

หน่วยเป็น %

2. สูตรคำนวณอัตราการหายใจ

การคำนวณอัตราการหายใจต้องใช้ค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ปริมาตรภาชนะ (L)
- น้ำหนักของผลไม้ (kg)
- ระยะเวลาการเก็บผลไม้ (hr)
- ปริมาณแก๊ส CO₂ ในระยะเวลาที่กำหนด (%)

$$\frac{(\text{ปริมาตรภาชนะ} - \text{น้ำหนักของผลไม้}) \times \text{ปริมาณแก๊ส CO}_2}{\text{น้ำหนักของผลไม้} \times \text{ระยะเวลาการเก็บ}}$$

หน่วยเป็น mL/kg.hr

3. การสร้าง Standard Curve สำหรับการวัดอัตราการหายใจของผลไม้โดยใช้ Gas Chromatograph (GC)

อุปกรณ์ที่ต้องใช้

- ถังก๊าซ CO₂ มาตรฐานความเข้มข้น 15%
- ถังก๊าซไนโตรเจน (N₂) หรืออากาศสังเคราะห์ (Air mixture) เป็นก๊าซพาหะ
- Syringe ขนาด 1 mL (Gas-tight syringe)
- ถังก๊าซหรือ vial ปิดสนิทสำหรับเตรียมสารมาตรฐาน
- เครื่อง Gas Chromatograph (GC) พร้อมตัวตรวจจับ CO₂ (ระบบ Thermal Conductivity Detector)

ขั้นตอนการเตรียมสารมาตรฐาน

1. คำนวณความเข้มข้นของ CO₂ เป็น % โดยปริมาตร (v/v)

ความเข้มข้น CO ₂ (%)	ปริมาตร CO ₂ (mL)	ปริมาตร N ₂ หรือ Air (mL)
3	0.2	0.8
6	0.4	0.6
9	0.6	0.4
12	0.8	0.2
15	1.0	-

2. ใช้ syringe ขนาด 1 mL ดูด CO₂ จากถังเก็บแก๊สตามที่กำหนด
3. ดูดแก๊สไนโตรเจนหรืออากาศสังเคราะห์ ให้ครบปริมาตร 1 mL
4. ตั้งค่าเครื่อง GC ตามเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการวัด CO₂ injection และ detector เท่ากับ 140 °C ตลอดระยะเวลาควบคุมอุณหภูมิภายในคอลัมน์ที่ 50 °C ตลอดระยะเวลา
5. ฉีดตัวอย่างแก๊ส 1 mL เข้าไปในเครื่อง GC
6. บันทึกค่า peak area และ retention time ของ CO₂ สำหรับแต่ละความเข้มข้น
7. สร้าง Standard Curve โดยพล็อตค่าความเข้มข้น CO₂ (%) บนแกน X กับค่า peak area บนแกน Y
8. นำไฟล์ที่ฉีดเสร็จแล้วมาเรียงใส่ในโปรแกรม (method file) เรียงตามความเข้มข้นข้างต้น เพื่อให้โปรแกรมคำนวณความเข้มข้นของ CO₂ (%) ให้อัตโนมัติ โดยความแม่นยำต้องมากกว่า 98%

4. สูตรคำนวณการผลิตเอทิลีน

การคำนวณการผลิตเอทิลีนต้องใช้ค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ปริมาตรภาชนะ (L)
- น้ำหนักของผลไม้ (kg)
- ระยะเวลาการเก็บผลไม้ (hr)
- ปริมาณแก๊สเอทิลีนในระยะเวลาที่กำหนด (ppm)

$$\frac{(\text{ปริมาตรภาชนะ} - \text{น้ำหนักของผลไม้}) \times \text{ปริมาณแก๊สเอทิลีน}}{\text{น้ำหนักของผลไม้} \times \text{ระยะเวลาการเก็บ}}$$

หน่วยเป็น $\mu\text{L/kg.hr}$

5. การสร้าง Standard Curve สำหรับการวัดปริมาณการผลิตเอทิลีนของผลไม้โดยใช้ Gas Chromatograph (GC)

อุปกรณ์ที่ต้องใช้

- แก๊สเอทิลีนมาตรฐานความเข้มข้น 100 ppm
- ถังก๊าซไนโตรเจน (N_2) หรืออากาศสังเคราะห์ (Air mixture) เป็นแก๊สพาหะ
- Syringe ขนาด 1 mL (Gas-tight syringe)
- เครื่อง Gas Chromatograph (GC) พร้อมตัวตรวจจับแก๊สเอทิลีน (ระบบ Flame Ionization Detector)

ขั้นตอนการเตรียมสารมาตรฐาน

1. คำนวณความเข้มข้นของแก๊สเอทิลีนเป็น ppm โดยปริมาตร (v/v)

ความเข้มข้น แก๊สเอทิลีน (ppm)	ปริมาตรแก๊สเอทิลีน (mL)	ปริมาตร N_2 หรือ Air (mL)
5	0.05	0.95
10	0.1	0.9
20	0.2	0.8
50	0.5	0.5
100	1.0	-

2. ใช้ syringe ขนาด 1 mL ดูดเอทิลีนจากถังเก็บแก๊สตามที่กำหนด
3. ดูดแก๊สไนโตรเจนหรืออากาศสังเคราะห์ ให้ครบปริมาตร 1 mL
4. ตั้งค่าเครื่อง GC ตามเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการวัดเอทิลีน
Injection ที่อุณหภูมิ 110 °C, total flow ที่ 25 mL/min
Column ที่อุณหภูมิ 80 °C, equilibration time ที่ 1 min
Detector ที่อุณหภูมิ 180 °C, sampling rate ที่ 40 msec
5. ฉีดตัวอย่างแก๊สปริมาณ 1 mL เข้าไปในเครื่อง GC
6. บันทึกค่า peak area หรือ retention time ของแก๊สเอทิลีน สำหรับแต่ละความเข้มข้น
7. สร้าง Standard Curve โดยพล็อตค่าความเข้มข้นแก๊สเอทิลีน (ppm) บนแกน X
กับค่า peak area บนแกน Y

นำไฟล์ที่ฉีดเสร็จแล้วมาเรียงใส่ในโปรแกรม (method file) เรียงตามความเข้มข้นข้างต้น เพื่อให้โปรแกรมคำนวณความเข้มข้นของเอทิลีน (ppm) ให้อัตโนมัติ โดยความแม่นยำต้องมากกว่า 98%



7. ขั้นตอนหลังการเก็บเกี่ยวของมะม่วงก่อนการฉายรังสีส่งออกสหรัฐอเมริกา
ณ สวนมะม่วง



- 1) เก็บเกี่ยวผลมะม่วงในระยะเหมาะสม 110-115 วันหลังดอกบาน



- 2) สวมโฟมตาข่ายและรองตะกร้าด้วยกระดาษป้องกันการกระแทกระหว่างการขนส่ง



- 3) คัดเลือกผลที่สมบูรณ์ ปราศจากโรคและแมลง ตัดขั้วให้เหลือ 1 ซม.
และล้างด้วยคลอรีน 200 ppm นาน 2 นาที

ณ โรงคัดบรรจุ



- 4) จุ่มน้ำร้อน 47–55 °C ร่วมกับสารป้องกันกำจัดเชื้อรา 500 ppm นาน 5 นาที



- 5) จุ่มในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 10–20 °C นาน 2 นาที เพื่อลดอุณหภูมิภายในผล



- 6) ฝั่จนแห้งจนสนิทที่อุณหภูมิห้องก่อนบรรจุ

ณ โรงคัดบรรจุ (ต่อ)



- 7) สวมตาข่ายโฟม และบรรจุลงกล่องขนาด 32*49*11 cm



- 8) จัดเรียงผลภายในกล่องให้กระชับและสวยงาม 10-14 ผล/กล่อง
น้ำหนักสุทธิตามที่กำหนด 5 กิโลกรัม

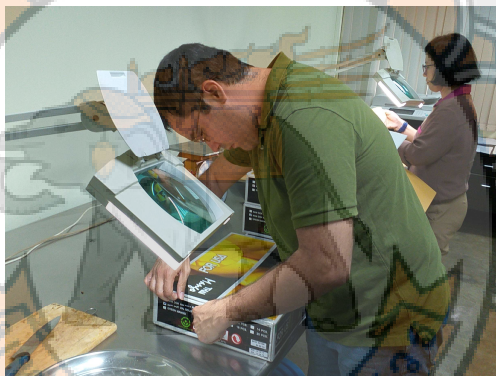


- 9) ขนส่งมายังศูนย์ฉายรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
ด้วยรถหกล้อปิดทึบ

ณ ศูนย์ฉายรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)



- 7) จัดเรียงลงบนพาเลทและชั่งน้ำหนักก่อนเข้าสู่ตู้ฉายรังสี โดยจัดเรียงพาเลทละ 36 กล่อง รวมทั้งสิ้น จำนวน 6 พาเลท หรือ 3 ตู้ฉาย ซึ่งเป็นปริมาณขั้นต่ำในการส่งออกผลไม้สด



- 8) ตรวจสอบขนานัมยพืช ได้แก่ โรค แมลง และขนาดคุณสมบัติของกล่อง โดยเจ้าหน้าที่จากหน่วยงาน APHIS และกรมวิชาการเกษตรก่อนเริ่มการฉายรังสี



- 9) ฉายรังสีแกมมา ปริมาณ 400 เกรย์ ตามข้อกำหนด ใช้ระยะเวลา 2 ชั่วโมง

8. วิธีการสกัดอาร์เอ็นเอด้วยวิธีมาตรฐานด้วยสารละลาย CTAB

add 600 μ L lysis buffer to ~100-150 mg sample (powder) + 2% 2-mercaptoethanol (20 μ L) to 1.5 mL tube and vortex into completely homogenized



incubate sample at 65 °C for 15 min then centrifuge at 13,000 rpm for 15 min



transfer the upper supernatant to a new 1.5 mL tube



** repeat 1 time

add chloroform : isoamyl-alcohol (24:1 v/v) at one volume of homogenized supernatant



centrifuge at 13,000 rpm for 15 min



transfer the upper supernatant to new 1.5 mL tube then add 8-10 M LiCl of one volume after that incubate overnight at 4 °C



centrifuge at 13,000 rpm for 15 min



wash pellet with 70% ethanol 500 μ L 2 times and discard the flow-through or use a micropipette for collect flow-through then allow tube to be dry in room temp.

for 5-10 min



add 30 μ L RNase-free water into 1.5 mL tube and kept at -20/-80 °C



check RNA quantity using nanodrop and quality using gel electrophoresis

9. วิธีการทำอาร์เอ็นเอให้บริสุทธิ์จาก gDNA โดยใช้ชุดเครื่องมือ TURBO™ DNase Kit

add 0.1 volume of 10X TURBO DNase Buffer

and 1 μL of TURBO DNase to RNA sample then mix gently

(resuspend the DNase inactivation by flicking or vortexing the tube before use)



incubate at 37 °C for 20–30 min.



add an acidic phenol of 200 μL and RNase free water (RFW) of 200 μL
mix thoroughly by vortexing and centrifuge at 15,000 rpm for 5 min



transfer the upper supernatant to a new micro tube (1.5 ml)



add 1/10 volume of 3M sodium acetate (pH 5.2)
and 2.5 volume of absolute ethanol



mix well and centrifuge at 15,000 rpm for 10 min at 4 °C



discard the supernatant and add 500 μL of 70% ethanol

centrifuge at 15,000 rpm for 10 min at 4 °C, repeat this step once more



discard the supernatant by decantation, remove any remaining liquid with a
pipette and dry the sample under reduced pressure for 5 min



dissolve the RNA pellet in an appropriate volume of RFW (30 μL)

10. ขั้นตอนและวิธีการใช้เทคนิค RT-PCR เพื่อสังเคราะห์ cDNA

mixing of 4X DN Master Mix and gDNA Remover (440 μ L + 8.8 μ L)

mix well by inversion



place 10 μ L RNA template (50 ng/ μ L) into a 0.2 mL tube (PCR tube)

then incubate at 65 °C for 5 min and quickly cool on ice



prepare the reaction mix (16 μ L) as follows:

4X Master Mix 4 μ L, RFW 2 μ L, RNA template 10 μ L mix well by pipetting



incubate at 37 °C for 5 min and quickly cool on ice



add 5X RT Master Mix II of 4 μ L into reaction tube (20 μ L)



after mixing the reaction, incubate at the following temperatures:

37 °C for 5 min

50 °C for 5 min

98 °C for 5 min (enzyme inactivation reaction)

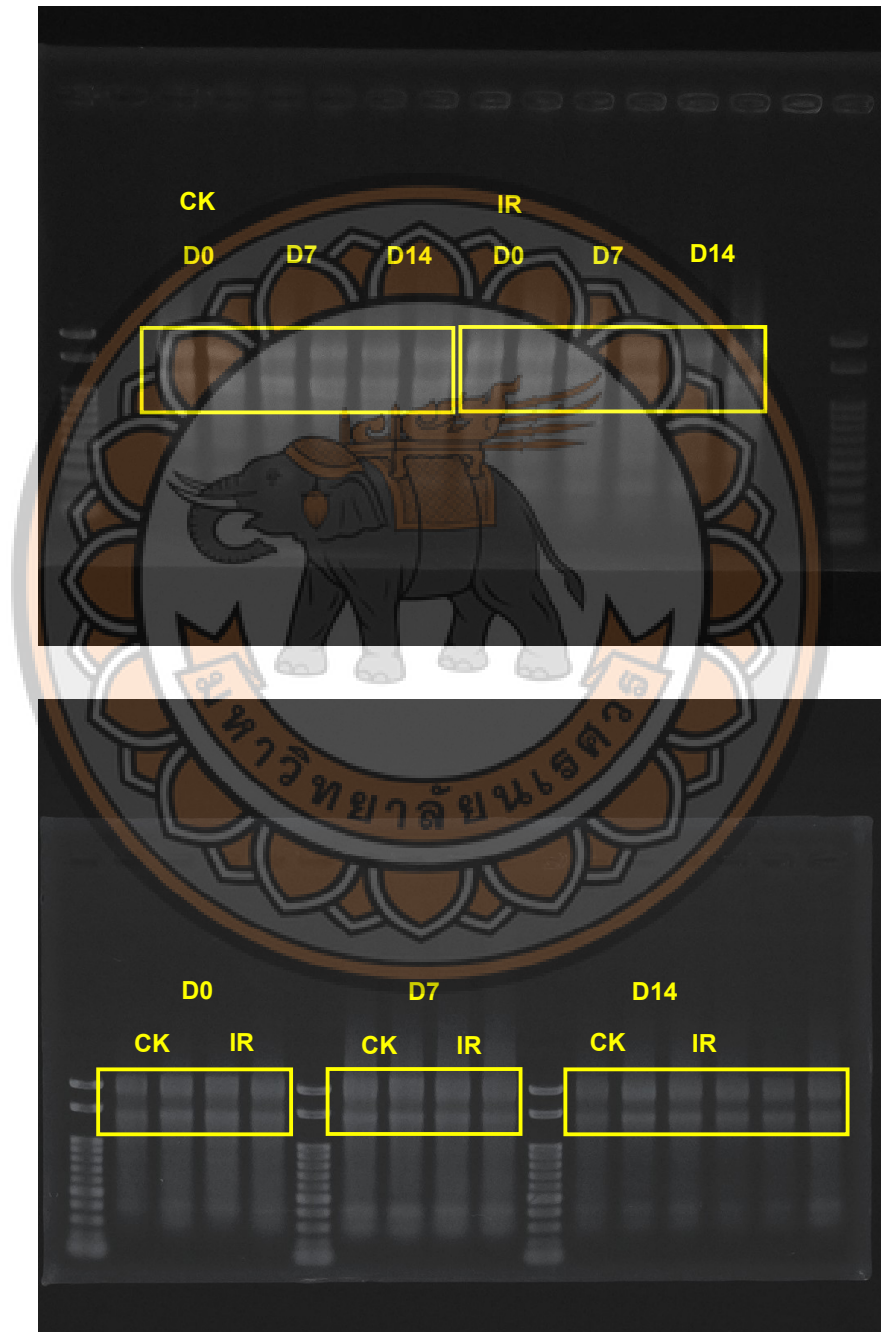
4 °C hold



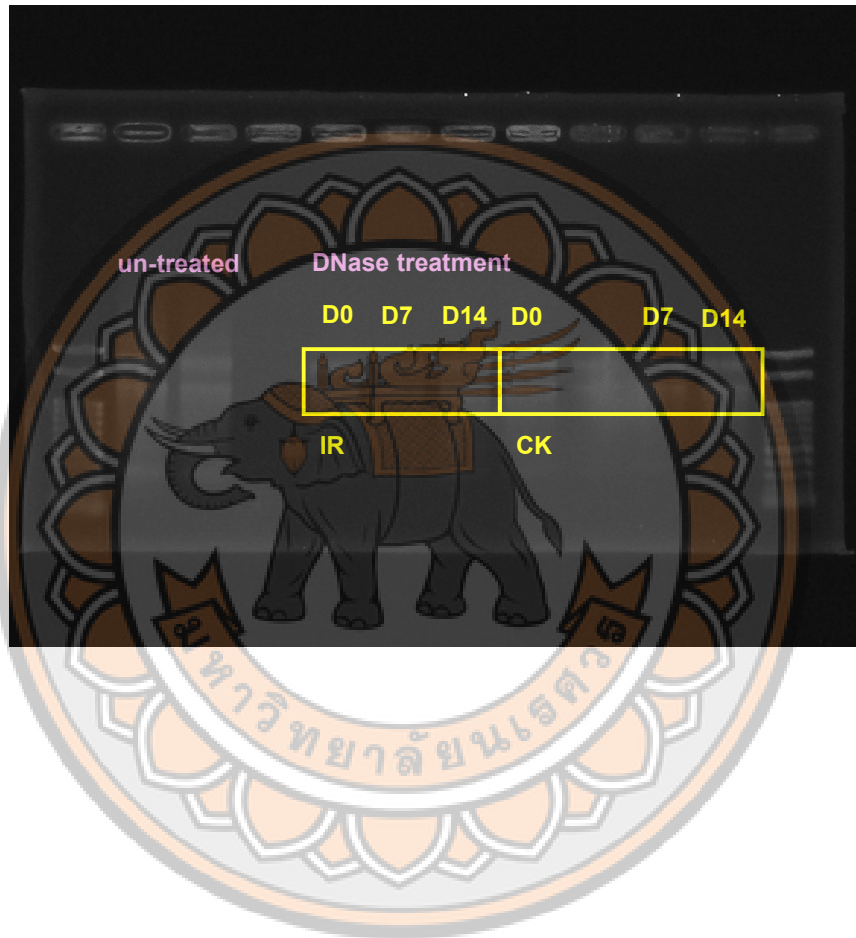
after the synthesis reaction is finished,

add 180 μ L of TE buffer to dilute the cDNA

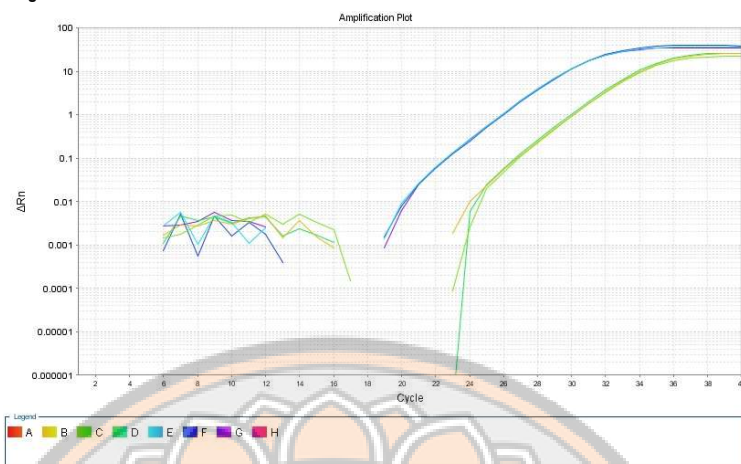
11. ภาพอาร์เอ็นเอในตัวอย่างมะม่วงฉายรังสีแกมมา (IR) และไม่ฉายรังสี (CK) ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟรีซิสใน 1% agarose gel ในระยะเวลาแตกต่างกัน 0, 7 และ 14 วัน (D0, D7 และ D14) ใช้ DNA marker OmniMARK (BH OneMARK, Bio-Helix co., ltd.)



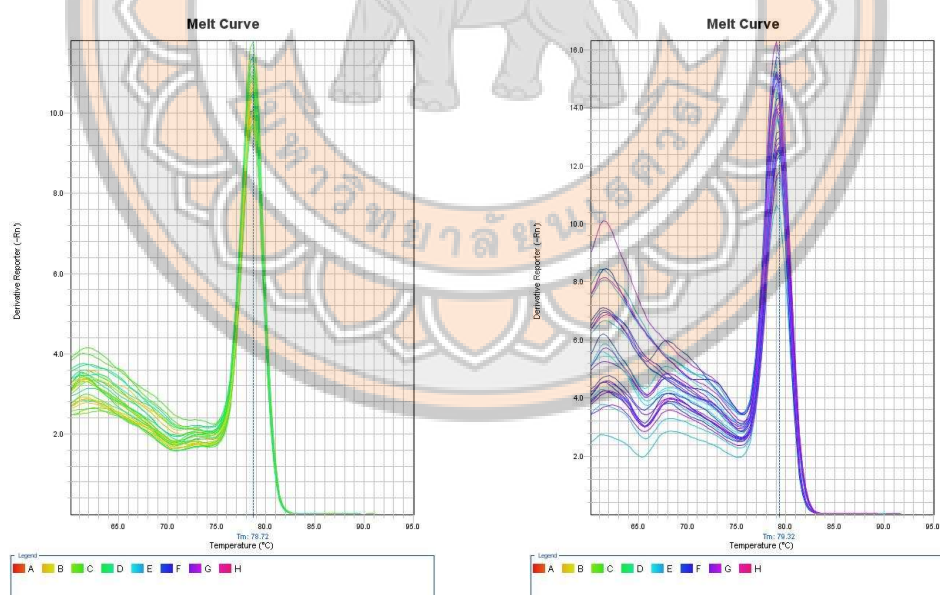
12. ภาพอาร์เอ็นเอภายหลัง DNase treatment ในตัวอย่างมะม่วงฉายรังสีแกมมา (IR) และไม่ฉายรังสี (CK) ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟรีซิสใน 1% agarose gel ในระยะเวลาแตกต่างกัน 0, 7 และ 14 วัน (D0, D7 และ D14) ใช้ DNA marker OmniMARK (BH OneMARK, Bio-Helix co., ltd.)



13. สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์และความจำเพาะของผลิตภัณฑ์ของยีน *MiETR1* และ *MiACT*

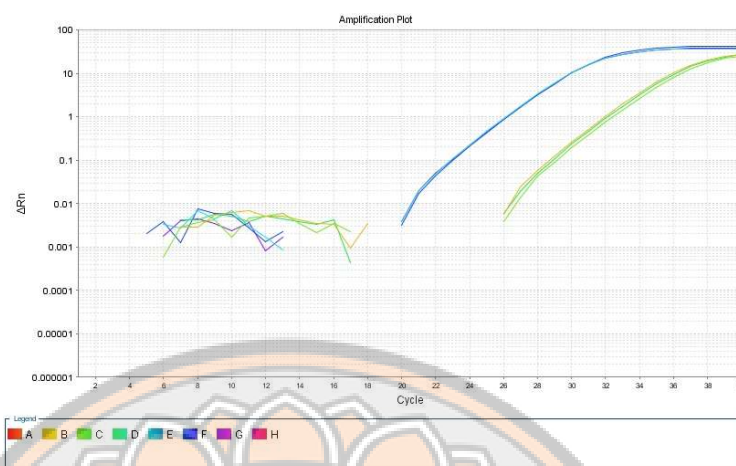


ภาพแสดงความเข้มของสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเพิ่มจำนวนของ DNA เป้าหมายในแต่ละรอบของการทำ PCR (cycle) โดยแกน X แสดงจำนวนรอบของการทำ PCR และแกน Y แสดงระดับสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของ DNA ที่ถูกขยายของยีน *MiETR1* (สีเขียว) เปรียบเทียบกับยีนควบคุม (*MiACT*) (สีน้ำเงิน)

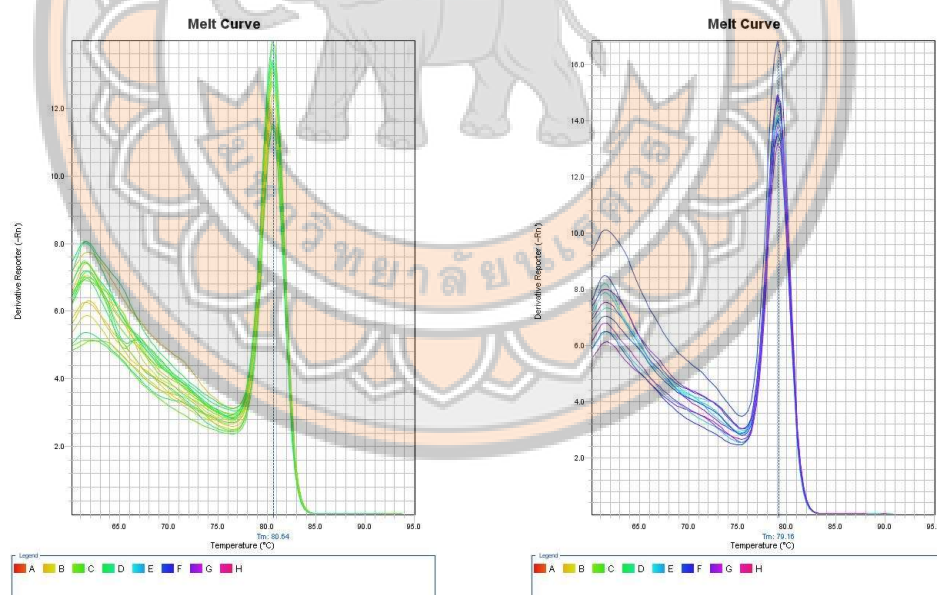


ความจำเพาะของผลิตภัณฑ์ DNA ที่ถูกขยาย (amplicon) โดยวิเคราะห์อุณหภูมิที่ทำให้สาย DNA ที่จับกันแยกออกจากกัน (denaturation) ซึ่งเรียกว่า จุดหลอมเหลว (melting temperature) แกน X (Temperature, °C) ระบุอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่ DNA หลอมละลาย และแกน Y (Fluorescence Intensity) ระบุระดับสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ที่ลดลงเมื่อ DNA เป้าหมายหลอมละลายของยีน *MiETR1* (ซ้าย) เปรียบเทียบกับยีนควบคุม (*MiACT*) (ขวา)

14. สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์และความจำเพาะของผลิตภัณฑ์ของยีน *MiERS1* และ *MiACT*

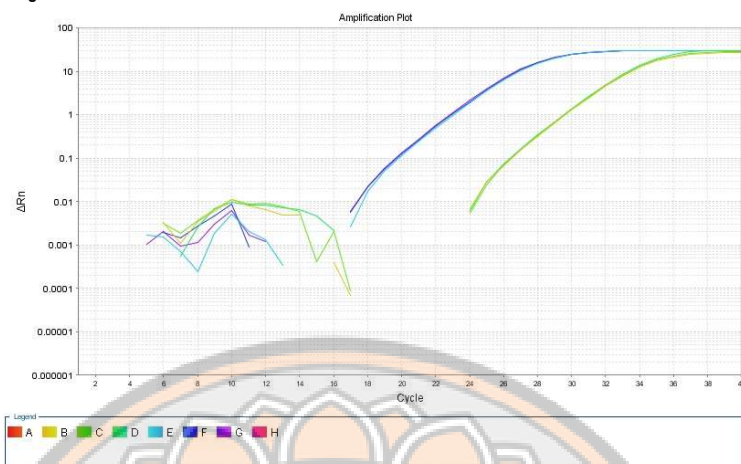


ภาพแสดงความเข้มของสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเพิ่มจำนวนของ DNA เป้าหมายในแต่ละรอบของการทำ PCR (cycle) โดยแกน X แสดงจำนวนรอบของการทำ PCR และแกน Y แสดงระดับสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของ DNA ที่ถูกขยายของยีน *MiERS1* (สีเขียว) เปรียบเทียบกับยีนควบคุม (*MiACT*) (สีน้ำเงิน)

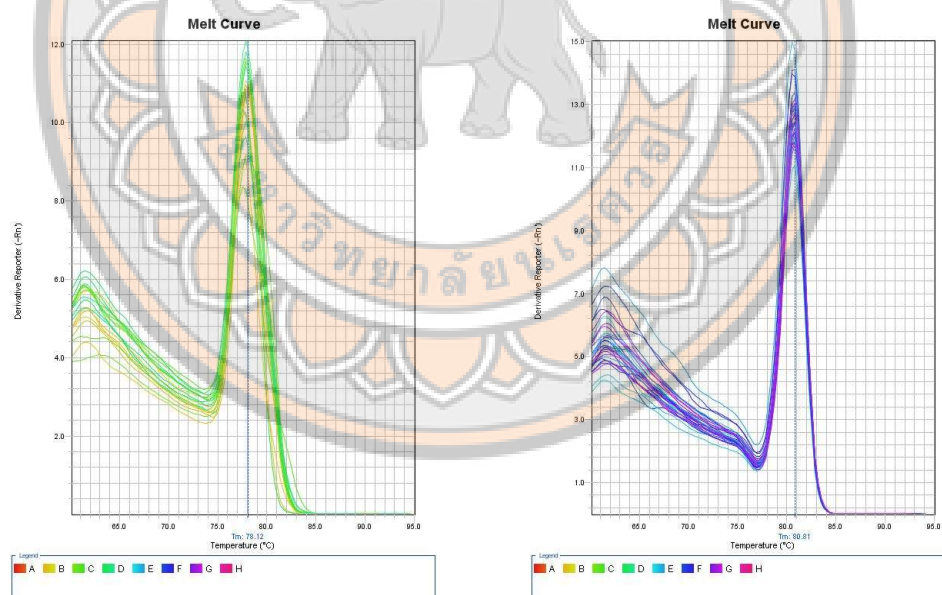


ภาพความจำเพาะของผลิตภัณฑ์ DNA ที่ถูกขยาย (amplicon) โดยวิเคราะห์อุณหภูมิที่ทำให้สาย DNA ที่จับกันแยกออกจากกัน (denaturation) ซึ่งเรียกว่า จุดหลอมเหลว (melting temperature) แกน X (Temperature, °C) ระบุอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่ DNA หลอมละลาย และแกน Y (Fluorescence Intensity) ระบุระดับสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ที่ลดลงเมื่อ DNA เป้าหมายหลอมละลายของยีน *MiERS1* (ซ้าย) เปรียบเทียบกับยีนควบคุม (*MiACT*) (ขวา)

15. สัญญาณฟลูออเรสเซนซ์และความจำเพาะของผลิตภัณฑ์ของยีน *MiACS* และ *MiACT*



ภาพแสดงความเข้มของสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเพิ่มจำนวนของ DNA เป้าหมายในแต่ละรอบของการทำ PCR (cycle) โดยแกน X แสดงจำนวนรอบของการทำ PCR และแกน Y แสดงระดับสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของ DNA ที่ถูกขยายของยีน *MiACS* (สีเขียว) เปรียบเทียบกับยีนควบคุม (*MiACT*) (สีน้ำเงิน)



ภาพความจำเพาะของผลิตภัณฑ์ DNA ที่ถูกขยาย (amplicon) โดยวิเคราะห์อุณหภูมิที่ทำให้สาย DNA ที่จับกันแยกออกจากกัน (denaturation) ซึ่งเรียกว่า จุดหลอมเหลว (melting temperature) แกน X (Temperature, °C) ระบุอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่ DNA หลอมละลาย และแกน Y (Fluorescence Intensity) ระบุระดับสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ที่ลดลงเมื่อ DNA เป้าหมายหลอมละลายของยีน *MiACS* (ซ้าย) เปรียบเทียบกับยีนควบคุม (*MiACT*) (ขวา)

16. วิธีการเตรียมสารละลาย CTAB buffer lysis

2% CTAB (Cetyl trimethylammonium bromide) (0.1 M Tris-HCl pH 8.0, 20 mM EDTA pH 8.0, 1% PVP-40, 1.4 M NaCl) ปริมาตร 200 mL ละลายใน RNase-free water

สารเคมี	คำนวณความเข้มข้น	ปริมาณ
2% CTAB	= 20,000 mg/L x 0.2 L	4 g
0.1 M Tris-HCl pH 8.0	= 0.1 M x 0.2 L x 121.14 g/mol	2.42 g
20 mM EDTA pH 8.0	= 0.02 M x 0.2 L x 372.24 g/mol	1.49 g
1% PVP-40	= 10,000 mg/L x 0.2 L	2 g
1.4 M NaCl	= 1.4 M x 0.2 L x 58.44 g/mol	16.36 g

วัสดุและสารเคมีที่ต้องใช้:

- เครื่องชั่งสารเคมี
- ปีกเกอร์ หรือ ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 500 mL
- เครื่องคนสารละลาย (Magnetic Stirrer) หรือแท่งแก้วคนสาร
- เตาร้อนไฟฟ้า
- ขวดแก้วพร้อมฝาปิด (ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว)

ขั้นตอนการเตรียม:

1. ชั่งสารเคมีตามที่กำหนดไว้ข้างต้น โดยใช้เครื่องชั่งสารเคมีที่มีความแม่นยำ
2. เติมน้ำ RNase-free water ปริมาณ 150-180 mL ลงในปีกเกอร์
3. เติมสารเคมีลงไปในปีกเกอร์ โดยเริ่มจาก CTAB แล้วคนด้วยแท่งแก้วหรือใช้เครื่องคนสารจนสารเริ่มละลาย แล้วจึงค่อยเติมสารชนิดต่อไป
4. ให้ความร้อนอุณหภูมิประมาณ 50-60°C เพื่อช่วยให้ละลายได้ดีขึ้น ระวังอย่าให้เดือด
5. เติมน้ำ RNase-free water เพิ่มจนได้ปริมาตร 200 mL
6. คนให้เข้ากันจนสารละลายใสและเป็นเนื้อเดียวกัน
7. เก็บสารละลายในขวดปิดฝาให้สนิท เก็บที่อุณหภูมิ 4 °C หรือ -20 °C

ข้อควรระวัง

- CTAB อาจละลายได้ช้าในน้ำที่อุณหภูมิต่ำ ควรให้ความร้อนหากจำเป็น
- ควรสวมถุงมือและหน้ากากขณะเตรียมเพื่อความปลอดภัย

17. วิธีเตรียมสาร 2% 2-Mercaptoethanol ปริมาตร 1,000 μL

สารเคมี	คำนวณความเข้มข้น	ปริมาณ
2% 2-Mercaptoethanol (99%)	$= 1,000 \mu\text{L} \times 0.02$	$\approx 20 \mu\text{L}$
RNase-free water		$= 980 \mu\text{L}$

วัสดุและอุปกรณ์ที่ต้องใช้:

- ไมโครปิเปต (Pipette) และทิปที่ปราศจาก RNase
- หลอด Eppendorf ขนาด 1.5 mL หรือ 2.0 mL
- ตู้ดูดควัน (Fume Hood) และถุงมือป้องกัน

ขั้นตอนการเตรียม

1. เตรียมหลอด Eppendorf ขนาด 1.5 mL หรือ 2.0 mL และ เติม RNase-free water 980 μL
2. ใช้ไมโครปิเปตดูด 2-Mercaptoethanol (BME) ปริมาณ 20 μL (มีความหนืด ควรดูดช้าๆ)
3. เติม BME ลงใน RNase-free water โดยต้องทำงานในตู้ดูดควัน เพื่อลดการสัมผัสไอระเหยที่เป็นอันตราย
4. ปิดฝาหลอดให้แน่น และผสมโดยการ Vortex หรือกลับหัวหลอดเบา ๆ
5. เก็บที่อุณหภูมิ 4°C หรือ -20°C เพื่อรักษาคุณสมบัติของสาร

ข้อควรระวัง

- 2-Mercaptoethanol มีกลิ่นแรงและเป็นพิษ ต้องทำงานในตู้ดูดควัน และสวม ถุงมือ + แว่นตานิรภัย
- ไม่สัมผัสสารโดยตรง และปิดฝาขวด BME ทันทีหลังใช้
- ใช้ RNase-free water เท่านั้นเพื่อลดการปนเปื้อน RNase enzyme

18. วิธีเตรียมสาร Chloroform : Isoamyl-alcohol (24:1 v/v) ปริมาตร 100 mL

สารเคมี	คำนวณความเข้มข้น	ปริมาณ
Chloroform	$= (200 \text{ mL} \times 24)/25$	$= 96 \text{ mL}$
Isoamyl-alcohol	$= (200 \text{ mL} \times 1)/25$	$= 4 \text{ mL}$

วัสดุและอุปกรณ์ที่ต้องใช้:

- ขวดแก้วขนาด 100 mL (ขวด Reagent หรือขวดเก็บสารละลายที่ปิดสนิท)
- กระจกบดหรือไมโครปิเปตขนาดใหญ่
- ตู้ดูดควัน (Fume Hood)
- ถุงมือป้องกัน แวนตานิรภัย และหน้ากากป้องกันไอระเหย

ขั้นตอนการเตรียม

1. สวมอุปกรณ์ป้องกัน (ถุงมือ, แวนตานิรภัย, หน้ากาก) และทำงานในตู้ดูดควัน
2. ตวง Chloroform 96 mL ด้วยกระจกบด
3. เติม Isoamyl alcohol 4 mL ลงไปอย่างระมัดระวัง
4. เทสารละลายลงในขวดแก้ว ปิดฝาขวดให้สนิท แล้วเขย่าหรือหมุนขวดเบา ๆ เพื่อให้สารผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
5. ติดฉลากขวด (ระบุวันที่เตรียม และอัตราส่วน Chloroform : Isoamyl alcohol 24:1)
6. เก็บที่อุณหภูมิ 4 °C หรือในที่เย็นและมีมืด (ควรเก็บในภาชนะกันแสงเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของ Chloroform)

ข้อควรระวัง:

- Chloroform เป็นสารพิษ และไวต่อแสง ควรทำงานในตู้ดูดควัน และหลีกเลี่ยงการสูดดม
- ห้ามใช้ภาชนะพลาสติกเก็บสารละลาย เนื่องจาก Chloroform อาจทำละลายพลาสติกบางชนิด
- ใช้ภาชนะที่ปิดสนิท เพราะ Chloroform ระเหยได้ง่าย
- ทิ้งของเสียอย่างถูกต้อง ตามข้อกำหนดของห้องปฏิบัติการ

19. วิธีเตรียมสารละลาย 10 M Lithium Chloride (LiCl) ปริมาตร 100 mL

สารเคมี	คำนวณความเข้มข้น	ปริมาณ
10 M Lithium Chloride	$= 10 \text{ M} \times 0.1 \text{ L} \times 42.39 \text{ g/mol}$	$\approx 42.39 \text{ g}$

วัสดุและอุปกรณ์ที่ต้องใช้:

- RNase-free water
- ปีกเกอร์ขนาด 150-250 mL
- ขวดแก้วขนาด 100 mL (ขวด Reagent หรือขวดเก็บสารละลายที่ปิดสนิท)
- กระบอกตวง หรือขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 100 mL
- เครื่องชั่งสารเคมี
- แท่งแก้วคนสาร หรือเครื่องคนสารละลาย (Magnetic Stirrer)
- pH meter (ถ้าต้องการปรับค่า pH)
- ถุงมือและแว่นตานิรภัย

ขั้นตอนการเตรียม:

1. ชั่ง LiCl 42.39 g โดยใช้เครื่องชั่งที่มีความแม่นยำ
2. เติม RNase-free water 70-80 mL ลงในปีกเกอร์ 150-250 mL
3. ค่อย ๆ เติมสาร LiCl ลงไปในปีกเกอร์ และใช้แท่งแก้วคนสาร หรือใช้เครื่องคนสารละลายให้ละลายจนหมด โดย LiCl จะละลายได้ช้า ควรคนอย่างต่อเนื่อง
4. เทสารละลายลงในขวดปรับปริมาตร ขนาด 100 mL
5. เติม RNase-free water เพิ่มจนได้ปริมาตร 100 mL แล้วเขย่าหรือหมุนขวดเบาๆ เพื่อให้สารผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
6. ตรวจสอบและปรับค่า pH (ถ้าจำเป็น) – ปกติ LiCl 10 M จะมี pH ประมาณ 6-7
7. เก็บสารละลายในขวดแก้วเก็บสารละลายที่ปิดสนิท และติดฉลากให้ชัดเจน
8. เก็บที่อุณหภูมิ 4 °C หรือ -20 °C เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ

ข้อควรระวัง

- LiCl ดูดความชื้นได้ดี ควรเก็บในภาชนะที่ปิดสนิท
- อาจระคายเคืองผิวหนังและดวงตา ควรใส่ถุงมือและแว่นตานิรภัยขณะเตรียม
- หากสัมผัสกับสารละลาย ให้ล้างออกด้วยน้ำปริมาณมากทันที

20. วิธีการเตรียมสารละลาย 70% ethanol

สารเคมี	คำนวณความเข้มข้น	ปริมาณ
70% ethanol (99%)	$= 200 \text{ mL} \times 0.7$	$\approx 140 \text{ mL}$

วัสดุและอุปกรณ์ที่ต้องใช้

- กระจกบอทดวง หรือขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 200 mL
- แท่งแก้วคนสาร หรือเครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer)

ขั้นตอนการเตรียม

1. เติมน้ำกลั่น 60 mL ลงในขวดวัดปริมาตร 200 mL
2. ค่อยๆ เติม 99% Ethanol ปริมาตร 140 mL ลงไปจนครบปริมาตร พร้อมกับคน/เขย่าให้เข้ากัน
3. เทสารละลายลงในขวดเก็บสารที่ปิดสนิท และติดฉลากให้ชัดเจน เก็บที่อุณหภูมิ 4 °C หรืออุณหภูมิห้องตามความเหมาะสมของการใช้งาน



21. วิธีเตรียมสารละลาย 3 M Sodium Acetate Trihydrate (pH 5.2)

สารเคมี	คำนวณความเข้มข้น	ปริมาณ
3 M Sodium Acetate (99%)	$= 3 \text{ M} \times 0.1 \text{ L} \times 136.08 \text{ g/mol}$	$\approx 40.83 \text{ g}$

วัสดุและอุปกรณ์ที่ต้องใช้:

- RNase-free water
- ปีกเกอร์ขนาด 150–250 mL
- pH meter
- กรดอะซิติกเข้มข้น (Glacial Acetic Acid สำหรับปรับ pH)
- ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 100 mL
- แท่งแก้วคนสาร หรือเครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer)

ขั้นตอนการเตรียม

1. ชั่ง Sodium Acetate Trihydrate 40.83 g ด้วยเครื่องชั่งที่มีความแม่นยำ
2. เติม RNase-free water 70–80 mL ลงในปีกเกอร์ขนาด 150–250 mL
3. ค่อยๆ เติม Sodium Acetate ลงไป และใช้แท่งแก้วคนสาร หรือเครื่องกวนแม่เหล็ก คนให้ละลายหมด
4. วัดค่า pH ด้วย pH meter
หาก pH สูงเกิน 5.2 ให้เติม Glacial Acetic Acid ทีละหยด จนได้ pH 5.2
หาก pH ต่ำกว่า 5.2 ให้เติม Sodium Acetate เพิ่มเล็กน้อย
5. เทสารละลายลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 mL
6. เติม RNase-free water จนได้ปริมาตร 100 mL เขย่าเล็กน้อย
7. เทสารละลายลงในขวดเก็บสารที่ปิดสนิท และติดฉลากให้ชัดเจน
8. เก็บที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อรักษาคุณสมบัติของสารละลาย

ข้อควรระวัง

- Sodium Acetate Trihydrate ดูดความชื้นได้ดี ควรเก็บในภาชนะที่ปิดสนิท
- Glacial Acetic Acid เป็นสารกัดกร่อน ควรใช้ถุงมือและทำงานในที่อากาศถ่ายเท

22. วิธีเตรียมสารละลาย 0.1 N Sodium Hydroxide

สารเคมี	คำนวณความเข้มข้น	ปริมาณ
0.1 M Sodium Hydroxide (99%)	$= 0.1 \text{ M} \times 1 \text{ L} \times 40.0 \text{ g/mol}$	$\approx 4.0 \text{ g}$

อุปกรณ์ที่ต้องใช้

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แบบเม็ดหรือผง

- บีกเกอร์
- แก้ววัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 1 ลิตร
- กระจกตวง
- เครื่องชั่งดิจิทัล
- แท่งคนสาร
- น้ำกลั่น
- ถุงมือและแว่นตานิรภัย (เพื่อความปลอดภัย)

ขั้นตอนการเตรียม

1. ชั่ง NaOH จำนวน 4.00 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง
2. ละลาย NaOH ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำกลั่นประมาณ 300-500 mL
3. คนจนละลายหมด (ระวัง: ปฏิกริยาเป็นแบบคายความร้อน)
4. เทสารละลายลงใน volumetric flask ขนาด 1 ลิตร
5. เติมน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 ลิตรพอดี
6. ปิดฝาแล้วเขย่าให้เข้ากัน
7. เทสารละลายลงในขวดเก็บสารที่ปิดสนิท และติดฉลากให้ชัดเจน

23. วิธีเตรียมสารละลาย TE buffer (Tris-EDTA buffer) 1X

สารเคมี	คำนวณความเข้มข้น	ปริมาณ
Tris base	$= 0.01 \text{ M} \times 1 \text{ L} \times 121 \text{ g/mol}$	$\approx 1.21 \text{ g}$
EDTA disodium salt	$= 0.001 \text{ M} \times 1 \text{ L} \times 372.24 \text{ g/mol}$	$\approx 0.372 \text{ g}$

อุปกรณ์ที่ต้องใช้

- ปีกเกอร์
- แก้ววัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 1 ลิตร
- กระบอกตวง
- เครื่องชั่งดิจิทัล
- แท่งคนสาร
- RNase-free water

ขั้นตอนการเตรียม

1. ชั่งสารตามที่กำหนด
2. ละลายสารทั้งสองใน RNase-free water ~800 mL (ในปีกเกอร์หรือขวดแก้ว)
3. ปรับค่า pH ให้เป็น 8.0 โดยใช้ HCl (ควรใช้ pH meter)
4. เติมน RNase-free water ให้ครบ 1,000 mL
5. เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องหรือ 4°C (ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้)

24. ผลงานตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ (มะม่วงฉายรังสี)

Effects of X-ray and gamma ray irradiation on the physico-chemical qualities of 'Nam Doc Mai Si Thong' mango (*Mangifera indica* L.)

P. Wichitkunanan¹, N. Phakdee¹, B. Saeng-on¹, S. Jetawattana² and P. Chaiprasart^{1,*}

¹Center of Excellence in Postharvest Technology, Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand; ²Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization), Technopolis, Pathum Thani, Thailand.

Abstract

'Nam Doc Mai Si Thong' mango is the major cultivar of mango produced in Thailand. Its apparent sweetness when ripe (16-18 %Brix), creamy smooth pulp, and attractive golden skin color make it popularly desired by international trade. Apart from heat treatment, good practices in postharvest combined with irradiation are usually required for fresh mango as a quarantine measure in some countries. However, overlooking good postharvest treatments prior to irradiation usually causes poor quality of mango when they arrive at their destinations. Subsequently causes the reluctance and misunderstanding blamed for the generic dose of 400 Gy by the exporters. Here we show X-ray and gamma irradiations combined with good practices in postharvest are essential to maintaining physico-chemical properties of mango. It was found that sorting of mango using near-infrared spectroscopy (NIR) helps in the selection maturity stage at 80% (7-13 %Brix) with the predicted R² values 0.8125 for total soluble solids (TSS). X-ray and gamma irradiations at 400 Gy significantly decreased ethylene production and respiration rate then delayed mango ripening up to 12 days of storage at 13°C, compared to non-irradiated. Both X-ray and gamma provided no different effect in physico-chemical characteristics. Also, systemic fungicide soaking (300 ppm) in hot water (45°C) effectively decreased anthracnose incidence in irradiated fruits to less than 5% compared to non-treated. Our results demonstrate that the phytosanitary irradiations with X-ray or gamma combined with good practices in postharvest processes are reliable in maintaining premium quality of 'Nam Doc Mai Si Thong' mangos and a starting point for other cultivars of mango for export. Furthermore, the premium qualities of 'Nam Doc Mai Si Thong' mango and its prolonged shelf life can considerably provide confidence on a commercial scale to exporters.

Keywords: NIR spectrometer, postharvest treatments, ionizing irradiation, absorbed doses, exportation

Wichitkunanan, P., Phakdee, N., Saeng-On, B., Jetawattana, S., & Chaiprasart, P. (2023). Effects of X-ray and gamma ray irradiation on the physico-chemical qualities of "Nam Doc Mai Si Thong" mango (*Mangifera indica* L.). *Acta Horticulturae*, 1364, 11–25. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1364.2>

Integrated effects of packaging and gamma irradiation on 'Nam Doc Mai Si Thong' mango shelf-life (*Mangifera indica* L.)

P. Wichitkunanan¹, M. Sirijan¹, N. Phakdee¹, B. Saeng-on¹, S. Jetawattana², H. Shamsub² and P. Chaiprasart^{1,*}

¹Center of Excellence in Postharvest Technology, Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University, Phitsanulok, 65000, Thailand; ²Thailand Institute of Nuclear Technology (public organization), Nakhon Nayok, 26120, Thailand.

Abstract

Mangos are ranked fifth among fresh produce export crops from Thailand. Thai mango cultivar 'Nam Doc Mai Si Thong' is the most popular exported fruit into Japan, Korea, China, Europe, Australia, and the USA. It has a sweet flavor when ripe, a smooth pulp, and a golden skinny peel which make it widely desirable for the international trade markets. Prior to export, the fresh mango fruits used in this study were subjected to phytosanitary treatment and biosecurity measures. A hot water dip treatment, hot vapor treatment, and ionizing irradiation treatment combined with good postharvest treatments provided the best processing to eradicate insects and pests. Irradiated mango fruit's shelf life of 7 days at ambient temperatures of 32-35°C to an expanded shelf life (12 days) during storage temperatures of 13-15°C when they arrived at their country's destination. This result was mostly causing poor mango fruits qualities for long-distance export even after irradiation and export. Here we show that using modified atmosphere packaging (MAP) could successfully delay the ripening process in physico-chemical qualities and reduced disease incidence which make it widely accepted by consumers, and then stored in reefer container. Our results demonstrate that white ethylene-absorbing bag 1 and 2 (WEB1) and (WEB2) enhanced the shelf life up to 24 and 15 days for non-packed. Besides, plastic bags with high oxygen transmission rate resulted in induce ripening process of mango fruits and decay ratio during storage. Furthermore, the 'Nam Doc Mai Si Thong' mango used WEB1 and WEB2 bags could be transported over long distances by sea freight.

Keywords: phytosanitary, quarantine method, exportation, white ethylene-absorbing bag

Wichitkunanan, P., Sirijan, M., Phakdee, N., Saeng-On, B., Jetawattana, S., Shamsub, H., & Chaiprasart, P. (2023). Integrated effects of packaging and gamma irradiation on "Nam Doc Mai Si Thong" mango shelf-life (*Mangifera indica* L.). *Acta Horticulturae*, 1364, 101–112. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1364.13>

The activity of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on postharvest life of the mango fruit (*Mangifera indica* L.) after irradiation

P. Wichitkunanan¹, S. Jetawattana², H. Shamsub² and P. Chaiprasart^{1,*}

¹Center of Excellence in Postharvest Technology, Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University, Phitsanulok, 65000, Thailand; ²Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization), Nakhon Nayok, 26120, Thailand.

Abstract

Mangoes are perishable fruit that lose their fruit firmness and weight rapidly during harvest, postharvest treatment, and transport. Thai fresh mangoes are usually treated with ionizing radiations as a phytosanitary treatment before being exported to overseas markets. In this study, the effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on mango fruit quality and their shelf-life was investigated after irradiation. The fruit was treated individually through fumigation with a 1-MCP via different at 500 and 1,000 ppb for 12 and 24 h at 25°C then stored at 13-15°C for 24 days. It was found that irradiated mango treated with 1-MCP at 500 and 1,000 ppb was more effective in maintaining quality on color, TSS/TA, fruit firmness, respiration rate, and ethylene production. Acceptable fruit after 24 days was higher than 80% in treated fruit with 1-MCP treatments at 500 and 1,000 ppb. Ripening of 1-MCP treated fruits was significantly delayed compared with non-treated fruit, and successfully extended the postharvest life of 'Nam Doc Mai Si Thong' mango. These results demonstrate that 1-MCP application after irradiation is a useful postharvest method for the preservation of mango fruit for long distances freight.

Keywords: irradiated mango, gamma ray, ripening, storage life

Wichitkunanan, P., Jetawattana, S., Shamsub, H., & Chaiprasart, P. (2024). The activity of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on postharvest life of the mango fruit (*Mangifera indica* L.) after irradiation. *Acta Horticulturae*, 1396, 545–552. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2024.1396.72>

Inhibition of the ripening process in 'Nam Doc Mai No.4' mango fruit using 1-methylcyclopropene (1-MCP) after irradiation

P. Wichitkunan¹, S. Jetawattana², H. Shamsub² and P. Chaiprasart^{1,*}

¹Center of Excellence in Postharvest Technology, Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University, Phitsanulok, 65000, Thailand; ²Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization), Nakhon Nayok, 26120, Thailand.

Abstract

The use of ionizing irradiation has been demonstrated as an effective commercial phytosanitary treatment prior to export to the international market in the US and Australia. Quality deterioration of irradiated mango is an inherent aspect of the advancement in senescence and loss in fruit quality during storage. 1-methylcyclopropene (1-MCP) was used for extending shelf life and quality, by delaying ripening through downregulating the ethylene response. In this study, application of 1-MCP after irradiation using gamma ray was studied for efficacy in delaying fruit ripening of 'Nam Doc Mai No.4' mango. The irradiated mangoes were exposed to 0, 500, and 1,000 ppb 1-MCP for 12 and 24 h, and stored at 13±2°C, 80-90% RH. It was found that 1-MCP treatment effectively maintained peel color (L*, a*, and b*) fruit firmness, and total soluble solids and titratable acidity ratio. In addition, irradiated mangoes were treated with 1-MCP, delaying respiration rate and ethylene production. 1-MCP treatment at 500 and 1,000 ppb for 12 and 24 h had a lower disease incidence by below 20% throughout storage time. 1-MCP treatment after irradiation is directly related to ripening process of mango, resulting in an extended storage life of up to 24 days. These results suggest that the effective delay of ripening of mango fruit was found in 1-MCP treatment after gamma radiation for up to 24 days.

Keywords: gamma ray, generic dose, fumigation, shelf-life extension

Wichitkunan, P., Jetawattana, S., Shamsub, H., & Chaiprasart, P. (2024). Inhibition of the ripening process in 'Nam Doc Mai No.4' mango fruit using 1-methylcyclopropene (1-MCP) after irradiation. *Acta Horticulturae*, 1396, 609–616. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2024.1396.81>

Application of Ionizing Radiation Treatments to Improve Postharvest Quality and Storage Life of Thai Mango (*Mangifera indica* L.) *International Journal of Fruit Science*. (accepted 2025)

Phytosanitary irradiation prolonged shelf-life by reducing ethylene production and gene expression: *MiETR1*, *MiERS1*, and *MiACS* in 'Nam Dok Mai Si Thong' mango. *Horticulture Environment Biotechnology*. (submitted 2025)

25. ผลงานตีพิมพ์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

Irradiation as a quarantine treatment on the quality and sensory evaluation of 'Thong Dee' Thai pomelo (*Citrus maxima* (Burm.) Merr.) during storage

P. Wichitkunanan¹, S. Jetawattana², H. Shamsub² and P. Chaiprasart^{1,*}

¹Center of Excellence in Postharvest Technology, Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University, Phitsanulok, 65000, Thailand; ²Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization), Nakhon Nayok, 26120, Thailand.

Abstract

The use of phytosanitary regulations to prevent the spread of pests into new areas is frequently required for international trade. Currently, Thai fresh pomelos are permitted to be exported to the United States and require to be treated with ionizing radiations as a phytosanitary treatment before being exported using gamma ray or X-ray at a generic dose. In this study, the effect of gamma irradiation on the postharvest quality of pomelo cultivar 'Thong Dee' (*Citrus maxima* (Burm.) Merr.) was evaluated and was carried out on a commercial-scale experiment to observe how shelf-life of pomelo during shipment and storage. Pomelos were irradiated at 400 Gy using gamma ray (1.25 MeV) from the ⁶⁰Co source and stored at 13-15°C for 50 days, pomelo were not treated with radiation as a control group. After irradiation, gamma radiation did not affect pomelo peel or external damage when compared to control. Neither irradiation affected characteristics, weight loss, fruit firmness, peel color, TSS/TA ratio, respiration rate, and ethylene production. In addition, decayed fruits were found after irradiation on day 30 of control and irradiated fruit with 12.98 and 5.17%, respectively. The quality of irradiated pomelo was similar to non-irradiated pomelo stored at refrigerated temperature for 50 days. The results suggest that irradiation could serve as a potential quarantine treatment for 'Thong Dee' Thai pomelo with good qualities and appearance which appropriate handling process and storage temperature.

Keywords: gamma ray, cobalt-60, phytosanitary, shelf-life

Wichitkunanan, P., Jetawattana, S., Shamsub, H., & Chaiprasart, P. (2024). Irradiation as a quarantine treatment on the quality and sensory evaluation of 'Thong Dee' Thai pomelo (*Citrus maxima* (Burm.) Merr.) during storage. *Acta Horticulturae*, 1404, 739–748. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2024.1404.101>

Effect of phytosanitary irradiation on fruit quality of Thai pomelo cv. Khao Nam Pueng (*Citrus maxima* (Burm.) Merr.) during storage. *Acta Horticulture*. (submitted 2024)

26. ตารางคำนวณต้นทุนการส่งออกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสำหรับการฉายรังสี

ลำดับ	รายการ	บาท
	ราคาผลมะม่วงต่อ กิโลกรัม	50
	จำนวน (กิโลกรัม) 270 กล่อง	1,350
1	มะม่วงผลสด เกรดส่งออก	67,500
	มะม่วงเกรดเอ เพื่อตัดเสีย 20 กก.	1,000
2	ค่าขนส่งผลไม้	
2.1	จากสวน -โรงคัดบรรจุ (รถกระบะคอก)	4,000
2.2	จากโรงคัดบรรจุ-โรงฉาย-สนามบิน	12,500
3	ค่าคัดบรรจุ	
3.1	ค่าบริการคัดบรรจุ (10 บาท/กก.) + vat	14,659
3.2	ค่ากล่อง (35 บาท/กล่อง) + vat	10,112
3.3	ค่าสารเคมี Azoxystrobin (1,900 บาท/0.5 ลิตร) + vat	7,600
3.4	ค่าตายายโฟมห่อมะม่วง (1 บาท/ชิ้น) + vat	3,467
3.5	ค่าโฟมรองกล่อง (6 บาท) + vat	3,467
3.6	ค่าฉลากติดกล่อง + vat	1,350
3.7	ค่าสติ๊กเกอร์ติดบนผลไม้แต่ละลูก (1 บาท/ชิ้น) + vat	3,467
4	ค่าประสานงานฉายรังสี/ตรวจผลไม้	
4.1	ค่าฉายรังสีแกมมา กิโลกรัม ละ 9 บาท	13,001
4.2	ค่าเดินทาง inspector (กรมวิชาการเกษตร)	2,000
4.3	ค่าตรวจผลไม้ของเจ้าหน้าที่ APHIS ก่อนการฉายรังสี (Co-operator) กิโลกรัมละ 30 บาท	41,100
5	shipping (ผู้ประสานงาน) ดูแลเอกสารทั้งหมดตอนฉายรังสี	7,000
	ต้นทุนคัดบรรจุ (ไม่รวมขนส่ง)	192,221
	vat 7%	13,455
	ต้นทุนมะม่วงรวม vat	205,677
	ราคาต้นทุนต่อกล่อง (บาท)	762

หมายเหตุ

APHIS = Animal and Plant Health Inspection Service