การรักษาคุณภาพที่ดีของผลมะม่วง (*Mangifera indica* L.) ในระยะหลังการเก็บเกี่ยว

Quality preservation of mango (*Mangifera indica* L.) fruit during postharvest period

อุบล ชินวัง[1*] และ ทินน์ พรหมโชติ[1]

Ubol Chinwang[1*] and Thin Promchot[1]

บทคัดย่อ

มะม่วงเป็นผลไม้ส่งออกของหลายประเทศ และเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคผลสดทั่วโลก การรักษาคุณภาพที่ดีของผลสดในระยะหลังการเก็บเกี่ยวด้วยวิทยาการด้านต่างๆ จึงมีความสำคัญมาก เพราะทำให้ผลไม้มีอายุการวางจำหน่ายยาวนานขึ้น วิทยาการดังกล่าวนี้สามารถชะลอการสุกของผล และลดปริมาณการเน่าเสียของผลเนื่องจากการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคพืชและแมลงศัตรูพืชบางชนิด นอกจากการปฏิบัติด้านการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมแล้ว วิทยาการหลายด้านได้ถูกนำมาใช้กับมะม่วงก่อนการบรรจุหีบห่อ และในระหว่างการขนส่งหรือการเก็บรักษาเพื่อรอจำหน่าย ได้แก่ การทำให้ผลิตผลเย็นลงโดยการลดอุณหภูมิ (precooling) ภายหลังการเก็บเกี่ยว การจุ่มผลในน้ำร้อนระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมกับมะม่วงพันธุ์ต่างๆ ร่วมกับสารเคมีที่มีฤทธิ์ป้องกันกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคพืชด้วยความเข้มข้น และระยะเวลาที่เหมาะสม การอบไอน้ำร้อนเพื่อกำจัดไข่และตัวอ่อนของแมลงวันผลไม้ การฉายรังสีมะม่วงภายในบรรจุภัณฑ์ก่อนการส่งออก และการเก็บรักษาผลในบรรจุภัณฑ์แบบดัดแปลงบรรยากาศ ร่วมกับการใช้อุณหภูมิต่ำในการเก็บรักษา ส่วนวิธีการเก็บรักษามะม่วงในสภาพควบคุมบรรยากาศแบบประยุกต์ (หรือ dynamic controlled atmosphere storage) เพื่อป้องกันการเกิดสภาพขาดก๊าซออกซิเจนของเนื้อเยื่อผลไม้ระหว่างการเก็บรักษา อยู่ในระหว่างการพัฒนาเพื่อให้สามารถใช้ได้ในเชิงพาณิชย์ได้ การใช้สารเคมีสังเคราะห์หลายชนิดมีประสิทธิภาพดีและให้ผลรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทางกายภาพ (ความร้อน ความเย็น รังสี ปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ลดลง และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น) และชีววิธี (สารสกัดจากพืช และเชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์) การใช้สารเคมีสังเคราะห์ต้องคำนึงถึงสารเคมีตกค้างในผลมะม่วงที่อาจพบในปริมาณที่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่ประเทศผู้นำเข้ากำหนดไว้ การศึกษาวิจัยด้านการใช้สารอินทรีย์ที่สกัดจากพืช และเชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ จึงมีการพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับ (หรือทดลองเปรียบเทียบกับ) สารเคมีสังเคราะห์ เพื่อผลิตเป็นสารผลิตภัณฑ์มาใช้ในการรักษาคุณภาพของผลมะม่วงในทางการค้าต่อไป

คำสำคัญ: การเก็บรักษาในอุณหภูมิต่ำ การอบไอน้ำร้อน การฉายรังสี ชีววิธี

Received: 20 August 2024; Accepted: 17 December 2024

[1] ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ. อุบลราชธานี 34190

[1] Department of Horticulture, Faculty of Agriculture. Ubon Ratchathani University. Ubon Ratchathani. 34190

* Corresponding author: ubon.c@ubu.ac.th

Abstract

Mango (*mangifera indica* L.) is an exported fruit for many producing countries with an increasing demand of the consumers worldwide. It is, therefore, importance to maintain good quality of harvested mango fruit using various postharvest technologies in order to extend its shelf life. These technologies delay fruit ripening and reduce fruit decay due to the infection of plant pathogens and some insect pests. In addition to an appropriate practices of fruit harvesting, postharvest approaches have been applied to the fruit before packaging, during transportation and storage. These include precooling after harvest, hot water immersion containing fungicide of a proper concentration and a dipping duration, vapor heat treatment to disinfestation of fruit flies and some pests, Irradiation on the fruit in packages, and modified atmosphere packaging in cold storage. In addition, dynamic controlled atmosphere storage, a prevention method of hypoxia condition in fruit tissues, has been developed to a commercial use. Synthetic fungicide application showed an excellent fruit decay control, as compared to many physical treatments (heat, cold, irradiation, and low O_2 and high CO_2 contents) and biocontrol methods (plant extracts and microbial antagonists). Nevertheless, it is needed to consider on chemical residues in the mango fruit, as mentioned by importing countries and the international organizations. Researches on the biocontrol methods have been studied to apply and/or to use in combination to the synthetic fungicides to obtain an alternative, effective mean for keeping good quality of mango fruit before marketing.

Keywords: cold storage, vapor heat treatment, irradiation, biocontrol

บทนำ

มะม่วงเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ และเป็นแหล่งของสารอาหารที่สำคัญของผู้บริโภค เช่น วิตามินเอ อี และซี กรดไขมัน สเตอรอล และสารต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ ในเนื้อผล (สารประกอบฟีนอล กรดแอสคอร์บิก และแคโรทีนอยด์) (Vilela et al., 2013; Lauricella et al., 2017; Rumainum et al., 2018) มะม่วงมีการปลูกทางการค้าหลายพันธุ์ แหล่งปลูกส่วนใหญ่อยู่ในประเทศต่างๆ ของทวีปเอเชีย (อินเดีย จีน ไทย ฟิลิปปินส์ และอินโดนีเซีย) และในทวีปอเมริกา (เม็กซิโก บราซิล กัวเตมาลา เปรู และเอกวาดอร์) ซึ่งให้ผลผลิตในปริมาณมาก (>1 ล้านตันต่อปี) ส่วนในทวีปออสเตรเลีย แอฟริกา และประเทศที่เป็นหมู่เกาะสามารถผลิตได้ในปริมาณรองลงมา (50,000-200,000 ตันต่อปี) (International Trade Centre,

2022) ในปี 2562 ประเทศเม็กซิโกเป็นผู้ผลิตมะม่วงเพื่อการส่งออกต่างประเทศและมีส่วนแบ่งในตลาดโลกมากที่สุด รองลงมาคือประเทศไทย บราซิล และเปรู โดยมีส่วนแบ่งการตลาด 21 17 11 และ 10% ของปริมาณทั้งหมดของการส่งออกมะม่วงทั่วโลก ตามลำดับ (International Trade Centre, 2022) ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกมะม่วงในปี 2564 จำนวน 913,887 ไร่ ดำเนินการผลิตโดยเกษตรกรจำนวน 200,922 ราย และมีพื้นที่สวนมะม่วงที่เก็บเกี่ยวผลผลิตได้จำนวน 684,587 ไร่ ได้ผลผลิตรวม 903,312 ตัน คิดเป็นผลผลิตเฉลี่ย 1,320 กิโลกรัมต่อไร่ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2564) ในปี 2564 ประเทศไทยมีการส่งออกผลมะม่วงสดจำนวน 113,806 ตัน คิดเป็นมูลค่า 2,935 ล้านบาท ส่วนผลผลิตสำหรับการบริโภคภายในประเทศมีจำนวน 761,553 ตัน นอกจากผลมะม่วงสดคุณภาพดีเพื่อการส่งออกแล้ว รูปแบบมะม่วงแปรรูปอื่นๆ ที่มีการส่งออก คือ มะม่วงบรรจุภาชนะที่อากาศผ่านเข้าออกไม่ได้ มะม่วงอบแห้ง และมะม่วงแช่แข็ง (กรมศุลกากร, 2564 อ้างโดยกรมส่งเสริมการเกษตร, 2564)

มะม่วงเป็นผลไม้ที่สามารถสุกได้ภายหลังการเก็บเกี่ยวผลจากต้นในระยะผลแก่ดิบซึ่งจัดเป็นผลไม้ประเภทไคลแมกเทอริก (climacteric fruit) การสุกของผลที่รวดเร็วในสภาพอุณหภูมิห้อง (5-9 วัน ขึ้นอยู่กับพันธุ์และอายุของผลขณะเก็บเกี่ยว) (ศิรกานต์ และคณะ, 2555; อุบล และ สาธิต, 2558; อุบล และคณะ, 2564) ทำให้มะม่วงมีอายุการวางจำหน่าย และอายุการเก็บรักษาสั้นลงระหว่างการขนส่งสู่ตลาด เกษตรกรและผู้ประกอบการส่งออกจึงมีการใช้หลายวิธีการในการรักษาคุณภาพที่ดีของผลมะม่วงตั้งแต่เก็บเกี่ยว เช่น การใช้ดัชนีการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม และปฏิบัติต่อผลขณะเก็บเกี่ยวด้วยความระมัดระวัง เพื่อลดการเกิดบาดแผล และการสะสมความร้อนภายในผล วิธีปฏิบัติที่สำคัญในการรักษาคุณภาพที่ดีและการยืดระยะเวลาของการเสื่อมคุณภาพของผล ได้แก่ การลดอุณหภูมิของผลิตผลโดยใช้ความเย็น การใช้อุณหภูมิต่ำในระหว่างการเก็บรักษาผลิตผล การใช้ความร้อน (heat treatment) รูปแบบต่างๆ เพื่อป้องกันกำจัดโรคพืช โดยเฉพาะโรคขั้วผลเน่า และแอนแทรคโนส การฉายรังสี การเคลือบผิวผลไม้ การเก็บรักษามะม่วงในสภาพดัดแปลงและควบคุมบรรยากาศ และการใช้สารเคมีสารอินทรีย์ และเชื้อปฏิปักษ์ในการควบคุมการเน่าเสียของผลระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา (Asio and Cuaresma, 2016; Alkan et al., 2018; Ntsoane et al., 2019a; Patel et al., 2019; Bambalele et al., 2021; Liu et al., 2023) วัตถุประสงค์ของบทความนี้เป็นการรวบรวมรายละเอียดด้านการจัดการหลังการเก็บเกี่ยว เช่น การใช้ความเย็นและความร้อน การฉายรังสี การเก็บรักษาแบบดัดแปลงและควบคุมบรรยากาศ และการใช้สารเคมีบางชนิดกับมะม่วง ได้แก่ 1-methylcyclopropene (1-MCP) ไนตริกออกไซด์ เมลาโทนิน เฮกซาแนล และสารเคมี (ชนิดสังเคราะห์ และสารสกัดจากพืช) และเชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ที่ใช้ป้องกันกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค

1. การใช้ความเย็น

การใช้ความเย็นกับมะม่วงในที่นี้เป็นการทำให้ผลไม้เย็นลงหลังจากการเก็บเกี่ยว และการใช้อุณหภูมิต่ำในการเก็บรักษาผลระหว่างการขนส่งและการจำหน่าย การทำให้ผลไม้เย็นลงนำมาปฏิบัติกับมะม่วงภายหลังการเก็บเกี่ยวทันทีในวันที่เก็บเกี่ยว อย่างไรก็ตาม การปฏิบัตินี้สามารถชะลอเวลาออกไปได้ในกรณีที่เก็บผลไม้ไว้ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมและไม่ได้สัมผัสกับแสงแดด นอกจากนี้ การทำให้ผลเย็นลงอาจนำผลไม้มาผ่านความเย็นระดับอุณหภูมิปานกลางในระยะเวลาช่วงหนึ่งก่อนการได้รับความเย็นระดับที่ใช้ปกติ ทั้งนี้ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดอาการผิดปกติจากการได้รับความเย็นจัดจากการปฏิบัตินี้ (Duan et al., 2020) ข้อดีสองประการของการทำให้ผลไม้เย็นลงคือ (1) การกำจัดความร้อนในแปลงปลูกที่สะสมอยู่ในเนื้อเยื่อผลไม้ที่เก็บเกี่ยวมาจากต้น โดยลดอุณหภูมิของเนื้อผลลงจากระดับที่มากกว่า 30 °C เป็น 26-28 °C ก่อนการปฏิบัติต่อมะม่วงในลำดับต่อไปในโรงคัดบรรจุ หรือลดลงให้มีอุณหภูมิต่ำกว่านี้ (12-17 °C) (Narasimha Rao et al., 2020) เพื่อชะลอการเสื่อมคุณภาพของผลไม้ระหว่างการเก็บรักษาต่อในห้องเย็นหรือในระหว่างการขนส่งด้วยรถห้องเย็น (Kader, 2002; Duan et al., 2020) ทั้งนี้ เพราะหลังจากที่ระดับอุณหภูมิของเนื้อผลไม้ลดลง กิจกรรมของเอนไซม์ชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาทางชีวเคมีภายในเนื้อเยื่อผลไม้ที่เป็น

สาเหตุของการวายมีอัตราลดลง และปริมาณอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อพืชลดลง เพราะเนื้อเยื่อพืชมีกิจกรรมที่เพิ่มขึ้นของเอนไซม์และสารอินทรีย์ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งรวมถึงการชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์สาเหตุของโรคที่อาจปนเปื้อนมากับผลไม้ตั้งแต่ระยะก่อนการเก็บเกี่ยว เช่น การลดอุณหภูมิของมะม่วงพันธุ์ทอมมี่แอทคินส์ ระยะผลแก่ดิบซึ่งเป็นระยะเก็บเกี่ยวทางการค้าโดยการนำผลที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 25 °C ทั้งที่ผิวผลและในเนื้อผลใกล้เมล็ด จำนวนผล 150 ผล มาเก็บรักษาในห้องเย็นขนาด 3×2×3 เมตร ที่ใช้ความเร็วของลมเย็น (12 °C) อัตรา 2 เมตรต่อวินาที เพื่อให้ผิวผลและเนื้อผลใกล้เมล็ดมีอุณหภูมิลดลงเป็น 20 °C ใช้ระยะเวลาประมาณ 11 และ 35 นาที ตามลำดับ และการลดระดับอุณหภูมิของผลลงเป็น 12 °C ต้องใช้ระยะเวลายาวนานขึ้น (230 และ 360 นาที [3.8 และ 6.0 ชั่วโมง] ตามลำดับ (de Mello Vasconcelos et al., 2019) Li et al. (2019) ศึกษาการลดอุณหภูมิภายในผลมะม่วงพันธุ์ Tainong ระยะผลแก่ดิบในวันที่เก็บเกี่ยวด้วยวิธีการบังคับลมเย็นจัด (0 °C) ภายในอุโมงค์แคบผ่านตะกร้าบรรจุผลไม้ในอัตรา 1 เมตรต่อวินาที สามารถลดอุณหภูมิภายในผลลงเป็น 13 °C ภายในระยะเวลาเพียง 0.5 ชั่วโมง ซึ่งรวดเร็วกว่าวิธีการใช้ลมเย็นที่หมุนเวียนภายในห้องเย็น มะม่วงที่ไม่ผ่านการทำให้เย็นลงก่อนการเก็บรักษาที่ 13 °C สุกเร็วกว่า และเกิดการเน่าเสียมากกว่าผลที่ผ่านการทำให้เย็นลง เนื่องจากเนื้อเยื่อของผลที่ผ่านการทำให้เย็นลงสามารถกำจัดอนุมูลอิสระกลุ่มออกซิเจน (reactive oxygen species) ได้มากขึ้นจากการทำงานของเอนไซม์หลายชนิดและสารอินทรีย์ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น superoxide dismutase, catalase, peroxidase และ glutathione reductase และสารประกอบฟลาโวนอยด์ (Li et al., 2019) ข้อดีประการที่ (2) คือการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็นของห้องเย็นที่ใช้เก็บรักษาผลไม้ในโรงคัดบรรจุ (Brosnan and Sun, 2001; Amwoka et al., 2021) และภายในยานพาหนะที่ใช้ขนส่ง ทั้งนี้ เนื่องจากผลไม้มีระดับอุณหภูมิภายในผลต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับระดับอุณหภูมิภายในผลขณะเก็บเกี่ยวใหม่ๆ จึงทำให้ระดับอุณหภูมิภายในห้องเย็นสม่ำเสมอมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มประสิทธิภาพในด้านนี้ ผู้ปฏิบัติต้องคำนึงถึงการเลือกใช้ชนิดของบรรจุภัณฑ์ผลไม้ และการจัดเรียงบรรจุภัณฑ์ผลไม้ภายในห้องเย็นต้องมีความสอดคล้องกับทิศทางของลมเย็นด้วย เช่น จำนวนและขนาดของช่องระบายอากาศบนบรรจุภัณฑ์ผลไม้ และการเรียงซ้อนบรรจุภัณฑ์ผลไม้ระหว่างการเก็บรักษาและการขนส่ง (Lehner and Siegmund, 2020)

หลังจากการทำให้ผลไม้เย็นลงแล้ว ผู้ปฏิบัติควรเก็บรักษาผลิตผลไว้ในห้องเย็นที่มีระดับอุณหภูมิต่ำค่อนข้างคงที่ก่อนการขนส่งผลิตผลไปให้ผู้ประกอบการค้าส่งและค้าปลีกในลำดับต่อไป บรรยากาศในห้องเย็นอาจใช้บรรยากาศแบบปกติ และแบบดัดแปลงหรือควบคุมบรรยากาศ (เช่น การลดปริมาณก๊าซออกซิเจนเป็น 5-10% และ/หรือเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 3-5%) โดยมะม่วงใช้อุณหภูมิสำหรับการเก็บรักษาที่ 12-13 °C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องเย็น 85-95% ซึ่งสามารถเก็บรักษาได้ 2-3 สัปดาห์ (Vithana et al., 2018; Lei Yi et al., 2019; Abu et al., 2020) ข้อดีของการเก็บรักษาในห้องเย็นนอกจากวัตถุประสงค์ด้านการชะลอการเสื่อมคุณภาพของผลไม้แล้ว ยังช่วยเพิ่มราคาของผลไม้ให้แก่ผู้ประกอบการ ขยายระยะเวลาของการจำหน่ายผลิตผลให้แก่ลูกค้าได้ยาวนานขึ้น และเกษตรกรสามารถเก็บมะม่วงไว้เพื่อรอจำหน่ายได้ยาวนานขึ้นในแต่ละฤดูการผลิต โดยการใช้ระบบ evaporative cooling และระบบทำความเย็นด้วยน้ำร่วมกับซิลิกาเจล และพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งผู้ประกอบการควรตรวจสอบความคงที่ของระดับอุณหภูมิในห้องเย็น การเกิดโรคเน่าเสียของผลไม้โดยเชื้อจุลินทรีย์ และอาการสะท้านหนาวที่อาจเกิดขึ้นกับผลิตผลเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานานขึ้น เช่นที่พบกับมะม่วงพันธุ์เคนซิงตันไพรด์ ที่ผ่านการเก็บรักษาที่ 5 °C เป็นเวลา 24 วัน ส่วนการเก็บรักษามะม่วงพันธุ์นี้ในระยะเวลาสั้นลง (12 วัน) มะม่วงไม่ปรากฏอาการดังกล่าว (Vithana et al., 2018) อย่างไรก็ตาม หากผู้ประกอบการไม่ต้องการเก็บรักษาผลิตผลในห้องเย็น สามารถขนส่งผลิตผลทันทีด้วยยานพาหนะชนิดที่มีห้องเย็นไปยังร้านค้าในแหล่งต่างๆ ได้ ซึ่งสิ่งที่ผู้ประกอบการต้องคำนึงถึงคือ

สุขอนามัยที่ดีภายในยานพาหนะดังกล่าว การไร้การรั่วไหลของอากาศเย็นภายในยานพาหนะสู่บรรยากาศภายนอก การขนส่งด้วยรถห้องเย็นมีต้นทุนสูง ผู้ประกอบการส่งออก/เกษตรกรไทยจึงขนส่งมะม่วงที่ต้องนำมาอบไอน้ำก่อนการส่งออกไปยังประเทศญี่ปุ่นด้วยยานพาหนะที่ไม่ได้ติดตั้งห้องเย็น และขนส่งในช่วงเวลาเย็นถึงกลางคืน ทั้งนี้ เพื่อหลีกเลี่ยงสภาพอากาศร้อนในช่วงเวลากลางวัน (อุบล และคณะ, 2564)

การปฏิบัติตั้งแต่การทำให้ผลไม้เย็นลงในระยะหลังการเก็บเกี่ยว การเก็บรักษาบรรจุภัณฑ์ผลไม้ในห้องเย็น และการขนส่งด้วยยานพาหนะชนิดที่มีห้องเย็น เป็นการจัดการเพียงส่วนหนึ่งในห่วงโซ่ความเย็น (cold chain) ที่ใช้จัดการกับผลิตผลสำหรับบริโภคสด โดยจัดเป็นระบบโลจิสติกส์ที่ช่วยรักษาคุณภาพที่ดีของผลิตผลสดทางการเกษตรหลายชนิด ตั้งแต่การจัดการกับผลิตผลที่แหล่งปลูกจนกระทั่งการขนย้ายผลิตผลมาสู่ตลาด (Amwoka et al., 2021) จุดศูนย์กลางของห่วงโซ่ความเย็นคือ แหล่งที่ผู้บริโภคเลือกซื้อผลิตผล ซึ่งหมายถึงชั้นวางจำหน่ายในมินิมาร์ทและซุปเปอร์มาร์เก็ตของห้างสรรพสินค้า (ที่เปิดแอร์ระดับ 20-25 °C) และตู้เย็น (5-10 °C) ในห้างสรรพสินค้า ซึ่งมีทั้งตู้เย็นแบบเปิดโล่งและแบบมีประตูปิดเปิด โดยทั่วไป ผลิตผลมักมีป้ายติดบอกวันที่ผลิตผลหมดอายุ และระยะเวลาที่ควรบริโภคก่อนผลิตผลหมดอายุด้วยเสมอ ทั้งนี้ เพราะผู้บริโภคอาจไม่ได้รับประทานผลิตผลนั้นในวันที่ซื้อ แต่มักจะเก็บผลิตผลส่วนหนึ่งไว้ในตู้เย็นในครัวเรือนของตน ดังนั้นความสำเร็จของการใช้ห่วงโซ่ความเย็นพิจารณาได้จากปริมาณการสูญเสียผลิตผลสดที่ลดลงในระยะหลังการเก็บเกี่ยว ตั้งแต่การจัดการผลิตผลที่แหล่งปลูกถึงการขนส่งผลิตผลมายังร้านค้าปลีก และจากการที่ผู้บริโภคใช้ประโยชน์จากผลิตผลที่เก็บในตู้เย็นภายในบ้านเรือนได้มากขึ้น (Han et al., 2021)

2. การใช้ความร้อน

การใช้ความร้อนกับมะม่วงเป็นวิธีการปฏิบัติที่ไม่มีสารเคมีตกค้างกับผลิตผล และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ความร้อนที่มีการประยุกต์ใช้เพื่อป้องกันหรือกำจัดแมลงศัตรูพืชเพื่อการส่งออกเรียกว่า heat disinfestation (quarantine) treatment และใช้กับผลไม้โดยทั่วไปมี 3 รูปแบบคือ ไอร้อน น้ำร้อน และไอน้ำร้อน โดยมีระดับอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 45-55 °C โดยใช้ระยะเวลาการให้ความร้อนแก่ผลมะม่วงแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับพันธุ์ (Johnson et al., 1997; Collin et al., 2007; Japan Fumigation Technology Association, 2009; Malik et al., 2018) รูปแบบความร้อนที่ใช้ ความร้อนที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์นี้ต้องมีประสิทธิภาพในการกำจัดแมลงศัตรูในทางสถิติได้ 99.9968% (Probit 9) โดยหมายถึงความร้อนสามารถทำลายแมลงศัตรูได้มากที่สุดและอาจมีรอดชีวิตได้แต่ไม่เกิน 3 ตัว จากจำนวนทั้งหมด 100,000 ตัว (Follet and Neven, 2006) อย่างไรก็ตามประเทศญี่ปุ่นกำหนดให้ใช้ Probit 9 ในความหมายที่แตกต่างไปเล็กน้อยคือ ความร้อนสามารถทำลายแมลงศัตรูจำนวน 30,000 ตัว ได้ทั้งหมดโดยไม่มีแมลงศัตรูรอดชีวิต (Paull and Armstrong, 1994) การสัมผัสกับความร้อนที่ผ่านเข้าสู่ผลไม้ช่วยทำลายไข่ และตัวอ่อนของแมลงศัตรูพืชที่อาศัยอยู่ภายใน ส่วนการควบคุมโรคพืชโดยความร้อน เกิดจากความร้อนยับยั้งการงอกของสปอร์ การชักนำให้เนื้อเยื่อพืชสร้างกลไกการป้องกันตนเองขึ้นมา เช่น สารอินทรีย์ประเภท phytoalexin และโปรตีนบางชนิดที่เนื้อเยื่อพืชสังเคราะห์ขึ้นหลังจากได้รับความร้อน ได้แก่ heat shock proteins และ pathogenesis-responsive proteins และความร้อนช่วยหลอมสารคิวติน (cutin) บริเวณผิวผลและปิดเคลือบช่องเปิดตามธรรมชาติบนผิวผล เช่น ปากใบ เลนติเซล รอยแตก และบาดแผล จึงลดการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ลงได้ อย่างไรก็ตาม ความร้อนมีผลต่อความเสียหายของผลมะม่วงบางพันธุ์ เช่น การสุกของผลที่รวดเร็วกว่าผลที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนสีผิวผล ความแน่นเนื้อที่ลดลงของเนื้อผล และการมีอัตราการหายใจที่สูงขึ้น จากผลงานวิจัยในระดับชีวโมเลกุลของผลมะม่วงพบว่าความร้อนสามารถกระตุ้นให้เนื้อเยื่อพืชมีการแสดงออกของยีนและการสังเคราะห์เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการอ่อนนุ่มของเนื้อผล เช่น polygalacturonase beta–galacturonase และ ramnogalaturonate และ

มีการสลายตัวของโมเลกุลของแป้งและน้ำตาล จึงทำให้เอนไซม์เหล่านี้มีกิจกรรมเพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาหลังจากที่ผลไม้ได้รับความร้อน (Yimyong et al., 2011; Dautt-Castro et al., 2018)

ความร้อนที่ผู้ประกอบการส่งออกใช้กับผลมะม่วงสดมี 3 รูปแบบคือ (1) ไอน้ำร้อนมีอุณหภูมิ 46-48 °C ตามข้อกำหนดในการนำเข้ามะม่วงสู่ประเทศญี่ปุ่น เกาหลีใต้ และนิวซีแลนด์ เพื่อกำจัดแมลงวันผลไม้ ซึ่งมีการดำเนินการในประเทศไทย ฟิลิปปินส์ ไต้หวัน อินเดีย ออสเตรเลีย และรัฐฮาวาย (ประเทศสหรัฐอเมริกา) (2) น้ำร้อนที่มีอุณหภูมิระหว่าง 45-55 °C นิยมปฏิบัติเพื่อชะลอการเกิดโรคและกำจัดแมลงศัตรูพืชกับมะม่วงในเชิงพาณิชย์ในประเทศฟิลิปปินส์ (Pasilan et al., 2020) อินเดีย (Agricultural and Processed Food Products Export Development Authority [APEDA], 2007) ปากีสถาน (Hasan et al., 2020) เม็กซิโก บราซิล เอกวาดอร์ และเปรู (Mendoza Orbegoso et al., 2017) อีกวิธีการหนึ่งคือ การขัดล้างผลด้วยน้ำร้อน เป็นวิธีการที่ใช้ในสายงานการคัดบรรจุมะม่วงและผลิตผลพืชสวนอีกหลายชนิดในเชิงพาณิชย์ของผู้ประกอบการค้าทั้งภายในประเทศอิสราเอลและส่งออกต่างประเทศ วิธีการนี้ผลมะม่วงผ่านการล้างด้วยน้ำประปาที่มีอุณหภูมิปกติก่อนผ่านการพ่นด้วยละอองน้ำร้อน (48-63 °C) เมื่อผลเคลื่อนผ่านบนลูกกลิ้งลำเลียงที่เป็นแปรงขนอ่อน ซึ่งมีน้ำร้อนบรรจุอยู่ภายในภาชนะด้านล่าง ใกล้กับปั๊มน้ำไฟฟ้าที่นำน้ำขึ้นมาใช้ซ้ำแบบหมุนเวียน เป็นเวลาสั้น (10-25 วินาที) ก่อนการทำให้ผิวผลแห้งหมาดด้วยลมร้อนภายในอุโมงเป็นเวลาไม่เกิน 2 นาที ก่อนการบรรจุหีบห่อ (Lurie, 2016) และ (3) ไอร้อนแบบบังคับทิศทางลมและมีอุณหภูมิระหว่าง 47-48 °C นิยมใช้กับมะม่วงเพื่อการส่งออกในรัฐฮาวาย ประเทศนิวคาลีโดเนีย ฟิจิ ทองก้า และเม็กซิโก (Mitcham and Yahia, 2009)

การอบไอน้ำร้อนเป็นการเพิ่มอุณหภูมิภายในผลมะม่วงด้วยการใช้น้ำร้อนหรืออากาศร้อน (50-55 °C) ที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง (>90%) ภายในห้องปิดมิดชิด เมื่อระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง จะเกิดการกลั่นตัวของไอน้ำร้อนที่มากระทบผิวผลมะม่วงที่มีระดับอุณหภูมิต่ำกว่าไอน้ำร้อน ความร้อนจากไอน้ำร้อนถูกส่งผ่านเข้าสู่เนื้อผลจนกระทั่งอุณหภูมิภายในผลเพิ่มขึ้นเป็นระดับที่ต้องการ (46-47 °C) และปล่อยให้อุณหภูมิคงที่ที่ระดับนี้เป็นเวลาช่วงหนึ่ง (10-30 นาที) ก่อนเสร็จสิ้นกระบวนการในห้องอบ ซึ่งใช้ระยะเวลาดำเนินการทั้งสิ้นประมาณ 3-4 ชั่วโมง หลังจากนั้น ผลมะม่วงจึงผ่านการลดอุณหภูมิ การบรรจุหีบห่อ และการตรวจสอบคุณภาพก่อนการขนส่ง การดำเนินงานที่บริษัทของผู้ประกอบการใช้เวลา 2 วัน ตั้งแต่การรับผลิตผลจากเกษตรกรจนกระทั่งการขนส่งบรรจุภัณฑ์มะม่วงถึงท่าอากาศยานหรือท่าเรือ (อุบล และคณะ, 2564; กรมส่งเสริมการเกษตร, 2565)

ในวิธีการจุ่มน้ำร้อน ความร้อนเกิดขึ้นกับมะม่วง 2 ช่วงคือ ความร้อนจากน้ำร้อนถ่ายเทไปสู่ผิวผลมะม่วง ซึ่งเกิดขึ้นรวดเร็ว เพราะน้ำเป็นสื่อความร้อนที่ดีกว่าอากาศ และความร้อนจากผิวผลไม้ถ่ายเทไปสู่เนื้อผลบริเวณติดกับเมล็ด ซึ่งการถ่ายเทความร้อนในช่วงที่สองนี้เกิดขึ้นช้ากว่าช่วงแรก เนื่องจากความร้อนต้องถ่ายเทผ่านเนื้อเยื่อพืชที่ประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ สารละลาย และช่องว่างระหว่างเซลล์ ก่อนจะถึงเนื้อเยื่อบริเวณใกล้เมล็ด ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการจุ่มน้ำร้อนขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้ซึ่งมี 2 ประการคือ

(1) การชะลอการเน่าเสียของผลจากการทำลายของเชื้อจุลินทรีย์สาเหตุของโรคแอนแทรคโนส และขั้วผลเน่า ดำเนินการโดยการจุ่มผลในน้ำร้อนเพียงครั้งเดียว นิยมใช้ระดับความร้อน 48-55 °C เป็นเวลา 1-8 นาที ขึ้นอยู่กับพันธุ์ และความไวของผลมะม่วงต่อการเกิดอาการผิดปกติจากการได้รับความร้อน ซึ่งมะม่วงพันธุ์ที่เกิดอาการดังกล่าวง่ายต้องใช้ระดับความร้อนที่ต่ำลง (48-50 °C) เช่น พันธุ์เออร์วิน และซีลล์ การปฏิบัติด้านการควบคุมโรคของผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ของสหกรณ์ชมรมชาวสวนมะม่วงจังหวัดฉะเชิงเทรา จำกัด ใช้วิธีการแช่ผลในน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิ 50-55 °C เป็นเวลา 5 นาที ก่อนลำเลียงผลมะม่วงผ่านน้ำเย็น (10°C) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้น นำผลมะม่วงจุ่มสารละลายโพรคลอราส ความเข้มข้น 250 ppm เป็นเวลา 3 นาที แล้วเก็บรักษาในห้องเย็นเพื่อรอการจำหน่ายต่อไป (กรกัญญา, 2554) Pasilan et al. (2020) พบว่าวิธีการจุ่มผลมะม่วงพันธุ์คาราบาวใน

น้ำร้อนระดับอุณหภูมิสูงขึ้น (59-60 °C นาน 35 วินาที และไม่ลดอุณหภูมิ) ให้ผลลัพธ์ที่ดีเท่ากับวิธีทางการค้า (52-55 °C นาน 10 นาที แล้วลดอุณหภูมิด้วยน้ำเย็นอีก 10 นาที) ในการควบคุมโรคขั้วผลเน่า และแอนแทรคโนสของมะม่วงพันธุ์คาราบาวในประเทศฟิลิปปินส์ นอกจากนี้วิธีการจุ่มผลในน้ำร้อนจำนวน 2 ครั้งต่อเนื่องกัน โดยในครั้งแรกใช้ระดับอุณหภูมิต่ำกว่าและใช้ระยะเวลาการจุ่มผลนานกว่า เช่น 52 °C เป็นเวลา 15 นาที ตามด้วย 52-56 °C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เนื้อเยื่อพืชค่อยๆ ปรับสภาพต่อความร้อน ซึ่งการปฏิบัติทั้งสองวิธีการมักใช้สารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคผสมในน้ำร้อนที่ใช้จุ่มผล เช่น thiabendazole prochloraz และ carbendazim ความเข้มข้น 100-500 ppm (APEDA, 2007)

(2) การป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชภายในผลมะม่วงสำหรับการส่งออกต่างประเทศ หรือระหว่างรัฐภายในประเทศ โดยระดับความร้อนที่ใช้อยู่ระหว่าง 45-48 °C เป็นเวลา 20-110 นาที ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของผู้นำเข้ามะม่วงแต่ละประเทศ ประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งเป็นผู้นำเข้ามะม่วงจากหลายประเทศในทวีปอเมริกากลางและใต้กำหนดให้การจุ่มน้ำร้อนเป็นวิธีปฏิบัติเพื่อการกักกันแมลงวันผลไม้ (Quarantine Treatment; QT) โดยต้องทำให้อุณหภูมิภายในผลมะม่วงเพิ่มขึ้นไม่ต่ำกว่า 43 °C (70 °F) จากการใช้น้ำร้อนอุณหภูมิ 46.1-46.5 °C ขึ้นอยู่กับพันธุ์ รูปทรง และน้ำหนักของผล เช่น ผลมะม่วงจากประเทศเม็กซิโกที่มีรูปทรงแบนและยาวรี น้ำหนักผลไม่เกิน 400 กรัม จุ่มผลในน้ำร้อน 46.1-46.5 °C เป็นเวลา 65 นาที ถ้าผลมีน้ำหนักมากขึ้น (401-570 กรัม) ต้องใช้ระยะเวลาในการจุ่มน้ำร้อน 75 นาที ส่วนผลมะม่วงทรงผลกลมจากประเทศคอสตาริกา น้ำหนักผลไม่เกิน 500 กรัม จุ่มผลในน้ำร้อน 46.1-46.5 °C เป็นเวลา 75 นาที ถ้าผลมีน้ำหนักมากขึ้น (501-700 กรัม) ต้องใช้ระยะเวลาในการจุ่มน้ำร้อน 90 นาที (Mitcham and Yahia, 2009) ส่วนคำแนะนำด้านการจุ่มน้ำร้อนเพื่อการป้องกันกำจัดแมลงวันผลไม้ (ระยะไข่ และหนอนวัยที่ 1) ของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ในประเทศไทยก่อนการส่งออก โดยกรมวิชาการเกษตร (2565) เป็นการใช้น้ำร้อนอุณหภูมิ 46 °C แช่ผลจนกระทั่งอุณหภูมิภายในผลสูงขึ้นถึง 46 °C เป็นเวลา 10 นาที ซึ่งดำเนินการในอ่างน้ำร้อนขนาดความจุมะม่วง 350 กิโลกรัม

การอบไอร้อนเป็นการเพิ่มอุณหภูมิภายในผลมะม่วงด้วยการใช้ไอร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 50 °C ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (<50%) และบังคับทิศทางของไอร้อนไปยังผิวผลไม้ภายในห้องปิดมิดชิด วิธีการนี้เป็นเพิ่มระดับของอุณหภูมิภายในผลอย่างช้าๆ (47-48 °C) และปล่อยให้อุณหภูมิคงที่ที่ระดับนี้เป็นเวลาช่วงหนึ่ง (2-20 นาที) ซึ่งใช้ระยะเวลาดำเนินการทั้งสิ้นประมาณ 1-4 ชั่วโมง หลังจากนั้น ผลมะม่วงจึงผ่านการลดอุณหภูมิก่อนการบรรจุหีบห่อ โดยไม่เกิดการกลั่นตัวของไอน้ำบนผิวผลไม้เหมือนวิธีการอบไอน้ำร้อนที่ใช้ไอร้อนที่มีความชื้นสูง เนื้อผลมะม่วงที่ผ่านการอบไอร้อนมีระดับอุณหภูมิที่สูงกว่าผิวผล ส่วนผิวผลมีลักษณะแห้งและมีระดับอุณหภูมิต่ำกว่าผลที่ผ่านวิธีการอบไอน้ำร้อน เนื่องจากหลักการทำให้เย็นด้วยวิธี evaporative cooling จากไอร้อนที่สัมผัสกับผิวผลที่เย็นกว่า ปัจจุบันใช้วิธีการอบไอร้อนแบบบังคับทิศทางเป็นวิธีปฏิบัติเพื่อการกักกันแมลงศัตรูพืชกับผลมะม่วงจากประเทศเม็กซิโก และรัฐฮาวายที่ส่งเข้ามาจำหน่ายในประเทศสหรัฐอเมริกา และมะม่วงจากประเทศในมหาสมุทรแปซิฟิก (ฟิจิ ทองก้า และนิวคาลีโดเนีย) ที่ส่งออกไปยังประเทศนิวซีแลนด์ และออสเตรเลีย (JAFTA, 2009; Mitcham and Yahia, 2009)

3. การฉายรังสี

การฉายรังสีผักและผลไม้สดมีวัตถุประสงค์หลักในการกำจัดแมลงศัตรูพืช และแมลงชนิดอื่นที่ไม่ใช่ศัตรูพืช (เช่น หอยทาก ผีเสื้อกลางคืน ด้วง เพลี้ยหอย และไร) ที่ปนเปื้อนอยู่กับผลิตผลดังกล่าว ไม่ให้แพร่ระบาดและทำลายพืชพรรณในประเทศผู้นำเข้าผลิตผลดังกล่าว จึงเรียกการฉายรังสีว่า phytosanitary irradiation ส่วนการฉายรังสีกับผลิตภัณฑ์อาหารชนิดต่างๆ ทั้งที่เป็นอาหารสดและอาหารแห้ง เช่น พืชผัก เนื้อสัตว์ อาหารทะเล และสมุนไพรมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการเน่าเสีย การเจริญเติบโตของยอดอ่อน การงอกของพืชผักประเภทหัวหรือรากสะสมอาหาร การปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์

สาเหตุของโรคพืชและโรคทางเดินอาหาร และรักษาคุณภาพที่ดีของผลิตภัณฑ์อาหารเหล่านั้น การใช้สัญลักษณ์ Radura บนบรรจุภัณฑ์ของผลิตผลแสดงว่าผลิตผลดังกล่าวผ่านการฉายรังสีแล้ว (Hallman, 2017; Ihsanullah and Rashid, 2017; Haynes and Domniak, 2018; Robert and Follett, 2018) รังสีไม่ทำให้ผลิตผลทางการเกษตรหรือผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการฉายรังสีเกิดความร้อน จึงไม่จำเป็นต้องมีการลดอุณหภูมิให้แก่ผลิตผล รังสีที่ใช้สำหรับผลิตผลทางการเกษตรและอาหารเป็นรังสีชนิดที่มีการแตกตัวของไอออน (ionization radiation) มี 3 ชนิดคือ (1) รังสีแกมมา ซึ่งเป็นโปรตอนพลังงานสูงและมีการกระจายออกจากแหล่งกำเนิดทุกทิศทาง ได้จากสารกัมมันตรังสีคือโคบอลต์-60 (^{60}Co) และซีเซียม-137 (^{137}Cs) (2) รังสีเอ็กซ์ผลิตจากเครื่องเร่งอิเล็กตรอนที่ทำงานด้วยระดับพลังงานไม่เกิน 5 MeV (million electron volt) และ (3) อิเล็กตรอนความเร็วสูงจากเครื่องเร่งอิเล็กตรอนทำงานด้วยระดับพลังงานไม่เกิน 10 MeV พลังงานจากรังสีทั้งสามชนิดก่อให้เกิดอนุมูลอิสระจำนวนมากในเนื้อเยื่อพืช แมลงศัตรูพืช และเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งรังสีจะทำลายพันธะเคมีของโมเลกุลของสารอินทรีย์ในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะโมเลกุลของสารพันธุกรรม (หรือดีเอ็นเอ) ดังนั้นสิ่งมีชีวิตเหล่านั้นจึงไม่สามารถสืบพันธุ์หรือขยายพันธุ์ได้ และไข่แมลงไม่สามารถพัฒนาไปเป็นตัวอ่อนที่สมบูรณ์ได้ (Fellows, 1988)

ในปี 2546 หน่วยงานระหว่างประเทศคือ International Plant Protection Convention (IPPC) กำหนดมาตรฐานในการฉายรังสีผลิตผลสดเพื่อใช้เป็นวิธีการกักกันศัตรูพืช ทดแทนวิธีการรมผลิตผลสดด้วยเมทิลโบรไมด์ ซึ่งยกเลิกการใช้ในประเทศพัฒนาแล้วในปี 2548 และในปี 2558 สำหรับประเทศกำลังพัฒนา ระดับของการฉายรังสีเพื่อกำจัดแมลงศัตรูพืชอยู่ระหว่าง 70-500 Gray (Gy) ซึ่งมะม่วงเป็นผลไม้ที่ทนต่อรังสีระดับสูงประมาณ 600 Gy เมื่อเปรียบเทียบกับผลไม้ชนิดอื่น เช่น มะละกอ มะเขือเทศ กล้วย แอปเปิล ส้ม และสาลี่ การฉายรังสีผลมะม่วงในประเทศเม็กซิโกเพื่อการส่งออกไปประเทศสหรัฐอเมริกาดำเนินการในปี 2552 การฉายรังสีผลมะม่วงและมังคุดเพื่อการกักกันแมลงศัตรูพืชเริ่มในประเทศอินโดนีเซียในปีเดียวกัน การส่งออกมะม่วงที่ผ่านการฉายรังสีในประเทศปากีสถานเริ่มในปี 2554 ต่อมาในปี 2556 และ 2558 ประเทศออสเตรเลียเริ่มส่งออกมะม่วงฉายรังสีไปยังประเทศมาเลเซียและสหรัฐอเมริกาตามลำดับ สาธารณรัฐโดมินิกันส่งออกมะม่วงมายังเมือง Gulfport ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อรับการฉายรังสี ณ โรงงานฉายรังสีแกมมาชื่อ Gateway America ก่อนการกระจายสินค้าเพื่อจำหน่ายภายในประเทศสหรัฐอเมริกาในปี 2559 (Hallman, 2011 และ 2017) การฉายรังสีแกมมามีการใช้กับการส่งออกผลลำไย มังคุด มะม่วง เงาะ ลิ้นจี่ แก้วมังกร และสับปะรดของประเทศไทยไปยังประเทศสหรัฐอเมริกา โดยผ่านการฉายรังสีแกมมาด้วยเครื่องฉายรังสีแกมมา (Carrier type รุ่น JS 8900 IR-155 บริษัท Nordion International Inc. ประเทศแคนาดา ในระดับ 200-700 Gy) ภายใต้การควบคุมดูแลของศูนย์ฉายรังสี (Thai Irradiation Center; TIC) ซึ่งเป็นหน่วยงานหนึ่งของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์กรมหาชน) (สทน.) ตั้งอยู่ในเทคโนธานี ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี ส่วนที่จังหวัดนครนายกเป็นเครื่องฉายรังสีแกมมาที่อยู่ภายใต้การควบคุมดูแลของศูนย์ฉายรังสีอัญมณีของสถาบันเดียวกัน TIC มีเครื่องฉายอิเล็กตรอนให้พลังงานอิเล็กตรอนไม่เกิน 10 MeV และรังสีเอ็กซ์พลังงาน 5 MeV ที่ให้บริการฉายรังสีผลิตผลทางการเกษตร ผลิตภัณฑ์อาหาร และเครื่องมือทางการแพทย์ ตั้งแต่ปี 2563 ภาคเอกชนที่ให้บริการด้านการฉายรังสีคือ บริษัท Synergy Health จำกัด จังหวัดชลบุรี (Hénon, 2014; Hallman et al., 2016) ระดับของการฉายรังสีเพื่อกำจัดแมลงวันผลไม้ในวงศ์ *Tephritidae* ในประเทศไทยคือ 400 Gy (ผ่องเพ็ญและอภิรดี, 2556; Hallman et al., 2016)

รายละเอียดด้านการปฏิบัติต่อผลมะม่วงของประเทศไทยก่อนการฉายรังสีมีการเผยแพร่โดยผ่องเพ็ญและอภิรดี (2556) อย่างไรก็ตาม ผู้เขียนได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลด้านการเตรียมผลมะม่วงก่อนการฉายรังสีจากอภิชัย เจนจบ (สอบถามส่วนตัว, 2563; เจ้าหน้าที่วิจัยที่ปฏิบัติงานร่วมกับผ่องเพ็ญ จิตอารีย์รัตน์ และอภิรดี อุทัยรัตนกิจ) ในวิธีปฏิบัติดังกล่าวเป็นการนำผลมะม่วงจากสวนมะม่วงทางการค้าที่เกษตรกรเจ้าของสวนได้รับ

การรับรองด้านการปฏิบัติทางการเกษตรที่ดีและเหมาะสม (หรือ GAP) มาตัดขั้วผลให้สั้นประมาณ 0.5 เซนติเมตร หลังจากปล่อยให้น้ำยางจากขั้วผลหยุดแล้ว (2-3 ชั่วโมงหลังจากการตัดขั้วผล) จึงนำผลมาล้างด้วยน้ำประปา และจุ่มผลในสารละลายป้องกันกำจัดเชื้อราโปรคลอราส ความเข้มข้น 500 ppm แล้วผึ่งให้ผิวผลแห้งหมาดน้ำ ก่อนการบรรจุผลลงในกล่องกระดาษลูกฟูกขนาด 6 กิโลกรัมต่อกล่อง และเก็บรักษาบรรจุภัณฑ์มะม่วงในห้องเย็น 13 °C และขนย้ายขึ้นยานพาหนะเพื่อเดินทางไปรับการฉายรังสี (400 Gy) ที่จังหวัดนครนายก นอกจากนี้ การเตรียมผลมะม่วงจากแหล่งปลูกในประเทศอินเดียก่อนการฉายรังสี พบว่ามีการเผยแพร่ในคู่มือด้านการปฏิบัติต่อผลมะม่วงของประเทศอินเดียเพื่อการส่งออกไปยังประเทศสหรัฐอเมริกา (APEDA, 2007) ซึ่งกล่าวถึงการเตรียมและคัดบรรจุผลไม้ก่อนการฉายรังสี การสุ่มตรวจแมลงศัตรูพืชในบรรจุภัณฑ์ทั้งก่อนและหลังจากการฉายรังสี การติดฉลากบนบรรจุภัณฑ์ และการขนส่งมายังสนามบินเพื่อการส่งออกไปยังประเทศสหรัฐอเมริกา

4. การเก็บรักษาแบบดัดแปลงบรรยากาศและการควบคุมบรรยากาศ

หลักการของวิธีการเก็บรักษาแบบดัดแปลงบรรยากาศและการควบคุมบรรยากาศคือ การแทนที่อากาศที่อยู่รอบผลิตผลในบรรจุภัณฑ์หรือห้องเก็บรักษาด้วยส่วนผสมของก๊าซออกซิเจน (O_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในสัดส่วนที่ต่างจากบรรยากาศปกติ (20.8 และ 0.035% ตามลำดับ) โดยลดปริมาณก๊าซ O_2 และเพิ่มปริมาณก๊าซ CO_2 โดยทั่วไป ปริมาณก๊าซทั้งสองชนิดในสภาพดัดแปลงและควบคุมบรรยากาศที่ใช้กับมะม่วงคือ 3-5 และ 5-10% ตามลำดับ (Badillo and Segura-Ponce, 2020; Follett and Neven, 2020) ซึ่งเป็นปริมาณก๊าซที่ใช้ในขณะเก็บรักษาและขนส่งมะม่วง (Singla et al., 2022) การเก็บรักษาผลไม้ประเภท climacteric ด้วยวิธีการนี้ช่วยชะลอการสุกและการวายของผลไม้ โดยทำให้อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนลดลง เพราะกระบวนการหายใจระดับเซลล์ของพืชที่เกิดขึ้นภายในไมโตครอนเดรียต้องใช้ก๊าซ O_2 และปริมาณก๊าซ O_2 ที่ลดลง และปริมาณก๊าซ CO_2 ที่เพิ่มขึ้นสามารถยับยั้งการสังเคราะห์เอทิลีนในขั้นตอนการเปลี่ยน 1-aminocyclopropane (ACC) เป็น เอทิลีนที่เร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ ACC oxidase และนิยมใช้วิธีการเก็บรักษานี้ร่วมกับสภาพอุณหภูมิต่ำ (5-10 °C) หรือที่ระดับอุณหภูมิต่ำที่เหมาะสมกับมะม่วง (12-13 °C หรือระหว่าง 10-15 °C ขึ้นอยู่กับพันธุ์) (Phakdee and Chaiprasart, 2020) อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ช่วยยืดระยะเวลาในการขนส่ง การเก็บรักษา และการวางจำหน่าย โดยผลไม้มีคุณภาพอยู่ในระดับเดิม ทั้งนี้ ต้องใช้ร่วมกับสายโซ่ของความเย็นที่ต่อเนื่องด้วยเสมอ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดสภาพการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) ของผลไม้ภายในบรรจุภัณฑ์ หากสายโซ่ของความเย็นไม่ต่อเนื่อง ด้วยเหตุที่สภาพอากาศระหว่างการขนส่ง การเก็บรักษา และการวางจำหน่ายมีอุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้อัตราการหายใจของผลไม้เพิ่มขึ้น ก๊าซ O_2 ในเนื้อเยื่อผลไม้จึงถูกใช้ในกระบวนการดังกล่าว และมีปริมาณลดต่ำลงมาก (น้อยกว่า 2%) และมี CO_2 สะสมเพิ่มขึ้น (มากกว่า 10%) ผลไม้จึงมีการหายใจแบบไม่ใช้ O_2 ภายในไซโตพลาสซึมของเซลล์ จึงเป็นสาเหตุให้มีการสะสมของอะเซตัลดีไฮด์และเอทิลแอลกอฮอล์ (เอทานอล) ซึ่งมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลไม้ด้านกลิ่นและรสชาติที่ผิดปกติ แอลกอฮอล์ชนิดที่พบว่าสะสมอยู่มากในเนื้อเยื่อผลมะม่วงพันธุ์ Shelly ที่เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ O_2 หลังจากการเก็บรักษาในสภาพควบคุมบรรยากาศที่มีก๊าซ O_2 ในปริมาณ 1% ที่ 13 °C เป็นเวลา 12 วัน ได้แก่ เอทานอล บิวทานอล 3-methyl-1-butanol และ propylene glycol (Ntsoane et al., 2019b)

บรรจุภัณฑ์ผลไม้แบบดัดแปลงบรรยากาศ (modified atmosphere packaging; MAP) ส่วนใหญ่คือ ถุงพลาสติกปิดผนึก และถาดที่หุ้มด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกโดยรอบ การบรรจุผลไม้ด้วยวิธีการนี้มักใช้ระยะเวลาในการเกิดสมดุลของสภาพดัดแปลงบรรยากาศที่เกิดจากการหายใจของผลไม้ภายในบรรจุภัณฑ์ในระยะเวลาช่วงหนึ่ง (เรียกว่า passive MAP) ซึ่งสภาพดัดแปลงบรรยากาศดังกล่าวนี้เกิดขึ้นช้ากว่าการเติมก๊าซ O_2 CO_2 และไนโตรเจนเข้าสู่บรรจุภัณฑ์โดยตรง หลังจาก

ดูดอากาศภายในบรรจุภัณฑ์ออกบางส่วน และอาจใช้ร่วมกับการแนบวัสดุที่มีคุณสมบัติดูดซับหรือปลดปล่อยก๊าซที่ต้องการเข้าไปในบรรจุภัณฑ์ผลไม้ด้วย (เรียกว่าบรรจุภัณฑ์ชนิดแอคทีฟ [active packaging]) (Ovando-Martínez et al., 2016) ปริมาณก๊าซ O_2 และ CO_2 ที่แนะนำให้ใช้กับบรรจุภัณฑ์มะม่วงแบบ MAP คือ 3-7 และ 5-8% ตามลำดับ (Singla et al., 2022) นอกจากนี้ การเคลือบผิวผลไม้ด้วยสารเคลือบผิวความเข้มข้นที่เหมาะสมทำให้เกิดสภาพดัดแปลงบรรยากาศกับผลไม้ได้ ก่อนการบรรจุผลในบรรจุภัณฑ์แบบ MAP หรือแบบปกติ ส่วนการเก็บรักษาผลไม้แบบควบคุมบรรยากาศต้องใช้ห้องแบบถาวร ตู้คอนเทนเนอร์ปรับอากาศ และเต้นท์ที่มีผนังและประตูที่ปิดมิดชิดไร้การรั่วซึมของก๊าซระหว่างภายในและภายนอกห้อง เพราะต้องควบคุมให้ก๊าซ O_2 และ CO_2 มีปริมาณที่คงที่ตามที่ตั้งค่าไว้ วิธีการนี้เหมาะกับการขนส่งผลไม้ในระยะทางไกลโดยเฉพาะทางเรือ เช่น การใช้ตู้คอนเทนเนอร์ควบคุมบรรยากาศและปรับอากาศได้ในการขนส่งผลแอปเปิล สาลี่ อะโวกาโด มะม่วง กล้วยหอม กีวีฟรุท พลัม สตรอเบอรี เมลอน มะเดื่อ และเชอรี

วิธีการเก็บรักษาแบบควบคุมบรรยากาศแบบดั้งเดิมนั้นเป็นการกำหนดให้มีปริมาณของก๊าซ O_2 ต่ำลงตั้งแต่วันแรกของการเก็บรักษา ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่ทำให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ O_2 กับผลิตผลนั้นๆ เรียกวิธีการนี้ว่า conventional หรือ static controlled atmosphere (SCA) อย่างไรก็ตาม หลังจากการเก็บรักษาผลิตผลเป็นระยะเวลาช่วงหนึ่ง ปริมาณของก๊าซ O_2 ในห้องเก็บรักษามักมีค่าลดลงจนถึงระดับที่เนื้อเยื่อของผลิตผลเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ O_2 ได้ ซึ่งสภาพนี้เป็นการที่เนื้อเยื่อของผลิตผลเปลี่ยนสารไพรูเวตที่ได้จากการหายใจในกระบวนการไกลโคไลซิสที่ เกิดขึ้นภายในไซโตพลาสซึมของเซลล์ ไปเป็นแอลกอฮอล์ และ/หรือกรดแลคติก เมื่อเกิดสภาพนี้เป็นเวลานานขึ้นจะทำให้ผลไม้มีกลิ่นและรสชาติที่ผิดปกติ เนื่องจากการสะสมของอะเซตัลดีไฮด์ ที่เกิดจากการทำงานของเอนไซม์ไพรูเวตดีคาร์บอกซิเลส หลังจากนั้น สารนี้จึงเปลี่ยนไปเป็นเอทานอลซึ่งเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์แอลกอฮอล์ดีไฮโดรจีเนส ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้เอทานอลที่เกิดขึ้นในสภาพดังกล่าวเป็นดัชนีทางชีววิทยา (biomarker) เพื่อแสดงว่าเนื้อเยื่อของผลิตผลมีระดับก๊าซ O_2 ลดลงระหว่างการเก็บรักษาและอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนแล้ว (Bender et al., 2022)

เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียคุณภาพด้านกลิ่น และรสชาติของผลมะม่วง รวมทั้งอาการผิดปกติทางสรีรวิทยาซึ่งเป็นผลมาจากการหายใจแบบไม่ใช้ O_2 ระหว่างการเก็บรักษาผลไม้ในสภาพ SCA นักวิจัยจึงประยุกต์ใช้วิธี dynamic controlled atmosphere (DCA) โดยการปรับปริมาณก๊าซ O_2 ให้สอดคล้องกับกิจกรรมทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อของผลไม้ที่เก็บรักษา (เช่น การหายใจระดับเซลล์ และการสังเคราะห์เอทิลีนและสารอินทรีย์อื่นๆ) ซึ่งใช้เครื่องมือตรวจวัดปริมาณก๊าซ O_2 ต่ำที่สุดที่ผลิตผลทนทานได้ และเป็นระดับที่สูงกว่าปริมาณที่จะเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ O_2 ในเนื้อเยื่อของผลไม้ได้ตลอดระยะเวลาของการเก็บรักษา (Mditshwa et al., 2018) เครื่องมือหรือข้อมูลตัวเลขที่ใช้ ได้แก่ (1) การเปลี่ยนแปลงของค่า chlorophyll fluorescence (CF) ที่วัดบนผิวผลไม้ในห้องเก็บรักษา (2) ค่า respiration quotient จากการวัดอัตราการหายใจของผลไม้ และ (3) ปริมาณเอทานอลที่สะสมหลังจากเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ O_2 ซึ่งหลังจากตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของค่าดังกล่าว (ค่าใดค่าหนึ่ง) ปริมาณของก๊าซ O_2 ในห้องเก็บรักษาจะถูกปรับให้มากขึ้นกว่าระดับที่เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน ปัจจุบัน วิธี DCA ได้นำมาใช้ในทางการค้ากับแอปเปิล สาลี่ และอะโวกาโด ส่วนการใช้กับมะม่วงอยู่ในระหว่างการศึกษา Ikwan et al. (2021) พบว่าการเก็บรักษามะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ (จากแหล่งปลูกในประเทศมาเลเซีย) ในสภาพ DCA ซึ่งใช้ก๊าซ O_2 ปริมาณ 2% ร่วมกับก๊าซ CO_2 ปริมาณ 5% ที่ 13 °C ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า CF สูงสุดที่แสดงเป็นเส้นกราฟ เมื่อบรรยากาศภายในห้องเก็บมีปริมาณ O_2 ลดลงจาก 2 เป็น 0.6% ค่านี้วัดทุกๆ ชั่วโมงด้วยตัวจับสัญญาณที่ติดตั้งไว้บนผิวผลของตัวอย่างมะม่วง (Fluorescence Interactive Response Monitor Sensors) หลังจากนั้น จึงปรับเพิ่มปริมาณ O_2 ขึ้นเป็น 0.7% และปรับปริมาณ CO_2 ลงเป็น 1.4% (2 เท่าของปริมาณ O_2 ที่ใช้) ซึ่งเป็นสัดส่วนก๊าซที่ผู้วิจัยพบว่าเหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาด้วยวิธี DCA

กับมะม่วงพันธุ์นี้ เส้นกราฟที่แสดงค่า CF หลังจากการปรับปริมาณ O_2 เพิ่มขึ้น มีลักษณะเป็นเส้นกราฟเรียบในแนวราบและไม่เกิดเส้นกราฟที่มีจุดสูงสุดเกิดขึ้น และด้วยวิธีการนี้ทำให้มะม่วงมีอายุการเก็บรักษายาวนานขึ้นจาก 5 สัปดาห์ (เมื่อใช้วิธี SCA ซึ่งใช้ก๊าซ O_2 และ CO_2 เท่ากับวิธี DCA) เป็น 7 สัปดาห์ ผลมะม่วงมีคุณภาพดีและสุกได้ตามปกติหลังจากย้ายจากห้องเย็น (13 °C) มาที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) และเร่งการสุกของผลด้วยการจุ่มผลในสารละลายเอทิฟอน ความเข้มข้น 200 ppm ซึ่งพบว่าเนื้อผลสุกมีรสชาติเปรี้ยวอมหวาน เพราะผลมีการสะสมปริมาณกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้น (จากอัตราการหายใจที่ลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 7 สัปดาห์ ในสภาพควบคุมบรรยากาศ) ดังนั้น การใช้วิธี DCA กับมะม่วงในเชิงพาณิชย์ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อนำผลการวิจัยมาทดสอบกับมะม่วงพันธุ์ทางการค้า โดยเฉพาะการศึกษาด้านปริมาณก๊าซ O_2 (และ/หรือ CO_2) ที่ควรปรับระดับในระหว่างการเก็บรักษามะม่วงแต่ละพันธุ์เพื่อป้องกันการหายใจแบบไม่ใช้ O_2 ที่มักเป็นสาเหตุของรสชาติและกลิ่นที่ผิดปกติของผลสุกหลังจากการย้ายออกมาจากห้องเย็นเพื่อการจำหน่าย

5. การใช้สารเคมีสังเคราะห์ สารอินทรีย์ และเชื้อปฏิปักษ์

สารเคมีสังเคราะห์ที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการยืดอายุผลมะม่วงในระยะหลังการเก็บเกี่ยวเป็นสารเคมีที่มีคุณสมบัติด้าน (1) การชะลอการสุกของผลไม้ โดยเฉพาะสารเคมีที่มีฤทธิ์ยับยั้งหรือชะลอการทำงานของเอทิลีนและ/หรือชะลออัตราการหายใจของผลไม้ ซึ่งสารเคมีชนิดที่มีอิทธิพลดังกล่าวกับมะม่วง ได้แก่ 1-MCP ไนตริกออกไซด์ (nitric oxide) โพลีเอมีน (polyamines) เมลาโทนิน (melatonin) และสารเคลือบผิวผลไม้ (2) การลดอาการสะท้านหนาวของผลไม้ระหว่างการเก็บรักษาในอุณหภูมิต่ำเป็นเวลานาน สารเคมีในกลุ่มนี้ได้แก่ ไนตริกออกไซด์ เมลาโทนิน เฮกซาแนล (hexanal) กรดซาลิไซลิก (salicylic acid) และกรดออกซาลิก (oxalic acid) และ (3) การลดหรือป้องกันการเกิดโรคเน่าระหว่างการขนส่งหรือการวางจำหน่าย สารเคมีในกลุ่มนี้ได้แก่ สารเคมีควบคุมเชื้อรา (carbendazim prochloraz และ azoxystrobin) และสารเคมีควบคุมเชื้อแบคทีเรีย (chlorine dioxide [ClO_2] และ sodium hypochlorite) ในบทความนี้แสดงรายละเอียดโดยย่อเกี่ยวกับ 1-MCP ไนตริกออกไซด์ เมลาโทนิน เฮกซาแนล และสารเคมีสารอินทรีย์ และเชื้อปฏิปักษ์ที่มีคุณสมบัติป้องกันกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคกับผลิตผล

5.1 1-methylcyclopropene (1-MCP)

1-MCP เป็นสารเคมีสังเคราะห์ที่มีจำหน่ายในทางการค้าหลายชื่อคือ EthylBloc™ และ Smart-Fresh™ ผลิตโดยบริษัท AgroFresh Inc. (Reddy et al., 2017; Depaepe and Van Der Straeten, 2019; Sharma, 2021) เพื่อใช้กับผลกล้วย อะโวกาโด เมลอน พลับ และมะเขือเทศ และชื่อ Harvista เพื่อใช้กับผลิตผลในระยะก่อนการเก็บเกี่ยวในประเทศสหรัฐอเมริกา แคนาดา ออสเตรเลีย นิวซีแลนด์ ชิลี บราซิล และอาร์เจนตินา เพื่อลดการหลุดร่วงของผลอ่อน ชะลอการบริบูรณ์ของผลิตผล และรักษาคุณภาพที่ดีของผลิตผลในระยะหลังการเก็บเกี่ยว (Sharma, 2021) 1-MCP สังเคราะห์มีชุดตัวเลขอ้างอิงเฉพาะหรือ CAS (Chemical Abstracts Service) Number คือ 3100-04-7 อิทธิพลด้านการยับยั้งการทำงานของเอทิลีนของ 1-MCP เกี่ยวข้องกับการยึดเกาะกับตัวจับเอทิลีน (ethylene receptors) บริเวณที่เรียกว่า binding site ของเนื้อเยื่อผลิตผล (Sisler and Serek, 1997; Satekge and Magwaza, 2022) อย่างไรก็ตาม กลไกการทำงานของ 1-MCP ยังเกี่ยวข้องกับ (i) การยับยั้งการสังเคราะห์เอทิลีนโดยชะลอการทำงานของเอนไซม์ ACC synthase และ ACC oxidase (Li et al., 2019) และ (ii) การยับยั้งการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายผนังเซลล์ของพืช รวมทั้งการชะลอการทำงานของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายผนังเซลล์พืช 1-MCP จึงสามารถชะลอการอ่อนนุ่มของเนื้อผลไม้ได้โดยเฉพาะผลไม้ประเภท climacteric (Li et al., 2022)

วิธีการใช้ 1-MCP กับผลมะม่วงมี 2 วิธีคือ การรมผลไม้ด้วยก๊าซ 1-MCP ภายในห้องปิดสนิทหรือในภาชนะปิดผนึก เป็นเวลา 6-24 ชั่วโมง และการแช่ผลหรือพ่นด้วยสารละลาย 1-MCP เป็นเวลา 1-5 นาที (ตารางที่

1) ส่วนการใช้เทคโนโลยีฟองก๊าซ 1-MCP ขนาดไมโคร (1-MCP microbubble technology) มีการทดลองใช้กับกล้วยหอม (ชัยรัตน์, 2561) ส้มโอ (Promkaew et al., 2019) และสาลี่ (Xu et al., 2020) ซึ่งมีข้อดีเพราะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะให้มากขึ้นจากการใช้ฟองก๊าซขนาดไมโคร และสาร 1-MCP มีความคงตัวนานขึ้นและละลายได้มากขึ้นในสารละลายประสิทธิภาพของ 1-MCP ที่มีต่อผลิตผลขึ้นอยู่กับความบริบูรณ์ของผล โดยระยะที่เหมาะสมของผลไม้หลายชนิดที่ใช้ 1-MCP เป็นระยะผลแก่ดิบ หรือมีอัตราการหายใจหรือการผลิตเอทิลีนในระยะเริ่มต้น (pre-climacteric mature fruit) และจากผลการวิจัยกับผลแอปเปิลหลายพันธุ์ สาลี่ และอะโวกาโด ได้มีข้อแนะนำว่าควรปล่อยให้ผลไม้สังเคราะห์และสะสมเอทิลีนภายในเนื้อเยื่อในระดับหนึ่งก่อนการได้รับ 1-MCP (1-3 วัน หลังจากการเก็บเกี่ยว) ทั้งนี้ เพื่อให้ผลิตมีตัวจับเอทิลีนเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้เห็นอิทธิพลของ 1-MCP ชัดเจนขึ้น (Reddy et al., 2017; Lurie, 2007 อ้างโดย Satekge and Magwaza, 2022)

5.2 ไนตริกออกไซด์ (nitric oxide; NO)

ผลิตผลและต้นพืชสามารถสังเคราะห์ NO ได้ตามธรรมชาติจากปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในเซลล์พืชทั้งที่ใช้และไม่ใช้เอนไซม์ในการเร่งปฏิกิริยา แหล่งที่มีการสังเคราะห์ NO ในปริมาณมากพบในส่วนของไมโตคอนเดรีย คลอโรพลาสต์ และเพอร์อคไซโซม (Li et al., 2022; Pols et al., 2022) การสังเคราะห์ NO และอนุมูลอิสระหลายชนิดของผลิตผลเกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษาในสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดความเครียด เช่น สภาพอุณหภูมิต่ำเกินไป สภาพที่มี O_2 ปริมาณน้อยกว่าในบรรยากาศปกติ สภาพการเก็บรักษาแบบดัดแปลงและควบคุมบรรยากาศ และผลิตผลมีเชื้อโรคเข้าทำลาย (Mazzucotelli et al., 2016)

ตารางที่ 1 ผลงานวิจัยด้านการใช้สารเคมีสังเคราะห์ สารอินทรีย์ และเชื้อปฏิปักษ์กับผลมะม่วงพันธุ์ต่างๆ

ชนิดของสารเคมี (รูปแบบ/ความเข้มข้น)	พันธุ์มะม่วง	สภาพการเก็บรักษา	ผลการศึกษาและเอกสารอ้างอิง
1-MCP 1,500 ppb / 5 นาที (สารละลายสำหรับจุ่มผล)	Tommy Atkins (อียิปต์)	8°C 85-90% RH (8 สัปดาห์) ก่อนย้ายมาที่ 20°C (7 วัน)	* รักษาความแน่นเนื้อได้ 33 วัน ซึ่งยาวนานกว่าชุดควบคุม (12 วัน) * ลดอัตราการหายใจตลอดระยะ เวลาการเก็บรักษา * ลดการเน่าเสียได้มากกว่าชุดควบคุม ในระยะเวลา 30 วัน ของการเก็บรักษา (Fayek et al., 2022)
1-MCP / 1 μL L^{-1} รมในกล่องโฟม ปิดผนึก 20 ชั่วโมง ที่ 25°C	Hongyu อายุ 120 วันหลังดอกบาน (จีน)	บรรจุผลในถุงพลาสติก ที่ 15±0.5°C 85-90% RH	* ลดกิจกรรมของเอนไซม์ β-GAL และ PG * ลดการแสดงออกของยีน ACO และ MiERF8 (ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์เอนไซม์ PG) * ผลมีอัตราการหายใจลดลงและน้อยกว่าชุดควบคุม และมีอัตราการหายใจสูงสุดลดลง (Li et al., 2022)
SNP / 0.25 mmol L^{-1} (สารละลายสำหรับจุ่มผล) 10 นาที	Tainong (จีน)	1) ใส่เชื้อโรคแอนแทรคโนส ผลละ 20 μL วางที่ 25°C 90-95% RH 2) ทดสอบการเจริญของเชื้อสาเหตุที่ 25°C ในอาหารวุ้น PDA	* ผลที่ได้รับเชื้อสาเหตุเกิดโรคแอนแทรคโนสน้อยกว่าชุดควบคุม 20-30% ในระยะเวลา 6 วัน ของการเก็บรักษา * การเจริญของเชื้อสาเหตุในจานอาหารวุ้นที่ผสมสารละลาย SNP เกิดขึ้นน้อยกว่าชุดควบคุม 28-32% (พิจารณาจาก % การงอกของสปอร์ และความสั้นของ germ tube (Ren et al., 2020)
Melatonin 0.1 mmol L^{-1}	Keitt ระยะผลแก่ดิบ	5±0.5°C 85-90% RH	* มะม่วงเริ่มเกิดอาการสะท้านหนาวค่อนข้างช้า โดยพบอาการในวันที่ 14 ของการเก็บรักษาที่ 5°C และมีความ

(สารละลายสำหรับจุ่มผล) 30 นาที	(จีน)	(21 วัน) และย้ายมาที่ 25°C อีก 4 วัน	รุนแรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (CI index มีค่า 20 จาก 100%) ในวันที่ 21 ที่ 5°C ส่วนชุดควบคุม เกิดอาการที่รุนแรงมากกว่า (CI index มีค่า 38%) (Kebbeh et al., 2023)
แผ่นวัสดุ (matrix) ขนาด 5×1 ซม. (ที่มีเฮกซาแนล 1 2 และ 3%) บรรจุร่วมกับผลในบรรจุภัณฑ์	Banganapalli ระยะผลแก่ดิบ 70% (อินเดีย)	บรรจุผลในกล่องกระดาษลูกฟูก (6 ผล/กล่อง) ร่วมกับแผ่นวัสดุ 28±2°C (18 วัน)	* มะม่วงชุดควบคุมมีอายุการเก็บรักษา 12 วัน ส่วนผลที่เก็บรักษาร่วมกับแผ่นวัสดุที่ผสมเฮกซาแนล 1-3% ทั้งสองแบบมีอายุการเก็บรักษา 18 วัน โดยเนื้อผลมีวิตามินซีสูญเสียช้าลง และมีปริมาณ TSS เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในระยะเวลา 18 วันของการเก็บรักษา (Jan et al., 2023)
สารละลายเฮกซาแนล ความเข้มข้น 0.02% 3 นาที	Kent ระยะผลแก่ดิบ (ไอโวรีโคท, ฝรั่งเศส)	2 สภาพคือ 29.7°C (7 วัน) และ 13°C (28 วัน) ก่อนย้ายมาที่สภาพห้อง (29.7°C) อีก 7 วัน	* มะม่วงเกิดโรคน้อยกว่าชุดควบคุมทั้งสองสภาพการเก็บรักษา (12 และ 18% ที่ 29.7°C และ 4 และ 16% ที่ 13°C) * ชะลอการสุกของผลมะม่วงที่ 13°C 28 วัน โดยพิจารณาจากเนื้อผลที่มีความแน่นเนื้อมากกว่าชุดควบคุม และจากปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และปริมาณ TSS * มะม่วงที่ 13°C 28 วัน เมื่อสุกในสภาพห้อง ได้รับคะแนนความชอบมากกว่าชุดควบคุม ในด้านสีผิวผลที่สวยงามกว่าและรสชาติที่หวานกว่า (Silué et al., 2022)
อบเชยเทศ / 0.5% (ผลิตภัณฑ์ทางการค้าของไทย) ร่วมกับกัมอะราบิก (10%)	อกร่อง (ไทย)	25°C	การใช้น้ำมันหอมระเหยร่วมกับกัมอะราบิกสามารถยับยั้งการเกิดโรคแอนแทรคโนสของมะม่วงได้ดีกว่าชุดควบคุม 83% หลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 6 วัน ส่วนการใช้สารสกัดหยาบจากเปลือกอบเชยเทศแห้งร่วมกับ กัมอะราบิกลดการเกิดโรคได้น้อยกว่า (55-58%) (พิกุล และนภาพร, 2565)
ต้นและใบหญ้าเนเปีย (*Pennisetum purpureum* Schumach) / 18 mg mL^{-1} ร่วมกับอัลจิเนต 2%	ไม่ระบุพันธุ์	25°C	มะม่วง (ไม่ระบุพันธุ์) เกิดโรคแอนแทรคโนสจากเชื้อ *C. Gloeosporioides* ในระยะเวลาที่ช้ากว่าชุดควบคุม (10 และ 4 วัน ตามลำดับ) หลังจากเก็บรักษาที่ 25°C (Sadau and Chuah, 2022)
แบคทีเรียน้ำเค็ม *Bacillus velezensis* INV FIR31 สารสกัด 400 ppm	Hilaza	28±2°C	ผลมะม่วง (ผ่านการใส่เชื้อก่อโรค *Colletotrichum* 3 ชนิด 10^8 cfu mL^{-1} ปริมาตร 10 µL) เกิดโรคแอนแทรคโนส 8-12% หลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 วัน (Holguín-Sterling et al., 2023)
ยีสต์ *Candida metapsilosis* 4×10^8 cells mL^{-1}	ไม่ระบุพันธุ์ (ไทย)	25°C	ผลมะม่วงที่ผ่านการล้างฆ่าเชื้อด้วย NaOCl ก่อนใส่เชื้อก่อโรค *C. gloeosporioides* 5×10^8 spores mL^{-1}) หลังจากนั้น จึงแช่ผลในน้ำปริมาตร 300 mL ที่ผสม *C. metapsilosis* 4×10^8 cells mL^{-1} เป็นเวลา 40 นาที และเก็บรักษาผลในกล่องพลาสติก เป็นเวลา 14 วัน เกิดโรคแอนแทรคโนสน้อยกว่าผลชุดควบคุม (4.2 และ 17.0% ของพื้นที่ผิวผล) และจากการแช่ผลในระยะเวลา 5 และ 10 นาที พบว่าวิธีการดังกล่าวชะลอการเกิดโรค

	ของมะม่วงไม่แตกต่างกับการแช่ผลในโซเดียมไบคาร์บอเนต (2%) (ลดการเกิดโรคได้ 91-100%) แต่ให้ผลในการควบคุมโรคดีกว่า mancozeb (1 g L^{-1}) (ลดการเกิดโรคได้เพียง 44-53%) 14 วัน ที่ 25°C (Chaisemsaeng et al., 2022)

NO เป็นอนุมูลอิสระกลุ่มไนโตรเจน (reactive nitrogen species; RNS) ที่อยู่ในรูปโมเลกุลของก๊าซ (Mazzucotelli et al., 2016; Sharma, 2021; Liu et al., 2023) พบในเนื้อเยื่อของมะม่วงและพืชทั่วไป และสามารถเคลื่อนที่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้อย่างอิสระ NO ทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณเมื่อผลิตผล (หรือต้นพืช) อยู่ในสภาพเครียด โดย NO ทำงานร่วมกับสารอินทรีย์ชนิดอื่น เช่น อนุมูลอิสระกลุ่มออกซิเจน (reactive oxygen species; ROS) กรดซาลิไซลิก กรดแจสโมนิก และฮอร์โมนพืช โดย NO ทำปฏิกิริยากับ ROS เกิดเป็น peroxynitrite (เป็นการลดปริมาณ ROS ที่เกิดขึ้นในไมโตคอนเดรีย) NO ชะลอการเสื่อมสภาพของเยื่อหุ้มเซลล์ โดยลดกิจกรรมของเอนไซม์ lipoxygenase (LOX) ซึ่งทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไขมันที่อยู่บนเยื่อหุ้มเซลล์ จึงลดการสะสมของสาร malondialdehyde (MDA) ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์สามารถควบคุมการผ่านเข้าออกของสารและไอออนได้ตามปกติ NO
กระตุ้น (หรือส่งสัญญาณ) ให้เนื้อเยื่อพืชสังเคราะห์ (ก) เอนไซม์ที่มีฤทธิ์กำจัดอนุมูลอิสระและต้านทานเชื้อโรค (เช่น ascorbate peroxidase, catalase, superoxide dismutase, chitinase และ peroxidase) (ข) เอนไซม์ในชีววิถี phenylpropanoids (phenylalanine ammonialyase, β-1,3-glucanase, cinnamate-hydroxylase และ 4-coumarate: CoA ligase) และ (ค) โปรตีนและสารอินทรีย์ที่มีฤทธิ์ต้านทานเชื้อโรค เช่น สารประกอบฟีนอล ลิกนิน และ phytoalexins ด้วยเหตุนี้ NO จึงช่วยลดหรือบรรเทาอาการผิดปกติที่จะเกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อพืชได้ เช่น อาการสะท้านหนาว และการเน่าเสียของผลิตผลระหว่างการเก็บรักษา และปรับกระบวนการหายใจระดับเซลล์ของผลิตผลเพื่อลดการสร้างพลังงาน adenosine triphosphate โดยใช้ (i) การหายใจแบบ anaerobic โดยไม่ผ่านขั้นตอน Krebs' cycle และ (ii) การส่งถ่ายอิเลคตรอนโดยใช้ nitrite เป็นตัวรับอิเลคตรอนแทน O_2 ในขั้นตอน electron transport chain จึงชะลอการสุกของผลไม้ในระหว่างการเก็บรักษาได้ นอกจากนี้กลไกในชะลอการสุกของผลไม้ยังเกี่ยวข้องกับการที่ NO ยับยั้งการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์เอทิลีน และยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ ACC synthase (ACS) และ ACC oxidase (ACO) (Buet et al., 2021; Pols et al., 2022; Liu et al., 2023)

การใช้ก๊าซ NO สังเคราะห์ (CAS Number: 10102-43-9) รมผลไม้ต้องทำในห้องหรือภาชนะที่ปิดสนิทที่ไม่มีหรือมีก๊าซ O_2 ในปริมาณต่ำ เพราะในสภาพดังกล่าว NO เปลี่ยนรูปไปเป็นไนโตรเจนออกไซด์ (NO_2) ได้ และต้องลดการเกิดสารพิษนี้โดยการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในห้องหรือภาชนะที่ใช้หลังจากการรมผลไม้ อีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการวิจัยคือ การแช่ผลไม้ในสารละลายเคมีที่เป็นแหล่งให้ก๊าซ NO ซึ่งสารเคมีที่นิยมใช้คือ sodium nitroprusside (SNP; CAS Number: 13755-38-9) (ตารางที่ 1) *S*-nitrosoglutathione (CAS Number: 57564-91-7) และ 2,2'-hydroxynitrosohydrazino-bisethanamine diethylene-triamine nitric oxide (DETANO; CAS Number: 146724-94-9) การใช้ NO ทั้งสองรูปแบบยังไม่มีการประยุกต์เพื่อใช้กับมะม่วงในเชิงพาณิชย์

5.3 เมลาโทนิน (melatonin)

เมลาโทนิน (*N*-acetyl-5-methoxytryptamine) เป็นสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชในกลุ่ม indoleamine พืชมีชีววิถีการสังเคราะห์เมลาโทนินคล้ายกับฮอร์โมนพืชออกซิน ซึ่งใช้สารตั้งต้นตัวเดียวกันคือกรดอะมิโนชื่อ tryptophan และมีสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในชีววิถีการสังเคราะห์คือ serotonin ทั้งพืชและสัตว์สามารถสังเคราะห์เมลาโทนินได้ (Meena et al., 2020;

Jayarajan and Sharma, 2021) ผลไม้สังเคราะห์สารนี้ได้ในปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ ความบริบูรณ์ และระยะการสุกของผล ผลมะม่วงสุกสังเคราะห์สารนี้และสะสมในเนื้อเยื่อในปริมาณ 0.7 นาโนกรัมต่อกรัม (ng g^{-1}) ซึ่งน้อยกว่าปริมาณที่พบในผลสุกของมะเขือเทศ (7.5-250 ng g^{-1}) หม่อน (90 ng g^{-1}) และพริก (*Capsicum annuum*) (31-93 ng g^{-1}) (Jayarajan and Sharma, 2021) เมลาโทนินเป็นสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระระดับรุนแรง และส่งสัญญาณหรือกระตุ้นให้เนื้อเยื่อพืชสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์และ/หรือเอนไซม์ที่มีฤทธิ์กำจัดอนุมูลอิสระ และทำงานร่วมกับสารอินทรีย์ชนิดอื่น (NO กรด salicylic และ polyamine) ในการสังเคราะห์โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการต้านทานการเข้าทำลายของเชื้อโรค (Tiwari et al., 2022)

การใช้เมลาโทนินชนิดสังเคราะห์ (CAS Number: 73-31-4) ในรูปสารละลายความเข้มข้นต่ำกับผักและผลไม้หลายชนิดในระยะหลังการเก็บเกี่ยวมีวัตถุประสงค์เช่นเดียวกันกับการใช้ NO คือการลดอาการสะท้านหนาว (Shah et al., 2023) การชะลอสุกของผลไม้ประเภท climacteric (Meena et al., 2020) และการลดการเน่าเสียและการวายของผลิตผลระหว่างการเก็บรักษา (Jayarajan and Sharma, 2021) โดยเมลาโทนินที่ผลิตผลได้รับจากภายนอกเคลื่อนผ่านเข้าสู่เยื่อหุ้ม plasma membrane ของเซลล์พืช สามารถกระตุ้นให้เซลล์พืชสังเคราะห์เมลาโทนิน (endogenous mela- tonin) ขึ้นได้โดยผ่านตัวรับเมลาโทนินภายในเนื้อเยื่อ (phyto-melatonin receptor) และสามารถชักนำให้ผลิตผลสังเคราะห์กรดอะมิโนชื่อ proline ได้ ซึ่งกรดอะมิโนชนิดนี้ช่วยป้องกันเซลล์พืชจากการเสื่อมสภาพของเยื่อหุ้มเซลล์เนื่องจากอุณหภูมิต่ำ และจากความเครียดชนิด abiotic อื่นๆ กลไกการทำงานของเมลาโทนินมีความคล้ายคลึงกันกับ NO คือ (1) การลดกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอนุมูลอิสระ (เช่น LOX PLD และ PPO) และ (2) การกระตุ้นให้เซลล์พืชสร้างสารประกอบอินทรีย์และ/หรือเอนไซม์ที่มีฤทธิ์กำจัดอนุมูลอิสระ (Jayarajan and Sharma, 2021; Tiwari et al., 2022) ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ผลิตผลที่ได้รับเมลาโมนิน (ชนิดสังเคราะห์จากภายนอก) มีการเสื่อมคุณภาพของเยื่อหุ้มเซลล์ช้าลง ความแน่นเนื้อของผลิตผลจึงมีค่ามากกว่าผลิตผลที่ไม่ได้รับสารนี้ และลดการเกิดอาการสะท้านหนาวของผลิตผล หรือบรรเทาความรุนแรงของอาการดังกล่าวได้ (ตารางที่ 1) นอกจากนี้ เมลาโทนินยังมีอิทธิพลต่อผลไม้ประเภท climacteric ในด้านการชะลอการสุกของผล จากสาเหตุด้านการลดกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์เอทิลีน และการย่อยสลายผนังเซลล์พืช เช่น galacturonase, xylanase, β-galac- tosidase และ α-amylase ผลการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการที่ทดลองกับผลมะม่วงที่ผ่านการแช่ในสารละลายเมลาโทนินร่วมกับสารเคมีอื่น เช่น กรด salicylic (Awad and Al-Qurashi, 2021) 1-MCP (ในรูปสารละลาย) (Yuan et al., 2023) และสารเคลือบผิวที่ผลิตจากพืช (tragacanth gum จาก *Astragalus gummifer*) (Khedr and Al-Khayri, 2023)

5.4 เฮกซาแนล (hexanal)

เฮกซาแนลเป็นสารประกอบอินทรีย์กลุ่ม aldehyde ผลิตผลและต้นพืชสามารถผลิตเฮกซาแนลได้เช่นเดียวกับเมลาโทนิน และ NO โดยผ่านชีววิถี lipoxygenase เมื่อเนื้อเยื่อพืชเกิดบาดแผล เฮกซาแนลสังเคราะห์ (CAS Number: 66-25-1) มีหลายชื่อคือ Hexaldehyde, Aldehyde C6, Caproaldehyde และ Caproic aldehyde สารนี้เป็นสารหอมระเหยที่องค์การอาหารและยาประเทศสหรัฐอเมริการับรองว่าปลอดภัยในการใช้เป็นสารปรุงแต่งผลิตภัณฑ์อาหาร และใช้โดยตรงกับผลิตผลสดทั้งในระยะก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว โดยกำหนดค่าที่เกิดอันตรายต่อการบริโภคของคนและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในปริมาณ 3,700 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม (Paliyath and Subramanian, 2008; Ashitha et al., 2020) การใช้เฮกซาแนลสังเคราะห์กับผลิตผลสดทั้งในระยะก่อนและหลังการเก็บเกี่ยวในทางการค้ามีวัตถุประสงค์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาโดย (1) การชะลอการสุกของผลไม้ประเภท climacteric เนื่องจากกลไกด้านการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ phospholipase D (PLD) จึงทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของส่วนต่างๆ ของเนื้อเยื่อพืชเสื่อมสภาพช้าลง และรักษาความแข็งแรงของผนังเซลล์ (Paliyath and Subramanian, 2008; Preethi et al., 2018; Datta and Bora, 2019;

Padmanabhan et al., 2020) และ (2) การยับยั้งการเจริญเติบโตของสปอร์ และ/หรือเส้นใยของเชื้อราบางชนิดที่ก่อโรคในระยะหลังการเก็บเกี่ยว จึงสามารถลดการเน่าเสียของผลิตผลได้ (Ma et al., 2019; Ashitha et al., 2020; Li et al., 2021)

การใช้เฮกซาแนลสังเคราะห์กับผลิตผลมีหลายรูปแบบคือ การพ่นสารละลายให้กับผลิตผลขณะอยู่บนต้น การแช่ผลิตผลที่เก็บเกี่ยวมาแล้วในสารละลาย ซึ่งอาจผสมร่วมกับน้ำมันสกัดจากพืช (เช่น อบเชย) การรมผลิตผลด้วยไอระเหย และการใช้แผ่นฟิล์ม ซองบรรจุขนาดเล็ก (sachet) หรือแคปซูลที่มีส่วนผสมของเฮกซาแนลและวัสดุชนิดอื่น (เช่น เส้นใยขนาดนาโนของเซลลูโลส สารเคลือบผิว และไซโคลเด็กตริน) ติดตั้งหรือแนบไว้ในบรรจุภัณฑ์ผลิตผล (ตารางที่ 1) วิธีการนี้ทำให้ไอระเหยของเฮกซาแนลค่อยๆ ปลดปล่อยออกมาภายในบรรจุภัณฑ์ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของเฮกซาแนลที่มีความดันไอค่อนข้างต่ำ จึงระเหยสู่บรรยากาศได้อย่างรวดเร็วในสภาพที่มีอุณหภูมิมากกว่า 30 $^{\circ}$C การใช้เฮกซาแนลสังเคราะห์กับมะม่วงยังไม่มีการปฏิบัติในทางการค้า

5.5 สารเคมี สารอินทรีย์ และเชื้อปฏิปักษ์ที่มีฤทธิ์ป้องกันกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค

โรคที่เกิดขึ้นกับผลมะม่วงในระยะหลังการเก็บเกี่ยวและลดมูลค่าทางการค้าแก่เกษตรกรและผู้ประกอบการค้ามะม่วงเป็นอย่างมาก ได้แก่ แอนแทรคโนส ผลเน่าและขั้วผลเน่า ที่เกิดจากเชื้อราสกุล *Colletotrichum Aspergillus* และหลายสกุลในวงศ์ *Botryodiplodia* (สกุล *Dothiorella Cytoshaera Lasiodiplodia* และ *Phomopsis*) ตามลำดับ (Ravikumar et al., 2017; Diskin et al., 2019; Rehman et al., 2020; Yanos et al, 2021; Yang et al., 2021; Iqbal et al., 2022) โดยรวมแล้ว การใช้สารเคมีสังเคราะห์เพื่อป้องกันโรคมะม่วงเป็นวิธีการที่ให้ผลรวดเร็วและดีกว่าหรือเทียบเท่ากับการใช้วิธีทางกายภาพ (ความร้อน และการฉายรังสี) และชีววิธี (สารสกัดจากพืช น้ำมันหอมระเหย และเชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์หรือ biocontrol agents) ซึ่งมีการใช้ทั้งในระยะก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว (Lokare et al., 2021) สารเคมีสังเคราะห์ชนิดปลอดภัยที่มีประสิทธิภาพดีในการควบคุมโรคมะม่วงหลังการเก็บเกี่ยวคือ carbendazim (Habiba et al., 2021), thiophanate-methyl (Diallo et al., 2017), thiabendazole (TBZ), imazalil, azoxystrobin (Manasa et al., 2018; Kongtragoul et al., 2020; Jaimes, 2021), chlorine dioxide (ClO_2) (Zhang et al., 2019) และ fludioxonil (Diskin et al., 2019) (ตารางที่ 2) ซึ่งสาร fludioxonil เป็นสารเคมีสังเคราะห์ที่มีแนวโน้มใช้ทดแทน prochloraz (ชื่อการค้าคือ Sportax®) ซึ่งยุติการใช้กับผลิตผลในประเทศสมาชิกของสหภาพยุโรปตั้งแต่ปี 2564 ผลการวิจัยโดยใช้ fludioxonil ความเข้มข้น 300 ppm ร่วมกับน้ำอุ่น (50 $^{\circ}$C) กับผลมะม่วงพันธุ์ Shelly และ Keitt หลังการเก็บเกี่ยวในประเทศอิสราเอลให้ผลดีกว่า prochloraz ในการป้องกันกำจัดโรคขั้วผลเน่าโดยเชื้อรา *Lasiodiplodia theobromae* (Diskin et al., 2019) fludioxonil เป็นสารเคมีกลุ่ม phenylpyrroles และมีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ protein kinase จึงทำให้เอนไซม์นี้ไม่สามารถทำหน้าที่ลำเลียงสารกลีเซอรอล (glycerol) ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตออกจากเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์สาเหตุของโรคพืชได้ ดังนั้น จึงมีผลยับยั้งการงอกของสปอร์ และการเจริญเติบโตของเส้นใยของเชื้อจุลินทรีย์ ส่วน ClO_2 เป็นสารเคมีสังเคราะห์ที่ได้รับการผลิตในรูปของเหลวที่มีสารประกอบหลักคือ sodium chlorite ($NaClO_2$) และของแข็งในรูปผง (powder for gaseous treatment) และ เม็ด (chlorine dioxide water tablets) (Huang et al., 2018; Mathew et al., 2018; Chen et al., 2020; Singh et al., 2021) ก๊าซ ClO_2 มีคุณสมบัติคล้ายคลอรีนและมีกลิ่นฉุน ก๊าซนี้ไม่ละลายรวมกับน้ำ แต่ยังคงเป็นก๊าซในน้ำหรือสารละลายนั้น ก๊าซนี้มีฤทธิ์ออกซิไดซ์อย่างแรงแม้มีความเข้มข้นต่ำ (0.1 มิลลิกรัม /ลิตร) และได้มีการนำมาใช้ในการกำจัดเชื้อราและแบค ทีเรียก่อโรคแทนคลอรีน เนื่องจาก ClO_2 มีฤทธิ์ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นมากกว่าคลอรีน 2.5 เท่า ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบอินทรีย์ และมีคุณสมบัติคงเดิมเมื่ออยู่ในสภาพเป็นกรดหรือมีค่า pH เปลี่ยนแปลงไป (Wu, 2016) ซึ่งสารนี้ได้รับการรับรอง

จากองค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (FDA) ในการนำมาใช้ในการล้างทำความสะอาดผลิตผลพืชสวนตั้งแต่ปี 2549 ด้วยความเข้มข้น 3 ppm (Wu, 2016) นอกจากนี้ องค์การอนามัยโลกจัดให้ ClO_2 เป็นสารเคมีกำจัดแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพสูง จึงสามารถนำสารนี้มาใช้ในการถนอมอาหาร ในอุตสาหกรรมน้ำดื่มและผลิตภัณฑ์อาหาร (Wu, 2016) กลไกการทำงานของ ClO_2 ภายในเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์สาเหตุของโรคพืชเกี่ยวข้องกับ (1) การยับยั้งการสร้างโปรตีน โดยเข้าทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโน และ RNA ภายในเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์และ (2) การทำให้เยื่อหุ้มเซลล์มีองค์ประกอบผิดปกติไปโดย ClO_2 เคลื่อนย้ายเอาโปรตีนและไขมันออกไปจากเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ได้ ดังนั้น การควบคุมผ่านเข้าออกของโมเลกุลและไอออนผ่านเยื่อหุ้มเซลล์จึงผิดปกติ เนื่องจากสภาพการเป็นก๊าซของ ClO_2 ผู้วิจัยจึงมีการใช้ ClO_2 ที่ผลิตในรูปแคปซูล (Zhang et al., 2019) แผ่นฟิล์ม ป้ายฉลาก แผ่นหรือซองขนาดเล็กที่ใช้ร่วมกับบรรจุภัณฑ์ผลไม้หรือผลิต ภัณฑ์อาหารที่สามารถปลดปล่อยก๊าซออกมาอย่างช้าๆ เพื่อควบคุมโรคที่จะเกิดขึ้นกับผลิตผลในบรรจุภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษาหรือวางจำหน่าย (Singh et al., 2021)

ตารางที่ 2 สารเคมีสังเคราะห์ที่มีฤทธิ์ป้องกันกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคที่ใช้กับมะม่วงในระยะหลังการเก็บเกี่ยว

ชื่อสารเคมี	ชื่อการค้า	CAS Number	อัตราที่ใช้	ค่า MRL (mg/kg bw)
azoxystrobin	การัน / อมิสตา 25% SC Amistar® / Amistar 25% SC Ortiva 250 SC	131860-33-8	500-1,000 ppm	4.0 (FDA/WHO)
carbendazim	คาร์ดาซิน 50% WP Bavistin FL 50% SC Bavistin 50 DF	10605-21-7	20 mg L^{-1}	5.0 (ไทย) 0.5 (EU/CODEX)
chlorine dioxide	FruitGard™ (ผงปลดปล่อยก๊าซ ClO_2) / SY-Sachet Activ-Film™ / Dioxiva® (สารละลาย 231.7 mg L^{-1} of ClO_2)	10049-04-4	3-5 ppm	-
fludioxonil	Switch® 62.5WG Scholar®	131341-86-1	300 ppm	7.0 (FDA/WHO)
prochloraz	โค-ราซ (50% WP) Sportax® / Octave 50% WP	67747-09-5	300 ppm	0.2
TBZ	Tecto®	148-79-8	0.25-0.45 g L^{-1}	2.0
Thiophanate-methyl	Fongsin 450 SC Topsin-M 70 WP Roko®	23564-05-8	20 mg L^{-1} 0.5 g L^{-1}	1.0 (EU) 5.0 (CODEX)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Chiangsin et al. (2016); Soliman et al. (2017); Mora-Aguilera et al. (2021); EFSA, (2021a,b); FAO & WHO (2023)

ในการค้ายุคปัจจุบัน เกษตรกรและผู้ประกอบการค้ามะม่วงและผลิตผลทางการเกษตรต้องให้ความสำคัญกับการปนเปื้อนของสารเคมีสังเคราะห์ในสภาพแวดล้อม และต้องใช้วิธีกำจัดสารเคมีที่จะตกค้างในดินและแหล่งน้ำได้ เช่น การใช้เชื้อแบคทีเรีย *Sphingomonas phylotype* (BB) ในการลดปริมาณ TBZ ในสารละลายที่ปล่อยทิ้งจากโรงคัดบรรจุผลไม้ในเมือง Limassol ประเทศไซปรัส (Perruchon et al., 2017) และการมีสารเคมีตกค้างในผลิตผลในปริมาณมากกว่าปริมาณที่กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ของไทย

กำหนดไว้จำนวน 10 ชนิด (Maximum Residue Limits; MRL, Thai Agricultural Standard TAS9002-2008, (2008)) และที่กำหนดโดย CODEX ประเทศสมาชิกสหภาพยุโรป (European Food Safety Authority [EFSA], 2021a; 2021b) และองค์กรระหว่างประเทศ (FAO & WHO, 2023) สารเคมีสังเคราะห์บางชนิดทำให้เกิดสารก่อมะเร็ง (trihalomethanes; THMs) กับคนและสัตว์ได้ เช่น sodium hypochlorite และ prochloraz นอกจากนี้ เชื้อจุลินทรีย์สาเหตุของโรคบางชนิดอาจเกิดความต้านทานต่อสารเคมีที่ผลไม้ได้รับ (สัณฐิติ และคณะ, 2560; Kongtragoul et al., 2020) จึงทำให้ประสิทธิภาพของสารเคมี ณ ความเข้มข้นนั้นลดลง เช่น เชื้อรา *C. gloeosporioides* ที่แยกเชื้อจากผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ในจังหวัดพิษณุโลกและเกิดโรคแอนแทรคโนสมีความต้านทานต่อ azoxystrobin ความเข้มข้น 0.1-10 μg mL^{-1} แต่ความเข้มข้นสูงขึ้น (100 μg mL^{-1}) สามารถป้องกันหรือลดการเกิดโรคได้ (สัณฐิติ และคณะ, 2560) ดังนั้นเกษตรกรจึงต้องใช้สารละลายเคมีในความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งผลที่ตามมาคือ การมีสารเคมีตกค้างในผลิตผลเพิ่มขึ้น (Zhao et al., 2018; Mohapatra et al., 2020) การใช้หลายวิธีผสมผสานกันระหว่างสารเคมีสังเคราะห์ชนิดปลอดภัย ความร้อนรูปแบบต่างๆ ชีววิธี และการนำผลการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการมาประยุกต์เพื่อหาวิธีทดแทนและเป็นทางเลือกใหม่ในการควบคุมโรคพืชในระยะหลังการเก็บเกี่ยวจึงพัฒนา ขึ้น โดยมีผลการวิจัยตีพิมพ์หลายฉบับที่รายงานข้อมูลในด้านดังกล่าว สารสกัดจากพืชทางการค้าที่มีการนำมาใช้กับผลไม้เพื่อรักษาคุณภาพที่ดีและชะลอการเน่าเสีย ได้แก่ สารสกัดจากเมล็ดสะเดา ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich (สหรัฐอเมริกา) (Shrestha et al., 2018) น้ำมันหอมระเหยที่มี carvone และ thymol เป็นองค์ประกอบหลัก ผลิตโดยบริษัท Xeda International SA (ฝรั่งเศส) (Chillet et al., 2018) และ thymol oil ที่สกัดจากพืช *Thymus vulgaris* และ *T. zygis* ผลิตโดยบริษัท Cyrus Enterprises (อินเดีย) และบริษัท Sigma-Aldrich (สหรัฐอเมริกา) และน้ำมันหอมระเหยจากพืชอีกหลายชนิด เช่น ตะไคร้ ขิง อบเชย thyme (*T. vulgaris*) และ cassia (*Senna siamea*) ผลิตโดยบริษัท Bett Organics (ไนจีเรีย) (Dania and Esiobu, 2022) นอกจากนี้ ยังมีสารสกัดจากพืชชนิดอื่นที่ได้รับความสนใจจากผู้วิจัยในการนำมาศึกษากับผลมะม่วงในระดับห้องปฏิบัติการหลายรูปแบบ คือการยับยั้งการเจริญเติบโตของโคโลนีในจานอาหารเลี้ยงเชื้อของเชื้อก่อโรคมะม่วง (*in vitro* assay) เช่น การใช้สารสกัดจากผิวผลส้มโอ (Cheng et al., 2023) เลมอน และมะกรูด (Alvindia and Mangoba, 2022) และสารสกัดจากใบฝรั่ง (Mangoba and Alvindia, 2023) การใช้สารสกัดจากพืชกับผลมะม่วงที่ได้รับการถ่ายเชื้อก่อโรคเข้าสู่ผล เพื่อตรวจลักษณะหรือความรุนแรงของการเกิดโรคในระยะเวลาสั้นๆ ในสภาพห้องปฏิบัติการ (*in vivo* assay) และอาจเปรียบเทียบกับการใช้สารเคมีสังเคราะห์ เช่น การใช้สารสกัดจากใบโหระพา (Danh et al., 2021) สารสกัดจากผิวผลมะกรูด (Chit-aree et al., 2021) สารสกัดจากขี้เลื่อยของต้น *Brosimum rubescens* (Taub.) จากแหล่งปลูกในประเทศโคลัมเบีย (Martinez et al., 2020) และสารหอมระเหยประเภท methylpyrazine ที่ได้จากเชื้อแบคทีเรียบางชนิด เช่น *Pseudomonas putida* BP25 และการศึกษาในรูปแบบสุดท้ายเป็นการแช่หรือพ่นสารละลายของสารสกัดจากพืช เช่น สารสกัดจากใบสะเดา (*Azadirachta indica*) ให้แก่ผลมะม่วงที่ไม่มีอาการของโรค เพื่อตรวจการเกิดโรคของผลมะม่วงในสภาพห้องปฏิบัติการ และเปรียบเทียบกับการใช้สารเคมีสังเคราะห์ (Shrestha et al., 2018) ด้วยเหตุผลที่น้ำมันหอมระเหยจากพืชมักระเหยได้ง่าย ผู้วิจัยจึงประยุกต์การใช้โดยนำน้ำมันหอมระเหยมาผสมกับสารเคลือบผิวชนิดบริโภคได้ก่อนการใช้กับผลไม้ (ตารางที่ 1; de Oliveira et al., 2017; Lieu et al., 2018; Zhou et al., 2021) และการผลิตในรูปซองขนาดเล็กวางร่วมในบรรจุภัณฑ์ผลไม้เช่นเดียวกับเฮกซาแนล และ ClO_2

เชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ที่มีการนำมาใช้ชะลอหรือยับยั้งการเกิดโรคกับผลมะม่วงในระยะหลังการเก็บเกี่ยวส่วนมากเป็นยีสต์ แบคทีเรีย และเชื้อรา *Trichoderma* spp. ยีสต์พบในสกุล *Metchinkowia*, *Pichia* และ *Rhodotorula* แบคทีเรียพบในสกุล *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Burkholderia, Paenibacillus* และแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติก ได้แก่ *Lactobacillus,*

Lactococcus, Pediococcus และ *Streptococcus* (Ciofini et al., 2022; Mohd Israfi et al., 2022; Sunitha et al., 2022) เชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์สกุล *Bacillus* ได้มีการผลิตในทางการค้าเพื่อการป้องกันโรคแอนแทรคโนสจากเชื้อ *Colletotrichum* spp. โดยมีชื่อทางการค้าว่า Serenade ASO ผลิตจากเชื้อ *B. amyloliquefaciens* QST713 (บริษัท Bayer, สหรัฐอเมริกา) และชื่อ Double Nickel 55 ผลิตจากเชื้อ *B. amyloliquefaciens* D747 (บริษัท Certis, สหรัฐอเมริกา) (Ciofini et al., 2022; Liang et al., 2022) เชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ที่ผลิตเพื่อการค้าในประเทศอินเดียมักผสมเชื้อจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น “Flora” ประกอบ ด้วยเชื้อ *Lactobacillius acidophilus*, *L. rham- nossus*, *Bifidobacterium longum* และ *B. boulardii* และ “V-Bact” ที่ประกอบด้วยเชื้อ *Streptococcu feacails, Clostidium butyricum*, *B. mesentericus* และ *L. sporogenes* ซึ่งผลิตภัณฑ์ทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพดีในการชะลอการเกิดโรคของผลมะม่วงในระยะหลังการเก็บเกี่ยวจากเชื้อ *Colletotrichum* และ *Alternaria* ทั้งการทดลองแบบ *in vitro* และ *in vivo* เมื่อเปรียบเทียบกับยีสต์ที่แยกได้จากแป้งธัญพืชและผลิตภัณฑ์ของน้ำนม (Greeshma et al., 2020) ผู้วิจัยพบเชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์อีกหลายชนิดที่มีประสิทธิภาพดีเทียบเท่ากับการใช้สารเคมีสังเคราะห์ และมีแนวโน้มนำมาประยุกต์ใช้กับมะม่วงแทนสารเคมีสังเคราะห์ได้ในอนาคต เช่น การนำเชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์มาผสมในน้ำล้างทำความสะอาดผลและผสมกับสารเคลือบผิวผลมะม่วงก่อนการเก็บรักษา (Yunita et al., 2018; Evangelista-Martinez et al., 2022; Ranjith et al., 2022) การพ่นสารสกัดหรือสารคัดหลั่งจากเชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์บนผิวผล การแช่ผลในสารละลายที่มีส่วนผสมของเชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ร่วมกับสารเคมีสังเคราะห์ชนิดปลอดภัย (Shao et al., 2019; Suasa-ard et al., 2019; Chaisemsaeng et al., 2022) และการทดสอบแบบ *in vitro* และ *in vivo* โดยกลไกที่ผู้วิจัยพบว่าเชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์สามารถชะลอการเกิดโรคกับผลมะม่วงคือ (1) การแย่งสารอาหารและพื้นที่สำหรับการเจริญเติบโตกับเชื้อก่อโรค (2) การกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการต้านทานเชื้อก่อโรคและการกำจัดอนุมูลอิสระ (เช่น chitinase, β-1,3-glucanase, glutathione และ superoxide dimutase) และ (3) ปลดปล่อยสารอินทรีย์ที่มีฤทธิ์ต้านทานเชื้อก่อโรค เช่น สารประกอบฟีนอล สารหอมระเหย (เช่น hexanedioic acid และ 12-methyl-tridecanoic acid) สารโมเลกุลต่ำที่จับกับไอออนของเหล็กได้ (siderophore) เชื้อก่อโรคจึงไม่สามารถนำธาตุอาหารนี้มาใช้ได้ และ lipopeptides ซึ่งสามารถทำให้เยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ของเชื้อก่อโรคเกิดช่องว่าง ทำให้ไม่สามารถควบคุมการผ่านเข้าออกของไอออนและสารละลายได้ (Shao et al., 2019; Suasa-ard et al., 2019; Konsue et al., 2020; Chaisem- saeng et al., 2022)

สรุป

การใช้วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวด้านต่างๆ กับมะม่วงในเชิงพาณิชย์ เช่น การทำให้ผลไม้เย็นลงหลังการเก็บเกี่ยวจากแปลงปลูก การใช้สารเคมีที่ได้รับการยอมรับว่าปลอดภัยเพื่อป้องกันกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค การอบไอน้ำร้อนและไอร้อน การแช่ผลในน้ำร้อน (ที่ไม่ผสมหรือผสมสารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อก่อโรค) การใช้บรรจุภัณฑ์แบบดัดแปลงบรรยากาศ การฉายรังสี และการเก็บรักษาในสภาพดัดแปลงบรรยากาศ ร่วมกับการใช้อุณหภูมิต่ำในระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษาสามารถรักษาคุณภาพที่ดีของผลมะม่วงสด ชะลอการสุกของผล ป้องกันการปนเปื้อนของแมลงศัตรูพืช และลดการเน่าเสียของผลจากเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคได้ อย่างไรก็ตาม วิธีปฏิบัติต่อมะม่วงเพื่อการส่งออกที่มีประสิทธิภาพดีและประหยัดต้นทุนในการลงทุนระยะยาวคือ (1) การใช้ความร้อนกับผลมะม่วงก่อนการบรรจุหีบห่อ ซึ่งมีการดำเนินการในประเทศผู้ส่งออกมะม่วงหลายประเทศ เช่น การอบไอน้ำร้อนมะม่วงของประเทศไทยเพื่อการส่งออกไปประเทศญี่ปุ่นและสาธารณรัฐเกาหลีใต้ การอบไอร้อนเพื่อการกักกันแมลงศัตรูพืชกับมะม่วงจากประเทศเม็กซิโกและรัฐฮาวายที่ส่งเข้ามาจำหน่ายในประเทศสหรัฐอเมริกา และมะม่วงจากประเทศในมหาสมุทรแปซิฟิกที่ต้องการส่งออกไปยังประเทศนิวซีแลนด์ และออสเตรเลีย การจุ่มน้ำร้อนของมะม่วงจากประเทศเม็กซิโก คอสตาริกา และ

เปอร์โตริโก เพื่อการกักกันแมลงศัตรูพืชก่อนการขนส่งเข้ามาจำหน่ายในประเทศสหรัฐอเมริกา (2) การฉายรังสีมะม่วงในบรรจุภัณฑ์ของประเทศไทย อินเดีย ฟิลิปปินส์ ปากีสถาน เวียดนาม เม็กซิโก และออสเตรเลีย เพื่อการส่งออกไปประเทศสหรัฐอเมริกา และ (3) การใช้สภาพดัดแปลงบรรยากาศในยานพาหนะที่ใช้ขนส่งและในห้องเย็นที่ใช้เก็บรักษาผลไม้ วิธีปฏิบัติด้านอื่นที่นำสารสกัดจากพืช และสารเคมีสังเคราะห์ (เช่น เฮกซาแนล และเมลาโทนิน) หรือเชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์มาใช้ร่วมกับวิธีการปฏิบัติเดิมอยู่ในระหว่างการศึกษาทดลองก่อนนำมาประยุกต์ใช้ต่อไปในทางการค้า เพื่อยืดอายุการวางจำหน่ายของผลมะม่วงสดให้ยาวนานขึ้นก่อนถึงผู้บริโภค

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2564. มะม่วง. ค้นเมื่อ 8 สิงหาคม 2567, http://www.agriman.doae.go.th.

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2565. การผลิตมะม่วงคุณภาพเพื่อการส่งออก. ค้นเมื่อ 8 สิงหาคม 2567, https://mediatank.doae. go.th/medias/file file_upload.pdf.

กรกัญญา อักษรเนียม. 2554. โมเดลการจัดการผลิตมะม่วงส่งออก. วารสารเคหการเกษตร. 35(2), 101-114.

ชัยรัตน์ บูรณะ. 2561. ผลของฟองก๊าซ 1-MCP ขนาดไมโครต่อคุณภาพของกล้วยหอมทอง. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 23(3), 1597-1603.

พิกุล นุชนวลรัตน์ และ นภาพร จิตต์ศรัทธา. 2565. ผลของสารสกัดหยาบจากอบเชย น้ำมันหอมระเหยอบเชย และกัมอะราบิกต่อการควบคุมโรคแอนแทรคโนสบนผลมะม่วงอกร่อง. วารสารวิทยาศาสตร์ชีวิตและสิ่งแวดล้อม. 23(1), 14-24.

ผ่องเพ็ญ จิตอารีย์รัตน์ และ อภิรดี อุทัยรัตนกิจ. 2556. การฉายรังสีผลไม้. ใน: ธวัชชัย รัตน์ชเลศ วิลาวัลย์ คำปวน และ ธีรนุช เจริญกิจ(บรรณาธิการ) มะม่วงการผลิตและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. เชียงใหม่: ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา,

สัณฐิติ บินคาเดอร์ รัติยา พงศ์พิสุทธา แ ละ ชัยณรงค์ รัตนกรีฑากุล. 2560. ตรวจสอบความต้านทานต่อสารเคมี Azoxystrobin ของเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Sacc สาเหตุโรคแอนแทรคโนสของมะม่วง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 48(3) (พิเศษ), 129-132.

ศิรกานต์ ศรีธัญรัตน์ เบญจมาศ รัตนชินกร และ คมจันทร์ สรงจันทร์. 2555. ผลของสารเคลือบผิวบางชนิดต่อคุณภาพของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เบอร์สี่ระหว่างการเก็บรักษา. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 43(2) (พิเศษ), 101-104.

อุบล ชินวัง และ สาธิต พสุวิทยกุล. 2558. ลักษณะคุณภาพ กายวิภาค และระยะเวลาการสุกของผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ทะวายเบอร์สี่และพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ อุบลราชธานี: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

อุบล ชินวัง ทินน์ พรหมโชติ สาธิต พสุวิทยกุล ซิง ซิงทองดี และ สุนทร โชคสวัสดิ์ธนะกิจ. 2564. การเพิ่มคุณภาพผลและการจัดการเพื่อการส่งออกผลมะม่วงพันธุ์มหาชนก. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. อุบลราชธานี: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

Abu, M., N.S. Olympio, and J.O. Darko. 2020. Effects of different storage temperature conditions on ripening quality and shelf life of mango (*Mangifera indica*) fruits in Ghana. Journal of Horticulture and Postharvest Research. 3(2), 245–256.

Agricultural and Processed Food Products Export Development Authority (APEDA). 2007. Guidelines for Export of Indian Mangoes to USA. Accessed 9 June 2020, https://pdf4pro.com/edn/guilines-for-

export-of-mangoes-to-usa-dr-reddy-592875-pdf.

Alkan, N., Kumar, A., and Gandhi, I. 2018. Post-harvest storage management of mango fruit. *In*: Sauco, V.G., and P. Lu (Eds). Achieving sustainable cultivation of mangoes. London: Burleigh Dodds Science Publishing.

Alvindia, D. de G., and M.A. Angeles Mangoba. 2022. Fungitoxic activities of *Citrus limon* L. peel extracts in controlling anthracnose of mango. Journal of Plant Pathology. 104(3), 939–945.

Amwoka, E.M., J.L. Ambuko, H.M. Jesang', and W.O. Owino. 2021. Effectiveness of selected cold chain management practices to extend shelf life of mango fruit. Advances in Agriculture. 2021(1), 1–12.

Ashitha, G.N., A.C. Sunny, and R. Nisha. 2020. Effect of pre-harvest and post-harvest hexanal treatments on fruits and vegetables: A review. Agricultural Reviews. 41(2), 124–131.

Asio, L.G., and F.D. Cuaresma. 2016. A review of postharvest treatments to maintain mango (*Mangifera indica* L.) quality. Annals of Tropical Research. 38(1), 81–93.

Awad, M.A., and A.D. Al-Qurashi. 2021. Postharvest salicylic acid and melatonin dipping delay ripening and improve quality of 'Sensation' mangoes. The Philippine Agricultural Scientist. 104(1), 34–44.

Badillo, G.M., and L.A. Segura-Ponce. 2020. Classic and reaction-diffusion models used in modified atmosphere packaging (MAP) of fruit and vegetables. Food Engineering Reviews. 12(2), 209–228.

Badillo, G.M., and L.A. Segura-Ponce. 2020. Classic and Reaction-Diffusion Models Used in Modified Atmosphere Packaging (MAP) of Fruit and Vegetables. Food Eng Rev. 12(2), 209–228.

Bambalele, N.L., A. Mditshwa, L.S. Magwaza, and S.Z. Tesfay. 2021. Recent advances on postharvest technologies of mango fruits: a review. International Journal of Fruit Science. 21(1), 565–586.

Bender, R.J., J.K. Brecht, and E.A. Baldwin. 2021. Aroma of mature-green and tree-ripe mangoes after refrigerated air or controlled atmosphere storage. Ciência Rural. 52(6), e20210062.

Brosnan, T., and D.-W. Sun. 2001. Precooling techniques and applications for horticultural products-a review. International Journal of Refrigeration. 24(2), 154–170.

Chaisemsaeng, P., N. Nitisuk, C. Thanomsit, and P. Phimchan. 2022. Postharvest application of antagonistic yeast, *Candida metapsilosis* to control *Colletotrichum gloeosporioides* caused anthracnose disease on mango fruits and possible mechanisms. International Journal of Food and Nutritional Sciences. 11(2), 1765-1775.

Chen, M., X. Chen, and K. Yam. 2020. Encapsulation complex of chlorine dioxide in α-cyclodextrin: structure characterization and release property. Food Control. 107, 106783.

Cheng, Y., Y. Wu, F. Lee, L. Ou, C. Chen, Y. Chu, and Y. Kuan. 2022. Impact of storage condition on chemical composition and

antifungal activity of pomelo extract against *Colletotrichum gloeosporioides* and anthracnose in post-harvest mango. Plants. 11(15), 2064.

Chiangsin, R., K. Wanichkul, D.I. Guest, and S. Sangchote. 2016. Reduction of anthracnose on ripened mango fruits by chemicals, fruit bagging, and postharvest treatments. Australasian Plant Pathology. 45(6), 629–635.

Chillet, M., J. Minier, M. Hoarau, and J.-C. Meile. 2019. Potential use of thymol to control anthracnose development in mango. European Journal of Plant Pathology. 155(3), 943–952.

Chit-aree, L., Y. Unpaprom, R. Ramaraj, and M. Thirabunyanon. 2023. Valorization and biorefinery of kaffir lime peels waste for antifungal activity and sustainable control of mango fruit anthracnose. Biomass Conversion and Biorefinery. 13(12), 10735–10749.

Ciofini, A., F. Negrini, R. Baroncelli, and E. Baraldi. 2022. Management of post-harvest anthracnose: current approaches and future perspectives. Plants. 11(14), 1856.

Danh, L.T., B.T. Giao, C.T. Duong, N.T.T. Nga, D.T.K. Tien, N.T. Tuan, B.T.C. Huong, T.C. Nhan, and D.T.X. Trang. 2021. Use of essential oils for the control of anthracnose disease caused by *Colletotrichum acutatum* on post-harvest mangoes of Cat Hoa Loc variety. Membranes. 11(9), 719.

Dania, V. O., and M. G. Esiobu. 2022. Efficacy of plant-derived essential oils in post-harvest management of anthracnose disease on mango fruits. Makerere University Journal of Agricultural and Environmental Sciences. 11(2), 90-106.

Datta, H. S., and S.S. Bora. 2019. Physiological approaches for regulation of fruit ripening: a review. International Journal of Chemical Studies. 7(3), 4587–4597.

Dautt-Castro, M., A. Ochoa-Leyva, C.A. Contreras-Vergara, A. Muhlia-Almazán, M. Rivera-Domínguez, S. Casas-Flores, M.A. Martinez-Tellez, A. Sañudo-Barajas, T. Osuna-Enciso, and M.A. Baez-Sañudo. 2018. Mesocarp RNA-Seq analysis of mango (*Mangifera indica* L.) identify quarantine postharvest treatment effects on gene expression. Scientia Horticulturae. 227, 146–153.

de Mello Vasconcelos, O.C., D. Duarte, J. de Castro Silva, N.F.O. Mesa, B.J.T. Mederos, and S.T. de Freitas. 2019. Modeling 'Tommy Atkins' mango cooling time based on fruit physicochemical quality. Scientia Horticulturae. 244, 413–420.

de Oliveira, K.Á.R., L.R.R. Berger, S.A. de Araújo, M.P.S. Câmara, and E.L. de Souza. 2017. Synergistic mixtures of chitosan and *Mentha piperita* L. essential oil to inhibit *Colletotrichum* species and anthracnose development in mango cultivar Tommy Atkins. Food Microbiology. 66, 96–103.

Diskin, S., T. Sharir, O. Feygenberg, D. Maurer, and N. Alkan. 2019. Fludioxonil–A potential alternative for postharvest disease control in mango fruit. Crop Protection. 124, 104855.

Duan, Y., G.-B. Wang, O.A. Fawole, P. Verboven, X.-R. Zhang, D. Wu, U.L. Opara, B. Nicolai, and K. Chen. 2020. Postharvest precooling of fruit and vegetables: A

review. Trends in Food Science and Technology. 100, 278–291.

European Food Safety Authority (EFSA). 2021a. Reasoned opinion on the toxicological properties and maximum residue levels (MRLs) for the benzimidazole substances carbendazim and thiophanate-methyl. EFSA Journal 2021. 19(7), 6773.

European Food Safety Authority (EFSA). 2021b. Reasoned opinion on the setting of import tolerances for azoxystrobin in mangoes and oil palm fruits. EFSA Journal 2021. 19(8): 6821.

Evangelista-Martínez, Z., A. Ek-Cen, C. Torres-Calzada, and A. Uc-Várguez. 2022. Potential of *Streptomyces* sp. strain AGS-58 in controlling anthracnose-causing *Colletotrichum siamense* from post-harvest mango fruits. Journal of Plant Pathology. 104(2), 553–563.

FAO & WHO. 2023. Report 2022-Pesticide residues in food-Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues. Rome. https://doi.org/10.4060/cc4115en.

Fayek, M. A., D. M. Ahmed, E. G. Ibrahim, and A. A. Khoudair. 2022. Prestorage application of 1-methylcyclopropane on quality and extending storability of Tommy Atkins mango fruits. Egyptian Journal of Chemistry. 65(4): 111-118.

Fellows, P. J. 1988. Food Processing Technology: Principles and Practice. London: Ellis Horwood.

Follett, P.A., and L.G. Neven. 2020. Phytosanitary irradiation: Does modified atmosphere packaging or controlled atmosphere storage creating a low oxygen environment threaten treatment efficacy? Radiation Physics and Chemistry. 173, 108874.

Greeshma, K., C.D. Deokar, K.S. Raghuwanshi, and V.K. Bhalerao. 2020. Probiotics as a biocontrol agent in management of postharvest diseases of mango. Current Journal of Applied Science and Technology. 39(2), 85–92.

Hallman, G. J. 2017. Process control in phytosanitary irradiation of fresh fruits and vegetables as a model for other phytosanitary treatment processes. Food Control. 72:372-377.

Hallman, G.J. 2011. Phytosanitary applications of irradiation. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 10(2), 143–151.

Hallman, G.J., Y.M. Hénon, A.G. Parker, and C.M. Blackburn. 2016. Phytosanitary irradiation: An overview. Florida Entomologist. 99(2), 1–13.

Han, J.-W., M. Zuo, W.-Y. Zhu, J.-H. Zuo, E.-L. Lü, and X.-T. Yang. 2021. A comprehensive review of cold chain logistics for fresh agricultural products: Current status, challenges, and future trends. Trends in Food Science and Technology. 109, 536–551.

Hasan, M.U., A.U. Malik, A.S. Khan, R. Anwar, M. Latif, A. Amjad, M.S. Shah, and M. Amin. 2020. Impact of postharvest hot water treatment on two commercial mango cultivars of Pakistan under simulated air freight conditions for China. Pakistan Journal of Agricultural Science. 57(5), 1381–1391.

Haynes, F.E., and B.C. Dominiak. 2018. Irradiation for phytosanitary treatment of the

Queensland fruit fly *Bactrocera tryoni* Froggatt benefits international trade. Crop Protection. 112, 125–132.

Hénon, Y. 2014. Irradiation of fruit vegetables for phytosanitary purpose: an overview. Food and Environmental Protection Newsletter. 17(2), 6-8.

Holguín-Sterling, L.C., A.R. Páez, A.D. Patiño, J. Gómez-León, and L.M. Blandón. 2023. Biosurfactants from marine bacteria to control anthracnose in Mango Fruits. Research Square. Accessed 19 August 2024, https://www.researchsquare.com/article/rs-2419275/v1,

Huang, C., B. Zhang, S. Wang, L. Zhang, J. Wang, X. Huang, Y. Zhao, and L. Huang. 2018. Moisture-triggered release of self-produced ClO_2 gas from microcapsule antibacterial film system. Journal of Material Science. 53(18), 12704–12717.

Ihsanullah, I., and A. Rashid. 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.

Ikwan, W.W.M.R., S.L. Tham, M. Razali, R.N. Azlin, and A.M. Fikkri. 2021. Dynamic controlled atmosphere storage technique by means of chlorophyll fluorescence extends storage life of Chokanan mango. Journal of Tropical Agriculture and Food Science. 49(1), 1-12.

International Trade Centre. 2022. Mango Value Chain: West Africa Competitiveness Programme. Accessed 15 August 2024, https://westafricaconnect.com/uploads/2022/08.pdf.

Iqbal, S., M.A. Khan, M. Atiq, N.A. Rajput, M. Usman, A. Nawaz, G.A. Kachelo, A. Akram, and H. Ahmad. 2022. Mango anthracnose: Global status and the way forward for disease management. Journal of Innovative Sciences. 8(2), 222–235.

JAFTA (Japan Fumigation Technology Association). 2009. Principles and Features of the Vapor Heat Treatment System. Accessed 9 June 2020, http://www.nikkunkyo.or.jp/documents/vapor_ heat_en.pdf.

Jan, N.A., K.S. Subramanian, S. Ganapathy, J. Mohanraj, and K. Govindaraju. 2023. Nano-fiber enabled regulated release of hexanal vapor and its impact on shelf life of mango fruits. Polymer Bulletin. 80(1), 865–881.

Jayarajan, S., and R.R. Sharma. 2021. Melatonin: A blooming biomolecule for postharvest management of perishable fruits and vegetables. Trends in Food Science and Technology. 116, 318–328.

Johnson, G. I., J. L. Shape, D. L. Milne, and S. A. Oosthuyse. 1997. Postharvest Technology and Quarantine Treatment. *In*: Litz, R. E. (Ed.). The Mango: Botany, Production and Uses. CAB International, Oxon.

Kader, A. A. 2002. Postharvest Technology of Horticultural Crops. Oakland: University of California (Agriculture and Natural Resources).

Kebbeh, M., J.-X. Dong, H. Chen, L.I.U. Yan, and X.-L. Zheng. 2023. Melatonin treatment alleviates chilling injury in mango fruit

'Keitt' by modulating proline metabolism under chilling stress. Journal of Integrative Agriculture. 22(3), 935–944.

Khedr, E.H., and J.M. Al-Khayri. 2023. Synergistic effects of tragacanth and anti-ethylene treatments on postharvest quality maintenance of mango (*Mangifera indica* L.). Plants. 12(9), 1887.

Kongtragoul, P., K. Imamoto, and H. Ishii. 2020. Resistance to quinone-outside inhibitor (QoI) fungicides in *Colletotrichum* species isolated from anthracnose disease occurring in Thailand. Current Applied Science And Technology. 20(1), 79–89.

Konsue, W., T. Dethoup, and S. Limtong. 2020. Biological control of fruit rot and anthracnose of postharvest mango by antagonistic yeasts from economic crops leaves. Microorganisms. 8(3), 317.

Lauricella, M., S. Emanuele, G. Calvaruso, M. Giuliano, and A. D'Anneo. 2017. Multifaceted health benefits of *Mangifera* indica L. (Mango): The inestimable value of orchards recently planted in Sicilian rural areas. Nutrients. 9(5), 525.

Lei Yi, P. P., T. T. Soe, Y. Yamamoto, and K. T. D. Myint. 2019. Influences of different storage conditions on postharvest quality of mango (*Mangifera indica* L. cv. Sein Ta Lone). Advances in Nutrition and Food Science. 2019(5), 1-7.

Li, J., Y. Fu, J. Yan, H. Song, and W. Jiang. 2019. Forced air precooling enhanced storage quality by activating the antioxidant system of mango fruits. Journal of Food Quality. 2019(1), 1606058.

Li, R., J. Ma, H. Gu, W. Jia, Y. Shao, and W. Li. 2022. 1-Methylcyclopropene counteracts ethylene promotion of fruit softening and roles of MiERF2/8 and MiPG in postharvest mangoes. Frontiers in Plant Science. 13, 971050

Li, S., S. Zhang, Y. Lv, H. Zhai, N. Li, Y. Hu, and J. Cai. 2021. Metabolomic analyses revealed multifaceted effects of hexanal on *Aspergillus flavus* growth. Applied Microbiology and Biotechnology. 105(9), 3745–3757.

Liang, Y., J. Fu, S. Chao, Y. Tzean, C. Hsiao, Y. Yang, Y. Chen, and Y. Lin. 2022. Postharvest application of *Bacillus amyloliquefaciens* PMB04 fermentation broth reduces anthracnose occurrence in mango fruit.. Agriculture. 12(10), 1646.

Lieu, M.D., N.N.H. Ngo, T.L. Lieu, K.T. Nguyen, and T.K.T. Dang. 2018. The efficacy of combined application of edible coatings and essential oil in mango preservation. Vietnam Journal of Science and Technology. 56(4), 458–467.

Liu, B., Q. Xin, M. Zhang, J. Chen, Q. Lu, X. Zhou, X. Li, W. Zhang, W. Feng, H. Pei, and J. Sun. 2023. Research progress on mango post-harvest ripening physiology and the regulatory technologies. Foods. 12(1), 173.

Lokare, P., S. Fatima, and P.E. Jagdale. 2021. A review on the management practices of *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. & Sacc. causes anthracnose disease of mango. International Journal of Botany Studies. 6(5), 742-746.

Lurie, S. 2016. Prestorage heat stress to improve storability of fresh produce: a review.

Israel Journal of Plant Sciences. 63(1), 17–21.

Ma, W., L. Zhao, W. Zhao, and Y. Xie. 2019. (*E*)-2-hexanal, as a potential natural antifungal compound, inhibits *Aspergillus flavus* spore germination by disrupting mitochondrial energy metabolism. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 67(4), 1138–1145.

Malik, M.T., T. Tariq, A.H. Khan, H. Ullah, M. Imran, J. Iqbal, and A. Zainab. 2018. Outbreak of anthracnose and stem end rot diseases of mango in changing climate and their management through hot water treatment. Pakistan Journal of Phytopathology. 30(1), 91-98.

Mangoba, M.A.A., and D. de G. Alvindia. 2023. Potential use of *Myrtus guajava* (L.) Kuntze for the management of anthracnose disease of mango fruit. Indian Phytopathology. 76(1), 133–140.

Martinez, J., A. Gomez, C. Ramirez, J. Gil, and D. Durango. 2020. Controlling anthracnose by means of extracts, and their major constituents, from *Brosimum rubescens* Taub. Biotechnology Reports. 25, e00405.

Mathew, E.N., M.S. Muyyarikkandy, C. Bedell, and M.A. Amalaradjou. 2018. Efficacy of chlorine, chlorine dioxide, and peroxyacetic acid in reducing *Salmonella* contamination in wash water and on mangoes under simulated mango packinghouse washing operations. Frontiers in Sustainable Food Systems. 2, 18.

Mditshwa, A., O.A. Fawole, and U.L. Opara. 2018. Recent developments on dynamic controlled atmosphere storage of apples—A review. Food Packaging and Shelf Life. 16, 59–68.

Meena, S., S. Yadav, and M. K. Meena. 2020. Melatonin promotes post-harvest ripening and quality of fruits. Food and Scientific Reports. 1(7), 64-69.

Mendoza Orbegoso, E.M., P. Villar-Yacila, D. Marcelo, and J. Oquelis. 2017. Improvements in thermal performance of mango hot-water treatment equipment: data analysis, mathematical modeling and numerical- computational simulation. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 5(2), 219-239.

Mohapatra, S., L. Siddamallaiah, N.Y. Matadha, S. Gadigeppa, D.P. Raja, and V.R. Udupi. 2020. Persistence and dissipation study of azoxystrobin, buprofezin, dinocap and hexaconazole on mango (*Mangifera indica* L.). Environmental Science and Pollution Research. 27(26), 32820–32828.

Mohd Israfi, N.A., M.I.A. Mohd Ali, S. Manickam, X. Sun, B.H. Goh, S.Y. Tang, N. Ismail, A.F. Abdull Razis, S.E. Ch'ng, and K.W. Chan. 2022. Essential oils and plant extracts for tropical fruits protection: From farm to table. Front. Plant Science. 13, 999270.

Mora-Aguilera, J.A., E.G. Ríos-López, M. Yáñez-Zúñiga, A. Rebollar-Alviter, C. Nava-Díaz, S.G. Leyva-Mir, J.S. Sandoval-Islas, and J.M. Tovar-Pedraza. 2021. Sensitivity to MBC fungicides and prochloraz of *Colletotrichum gloeosporioides* species complex isolates from mango orchards in Mexico. Journal of Plant Diseases and Protection. 128(2), 481–491.

Narasimha Rao, K., S. Shareef, and R.B. Damarla. 2020. Mathematical modeling of cooling rates of mango fruits during unsteady state cooling in an artificial ripening chamber. Test Engineering and Management. 83, 6862–6871.

Ntsoane, M.L., A. Luca, M. Zude-Sasse, D. Sivakumar, and P.V. Mahajan. 2019b. Impact of low oxygen storage on quality attributes including pigments and volatile compounds in 'Shelly' mango. Scientia Horticulturae. 250, 174–183.

Ntsoane, M.L., M. Zude-Sasse, P. Mahajan, and D. Sivakumar. 2019a. Quality assessment and postharvest technology of mango: A review of its current status and future perspectives. Scientia Horticulturae. 249, 77–85.

Ovando-Martínez, M., C.A. Ruiz-Pardo, A.E. Quirós-Sauceda, G.R. Velderrain-Rodríguez, G.A. González-Aguilar, and J.F. Ayala-Zavala. 2016. Oxygen, Carbon Dioxide, and Nitrogen. *In*: Siddiqui, M., J. Ayala Zavala, C. A. Hwang. (Eds.). Postharvest Management Approaches for Maintaining Quality of Fresh Produce. Cham: Springer International Publishing.

Padmanabhan, P., A.S. Cheema, J.F. Todd, L.-T. Lim, and G. Paliyath. 2020. Ripening responses, fruit quality and phospholipase D gene expression in bell peppers exposed to hexanal vapor. Postharvest Biology and Technology. 170, 111317.

Paliyath, G. and J. Subramanian. 2008. Phospholipase D Inhibition Technology for Enhancing Shelf Life and Quality. *In*: Paliyath, G., D. P. Murr, A. K. Handa and S. Lurie. (Eds.). Postharvest Biology and Technology of Fruits, Vegetables, and Flowers. Ames: Wiley-Blackwell Publishing.

Pasilan, M., L. Secretaria, E.R. Bayogan, C.D. Lubaton, D. Dacera, and J.H. Ekman. 2020. Effect of rapid hot water treatment on some postharvest quality characteristics of Philippine 'Carabao' mango (*Mangifera indica* L.). South Western Journal of Horticulture. 11: 97-109.

Patel, K.K., M.A. Khan, Y. Kumar, and A.K. Yadav. 2019. Novel techniques in postharvest management of mango – an overview. South Asian Journal of Food Technology and Environment. 5(2), 821-835.

Perruchon, C., A. Chatzinotas, M. Omirou, S. Vasileiadis, U. Menkissoglou-Spiroudi, and D.G. Karpouzas. 2017. Isolation of a bacterial consortium able to degrade the fungicide thiabendazole: the key role of a Sphingomonas phylotype. Applied Microbiology and Biotechnology. 101(9), 3881–3893.

Phakdee, N., and P. Chaiprasart. 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.

Pols, S., B. Van De Poel, M.L.A.T.M. Hertog, and B.M. Nicolaï. 2022. The regulatory role of nitric oxide and its significance for future postharvest applications. Postharvest Biology and Technology. 188, 111869.

Preethi, P., K. Soorianathasundaram, A. Sadasakthi, K. S. Subramanian, G. Paliyath, and J. Subramanian. 2018.

Influence of hexanal formulation on storage life and postharvest quality of mango fruits. Journal of Environmental Biology. 39: 1006-1014.

Ranjith, F.H., S.H. Ariffin, B.J. Muhialdin, N.L. Yusof, N.K. Mohammed, A.A. Marzlan, and A.S.M. Hussin. 2022. Influence of natural antifungal coatings produced by Lacto-fermented antifungal substances on respiration, quality, antioxidant attributes, and shelf life of mango (*Mangifera indica* L.). Postharvest Biology and Technology. 189, 111904.

Ren, Y., Y. Xue, D. Tian, L. Zhang, G. Xiao, and J. He. 2020. Improvement of postharvest anthracnose resistance in mango fruit by nitric oxide and the possible mechanisms involved. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 68(52), 15460–15467.

Robert, P. B. and P. A. Follett. 2018. Food Irradiation for Phytosanitary and Quarantine Treatment. *In*: Ferreira, I.C.F.R., A.L. Antonio, and S.C. Verde (Eds). Food Irradiation Technologies: Concepts, Applications and Outcomes. Cambridge: Royal Society of Chemistry.

Rumainum, I.M., K. Worarad, V. Srilaong, and K. Yamane. 2018. Fruit quality and antioxidant capacity of six Thai mango cultivars. Agriculture and Natural Resources. 52(2), 208–214.

Sadau, E. T., and T. S. Chuah. 2022. Potential of *Pennisetum purpureum* weed extract on delaying of anthracnose pathogen disease development on mango fruits. Advances in Agricultural and Food Research Journal. 3(1), a0000292.

Shah, H.M.S., Z. Singh, E. Afrifa-Yamoah, M.U. Hasan, J. Kaur, and A. Woodward. 2024. Insight into the role of melatonin in mitigating chilling injury and maintaining the quality of cold-stored fruit and vegetables. Food Reviews International. 40(5), 1238–1264.

Shao, Y., J. Zeng, H. Tang, Y. Zhou, and W. Li. 2019. The chemical treatments combined with antagonistic yeast control anthracnose and maintain the quality of postharvest mango fruit. Journal of Integrative Agriculture. 18(5), 1159–1169.

Shrestha, S., B. Pandey, and B. Mishra. 2018. Effects of different plant leaf extracts on postharvest life and quality of mango (*Mangifera indica* L.). International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology. 3(2), 422–432.

Silué, Y., C. Nindjin, M. Cissé, K.A. Kouamé, N. ’guessan G. Amani, D. Mbéguié-A-Mbéguié, F. Lopez-Lauri, and K. Tano. 2022. Hexanal application reduces postharvest losses of mango (*Mangifera indica* L. variety “Kent”) over cold storage whilst maintaining fruit quality. Postharvest Biology and Technology. 189, 111930.

Singh, S., P.K. Maji, Y.S. Lee, and K.K. Gaikwad. 2021. Applications of gaseous chlorine dioxide for antimicrobial food packaging: a review. Environmental Chemistry Letters. 19(1), 253–270.

Sisler, E.C., and M. Serek. 1997. Inhibitors of ethylene responses in plants at the receptor level: Recent developments. Physiologia Plantarum. 100(3), 577–582.

Soliman, A.S., R.M.A. Helmy, I.N. Nasr, M.S. Abbas, H.A. Mahmoud, and W. Jiang. 2017. Behavior of thiophanate methyl and propiconazole in grape and mango fruits under the Egyptian field conditions. Bulletin in Environment Contamination and Toxicology. 98(5), 720–725.

Suasa-ard, S., W. Eakjamnong, and T. Dethoup. 2019. A novel biological control agent against postharvest mango disease caused by Lasiodioplodia theobromae. European Journal of Plant Pathology. 155(2), 583–592.

Sunitha, C., M. Madhavi, M. Sandhyarani, M. Jasmitha, B. Srinivasulu, and P.P. Kumar. 2022. Role of biostimulants in fruit crops: A review. The Pharma Innovation Journal. 11(8), 2041–2048.

Thai Agricultural Standard TAS 9002-2008. 2008. Pesticide residues: Maximum residue limits. National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, Ministry of Agriculture and Cooperatives. Accessed .8 August 2024, https://www.a-cfs.go.th/standard/download/eng/MRL.pdf.

Tiwari, R.K., R. Kumar, M.K. Lal, A. Kumar, M.A. Altaf, R. Devi, V. Mangal, S. Naz, M.M. Altaf, A. Dey, and T. Aftab. 2023. Melatonin-polyamine interplay in the regulation of stress responses in plants. 2022. Journal of Plant Growth Regulation. 42(8), 4834–4850.

Vilela, C., S.A.O. Santos, L. Oliveira, J.F. Camacho, N. Cordeiro, C.S.R. Freire, and A.J.D. Silvestre. 2013. The ripe pulp of *Mangifera indica* L.: A rich source of phytosterols and other lipophilic phytochemicals. Food Research International. 54(2), 1535–1540.

Vithana, M.D.K., Z. Singh, and S.K. Johnson. 2018. Cold storage temperatures and durations affect the concentrations of lupeol, mangiferin, phenolic acids and other health-promoting compounds in the pulp and peel of ripe mango fruit. Postharvest Biology and Technology. 139, 91–98.

Wu, V. C. 2016. Chlorine dioxide (ClO_2). *In*: Siddiqui, M.W., J. Ayala Zavala, and C. A. Hwang (Eds.). Postharvest Management Approaches for Maintaining Quality of Fresh Produce. Cham: Springer International Publishing.

Yasunaga, E., S. Fukuda, M. Nagle, and W. Spreer. 2018. Effect of storage conditions on the postharvest quality changes of fresh mango fruits for export during transportation. Environmental Control of Biology. 56(2), 39–44.

Yimyong, S., T.U. Datsenka, A.K. Handa, and K. Seraypheap. 2011. Hot water treatment delays ripening-associated metabolic shift in ‘Okrong’ mango fruit during storage. Journal of the American Society for Horticultural Science. 136(6), 441–451.

Yuan, F., C. Wang, P. Yi, L. Li, G. Wu, F. Huang, M. Huang, and T. Gan. 2023. The effects of combined 1-methylcyclopropene and melatonin treatment on the quality characteristics and active oxygen metabolism of mango fruit during storage. Foods. 12(10), 1979.

Yunita, R., R. Poerwanto and S. Wiyono, 2018. Biological control of postharvest disease

of mango by using antagonistic microorganism. *In*: Proceedings of the International Seminar on Tropical Horticulture, Bogor. 10th December 2018.

Zhang, B., C. Huang, L. Zhang, J. Wang, X. Huang, Y. Zhao, Y. Liu, and C. Li. 2019. Application of chlorine dioxide microcapsule sustained-release antibacterial films for preservation of mangos. Journal of Food Science and Technology. 56(3), 1095–1103.

Zhao, F., J. Liu, D. Xie, D. Lv, and J. Luo. 2018. A novel and actual mode for study of soil degradation and transportation of difenoconazole in a mango field. RSC Adv. 8(16), 8671–8677.

Zhou, W., Y. He, F. Liu, L. Liao, X. Huang, R. Li, Y. Zou, L. Zhou, L. Zou, Y. Liu, R. Ruan, and J. Li. 2021. Carboxymethyl chitosan-pullulan edible films enriched with galangal essential oil: Characterization and application in mango preservation. Carbohydrate Polymers. 256, 117579.