



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง การศึกษาการตกค้างของซัลเฟอร์ในผลลำไย หลังการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการวิเคราะห์การกระจายตัวและ
หาตำแหน่งของธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์

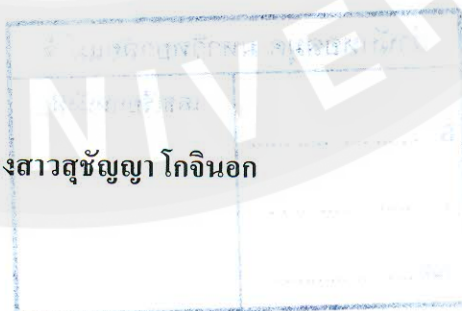
The Study on Sulfur residue in Longan Fruit after Sulfur Dioxide Fumigation by
Scanning Electron Microscope and X-ray Mapping Analysis

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2558

จำนวน 113,800 บาท

หัวหน้าโครงการ

นางสาวสุชนูญา โกจิณอก



งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

30 กันยายน 2559

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง การศึกษาการตกค้างของซัลเฟอร์ในผลลำไย หลังการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการวิเคราะห์การกระจายตัวและหาตำแหน่งของธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ ได้สำเร็จลุล่วงโดยได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2558

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์จักรพงษ์ พิมพ์พิมล อาจารย์ที่ปรึกษาการวิจัย ที่ได้ช่วยกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำในการวางแผนดำเนินการวิจัย ตลอดจนช่วยสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์สำหรับการวิจัย จนกระทั่งการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บุคลากรจาก สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร สถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนอำนวยความสะดวกสำหรับการใช้สถานที่ วัสดุอุปกรณ์สำหรับการวิจัย รวมทั้งช่วยประสานงานทางด้านเอกสารทางราชการในการติดต่อกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่เป็นกำลังใจให้จนทำให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

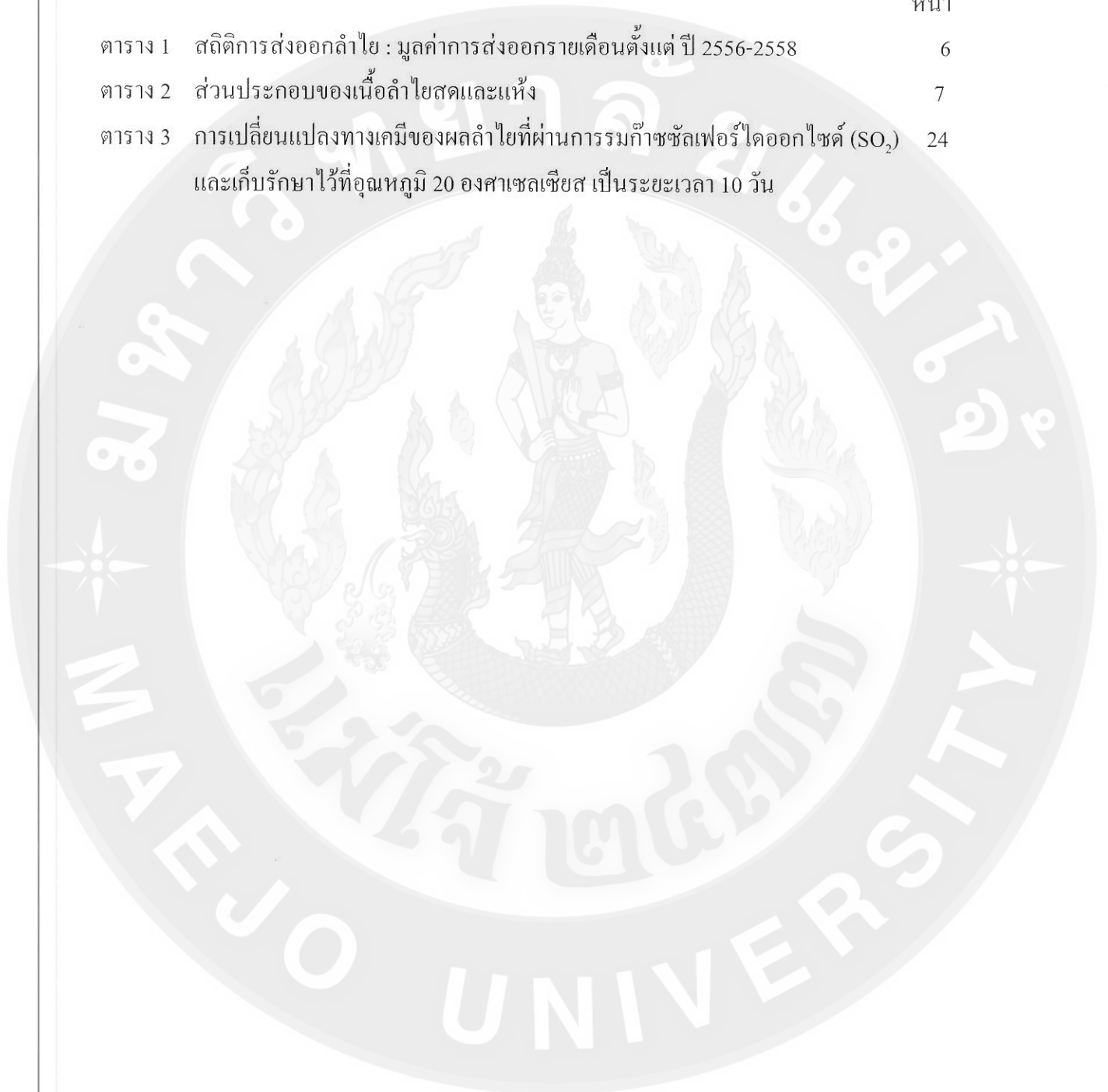
ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ข
สารบัญภาพ	ค
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
คำนำ	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการวิจัย	15
การดำเนินการวิจัย	16
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	21
สรุปผลการวิจัย	30
เอกสารอ้างอิง	31

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 สถิติการส่งออกผลไม้ : มูลค่าการส่งออกรายเดือนตั้งแต่ปี 2556-2558	6
ตาราง 2 ส่วนประกอบของเนื้อลำไยสดและแห้ง	7
ตาราง 3 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของผลลำไยที่ผ่านการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂) และเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 วัน	24



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 ส่วนประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	11
ภาพ 2 การเกิดอันตรกิริยาที่สำคัญบนชิ้นงานตัวอย่าง	13
ภาพ 3 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นโคจรต่าง ๆ	14
ภาพ 4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของผลลำไยที่ไม่ผ่านการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) 21 และเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	22
ภาพ 5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของผลลำไยที่ผ่านการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) 22 และเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	26
ภาพ 6 ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของผลลำไย	27
ภาพ 7 ตำแหน่งและการกระจายตัวของธาตุต่างๆที่สะสมอยู่บริเวณเปลือกและเนื้อของผลลำไยสด	29
ภาพ 8 ตำแหน่งและการกระจายตัวของซัลเฟอร์ (S) ที่สะสมอยู่บริเวณเปลือกและเนื้อของผลลำไยสดหลังการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 20 °C เป็นเวลา 10 วัน	

การศึกษาการตกค้างของซัลเฟอร์ในผลลำไย หลังการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการวิเคราะห์

การกระจายตัวและตำแหน่งของธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์

The Study on Sulfur residue in Longan Fruit after Sulfur Dioxide Fumigation by
Scanning Electron Microscope and X-ray Mapping Analysis

สุชญญา โกจินอก

Suchanya Kojinok

สถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของผลลำไยสดหลังผ่านการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง (Vertical forced-air) และทำการเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน พบว่า การรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) กับผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลลำไยสดได้ และทำให้มีการตกค้างของปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ภายหลังสิ้นสุดการรม เหลือตกค้างอยู่ในเปลือกและเนื้อผล มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1884.84 และ 47.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ภายหลังทำการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 10 วัน ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) มีค่าลดลงทั้งในเปลือกและเนื้อผล มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1203.14 และ 0.87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ผลการวิเคราะห์หาการกระจายตัวและตำแหน่งการสะสมของธาตุซัลเฟอร์ (S) โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยเทคนิค ESEM ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานด้วยรังสีเอ็กซ์ (EDX) สามารถยืนยันตำแหน่งการตกค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในผลลำไยระหว่างทำการเก็บรักษาได้ ซึ่งธาตุซัลเฟอร์ (S) ที่ตรวจพบจะมีการตกค้างและสะสมอยู่ในบริเวณเปลือกมากกว่าในเนื้อผล ตำแหน่งของธาตุซัลเฟอร์ (S) จะมีการสะสมลดลงตลอดอายุการเก็บรักษา และยังคงตรวจพบได้ทั้งในเปลือกและเนื้อผล หลังทำการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 10 วัน

คำสำคัญ: ลำไย ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Abstract

In this study, the physical and chemical properties of longan fruit were analyzed after SO₂ fumigation with the vertical force-air circulation system and stored at 20 °C for 2, 4, 6, 8 and 10 days. The SO₂ fumigation could maintain the post-harvest quality of longan along the storage durations. The application of vertically forced circulation for SO₂ fumigation has reduced the dosage of SO₂ residue immediately after fumigation of longan fruit, the SO₂ residue was found in the peel and pulp of 1884.84 and 47.13 mg·kg⁻¹. The SO₂ residue was significantly decreased after stored for 10 days. The SO₂ residue on the peel tissue of 1203.14 mg·kg⁻¹, while the SO₂ residue in the pulp of 0.87 mg·kg⁻¹. The environmental scanning electron microscopy (ESEM) equipped with an energy dispersive X-ray microanalysis (EDX) was applied to observe the morphology and elemental analysis on fresh longan fruit after the force-air circulation system of SO₂ fumigation. X-ray mapping showed the sulfur residues on the peel and the pulp tissue. The result indicated that sulfur residues were accumulated on the peel and the pulp tissue and were decreased along the storage durations. However, sulfur residues were detected in the peel and the pulp tissue after the storage durations for 10 days. This study reveals that the ESEM and EDX can be used to support on the observation of SO₂ residues on fresh longan fruit.

Keyword: Longan, Force-air circulation system, ESEM-EDX

คำนำ

การรมผลลำไยด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่ได้จากการเผาฟางมะถัน หรือการใช้สารประกอบเกลือซัลไฟด์ เป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้ผลดีสำหรับการยืดอายุการเก็บรักษาผลลำไย ซึ่งก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีฤทธิ์เป็นกรด สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์สาเหตุของการเน่าเสียได้ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการฟอกสีและช่วยป้องกันการเกิดสีน้ำตาลภายหลังการเก็บเกี่ยว ทำให้ผลลำไยมีสีผิวที่สวยงาม (จริงแท้, 2538) การรมผลลำไยสดด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ร่วมกับการเก็บรักษาผลลำไยที่อุณหภูมิต่ำ เป็นแนวทางในการยืดอายุหลังการเก็บเกี่ยวของผลผลิตลำไยได้ดีที่สุด โดยลำไยที่ผ่านการรมด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะมีอายุการเก็บรักษาได้นานเกิน 6 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 0-2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 90-95 เปอร์เซ็นต์ การเก็บรักษาลำไยที่อุณหภูมิ 4-5 องศาเซลเซียส ภายหลังการรมสามารถเก็บไว้ได้นาน 50 วัน (พาวันและคณะ, 2547) อย่างไรก็ตามการรมผลลำไยด้วย SO_2 มักพบปัญหาการตกค้างในผลลำไยสูงเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ ซึ่งแต่ละประเทศกำหนดปริมาณการตกค้างของ SO_2 ในผลผลิตลำไยแตกต่างกันไป ซึ่งสถาบันอาหารได้กำหนดมาตรฐานปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในเปลือกหลังการรมแล้วต้องมีไม่เกิน 1,700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และกรมวิชาการเกษตรได้กำหนดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในเนื้อหลังการรมแล้วต้องมีไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมวิชาการเกษตร, 2545)

จากปัญหาที่เกิดขึ้นทำให้เกิดความไม่เชื่อมั่นจากผู้บริโภคต่างชาติมากขึ้น เป็นอุปสรรคสำคัญต่อการส่งออกลำไยเป็นอย่างมาก ซึ่งต้องการดำเนินการแก้ไขอย่างเร่งด่วน โดยการตกค้างของสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่สูง อาจมาจากสาเหตุหลายประการ เช่น ห้องรมที่สร้างไม่ได้ตามมาตรฐาน การปฏิบัติของคณงาน รวมถึงความต้องการผลลำไยที่มีสีส้มสวยงามโดยไม่ตระหนักถึงปริมาณสารตกค้าง ทำให้การรมในปัจจุบันไม่สามารถควบคุมหรือตรวจสอบได้เท่าที่ควร หากประเทศคู่ค้าปลายทางเข้มงวดกับการตรวจสอบสารพิษตกค้าง การส่งออกลำไยสดอาจถึงจุดวิกฤติได้

จากปัญหาการตกค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากเกินไปเกินมาตรฐาน ทำให้มีการศึกษาการนำเอาเทคโนโลยีต่างๆ มาช่วยลดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างในผลลำไยภายหลังสิ้นสุดการรมมากขึ้น เช่น การพัฒนาวิธีการล้างลำไยด้วยระบบน้ำไหล การแช่ในน้ำที่ผ่านโอโซน การนำเอาระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ (Forced-air) มาใช้ เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ สามารถช่วยลดระดับความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างอยู่บนเปลือกและในเนื้อผลให้มีความเข้มข้นอยู่ในระดับที่ต่ำกว่ามาตรฐาน หรืออยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยพบว่า การตกค้างของ SO_2 ส่วนใหญ่จะพบอยู่บนเปลือกมากกว่าในเนื้อผล ซึ่งปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างอยู่นั้นจะมีปริมาณลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา สอดคล้องกับการรายงานการวิจัยก่อนหน้านี้ของภูมิพัฒน์

(2547) ที่ได้ศึกษาการพัฒนากระบวนการรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับผลลำไยสดด้วยถังอัดความดัน โดยตรงเพื่อหาปริมาณการตกค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในผลลำไยทันทีหลังผ่านการรม และหลังจากการนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 วัน พบว่า เมื่อให้ระดับความเข้มข้นหลังจากสิ้นสุดการรมเท่ากับ 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะทำให้มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในส่วนเปลือกและเนื้อผลหลังการรมทันทีประมาณ 1,020 และ 0.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และพบว่าภายหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 5 วัน ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างในเปลือกผลจะมีค่าลดลง มีปริมาณเท่ากับ 749 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และไม่พบการตกค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเนื้อผล เช่นเดียวกับการรายงานการวิจัยของ จักรพงษ์ และคณะ (2550) ที่ได้ทำการพัฒนากระบวนการรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับผลลำไยสดที่ได้จากการเผาฟางกำมะถัน โดยนําระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air มาใช้ให้มีระดับความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์หลังจากสิ้นสุดการรมเท่ากับ 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 วัน พบว่า ระดับความเข้มข้นของปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในเปลือกผลหลังจากการรมทันทีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,260-1,520 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และไม่พบการตกค้างปริมาณของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในส่วนของเนื้อผล โดยภายหลังการเก็บรักษาที่ 20 วัน พบว่า ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในเปลือกจะมีค่าลดลง เท่ากับ 355 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตาม ระดับความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ลดลงนั้น ยังคงเป็นระดับความเข้มข้นที่สูงเกินกว่าที่ร่างกายของมนุษย์จะรับได้

ดังนั้น งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาหาปริมาณและตำแหน่งการสะสมของซัลเฟอร์ที่ตกค้างอยู่ในส่วนเปลือก และเนื้อผล ภายหลังการรมลำไยด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) ร่วมกับการวิเคราะห์การกระจายตัวและหาตำแหน่งของธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Mapping) เพื่อนำความรู้ที่ได้รับไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวัสดุดูดซับ หรือพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติในการกำจัดหรือลดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ยังคงตกค้างอยู่ในผลลำไยให้หมดไประหว่างการเก็บรักษาก่อนที่จะมีการส่งออกได้ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาปริมาณและตำแหน่งการสะสมของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างเหลืออยู่ในบริเวณเปลือก และเนื้อของผลลำไยสดภายหลังการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยวิธีหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ (forced-air) โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ร่วมกับการวิเคราะห์การกระจายตัวและหาตำแหน่งของธาตุด้วยรังสีเอกซ์ (X-Ray Mapping)
2. เพื่อนำความรู้ที่ได้รับไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุดูดซับ หรือออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติที่สามารถกำจัดหรือลดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างเหลืออยู่ในผลลำไยสดระหว่างการเก็บรักษาก่อนทำการส่งออกได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบตำแหน่ง และบริเวณการสะสมของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เหลือตกค้างอยู่บริเวณส่วนต่างๆในผลลำไยสด ภายหลังการยืดอายุการเก็บรักษาด้วยกระบวนการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
2. สามารถนำความรู้ที่ได้รับไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์บรรจุลำไยสดที่มีคุณสมบัติกำจัดหรือลดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง ภายหลังการจัดการและรักษาคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวด้วยกระบวนการรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อไปได้โดยมีภาครัฐและภาคเอกชนร่วมมือกัน
3. สามารถนำความรู้ที่ได้รับไปใช้ศึกษา ปรับปรุง พัฒนา หรือเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการลดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในผลผลิตลำไย ตลอดจนสามารถถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับภาคเกษตรกร จนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมการส่งออกลำไยได้

การตรวจเอกสาร

1. ลำไย

ลำไย (*Dimocarpus longan* Lour.) จัดเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในหลายประเทศของภูมิภาคเอเชีย ได้แก่ ไทย จีน อินเดีย และเวียดนาม สำหรับประเทศไทยลำไยเป็นผลไม้ทางเศรษฐกิจที่รัฐบาลให้ความสำคัญมากจัดเป็นสินค้าเพื่อการส่งออกที่มีมูลค่าสูงและมีแนวโน้มของปริมาณการส่งออกสูงขึ้นทุกปี โดยลำไยสดมีมูลค่าการส่งออกสูงที่สุด รองลงมาเป็น ลำไยอบแห้ง ลำไยแช่แข็ง และลำไยกระป๋อง ตามลำดับ ปัจจุบันตลาดการส่งออกลำไยที่สำคัญ ได้แก่ จีนฮ่องกง อินโดนีเซีย อินเดีย ไต้หวัน มาเลเซียและสิงคโปร์

ตาราง 1 สถิติการส่งออกลำไย : มูลค่าการส่งออกรายเดือนตั้งแต่ ปี 2556-2558

เดือน	มูลค่าการส่งออกลำไยทั้งหมด		
	ปี 2556	ปี 2557	ปี 2558
มกราคม	1,683,083,545	1,475,897,967	1,855,122,021
กุมภาพันธ์	620,196,070	809,427,056	940,563,764
มีนาคม	876,905,962	1,063,499,562	1,226,307,067
เมษายน	600,601,965	619,342,369	469,657,043
พฤษภาคม	217,127,449	330,699,267	270,287,260
มิถุนายน	280,603,113	92,111,720	180,127,383
กรกฎาคม	1,068,340,874	1,292,487,957	702,516,752
สิงหาคม	2,025,095,685	3,124,422,789	1,926,388,422
กันยายน	1,295,176,445	1,760,392,207	1,752,588,859
ตุลาคม	1,085,560,382	1,082,626,572	1,331,103,462
พฤศจิกายน	1,147,206,377	815,540,660	1,796,178,310
ธันวาคม	2,272,123,814	1,585,577,629	3,362,303,498
รวม	13,172,021,681.00	14,052,025,755.00	15,813,143,841.00

ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2558)

ลำไยสามารถปลูกได้ทั่วไปในประเทศไทย แต่พบปลูกมากในแถบภาคเหนือ โดยเฉพาะพื้นที่ในจังหวัดลำพูนและเชียงใหม่ เป็นแหล่งผลิตลำไยสดมากที่สุดของประเทศ ลำไยเป็นผลไม้ที่มีอายุการเก็บรักษาค่อนข้างสั้น อายุการวางจำหน่าย (shelf life) ของผลลำไยสดประมาณ 2-3 วันเท่านั้น โดยไม่มีการใช้เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สาเหตุสำคัญที่ทำให้ผลลำไยสดมีอายุการเก็บรักษาสั้น ส่วนใหญ่เริ่มจากมีอาการเปลือกแห้งและเปลี่ยนเป็นสีคล้ำหรือสีน้ำตาล (browning) ของเปลือกผลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอล ซึ่งเป็น substrate จากกิจกรรมของเอนไซม์ polyphenol oxidase (PPO) และ peroxidase (POD) ก่อให้เกิดสารประกอบสีน้ำตาลขึ้น (Jiang, 1999; Jiang and Li, 2001) นอกจากนี้ การเสื่อมสภาพของลำไยจากการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์จึงทำให้เกิดการเน่าเสียได้ง่าย เชื้อจุลินทรีย์ที่สำคัญได้แก่ *Botryodiplodia* spp. และ *Penicillium* sp. พบมากหากเก็บรักษาลำไยไว้ที่อุณหภูมิปกติเป็นระยะเวลานาน (ชิงชิง, 2535)

ตาราง 2 ส่วนประกอบของเนื้อลำไยสดและแห้ง

ส่วนประกอบของลำไย	เนื้อลำไยสด	เนื้อลำไยแห้ง
ความชื้น (ร้อยละ)	81.10	17.80
ไขมัน (ร้อยละ)	0.11	0.40
เส้นใย (ร้อยละ)	0.28	1.60
โปรตีน (ร้อยละ)	0.97	4.60
เถ้า (ร้อยละ)	0.56	2.86
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	16.98	72.70
พลังงานความร้อน(กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม)	72.79	311.80
แคลเซียม (มิลลิกรัมต่อ100 กรัม)	5.70	27.70
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อ100 กรัม)	0.35	2.39
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อ100 กรัม)	35.30	159.50
วิตามินซี (มิลลิกรัมต่อ100 กรัม)	69.20	137.80
โซเดียม (มิลลิกรัมต่อ100 กรัม)	-	4.50
โพแทสเซียม(มิลลิกรัมต่อ100 กรัม)	-	2,012.00
ไนอาซิน (มิลลิกรัมต่อ100 กรัม)	-	3.03
วิตามินบี (มิลลิกรัมต่อ100 กรัม)	-	0.375

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร (2548)

เนื่องจากลำไยเป็นผลไม้ชนิดที่มีปริมาณน้ำตาลสูง จึงส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดี องค์ประกอบหลักของเนื้อลำไยส่วนใหญ่เป็นซัสเตรท ที่ละลายน้ำได้ เท่ากับ 79-77 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประกอบด้วย กลูโคส 26.91 เปอร์เซ็นต์ ซูโครส 0.22 เปอร์เซ็นต์ กรดทาทาริก 1.26 เปอร์เซ็นต์ สารประกอบไนโตรเจน 6.31 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 5.6 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 0.5 เปอร์เซ็นต์ และธาตุอาหารอื่นๆ เช่น Ca, Fe, P, Na, K และวิตามิน แสดงดังตาราง 2

2. การรมลำไยด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂)

การรมลำไยด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) สามารถแก้ปัญหาลำไยเสื่อมสภาพของผลลำไยภายหลังการเก็บเกี่ยวได้ซึ่งสีผิวเปลือกที่เปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลคล้ำอย่างรวดเร็วภายใน 2-3 วัน ทำให้ผลลำไยมีราคาต่ำลงได้ การรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับผลลำไยสด มีรายงานว่า สามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ เชื้อรา และแมลง รวมทั้งช่วยฟอกสี ทำให้ผลลำไยสวยงาม ลดการเน่าเสียและมีอายุหลังเก็บเกี่ยวที่ยาวนานขึ้น (Su *et al.*, 2005) การนำ SO₂ มาใช้ในกระบวนการรมผลลำไยสดเชิงพาณิชย์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา มีอยู่หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งานหรือระยะเวลาในการเก็บรักษาผลิตผล โดยทั่วไปมีอยู่ 3 รูปแบบ คือ การเผาผงกำมะถัน การใช้ก๊าซ SO₂ โดยตรงจากถังอัดความดัน และการใช้สารประกอบเกลือซัลไฟต์ซึ่งแตกตัวให้ SO₂

การรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ร่วมกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ ยังสามารถยับยั้งการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลของเปลือกได้ โดยการยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์โพลีฟีนอล ออกซิเดส (Polyphenol Oxidase: PPO) อย่างไรก็ตาม พบว่าการใช้ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกินมาตรฐานที่กำหนดจะทำให้คุณภาพของลำไยลดลงไปด้วย (Jiang, 1999) จากการศึกษาของ Han และคณะ (2001) พบว่า ผลลำไยพันธุ์ Shixia ที่รมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นาน 15, 20 และ 30 นาที แล้วนำมาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะสามารถเก็บได้นาน 60 วัน นอกจากนี้ Wilasinee (2010) ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงทางกายวิภาค ทางกายภาพ และทางชีวเคมีของลำไยพันธุ์เบ๊ยวเขียวและพันธุ์ดอหลังการรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่า การรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกและเนื้อของลำไย การเก็บรักษาลำไยที่อุณหภูมิ 2 ± 2 องศาเซลเซียส สามารถช่วยยับยั้งการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลของเปลือกได้ อย่างไรก็ตาม ภายหลังการเก็บรักษาพบปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีปริมาณสูงในเปลือกและเนื้อของพันธุ์เบ๊ยวเขียว มีค่าเท่ากับ 900.20 และ 0.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับพันธุ์ดอ พบปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเปลือกเท่านั้น มีค่าเท่ากับ 350 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ในปัจจุบันการแข่งขันทางการค้าของการส่งออกผลลำไยมีมากขึ้นทำให้ผู้ประกอบการบางรายมีการใช้ปริมาณ SO₂ ความเข้มข้นสูงเกินกว่าที่กำหนดไว้เพื่อให้เปลือกลำไยมีสีเหลืองทอง

สามารถดึงดูดใจผู้บริโภคให้มีความสนใจกับผลลำไยของตนเองมากขึ้นส่งผลให้การส่งออกลำไยพบการตกค้างของสาร SO_2 ในเปลือกและเนื้อเพิ่มมากขึ้นจากข้อมูลการสำรวจการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์รมลำไยสดของผู้ประกอบการในจังหวัดเชียงใหม่และลำพูนพบว่า ความเข้มข้นของสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เหลืออยู่ในห้องรมหลังสิ้นสุดการรมตามที่ใช้ประกอบการใช้กันอยู่คือ 15,000-20,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และจากการสำรวจโรงรมในภาคเหนือจำนวน 16 โรง ในปี 2550 พบการตกค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเนื้อเปลือกและทั้งผลเท่ากับ 141, 518 และ 217 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (พงศ์พันธุ์และคณะ, 2551) ซึ่งเกณฑ์สูงสุดที่ยอมให้ตรวจพบ (maximum residue levels, MRLs) ได้กำหนดไว้ในเนื้อผลต้องไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับลำไยส่งออกไปยังสาธารณรัฐประชาชนจีนสำหรับลำไยที่ส่งไปขายในประเทศกลุ่มยุโรป ญี่ปุ่นและแคนาดาจะต้องไม่มีสารตกค้าง (สำนักงานวิจัยและพัฒนาเกษตรเขตที่ 1, 2551) และจากรายงานก่อนหน้านี้เกี่ยวกับสถานการณ์ของปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยของจังหวัดเชียงใหม่และลำพูน พบว่า มีการตกค้างของปริมาณ SO_2 มากถึงร้อยละ 80 ของตัวอย่างที่เก็บมาทั้งหมด พบการตกค้างในเปลือกมากกว่า 1,700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และยังมีการตกค้างในเนื้อถึง 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ธีรนุช และคณะ, 2548) เป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาภัยคุกคามทางการค้าจากประเทศคู่ค้า ทำให้การส่งออกลำไยสดไปยังต่างประเทศยากขึ้นกว่าเดิมและหากมีปริมาณสารตกค้างมากเกินไปจะสามารถทำให้เกิดอาการแพ้และเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคได้ทำให้มีแนวโน้มว่า ประเทศผู้นำเข้าลำไยหลายประเทศประกาศห้ามใช้สารประกอบซัลไฟท์ (sulfite agents) หรือให้ใช้ได้ปริมาณที่น้อยลงซึ่งคณะกรรมการอาหารระหว่างประเทศ (Codex) กำหนดให้ปริมาณ SO_2 ตกค้างในเนื้อผลได้ไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (สถาบันอาหาร, 2541)

3. ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ (Forced-air)

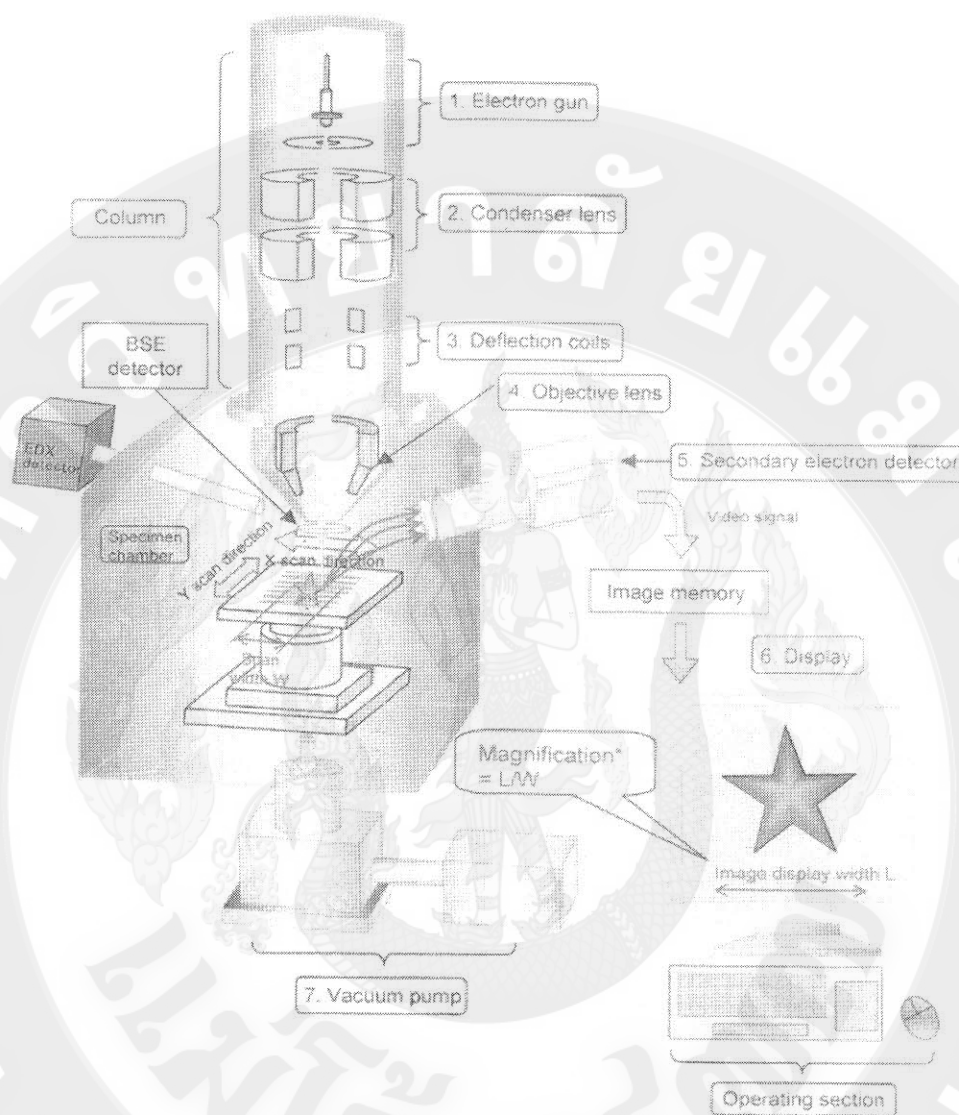
ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ (Forced-air) ถูกนำมาใช้ในกระบวนการลดอุณหภูมิของผลิตผลทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว โดยมีการนำมาใช้เพื่อเชิงการค้าครั้งแรกกับผลองุ่นสดเพื่อส่งขายในสหรัฐอเมริกา (Watkins, 1990) ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ จะแตกต่างกับระบบห้องเย็นทั่วไป คือ มีความแตกต่างระหว่างความดันทั้ง 2 ด้านของบรรจุภัณฑ์ ก่อให้เกิดการดึงอากาศให้ผ่านเข้าไปด้านใน จำเป็นต้องใช้ร่วมกับบรรจุภัณฑ์ที่ถูกออกแบบให้มีช่องสำหรับให้อากาศไหลผ่าน โดยมีทิศทางไหลที่แน่นอน เป็นลักษณะการทำความเย็นที่ใช้ทั้งคุณสมบัติของการนำและการพาความร้อนในระบบเดียวกัน ก่อให้เกิดการไหลเวียนของอากาศได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอจากการศึกษาของ Luvisi *et al.* (1992) ได้นำระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับมาใช้ในกระบวนการรม SO_2 กับผลองุ่นเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและยับยั้งการเน่าเสียของที่เกิดจากเชื้อรา

Botrytis cinerea โดยใช้ก๊าซ SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงร่วมกับระบบบังคับอากาศแบบอุโมงค์ลม (tunnel) หรือการบังคับอากาศแบบแนวนอน พบว่า วิธีการนี้สามารถลดระดับความเข้มข้นของ SO_2 ที่นำมาใช้รมผลองุ่นสดได้ประมาณ 2 เท่า เมื่อเทียบกับการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบปกติ ส่งผลให้มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในเนื้อผลองุ่นไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ยังมีการรายงานการนำเอาระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับมาใช้เพื่อลดอุณหภูมิและยืดอายุการเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวของผลสตอเบอรี่ (Ferrua and Singh, 2009) และแอฟริคอต (Agar *et al.*, 2006)

ในประเทศไทย มีการศึกษานำเอาระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ (Forced-air) มาดัดแปลงใช้ในกระบวนการรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับผลลำไยสด การนำเอาระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับแนวตั้ง (vertical forced-air) มาใช้ในกระบวนการรม สามารถทำให้เกิดระบบการหมุนเวียนของอากาศผ่านเข้าไปในตะกร้าบรรจุลำไยได้มากขึ้น ทำให้แก๊สมีโอกาสดูดซับกับผลลำไยได้ดีกว่าการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบปกติ (circulating-air) ทำให้สามารถลดการใช้ปริมาณแก๊สลงได้ ส่งผลให้มีการตกค้างของปริมาณ SO_2 ในผลลำไยลดลงพบว่า สามารถลดความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ 5 เท่า โดยผลลำไยยังคงมีคุณภาพและอายุการเก็บรักษาได้เช่นเดียวกันการนำเอาระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับมาใช้ในกระบวนการรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาฟางมะถันและจากถังอัดความดันโดยตรง และทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 20 วัน พบว่า สามารถป้องกันการเกิดโรค และการเกิดสีน้ำตาลที่เปลือกผลลำไยได้ โดยการเผาฟางมะถันมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในส่วนของการรมที่เฉลี่ยประมาณ 1,260-1,520 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และไม่พบปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในส่วนเนื้อผล ส่วนการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากถังอัดความดันโดยตรง ทำให้มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในส่วนของการรมที่เฉลี่ยประมาณ 1,390-1,470 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และไม่พบปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในส่วนเนื้อผลเช่นกัน (จักรพงษ์และคณะ, 2550)

4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า กล้อง SEM เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับใช้ศึกษาลักษณะโครงสร้างของพื้นผิว ขนาด และอนุภาคได้โดยตรง การสร้างภาพทำโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าของตัวอย่าง ลักษณะภาพที่ได้เป็น 3 มิติ สามารถใช้เปรียบเทียบและแยกลักษณะจำเพาะ รวมถึงใช้ศึกษาความหลากหลายของธาตุที่สะสมและกระจายอยู่ภายในสิ่งลงไปในระดับไมครอนได้ (Szynkowska, 2005)



ภาพ 1 ส่วนประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุจากการกระจายตัวของพลังงานด้วยรังสีเอ็กซ์ (Energy dispersive X-ray spectroscopy) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ศึกษาสัณฐานวิทยาในเนื้อเยื่อพืชกันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะส่วนของใบและราก จากการรายงานของ Krause and Dochinger (1987) ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดศึกษาผลของการสะสมซัลเฟอร์ในเนื้อเยื่อใบเรดเมเปิล หลังได้รับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน พบว่า ใบเรดเมเปิลที่ผ่านการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะยังคงมีธาตุซัลเฟอร์สะสมและกระจายตัวอยู่ในส่วนของ chloroplast ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เซลล์แตกในเวลาต่อมา จาก

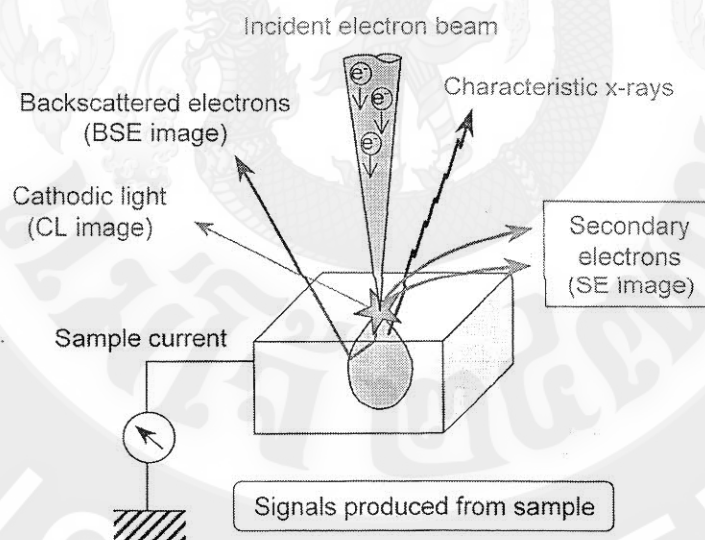
การรายงานของ Williams *et al.* (2002) ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการวิเคราะห์ตำแหน่งและการกระจายพลังงานด้วยรังสีเอ็กซ์ ศึกษาปริมาณการสะสมของซัลเฟอร์และไทออลในต้นมะเขือเทศหลังได้รับเชื้อก่อโรค พบว่า ต้นมะเขือเทศจะสร้างเอนไซม์ที่ผลิตซัลเฟอร์ในการเป็นสารไฟโตอเล็กซิน (Phytoalexin) สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อก่อโรคได้ และจากการรายงานของ Chiraporn *et al.* (2013) ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการวิเคราะห์ตำแหน่งและการกระจายพลังงานด้วยรังสีเอ็กซ์ ในการศึกษาลักษณะเฉพาะของเปลือกกล้วยหลังทำการทดลองดูดซับสารละลายทองแดงด้วยเปลือกกล้วย พบว่า เปลือกกล้วยมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และพบธาตุทองแดงปรากฏอยู่ที่บริเวณผิวเปลือก ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่แสดงด้วยภาพและพิกัดสัญญาณของธาตุทองแดงที่ปรากฏ สามารถใช้ยืนยันปฏิกิริยาการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการวินิจฉัยทางโรคพืชได้อีกด้วย (Pitman *et al.*, 1981; Koroleva *et al.*, 2000; Fernando *et al.*, 2006)

4.1 หลักการทำงาน

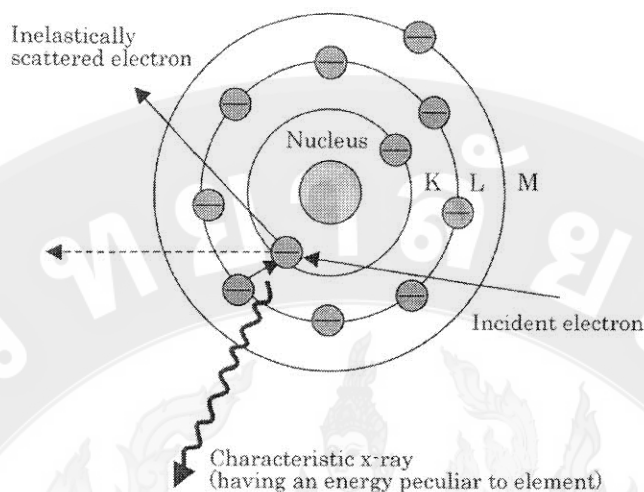
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) เพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (1,000-3000 อิเล็กตรอนโวลต์ หรือมากกว่า) ที่สามารถปรับค่าได้ จากนั้นจึงถูกดึงดูดลงสู่เบื้องล่างโดยแผ่นแอโนด (anode plate) ภายใต้ความดันสุญญากาศ 10^{-3} - 10^{-8} ทอร์ จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์วัตถุ (objective lens) ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอน (electron beam) ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน ให้มีจุดโฟกัสตกบนผิวตัวอย่างพอดี ลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัตถุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5-200 นาโนเมตร โดยมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (scan coil) ของลำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดได้โดยผ่านทางชุดควบคุม (control unit) ขณะที่ลำอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุในวัตถุหรือตัวอย่างและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ขึ้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่างๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal) ชนิดต่างๆ ออกมา ซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาลักษณะผิวของตัวอย่าง และวิเคราะห์ธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ (วีระศักดิ์และคณะ, 2543)

4.2 การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray analysis)

การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้ระบบการวิเคราะห์แบบการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ มีหลักการวิเคราะห์ คือ เมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงขึ้นเกิน พลังงานยึดเหนี่ยวของชั้นโคจรจึงหลุดออกจากวงโคจรและทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร จากนั้นอะตอมที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในช่วงระยะเวลาอันสั้นประมาณ 10-15 วินาที โดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไปลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน ด้วยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปของรังสีเอกซ์แล้วอิเล็กตรอนเข้ามาแทนที่ พลังงานส่วนเกินนี้มีพลังงานเท่ากับความต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิเล็กตรอนและเฉพาะของธาตุนั้นๆ จึงมีค่าพลังงานเฉพาะค่า เราเรียกรังสีเอกซ์ชนิดนี้ว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัว



ภาพ 2 การเกิดอันตรกิริยาที่สำคัญบนชิ้นงานตัวอย่าง



ภาพ 3 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นโคจรต่าง ๆ

การวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่าง กระทำได้ 3 วิธีดังนี้

ก. การวิเคราะห์ส่องกราดเฉพาะพื้นที่ (area scan analysis) หรือ เรียกว่าเป็นการทำเอ็กซ์เรย์แมปปิง (X-ray mapping) เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนผิวตัวอย่างเป็นพื้นที่เล็กๆ โดยความกว้างของพื้นที่ขึ้นกับกำลังขยายที่ใช้ และมีลักษณะการส่องกราดเป็นแนวจากซ้ายไปขวา และ บนลงล่างเหมือนโทรทัศน์ รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่พุ่งออกมาจากตัวอย่างเป็นจุดต่อจุด ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์แบบนี้แสดงถึงลักษณะการกระจายของธาตุนบนพื้นที่นั้น ๆ

ข. การวิเคราะห์ส่องกราดตามแนวเส้น (line scan analysis) เป็นการวิเคราะห์โดยใช้การส่องกราดลำอิเล็กตรอนเป็นแนวนอนบนตัวอย่าง ณ ตำแหน่งที่สนใจ เพื่อวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการหาขอบเขต (boundary) ของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง

ค. การวิเคราะห์เฉพาะจุด (point scan analysis) เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำอิเล็กตรอนกระทบอยู่นิ่งกับที่บนผิวตัวอย่าง ณ จุดที่ต้องการวิเคราะห์ เพื่อวัดปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะตัวตรงจุดที่ต้องการ

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้

1. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ผลิตโดย บริษัท บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ผลิตโดย บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ผลิตโดย บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
4. เมทิลเรด ($C_{15}H_{15}N_3O_2$) ผลิตโดย บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
5. เมทิลีนบลู ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) ผลิตโดย บริษัท AJAX ประเทศออสเตรเลีย
6. ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ ($C_{20}H_{14}O_4$) ผลิตโดย บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
7. เอทานอล (C_2H_6O) ผลิตโดย บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
8. บีกเกอร์ ขนาด 100 และ 250 มิลลิลิตร
9. ขวดปรับปริมาตร ขนาด 100 และ 1,000 มิลลิลิตร
10. ช้อนตักสาร
11. มีดและใบมีดผ่าตัด
12. ปิเปตขนาด 10 มิลลิลิตร
13. เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Precisa รุ่น 240A ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
14. เครื่องคนโดยใช้แม่เหล็ก (magnetic bar) ยี่ห้อ Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
15. ชุดกลั่นและเก็บก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
16. เตาให้ความร้อนแบบหุ้ม (heating mantle) ยี่ห้อ FAITHFUL รุ่น 98-i-c ประเทศจีน
17. เครื่องวัดสี (color reader) ยี่ห้อ KONICA MINOLTA รุ่น CR-10 ประเทศญี่ปุ่น
18. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI98103 Checker ประเทศโรมาเนีย
19. เครื่องวัดปริมาณน้ำตาล (hand refractometer) ยี่ห้อ shilac รุ่น 0-32% A.T.C. ประเทศญี่ปุ่น
20. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 250 ประเทศเช็ก
21. เครื่องวัดการกระจายพลังงานด้วยรังสีเอ็กซ์ (EDX) ยี่ห้อ Oxford ประเทศอังกฤษ

การดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของผลลำไยภายหลังการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

นำผลลำไยสดที่ผ่านกระบวนการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับแนวตั้ง (vertical forced-air) จากถังอัดความดันโดยตรง กำหนดให้มีอัตราการไหลของก๊าซอยู่ที่ 0.6-0.8 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เป็นระยะเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้เหลือการตกค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายหลังสิ้นสุดการรมมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 1,500-2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (จักรพงษ์, 2550) และนำมาทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิจำลองการวางจำหน่าย ในการวิจัยนี้ใช้ที่ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีที่อายุการเก็บรักษาที่ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอก การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก การเปลี่ยนแปลงของของแข็งที่ละลายน้ำได้ การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง การเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกผล และการเปลี่ยนแปลงของปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างเหลืออยู่ทั้งในเปลือกและเนื้อผล

1.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกผล

นำผลลำไยที่ผ่านการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มาทำการวัดการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกผล โดยใช้เครื่องวัดสี (color reader) ที่อายุการเก็บรักษา 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน รายงานค่าการเปลี่ยนแปลงสีด้วยค่า L^* C^* และ H° ซึ่งแต่ละค่ามีความหมายดังนี้

L^* คือ ค่าความสว่างของสี มีค่า 0-100 ถ้าค่า L^* เข้าใกล้ 0 หมายถึง ผลมีสีคล้ำ ถ้าค่า L^* เข้าใกล้ 100 หมายถึง ผลมีความสว่าง

C^* คือ ค่า Chroma บอกความอิ่มตัวของสี

H° เป็นค่ามุมที่ทำกับแกน $+a^*$ โดย 0° เท่ากับ $+a^*$ (red), ค่า 90° เท่ากับ $+b^*$ (yellow), ค่า 180° เท่ากับ $-a^*$ (green) และค่า 270° เท่ากับ $-b^*$ (blue)

ค่า C^* และ H° คำนวณจากสมการ ดังนี้

$$\text{Chroma, } C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

$$\text{Hue angle, } H^\circ = \tan^{-1}(b^*/a^*)$$

1.2 การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนัก

นำผลลำไยมาทำการชั่งน้ำหนักผลแต่ละผล ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ ที่อายุการเก็บรักษา 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน บันทึกการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักผล แล้วนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักผลตามสูตร

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

1.3 การวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของเนื้อผล (total soluble solid, TSS)

นำน้ำคั้นของเนื้อผลมาวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ โดยใช้เครื่อง hand refractometer ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ ที่อายุการเก็บรักษา 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน ค่าที่ได้มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร)

1.4 การวัดค่าความเป็นกรดต่างของเนื้อผล (pH)

นำน้ำคั้นของเนื้อผลมาวัดค่าความเป็นกรดต่าง โดยใช้เครื่อง pH meter ทำการวัดจำนวน 3 ซ้ำ ที่อายุการเก็บรักษา 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน

1.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ตกค้างในเปลือกและเนื้อผลลำไย

ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างเหลืออยู่ในส่วนของเปลือกและเนื้อผล ภายหลังการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเก็บรักษาไว้ในที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์หาปริมาณ SO₂ ตกค้างตามวิธีมาตรฐาน Modified Monier-William Method (AOAC, 1984) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ปริมาณ SO₂ ในรูปซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทั้งหมด (total sulfurdioxide) โดยในการทดลองนี้จะทำการวิเคราะห์ทั้งหมดจำนวน 3 ซ้ำดังนี้

1.5.1 สารเคมีและวิธีการเตรียม

- สารละลายอินดิเคเตอร์เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่เป็นตัวบ่งชี้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) และ SO₂ ประกอบด้วย เมทิลีนบลู (methylene blue) และเมทิลเรด (methyl red) มีวิธีการเตรียมดังนี้

- ชั่ง methylene blue และ methyl red จำนวน 0.05 และ 0.10 g ตามลำดับ นำไปละลายในสารละลายเอทานอล (ethanol) เข้มข้น 95% แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 100 ml เก็บในขวดสีชา

- สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เข้มข้น 3%

เตรียมโดยนำสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 30% จำนวน 100 ml มาเจือจางในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 1,000 ml จะได้สารละลายสีเขียวอ่อนใส จากนั้นจึงหยดสารละลายอินดิเคเตอร์ที่ได้จากข้อ 2.1.1 ลงไปจนได้สารละลายสีม่วงอ่อนใส ซึ่งสารละลายในขั้นตอนนี้จะมีสภาพเป็นกรด เมื่อจะนำไปงานจะต้องทำการปรับสภาพสารละลายให้เป็นกลาง โดยหยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 N ลงไปจนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเขียวอ่อนใสซึ่งใกล้เคียงกับสีของสารละลาย H_2O_2 ก่อนหยดอินดิเคเตอร์สารละลาย H_2O_2 ที่เตรียมไว้ควรเก็บไว้ในขวดสีชา และควรนำไปใช้ทันที หรือเก็บรักษาในตู้เย็นอุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส

- สารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 N

เตรียมโดย ปิเปต สารละลายไฮโดรคลอริก เข้มข้น 37 % w/w จำนวน 8.3 ml มาเจือจางในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 1,000 ml

- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.01 และ 0.1 N

สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.01 N เตรียมโดย ชั่ง NaOH 0.4 g มาละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 1,000 ml สำหรับสารละลาย NaOH เข้มข้น 0.1 N เตรียมโดย ชั่ง NaOH 0.4 g มาละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 1,000 ml จากนั้นนำไปหาความเข้มข้นที่แน่นอน (standardization) โดยการไตเตรตกับสารละลายไฮดรอกลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 N และใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ เมื่อถึงจุดยุติ สารละลาย NaOH จะเปลี่ยนจากสีใสเป็นสีชมพูอ่อน จากนั้นจึงนำไปคำนวณตามสูตรดังนี้

$$N_1 V_1 = N_2 V_2$$

โดย N_1 = ความเข้มข้นของ NaOH (N)

N_2 = ความเข้มข้นของ HCl (N)

V_1 = ความเข้มข้นของ NaOH ที่ถูกไตเตรท (ml)

V_2 = ความเข้มข้นของ HCl ที่ใช้ในการไตเตรท (ml)

1.5.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณ SO_2 ตกค้าง

- ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างผลลำไยมาประมาณ 10-15 ผลมาแยกส่วนเปลือก และเนื้อออกจากกัน ชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล
- นำตัวอย่างเปลือกและเนื้อใส่ในขวดแก้วก้นกลมชนิดสองคอขวด แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจำนวน 200 ml หรือประมาณครึ่งหนึ่งของขวดก้นกลม
- ใส่กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 N ลงไปในขวดแก้วก้นกลม 20 มิลลิลิตร
- เทสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ลงในขวดรูปชมพู่ (conical flask) จำนวน 100 ml และหลอดทดลองประมาณครึ่งหลอด
- ประกอบขวดก้นกลมชนิดสองคอขวด ขวดรูปชมพู่ และหลอดทดลองเข้ากับชุดกลั่นตัวอย่างเพื่อสกัด SO_2
- สวมท่อनाแก๊สในโตรเจนเข้ากับขวดก้นกลม โดยกำหนดให้มีอัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 1 ฟองปุ่ดต่อวินาที
- เปิดน้ำให้ไหลเข้าไปในท่อคอนเดนเซอร์ แล้วเปิดเตาให้ความร้อน รอนจนตัวอย่างเดือด จึงจับเวลาต้มต่อไปประมาณ 60 นาที หากตัวอย่างมี SO_2 ตกค้าง สารละลาย H_2O_2 จะเปลี่ยนจากสีเขียวอ่อนเป็นสีม่วงใส
- นำสารละลาย H_2O_2 ในขวดรูปชมพู่ไปไตเตรทกับสารละลาย NaOH โดยตัวอย่างเปลือกจะไตเตรทกับสารละลาย NaOH เข้มข้น 0.1 N ตัวอย่างเนื้อจะไตเตรทกับสารละลาย NaOH เข้มข้น 0.01 N เมื่อถึงจุดยุติการไตเตรทจะได้สารละลายสีเขียวอ่อน
- นำปริมาตรของสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการไตเตรทมาคำนวณหาปริมาณ SO_2 ที่ตกค้างในเปลือกและเนื้อตามสูตรดังนี้

$$\text{ปริมาณ } \text{SO}_2 \text{ ที่ตกค้าง (ppm)} = \frac{\text{N. NaOH} \times \text{ml. NaOH} \times 32 \times 1,000}{\text{น้ำหนักเปลือกหรือเนื้อผลลำไยสด (กรัม)}}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } \text{N NaOH} &= \text{ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (N)} \\ \text{ml NaOH} &= \text{ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ในการไตเตรท (ml)} \\ 32 &= \text{น้ำหนักกรัมสมมูล (equivalent weight) ของก๊าซ } \text{SO}_2 \end{aligned}$$

2. การศึกษาโครงสร้างเนื้อเยื่อของผลลำไย โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์การกระจายตัวและหาตำแหน่งของธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Mapping)

ทำการตรวจสอบโครงสร้างเนื้อเยื่อและการกระจายตัวของธาตุบริเวณส่วนต่างๆของผลลำไยสด ที่ไม่ผ่านการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ได้แก่ บริเวณผิวเปลือกด้านนอก บริเวณเนื้อเยื่อของเปลือกและส่วนของเนื้อ โดยงานวิจัยนี้จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยเทคนิค ESEM (environmental scanning electron microscope) ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถถ่ายภาพตัวอย่างขณะมีความชื้นสูงหรือเปียกได้ (Wet mode imaging) ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 250 ที่ใช้ gaseous secondary electron detector (GSED) เป็นดีเทคเตอร์ มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและวิธีวิเคราะห์ ดังนี้

2.1 ตัดตัวอย่างเปลือกและเนื้อของลำไยให้มีขนาดพื้นที่เท่ากับ 0.5 x 0.5 ลบ.ซม.

2.2 นำชิ้นตัวอย่างไปวางบนแท่นยึดตัวอย่างแบบระบายความร้อนได้ (cooling stage) ซึ่งมีการติดตั้งระบบถ่ายเทความร้อนไว้ด้านล่าง (peltier plate)

2.3 ปรับสถานะของกล้อง SEM ที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่าง โดยใช้โหมด ESEM จากนั้นทำการปรับลดอุณหภูมิของตัวอย่างให้เหลือ 3-5 องศาเซลเซียส กำหนดความชื้นสัมพัทธ์ภายในช่องใส่ตัวอย่าง (chamber) เท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ ทำงานภายใต้ความดันบรรยากาศที่ 800 Pa

2.4 ทำการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบ การกระจายตัวและการสะสมของธาตุองค์ประกอบที่มีอยู่ในเปลือกและเนื้อของผลลำไย โดยเทคนิค X-Ray Mapping ด้วยเครื่องวัดการกระจายพลังงานด้วยรังสีเอ็กซ์ (energy dispersive X-ray)

3. การศึกษาหาตำแหน่งและการกระจายตัวของธาตุซัลเฟอร์ (S) ที่ตกค้างและสะสมอยู่ในบริเวณเปลือกและเนื้อของผลลำไย โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์การกระจายตัวและหาตำแหน่งของธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Mapping)

ทำการตรวจสอบหาตำแหน่งการสะสมของธาตุซัลเฟอร์ (S) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งตกค้างและกระจายตัวสะสมอยู่ที่บริเวณส่วนต่างๆของผลลำไย บริเวณผิวเปลือกด้านนอก บริเวณเนื้อเยื่อของเปลือกและส่วนของเนื้อ ที่ผ่านกระบวนการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับแนวตั้ง (vertical forced-air) และทำการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิจำลองการวางจำหน่ายที่ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ร่วมกับเครื่องวัดการกระจายพลังงานด้วยรังสีเอ็กซ์ (EDX) มีวิธีการเตรียมตัวอย่างและวิธีวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับข้อ 2.1-2.4

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของผลลำไยภายหลังการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

การศึกษากการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพภายนอกของผลลำไยที่ผ่านการรมและไม่ผ่านการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ภายหลังการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่า ผลลำไยที่ไม่ผ่านการรม SO_2 มีแนวโน้มการเกิดสีน้ำตาลคล้ำเพิ่มมากขึ้นตามอายุการเก็บรักษา การเน่าเสียเริ่มเกิดขึ้นหลังทำการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 6 และ 8 วัน เมื่อทำการเก็บรักษาต่อไปเป็นเวลา 10 วัน จะพบการเข้าทำลายของเชื้อราเริ่มเกิดขึ้น แสดงผลดังภาพ 4

การรมลำไยด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) จะมีผลทำให้สีผิวของเปลือกลำไยเปลี่ยนเป็นสีเหลืองทอง ภายหลังการนำผลลำไยมาทำการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 วัน ไม่พบการเกิดโรคและการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์เกิดขึ้น สีผิวของเปลือกลำไยจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลคล้ำขึ้นหลังทำการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลาเกินกว่า 10 วัน แสดงผลดังภาพ 5



ภาพ 4 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของผลลำไยที่ไม่ผ่านการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และเก็บรักษาไว้เป็นเวลา (ก) 0 วัน (ข) 2 วัน (ค) 4 วัน (ง) 6 วัน (จ) 8 วัน และ (ฉ) 10 วัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส



ภาพ 5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของผลลำไยที่ผ่านการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และเก็บรักษาไว้เป็นเวลา (ก) 0 วัน (ข) 2 วัน (ค) 4 วัน (ง) 6 วัน (จ) 8 วัน และ (ด) 10 วัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกผลหลังการรม พบว่า L^* C^* H^* ของสีผิวเปลือก ที่อายุการเก็บรักษา 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน พบว่า มีค่าลดลงตามอายุการเก็บรักษา โดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงผลดังตาราง 3 เนื่องจากการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับสามารถทำให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) สัมผัสกับผลลำไยได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้สีผิวของเปลือกภายหลังการรมมีสีเหลืองอย่างสม่ำเสมอทั้งผล (จักรพงษ์ และคณะ, 2553)

จากผลการตรวจวิเคราะห์ค่าความสว่างและค่าสีเหลืองมีการลดลงนั้น อาจมีสาเหตุมาจากความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีปริมาณลดลงตามอายุการเก็บรักษา ซึ่งความเข้มข้นของปริมาณ SO_2 มีผลต่อการควบคุมการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลของเปลือก และมีคุณสมบัติเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงส่งผลให้สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดส ซึ่งเป็นสาเหตุของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลบนเปลือก (พัชรา และคณะ, 2552) และเนื่องจาก SO_2 เป็นก๊าซที่มีฤทธิ์เป็นกรด จึงสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราที่เป็นสาเหตุของโรคเน่าได้ (จักรพงษ์, 2542)

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของผลลำไยที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่า ในระหว่างการเก็บรักษาผลลำไยเป็นระยะเวลา 10 วัน จะมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเกิดขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมากจากการหายใจและการสูญเสียน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษา ภายหลังสิ้นสุดการเก็บรักษา ผลลำไยมีค่าเฉลี่ยของการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 13.82 เปอร์เซ็นต์

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อผลภายหลังการเก็บรักษา พบว่า มีค่าลดลงโดยไม่มี ความแตกต่างทางสถิติ ($p>0.05$) ในขณะที่ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของเนื้อผลมีค่า pH เพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ 6.18, 6.19, 6.23, 6.27, 6.39 และ 6.54 หลังทำการเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) สอดคล้องกับ รายงานผลการวิจัยของ Wilasinee (2010) พบว่า ระยะเวลาการเก็บรักษาจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของผลลำไย ทั้งนี้เป็นผลมาจากความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมีปริมาณลดลงในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถถูกดูดซึมจากผิวเปลือกเข้าสู่เนื้อผลลำไยได้ เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะถูกออกซิไดส์เป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และถ้าทำปฏิกิริยากับ สารละลายในเนื้อผลลำไยต่อจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณ SO_2 ที่ตกค้างในผลลำไยทั้งเปลือกและเนื้อหลังผ่านการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ด้วยวิธีระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ (forced-air) พบว่า การนำเอาระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับมาใช้ในกระบวนการรมสามารถทำให้ปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ภายหลังสิ้นสุดการรมมีการตกค้างอยู่ในส่วนของเปลือกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1884.84 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในเนื้อผลเท่ากับ 47.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ภายหลังทำการเก็บรักษาผลลำไยไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่า ปริมาณ SO_2 ที่ตกค้างเหลืออยู่ทั้งในเปลือกและเนื้อจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ค่าเฉลี่ยของปริมาณ SO_2 ที่พบตกค้างในเปลือกเท่ากับ 1487.64, 1401.70, 1339.65, 1423.36 และ 1203.14 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่อายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของปริมาณ SO_2 ที่พบตกค้างเหลืออยู่ในเนื้อเท่ากับ 22.54, 8.35, 6.25, 2.85 และ 0.87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่อายุการเก็บรักษาเป็นเวลา 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) เนื่องจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถระเหยได้ เพราะมีคุณสมบัติไวต่ออากาศ จึงทำให้ความเข้มข้นของมีปริมาณลดลง (พงศพัทธ์และคณะ, 2550) อย่างไรก็ตาม แม้ว่าปริมาณ SO_2 จะมีการลดลงตลอดอายุการเก็บรักษา แต่ยังคงพบว่าการตกค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในเปลือกผล ที่เก็บรักษาไว้นานกว่า 10 วัน ที่ระดับความเข้มข้นเกินกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นระดับเข้มข้นที่ยังสูงอยู่ และสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคโดยตรงได้

ตาราง 3 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของผลลำไยที่ผ่านการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 วัน

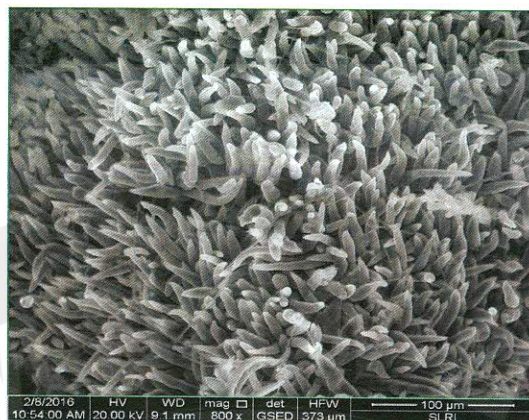
ระยะเวลา การเก็บรักษา (วัน)	การสูญเสียน้ำหนัก (%)	ปริมาณของแข็งที่ ละลายน้ำได้ของ เนื้อผล (%)	ความเป็นกรดต่าง ของเนื้อผล (pH)	การเปลี่ยนแปลงสีของเปลือก			ปริมาณ SO ₂ ตกค้าง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	
				L*	C*	H°	เปลือก	เนื้อผล
0	0 ^a	17.8 ^{ns}	6.18 ^a	46.33 ^{ns}	36.02 ^{ns}	60.17 ^{ns}	1884.84 ^a	47.13 ^a
2	4.8 ^b	17.7 ^{ns}	6.19 ^a	46.04 ^{ns}	35.56 ^{ns}	59.61 ^{ns}	1487.64 ^b	22.54 ^b
4	5.95 ^b	17.6 ^{ns}	6.23 ^{ab}	44.36 ^{ns}	35.58 ^{ns}	59.46 ^{ns}	1401.70 ^b	8.35 ^c
6	8.15 ^{bc}	17.3 ^{ns}	6.27 ^{ab}	44.01 ^{ns}	35.37 ^{ns}	58.84 ^{ns}	1339.65 ^b	6.25 ^c
8	12.6 ^c	17.13 ^{ns}	6.39 ^{bc}	43.93 ^{ns}	35.26 ^{ns}	58.33 ^{ns}	1423.36 ^b	2.85 ^c
10	13.82 ^c	16.93 ^{ns}	6.54 ^d	43.44 ^{ns}	35.03 ^{ns}	56.68 ^{ns}	1203.14 ^b	0.87 ^c

หมายเหตุ ค่าในแต่ละคอลัมน์ที่มีตัวอักษร ns กำกับ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P \geq 0.05$)
 ค่าในแต่ละคอลัมน์ที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P \geq 0.05$)
 ค่าในแต่ละคอลัมน์ที่มีตัวอักษรกำกับไม่เหมือนกัน มีความแตกต่างทางสถิติ ($P \geq 0.05$)

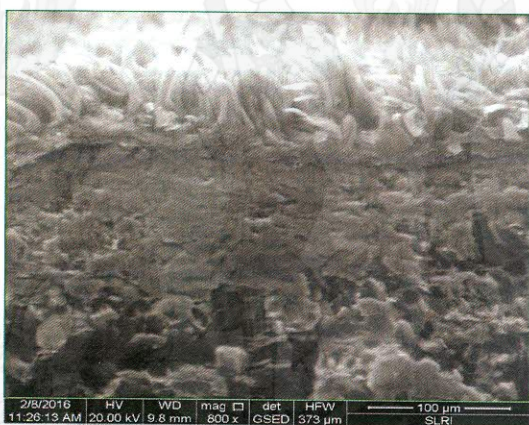
2. ผลการศึกษาโครงสร้างเนื้อเยื่อของผลลำไยสด โดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์การกระจายตัวและหาตำแหน่งของธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์

การศึกษาโครงสร้างเนื้อเยื่อของผลลำไยสดและการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุบริเวณผิวเปลือกด้านนอก บริเวณเนื้อเยื่อตัดขวางของเปลือกและเนื้อของผลลำไยสดที่ไม่ผ่านการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้กล้อง SEM ที่มีคุณสมบัติสามารถตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีความชื้นสูงหรือเปียกได้ หรือที่เรียกกันทั่วไปว่าเทคนิค ESEM มีข้อดีสำหรับการใช้ตรวจสอบตัวอย่างที่มีความชื้นสูงและไม่ต้องทำให้น้ำไฟฟ้า ช่วยหลีกเลี่ยงการเตรียมตัวอย่างที่ต้องการกำจัดน้ำออก (dehydrate) ก่อนทำการตรวจสอบได้ (พรพจน์, 2554) ขณะที่สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ในโหมด ESEM นั้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ ตามคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของของเหลวที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งต้องทำการรักษาสถานะของเหลว (liquid phase) ภายในตัวอย่างให้คงอยู่ระหว่างทำการทดสอบ (Tabor, 1991; Nedéla *et al.*, 2015)

โดยในการวิจัยนี้ได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างผลลำไยสดแล้วพบว่า การใช้อุณหภูมิต่ำประมาณ 3-5 °C ในการศึกษาตัวอย่างลำไยสดภายใต้ความดันบรรยากาศ 800 Pa และความชื้นสัมพัทธ์ 90% จะไม่ทำให้ชิ้นตัวอย่างแห้งและได้รับความเสียหายเนื่องจากการทำลายของอิเล็กตรอนขณะวิเคราะห์ได้ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของส่วนผิวเปลือกด้านนอกภาคตัดขวางของเปลือกและเนื้อ ที่ทำการตรวจสอบได้ (ภาพ 6) และเมื่อทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุและการกระจายตัวของธาตุ (X-ray mapping) ที่สะสมอยู่บริเวณเปลือกและเนื้อของผลลำไย พบว่า ที่ผิวเปลือกและเนื้อเยื่อตัดขวางของเปลือกจะประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) และฟอสฟอรัส (P) ตามลำดับสำหรับในเนื้อผล พบการสะสมของธาตุ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และเหล็ก (Fe) ตามลำดับ (ภาพ 7) ซึ่งในการวิจัยนี้จะไม่รายงานผลความเข้มข้นของพิกเมนต์เอ็กซีเจเนของแต่ละธาตุที่เกิดขึ้น เนื่องจากการแปรผันของข้อมูลที่เกิดขึ้นในระหว่างการวิเคราะห์ ทั้งนี้การวิเคราะห์ชิ้นงานโดยเทคนิค SEM-EDS สามารถวิเคราะห์ธาตุโดยให้ผลทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพโดยใช้ระยะเวลาอย่างรวดเร็วได้ อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเทคนิคนี้ จะให้ผลเป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนัก กับสัดส่วนของมวลอะตอมของธาตุเทียบกับสารมาตรฐานในโปรแกรมวิเคราะห์ธาตุแบบคร่าวๆ เท่านั้น ซึ่งพบว่ามีหลายปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ และจะแตกต่างกันไปตามสภาวะของการวิเคราะห์ เช่น ความเสถียรของชิ้นงาน ความหนาแน่นของชิ้นงาน การดูดกลืนรังสีเอ็กส์ และการเรืองรังสีเอ็กส์ ซึ่งต้องศึกษาและทำการปรับแก้ค่าที่ได้จากการรายงานของเครื่องให้เป็นค่าที่ถูกต้องทุกครั้ง (Eric *et al.*, 1998)



(ก)



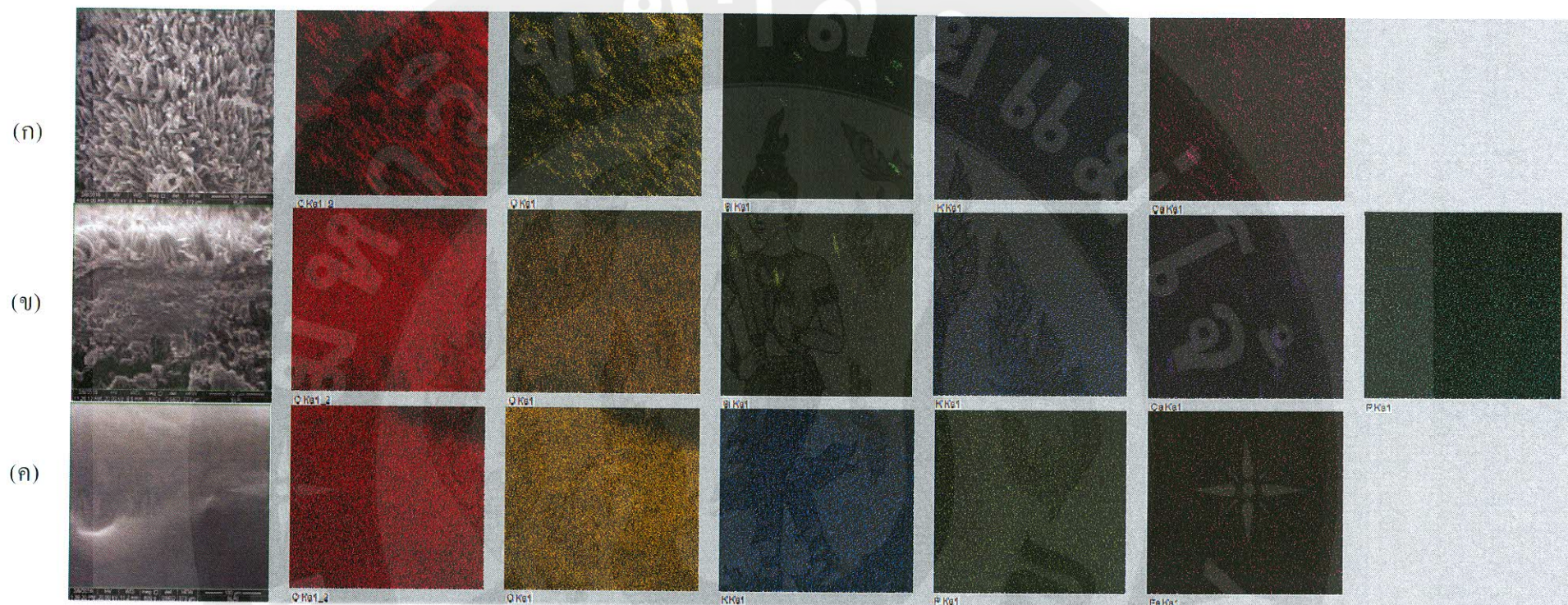
(ข)



(ค)

ภาพ 6 ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของผลลำไย

(ก) ผิวเปลือกด้านนอก (ข) เนื้อเยื่อดัชวางของเปลือก และ (ค) เนื้อเยื่อดัชวางของเนื้อผล



ภาพ 7 ตำแหน่งและการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ที่สะสมอยู่บริเวณเปลือกและเนื้อของผลลำไยสด

(ก) ธาตุที่พบบริเวณผิวเปลือกด้านนอก ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) โพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca)

(ข) ธาตุที่พบบริเวณเนื้อเยื่อตัดขวางของเปลือก ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ซิลิกอน (Si) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) และฟอสฟอรัส (P)

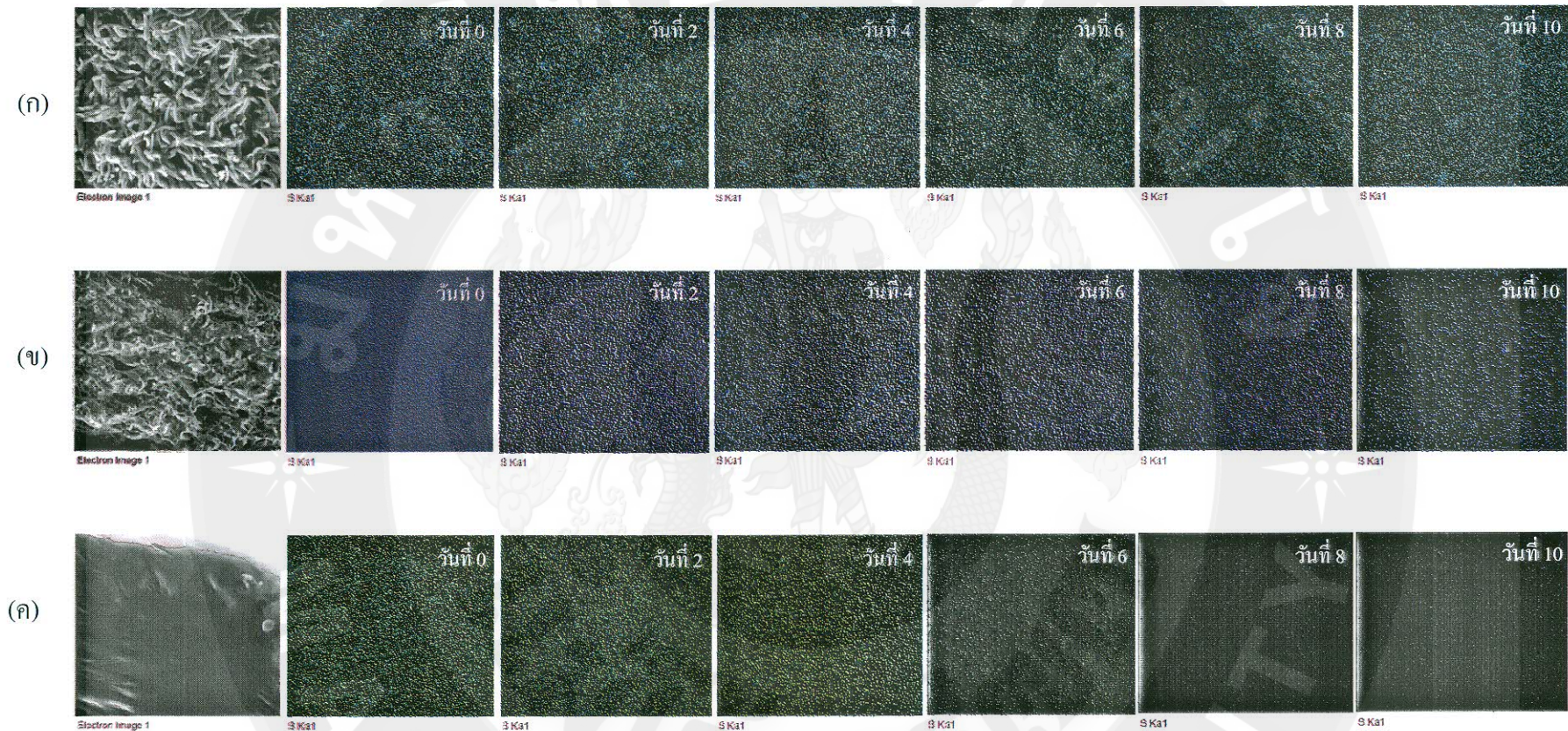
(ค) ธาตุที่พบบริเวณเนื้อเยื่อตัดขวางของเนื้อผล ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) และเหล็ก (Fe)

3. ผลการศึกษาหาการกระจายตัวและตำแหน่งการสะสมของธาตุซัลเฟอร์ ที่ตกค้างเหลืออยู่ในเปลือกและเนื้อของผลลำไยภายหลังทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน

การศึกษาหาการกระจายตัวและตำแหน่งของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ตกค้างเหลืออยู่ในเปลือกและเนื้อของผลลำไย ในการวิจัยนี้ จะทำการศึกษาทำ X-ray mapping เฉพาะธาตุซัลเฟอร์(S) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบหลักของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในตัวอย่างผิวเปลือก เนื้อเยื่อตัดขวางของเปลือกและเนื้อของผลลำไยสด ที่ผ่านกระบวนการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้ง และทำการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิจำลองการวางจำหน่ายที่ 20 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 วัน ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการสะสมของซัลเฟอร์ในเปลือกและเนื้อลำไยแสดงดังภาพ 8

จากภาพ 8 แสดงตำแหน่งการสะสมและการกระจายตัวของซัลเฟอร์ พบว่า ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการรมลำไยด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จะทำให้มีธาตุซัลเฟอร์สะสมและกระจายตัวอยู่ในบริเวณต่างๆ ได้แก่ ผิวเปลือกด้านนอก เนื้อเยื่อของเปลือกและเนื้อของผลลำไย โดยในตัวอย่างเนื้อเยื่อเปลือกจะพบการสะสมและกระจายตัวของซัลเฟอร์มีปริมาณสูงกว่าในเนื้อผล และเมื่อทำการเก็บรักษาผลลำไย ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน ทำให้ทราบว่า การกระจายตัวและการสะสมของซัลเฟอร์ (S) ในผลลำไยมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยการสะสมของซัลเฟอร์มีแนวโน้มลดลงทั้งในเปลือกและเนื้อผล หลังทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน ตามลำดับ ทั้งนี้เกิดจากการลดลงของปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในเปลือกและเนื้อผล (ตาราง 3)

จากผลการวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่า การทำ X-ray Mapping จะได้ผลการวิเคราะห์ที่สามารถช่วยบ่งชี้ตำแหน่งการสะสมของธาตุซัลเฟอร์ที่ตกค้างอยู่ในเปลือกและเนื้อของผลลำไยสดได้ ช่วยสนับสนุนผลการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ตกค้างในผลลำไยได้ และทำให้ทราบว่า ซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะมีการตกค้างและสะสมอยู่ในเปลือกและเนื้อของผลลำไยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาเป็นเวลานานกว่า 10 วัน แม้จะพบว่าปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีการลดลงตลอดอายุการเก็บรักษาก็ตาม ซึ่งจากการรายงานก่อนหน้านี้ พบว่า มีการทำ X-ray Mapping เพื่อใช้บ่งชี้ตำแหน่งและการสะสมของธาตุในเนื้อเยื่อพืชเช่นกัน โดยจากการรายงานของ Krause และคณะ(1987) พบว่า บริเวณใบเมเปิ้ลที่มีการสะสมของธาตุซัลเฟอร์อยู่มากจะแสดงอาการเสียหายอย่างรุนแรง หลังได้รับการรมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และจากการรายงานของ Williams และคณะ (2002) พบว่า ตำแหน่งที่มีการสะสมของธาตุซัลเฟอร์ คือ ตำแหน่งของการสร้างสารไฟโตรอเล็กซิน (phytoalexin) เพื่อยับยั้งการเข้าทำลายของเชื้อราในเนื้อเยื่อที่ลำเลียงของมะเขือเทศ และในพริกไทย (Novo et al., 2007)



ภาพ 8 ตำแหน่งและการกระจายตัวของซัลเฟอร์ (S) ที่สะสมอยู่บริเวณเปลือกและเนื้อของผลกล้วยสด หลังการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 20 °C เป็นเวลา 10 วัน

(ก) ผิวเปลือกด้านนอก (ข) เนื้อเยื่อคั่นขวางของเปลือก และ (ค) เนื้อเยื่อคั่นขวางของเนื้อผล

สรุปผลการวิจัย

1. การนำระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ (forced-air) มาใช้ในกระบวนการรมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) กับผลลำไยสด ช่วยให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาและคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลลำไยได้ ช่วยลดปริมาณการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้มากกว่าการรมแบบวิธีดั้งเดิม ส่งผลให้มีการตกค้างของปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในเปลือกและเนื้อผล ภายหลังสิ้นสุดการรมมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการส่งออก มีการตกค้างของปริมาณ (SO_2) อยู่ในส่วนของเปลือกและเนื้อผล มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1884.84 และ 47.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

2. ผลการวิเคราะห์หาธาตุซัลเฟอร์ (S) ตกค้างในผลลำไยสดโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ESEM) ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของธาตุด้วยรังสีเอ็กซ์ (EDX) สามารถช่วยสนับสนุนผลการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในเปลือกและเนื้อได้ สามารถชี้ยืนยันตำแหน่งการสะสมและการกระจายตัวของธาตุซัลเฟอร์ที่ตกค้างเหลืออยู่ในผลลำไยระหว่างการเก็บรักษาก่อนทำการส่งออกได้

3. สามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน สำหรับการปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการรมลำไยสดด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในเชิงพาณิชย์ได้ และสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัย การพัฒนาวัสดุดูดซับซัลเฟอร์ หรือการออกแบบบรรจุภัณฑ์ ที่มีคุณสมบัติ สามารถลดปริมาณการตกค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่เหลือตกค้างอยู่ในเปลือกผลลำไยระหว่างการเก็บรักษาก่อนทำการส่งออกได้

เอกสารอ้างอิง

- กรมวิชาการเกษตร. 2548. ฐานความรู้ด้านพืชลำไย คืออาหาร คือยา คือคุณค่าที่มากับความหวาน
ชื่นใจ. จาก <http://www.doa.go.th/data-agri/LONGAN/1stat/st01.html> [7 กันยายน 2558].
- จักรพงษ์ พิมพ์พิมล. การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวผลลำไยสดเชิงการค้า. 2555. โรงพิมพ์ดอกคิวนม
ทาร์ ดีไซน์, เชียงใหม่. 170 หน้า.
- จักรพงษ์ พิมพ์พิมล จาคูพงศ์ วาฤทธิ์ และสมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ. 2550. การรมซัลเฟอร์ได
ออกไซด์ (SO₂) กับผลลำไยสดด้วยวิธีหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air. รายงานวิจัยฉบับ
สมบูรณ์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 87 หน้า.
- จริงแท้ สิริพานิช. 2538. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. โรงพิมพ์ศูนย์
ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม. 396 หน้า.
- ชิง ชิง ทองดี. 2541. การใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์สำหรับลำไยสดเพื่อการส่งออก.
สารเคหการเกษตร. 23(2) หน้า 193.
- ธีรนุช เจริญกิจ จักรพงษ์ พิมพ์พิมล และสุชาดา ทองศรี. 2548. สถานการณ์ตักค้างของซัลเฟอร์ได
ออกไซด์บนผลลำไยสดที่จังหวัดเชียงใหม่และลำพูน. น.28. ในเอกสารประกอบการ
สัมมนาวิชาการพืชสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 5 26-29 เมษายน 2548. กรุงเทพฯ: ภาควิชาพืชสวน
คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พงศ์พันธุ์ จิ๋งอยู่สุข สมเพชร เจริญสุข และวิทยา อภัย. 2550. ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการ
ตักค้างของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในผลลำไยสด. กรมวิชาการเกษตร.
- พรพจน์ หนูทอง. 2554. ESEM mode แก้ปัญหาการเตรียมตัวอย่างได้อย่างไร. จาก
<http://share.psu.ac.th/blog/pom-sec/17980> [8 มกราคม 2559].
- พรเทพ จอมเมือง. 2552. การออกแบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งสำหรับการรม
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับผลลำไยสด. ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
การแปรรูปผลผลิตการเกษตร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้,
เชียงใหม่.
- พาวิน มะโนชัย ยุทธนา เขาสุเมรุ ชิตี ศรีตันทิพย์ และ สันติ ช่างเจรจา. 2547. เทคโนโลยีการผลิต
ลำไย. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์. กรุงเทพฯ. 125 หน้า.

- ภูมิพัฒน์ มาลีสะพ่าน. 2547. แนวทางการปรับปรุงรูปแบบการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) กับผล
ลำไยสด. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมและ
อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. 2543. **เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการทำงาน
เบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 333 น.
- สถาบันอาหาร. 2541. **คู่มือการอบรมควั่น-อบลำไยแห้ง พร้อมกรรมวิธีการผลิตและแบบแปลน**,
74 หน้า.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร และกรมศุลกากร. 2558. สถิติการส่งออกลำไย. จาก
http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php [2 กันยายน 2558].
- AOAC Peer verified methods program. 1993. **The Manual of Policies and Procedures**.
Arlinton: VA. 22 p.
- Agar, T., S. Paydas and F. Ekinici. 2006. Effect of harvest dates and forced air cooling on
postharvest quality of apricot cv. precoce tyrinthe. **Acta Horticulturae**, 701: 577-580.
- Chiraporn, T., Suwin, A. and Worapan, P. 2013. Characterizations of banana peel and its
efficiency for copper adsorption. **Journal of Environmental Science and
Engineering A**. 2:608-613.
- Eric, L., Doganaksoy, N., Sirois, J. and Gauvin, R. 1998. Statistical considerations in
Microanalysis by energy-dispersive spectrometry. **Microscopy and Microanalysis**. 4
(6): 598-604.
- Fernando, D.R., Bakkaus, E.J., Perrier, N., Baker, A.J.M., Woodrow, I.E., Batianoff, G.N. and
Collins, R.N. 2006. Manganese accumulation in the leaf mesophyll of four tree species: a
PIXE/EDAX localization study. **New Phytologist**, 171: 751-758.
- Ferrua, M.J. and Singh, R.P. 2009. Design guidelines for the forced-air cooling process of
strawberries. **International journal of refrigeration**: in press.
- Han, D.M., Wu, Z.X. and Ji, Z.L. 2001. Effect of SO₂ treatment on the overall quality of longan
(cv. Shixia) during cold storage. **Acta Horticulturae** 558: 375-379.
- Jiang, Y.M. 1999. Purification and some properties of polyphenol oxidase of longan fruit. **Food
Chemistry**. 66: 75-79.
- Jiang, Y.M., Zhang, Z., Joyce, D.C. and Ketsa, S. 2002. Postharvest biology and handling of
longan fruit (*Dimocarpus longan* Lour.). **Postharvest Biology Technology**. 26: 241-252.

- Kader, A.A. 2013. **Longan: Recommendation for maintaining postharvest quality**. Available from: <http://postharvest.ucdavis.edu/PFfruits/Longan/> [2015 September4].
- Koroleva, O.A., Davies, A., Deeken, R., Thorpe, M.R., Tomos, A.D. and Hedrich, R. 2000. Identification of a new glucosinolate-rich cell type in arabidopsis flower stalk. **Plant Physiology**, 124:599-608.
- Krause, C.R. and Dochinger, L.S. 1987. Sulfur accumulation in red maple leaves exposed to sulfur dioxide. **Phytopathology**, 77: 1438-1441.
- Luvisi, A.D., Shorey, H.H., Smilanick J.L., Thompson F.J., Gump H.B., and Knuton J. 1992. **Sulfur dioxide fumigation of table grapes**. Division of Agriculture and Natural Resources. University of California, California. 22 pp.
- Nedéla, V., Tihlaříková, E and Hřib, J. 2015. The low-temperature method for study of coniferous tissues in the environmental scanning electron microscope. **Microscope Res Tech**, 70: 95-100.
- Pitman, M.G., Lauchli, A. and Stelzer, R. 1981. Ion distribution in roots of barley seedlings measured by electron probe x-ray microanalysis. **Plant Physiol**, 68: 673-679
- Su, X., Jiang, Y., Duan, X., Li, H., Li, Y., Lin, W. and Zheng, Y. 2005. Effect of oxygen on skin browning of longan fruit. **Food Technology Biotechnology**, 43 (4): 359-356.
- Szynkowska, M.I., 2005. **Scanning Electron Microscopy**. **Encyclopedia of Analytical Science** (Eds. Worsfold, P.J., Townshend, A. and Poole, C.F.). Elsevier, Oxford, pp. 134-142.
- Tabor, D. 1991. **Gases, liquid and solids, and other states of matter**. John Wiley & Sons and Cambridge University Press. P 444.
- Watkins, J.B. 1990. **Forced-Air Cooling. Queensland: Formerly of Horticulture branch**. Department of Primary Industries. 56 pp.
- Wilasinee Chitbanchong. 2010. **Anatomical and Biochemical Changes in sulphur dioxide treated longan fruit during storage at low temperature**. Doctor of philosophy in postharvest technology. Chiang Mai university. 113 p.
- Williams, J.S, Hall, S.A., Hawkesford, M.J., Beale, M.H. and Cooper, R.M. 2002. Elemental sulfur and thiol accumulation in tomato and defense against a fungal vascular pathogen. **Plant Physiology**, 128: 150-9.