



การพัฒนาบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดีแปรแอคทีฟประเภทของควบคุม
การปล่อยไอระเหยเอทานอลสำหรับพริกหวานสด

นฤมล พิลาคูณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



DEVELOPMENT OF ACTIVE MODIFIED ATMOSPHERE
PACKAGING USING ETHANOL VAPOUR CONTROLLED
RELEASE SACHET FOR FRESH BELL PEPPER

NARUEMOL PILAKHUN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THEREQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
MAJOR IN FOOD TECHNOLOGY
FACULTY OF AGRIRCUL TURE
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2020
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์

เรื่อง การพัฒนาบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดีแปรแอคทีฟประเภทซองควบคุมการปล่อยไอระเหย
เอทานอลสำหรับพริกหวานสด

ผู้วิจัย นางสาวนฤมล พิลาคูณ

คณะกรรมการสอบ

รองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชัย วงษ์อารี	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ อ่อนสะอาด	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรเวทย์ อุทโธ	กรรมการ
ดร. ฤทธิรงค์ พฤษภูมิกุล	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....	อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรเวทย์ อุทโธ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. ฤทธิรงค์ พฤษภูมิกุล)	

.....
(ดร. นรินทร์ บุญพรหมณ์.)
คณบดีคณะเกษตรศาสตร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนาทิพย์ แผลมคม)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา/2563

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง “การพัฒนาบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดีแปรแอคทีฟประเภทของควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลสำหรับพริกหวานสด” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรเวทย์ อุทโธ และ ดร. ฤทธิรงค์ พฤษณิกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาช่วยชี้แนะวิธีดำเนินการวิจัย ความรู้ทางวิชาการในการทำวิทยานิพนธ์ และให้คำปรึกษาในด้านการศึกษาเป็นอย่างดี และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชัย วงษ์อารี ประธานกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ อ่อนสะอาด กรรมการสอบที่ให้คำแนะนำในการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ระดับปริญญาโทของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่สนับสนุนเงินทุนตลอดระยะเวลาในการศึกษา และขอขอบคุณคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนอุปกรณ์ และเครื่องมือในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณครอบครัว เพื่อน พี่ และน้องๆ นักศึกษาปริญญาตรี โท และเอก คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ตลอดจนผู้มีพระคุณที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่สามารถกล่าวได้หมด ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และกำลังใจอันดีจากทุกท่านจึงขอกราบขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้

นฤมล พิลาคูณ

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง	: การพัฒนาบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแอคทีฟประเภทซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลสำหรับพริกหวานสด
ผู้วิจัย	: นฤมล พิลาคูณ
ชื่อปริญญา	: วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	: เทคโนโลยีการอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษา	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรเวทย์ อุทโธ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	: ดร.ฤทธิรงค์ พงษ์พิบูล
คำสำคัญ	: บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ, พลาสติกเจาะรู, ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล, พริกหวาน

ผักและผลไม้สดมีคุณค่าทางโภชนาการและเศรษฐกิจที่สูงแต่มีแนวโน้มที่เกิดการสูญเสียได้ง่าย โดยเฉพาะจากเชื้อจุลินทรีย์ การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ การพัฒนาการบรรจุภัณฑ์บรรยากาศแอคทีฟสำหรับผักและผลไม้สด โดยมีระบบแอคทีฟ คือ ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลและเกลือแกง (10g) การศึกษาได้ใช้พริกหวานเป็นตัวอย่างของผลิตภัณฑ์สด บรรจุในถุงพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene; LDPE) ที่มีระดับของการเจาะรูร้อยละ 60 และเส้นผ่านศูนย์กลางของรู 3 มิลลิเมตร ซองควบคุมทำจากฟิล์มพลาสติก 2 ประเภท คือฟิล์ม LDPE และฟิล์ม Active PakTM ฟิล์มแต่ละชนิดประกบกับฟิล์มอะลูมิเนียมไนต์ในการขึ้นรูปเป็นซองขนาดเล็กสำหรับใช้บรรจุกระดาดขนาด 8×8 cm ที่เอบซุ่มด้วยเอทานอลเหลว (บริสุทธิ์ร้อยละ 99.99) การวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่าน (effective film permeability หรือ effective FPE) ของฟิล์ม LDPE เจาะรูโดยใช้วิธี isostatic ที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C พบว่า ค่า effective FPE ที่อุณหภูมิ 10 มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 25°C อย่างมีนัยสำคัญ ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุมฯ พบว่าซองควบคุมฯ ที่ทำจากฟิล์ม Active PakTM ปล่อยไอระเหยเอทานอลได้เร็ว และมีความเข้มข้นสะสมในบรรจุภัณฑ์ที่สูงกว่าซองควบคุมฯ ที่ทำจากฟิล์ม LDPE การปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุมฯ ทั้งสองประเภทที่อุณหภูมิ 25°C เกิดขึ้นได้เร็วกว่าที่ 10°C ตลอดระยะเวลา 10 วัน การวิจัยนี้ได้จำลองสภาวะอุณหภูมิเก็บรักษาไม่คงที่ในระหว่างการขนส่งและเก็บรักษา โดยทำการ

ย้ายระบบทดสอบจลนพลศาสตร์จากที่ 10°C ไปยัง 25°C และเก็บรักษาต่อไปอีกเป็นเวลา 4 วัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ซองควบคุมฯ ทุกประเภทปลดปล่อยไธราเฮนได้เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของไธราเฮนเอทานอลที่สะสมในบรรจุภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยได้ศึกษาผลของต้นแบบบรรจุภัณฑ์แอคทีฟต่อคุณภาพการเก็บรักษาของพริกหวานสด เก็บรักษาไว้ที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ (10 หรือ 25°C) และสภาวะจำลองอุณหภูมิเก็บรักษาไม่คงที่ พบว่า ไธราเฮนเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์แอคทีฟพอลิพลาสติกเจาะรูที่อุณหภูมิ 10°C (ช่วงความเข้มข้นที่สภาวะคงที่เท่ากับ 10-50 $\mu\text{L L}^{-1}$) และที่อุณหภูมิ 25°C (ความเข้มข้น 100-300 $\mu\text{L L}^{-1}$) ชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพโดยเฉพาะการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และการเปลี่ยนสีผิวของพริกหวาน ได้ดีกว่าการเก็บรักษาในสิ่งทดลองควบคุมซึ่งไม่มีซองควบคุมฯ และเกลือแกง ทั้งนี้ซองควบคุมฯ ที่ทำจากฟิล์ม Active Pak™ ปลดปล่อยไธราเฮนเอทานอลได้เร็วกว่าฟิล์ม LDPE การสะสมของไธราเฮนเอทานอลในบรรจุภัณฑ์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊สออกซิเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในบรรจุภัณฑ์ การเก็บรักษาพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ทุกประเภทที่อุณหภูมิ 10°C เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพได้ช้ากว่าที่อุณหภูมิ 25°C เมื่ออุณหภูมิไม่คงที่และเกิดการเพิ่มขึ้นช่วงสั้น ๆ ในระหว่างการเก็บที่อุณหภูมิ 10°C พบว่า ซองควบคุมฯ ทั้งสองประเภทปลดปล่อยไธราเฮนเอทานอลได้เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับผลการศึกษาที่รายงานในการศึกษาจลนพลศาสตร์ ในภาพรวมบรรจุภัณฑ์แอคทีฟต้นแบบประเภทซองควบคุมการปล่อยไธราเฮนเอทานอลที่ได้พัฒนาสำหรับพริกหวานมีศักยภาพในการลดการสะสมความชื้นในบรรจุภัณฑ์และยืดอายุการเก็บรักษาของพริกหวานจากการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ บรรจุภัณฑ์แอคทีฟต้นแบบนี้สามารถปรับปรุงให้เหมาะสมกับความต้องการด้านการบรรจุภัณฑ์ และเก็บรักษาของผักและผลไม้ประเภทอื่น ๆ ได้ต่อไป

ABSTRACT

TITLE : DEVELOPMENT OF ACTIVE MODIFIED ATMOSPHERE PACKAGING
USING ETHANOL VAPOUR CONTROLLED RELEASE SACHET FOR
FRESH BELL PEPPER

AUTHOR : NARUEMOL PILAKHUN

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : FOOD TECHNOLOGY

ADVISOR : ASST. PROF. WEERAWATE UTTO, Ph.D.

CO- ADVISOR : RITTIRONG PRUTHTIKUL, Ph.D.

KEYWORDS : ACTIVE PACKAGING, PERFORATED PLASTIC FILM, ETHANOL VAPOUR
CONTROLLED RELEASE SACHET, BELL PEPPER

Fruits and vegetables have high nutritional and economical value but they are very susceptible to deterioration due to microorganisms. This research was undertaken to develop active modified atmosphere packaging for fresh fruits and vegetables, of which the active systems involved the controlled release of ethanol vapour sachets and sodium chloride (10g). In this study, bell peppers were employed as fresh produce samples. Both the active systems and the pepper were packaged into perforated LDPE plastic bags of which the perforation level was 60 per cent and the perforated hole diameter was 3 mm. The sachets were made of 2 types of plastic film including LDPE and so-called Active PakTM. Individual films were sealed with aluminum laminated ones to form sachets into which 8×8 cm filter papers soaked with ethanol liquid (99.99% purity) were individually inserted. The present research studied effective film permeabilities or effective FPE of the perforated LDPE film using isostatic method at 10 and 25°C. Experimental findings suggest that the effective FPE values measured at 10°C were significantly higher than those measured at 25°C. This research studied the kinetic activity of the ethanol vapour released from the sachets. The results showed that the release that occurred at 25°C was faster at subsequently causing the accumulation of higher ethanol vapour concentration, compared to those that occurred at 10°C throughout the 10 days. This research conducted simulations of

temperature fluctuations during storage and transportation. In so doing, the kinetic systems tested at 10°C were transferred to- and kept at 25°C for a further 4 days.

The results showed that all sachets released the ethanol vapour at increased rates, consequently yielding a greater accumulation of ethanol vapour concentration in the systems. This research further undertook to study the effects of an active packaging prototype for the quality of storage of fresh bell peppers kept at either 10 or 25°C, as well as the temperature fluctuation in the simulated conditions. With the results, it was found that the ethanol vapour accumulated in the packages kept at 10°C (i.e. 10-50 $\mu\text{L L}^{-1}$ as a range of steady-state vapour concentration) and kept at 25°C (i.e. 100-300 $\mu\text{L L}^{-1}$ as a range of steady-state vapour concentration) giving better delays in quality changes especially microbial proliferation as well as surface colour changes, compared to the control group treatment (having no sachets and NaCl). The sachets made of the Active PakTM film could release ethanol vapour faster than those made of the LDPE film. The accumulation of ethanol vapour in the packages had no effect on the concentration of oxygen and carbon dioxide. Changes in the quality of the bell peppers in all packaging types kept at 10°C were took place more slowly than those kept at 25°C. When the temperatures fluctuated for a short simulated period during 10°C storage, both types of sachets release ethanol vapour at an increased rate, as found in results reported from kinetic studies. In an overview, a prototype of ethanol vapour controlled-release sachet based active packaging has the potential to reduce in-package humidity as well as extending the shelf life of bell peppers by delaying the proliferation of microbes. This active packaging prototype could be adjusted to suit packaging and storage requirements of other fruits and vegetables.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	4
1.6 ความหมายหรือนิยามศัพท์เฉพาะ	4
บทที่ 2 ตรวจเอกสาร	
2.1 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพภายหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญของพริกหวาน	6
2.2 การบรรจุแบบบรรจุอากาศดัดแปรแอคทีฟประเภทการควบคุมการปล่อย ไอระเหยเอทานอลสำหรับผักและผลไม้สด	15
2.3 สรุปประเด็นสำคัญ	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วัตถุประสงค์และวัสดุฟิล์มบรรจุภัณฑ์	26
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่สำคัญ	26
3.3 สารเคมี (Chemical)	27
3.4 วิธีดำเนินการ	27
3.5 การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์เชิงสถิติ	34
3.6 สรุปประเด็นที่สำคัญ	35

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	หน้า
4.1 สมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์ม LDPE ที่มีการเจาะรู และ จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุมฯ ที่ทำจากฟิล์ม Active Pak™ และฟิล์ม LDPE ภายในระบบปิด	36
4.2 การศึกษาผลของการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟซึ่งมีซองควบคุมฯต่อการเปลี่ยนแปลง คุณภาพของพริกหวานบรรจุถุงพลาสติก LDPE เจาะรูในระหว่างการเก็บรักษา	43
4.3 สรุปประเด็นสำคัญ	69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปการวิจัยในภาพรวม	70
5.2 ข้อเสนอแนะการวิจัยต่อไป	72
เอกสารอ้างอิง	73
ภาคผนวก	
ก การวิเคราะห์ทางเคมี – ภาพภาพ	86
ข การวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์	91
ค การหาความชื้นสัมพัทธ์ในบรรจุภัณฑ์พริกหวาน	95
ประวัติผู้วิจัย	97

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตัวอย่างของอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของผักและผลไม้บางประเภท	8
2	ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ไอระเหยเอทานอลสำหรับผลิตภัณฑ์พืชสวน	19
3	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C	50
4	การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C	55
5	ค่าสัมประสิทธิ์ของจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานซึ่งเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C	59
6	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักในพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C	61
7	การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อในพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C	64
8	การเปลี่ยนแปลงค่าสีเขียว (a^*) ของผิวพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C	67
9	การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) ของผิวพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C	68
10	การเจือจางสารละลาย (stock solution)	87
11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและจำนวน mol ของเอทานอลที่อยู่ในปริมาตรสารละลายที่ฉีด 1 μ l	88

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะปรากฏของเชื้อจุลินทรีย์บริเวณผิวของพริกหวาน	6
2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแก๊ส O_2 และอัตราการหายใจ	9
3	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอายุการเก็บรักษาของหน่อไม้ฝรั่งและสตอเบอรี่	10
4	ลักษณะปรากฏของโรคเน่าและของพริกหวาน	15
5	แบบจำลองแนวคิดกระบวนการถ่ายโอนมวลที่สำคัญสำหรับการปล่อยและสะสมไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ของพริกหวาน	20
6	แบบจำลองการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของก๊าซ ไอน้ำหรือสารประกอบโมเลกุลขนาดเล็ก	22
7	ผลของแผ่นเอทานอลต่อความแน่นเนื้อผลของเชอร์รี่หวานพันธุ์ Lapins ที่มีของ Antimold Mild® และไม่มี (control) ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 1, 10 และ 20°C เป็นเวลา 14, 10 และ 3 วัน ตามลำดับ	24
8	คะแนนของคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของเชอร์รี่หวานพันธุ์ Lapins เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 4 วัน	25
9	ตัวอย่างของช่องควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล	27
10	stainless steel cell (หรือ Permeability cell) ใช้ในการวัด film permeability to ethanol vapour (FPE)	29
11	การจัดวาง (settings) ของ permeability cell สำหรับการวัด FPE ของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม ActivePAK™ (A) และภาพตัดหลักการทำงานของ Permeability cell (B)	30
12	การใช้สารละลายเกลือ NaCl ความเข้มข้น 10% (w/v) ร่วมกับบรรจุภัณฑ์ถุงเจาะรูเพื่อลดการเกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำในบรรจุภัณฑ์พริกหวาน	32
13	เครื่องวัดก๊าซ O_2 และ ก๊าซ CO_2 Handheld gas analyser รุ่น Checkpoint3 (PBI. Dansensor, Denmark)	32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่า effective FPE (n=5) ของฟิล์มพลาสติก LDPE ซึ่งมีการเจาะรู และความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล ที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C	37
15	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก LDPE และ Nylon/PE (ฟิล์มไม่เจาะรู) และความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล ที่อุณหภูมิ 10 และ 25 °C	38
16	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศของระบบปิด ซึ่งเป็นผลจากการปลดปล่อยจากซองควบคุมฯ ที่ทำจากฟิล์ม 2 ประเภทคือ Active Pak™ และ LDPE ที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C	40
17	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลและค่า FPE ของฟิล์ม FF3 และ ฟิล์ม Active Pak™ ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C และ 25°C (ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย n=3)	41
18	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุมฯ ที่ทำจากฟิล์ม 2 ประเภทคือ Active Pak™ และ LDPE ที่สะสมในบรรยากาศของระบบปิด ในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่ (โดยจะเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 10 วัน และย้ายไปที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 4 วัน)	42
19	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซ O ₂ และก๊าซ CO ₂ ในบรรจุภัณฑ์เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C เก็บรักษาไว้ 48 ชั่วโมงจากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 2 วัน ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C เก็บเป็นเวลา 96 ชั่วโมง	44
20	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์เจาะรู เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C เก็บเป็นเวลา 7 วัน	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C เก็บเป็นเวลา 7 วัน	51
22	การเปลี่ยนแปลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และรา ในพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10°C โดยเก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C	52
23	การเปลี่ยนแปลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และรา ในพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 7 วัน	52
24	การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C เก็บเป็นเวลา 7 วัน	54
25	จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอบิกในพริกหวาน (exp. ข้อมูลศึกษาในห้องปฏิบัติการ) ซึ่งเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C	58
26	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักในพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C (A) เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 4 วัน ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C (B) เก็บเป็นเวลา 7 วัน	62
27	การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อในพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C (A) เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C (B) เก็บเป็นเวลา 7 วัน	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	การเปลี่ยนแปลงค่าสี a^* และ L^* ของพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C (A) เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C (B) เก็บเป็นเวลา 7 วัน	66
29	แบบจำลองแนวคิดกระบวนการถ่ายโอนมวลที่สำคัญสำหรับการปล่อยและสะสมไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ของพริกหวาน	71
30	การหาความชื้นสัมพัทธ์ในบรรจุภัณฑ์พริกหวาน	96

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

การบริโภคผักและผลไม้โดยเฉพาะในรูปของผลิตภัณฑ์สดพร้อมบริโภคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเพราะสามารถนำไปบริโภคได้ทันทีที่ทำให้ประหยัดเวลาตลอดจนผู้บริโภคหันมาใส่ใจสุขภาพมากขึ้น (Oliveira et al., 2015) ผลิตภัณฑ์อายุการเก็บรักษาที่ค่อนข้างสั้นและมีแนวโน้มเกิดการเน่าเสียได้ง่าย เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (ในช่วง 30-35°C) เนื่องจากกิจกรรมทางชีวเคมียังคงดำเนินต่อเนื่องภายหลังการเก็บเกี่ยว และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงสามารถกระตุ้นการหายใจและเมตาบอลิซึมของเนื้อเยื่อพืชส่งผลให้เร่งการเปลี่ยนแปลง อันเป็นผลจากปฏิกิริยาทางเคมีและเอนไซม์สลายคุณภาพโดยเฉพาะการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ส่งผลให้เกิดลักษณะปรากฏที่ไม่พึงประสงค์ของผู้บริโภค (King and Bolin, 1989) ปัญหาสำคัญของการเก็บรักษาผักและผลไม้สดก่อนการบริโภคมักเกิดขึ้นภายในขั้นตอนต่าง ๆ ของโซ่อุปทาน คือ การขาดความรู้และความเข้าใจในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม เช่น การใช้เทคโนโลยีการบรรจุภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพเพื่อยืดอายุของผลิตภัณฑ์สดและรักษาคุณภาพให้คงเดิม จึงเป็นสาเหตุสำคัญของการสูญเสียคุณภาพและมูลค่าของผัก และผลไม้สด ที่อาจสูงถึง 20-60% ของมูลค่าโดยรวม (Gardas et al., 2018) จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมเพื่อชะลอการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์มีความสำคัญอย่างยิ่ง

การบรรจุผักและผลไม้นิยมบรรจุในรูปแบบของการบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (modified atmosphere packaging systems; MAP หรือที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าคือ passive MAP) เช่น การบรรจุผลิตภัณฑ์บนถาดและหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกหรือบรรจุในถุงพลาสติกและเก็บรักษาภายใต้สภาวะอุณหภูมิเย็น (เช่น 10-12°C) การบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวชะลออัตราการหายใจและเมตาบอลิซึมเนื่องมาจากการลดลงของความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนและการเพิ่มความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ซึ่งเป็นผลจากสมดุลระหว่างอัตราการหายใจและอัตราการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของแก๊สทั้งสอง (Soliva-Fortuny and Martin-Belloso, 2003) การบรรจุแบบ passive MAP มักมีข้อจำกัดด้านการชะลอการสุกและการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นในระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา (Kader and Saltveit, 2003) ตัวอย่างของข้อจำกัดการเก็บรักษาด้วยระบบ passive MAP เช่น Loannidis et al. (2018) รายงานว่า การเก็บรักษาผักกาดแก้วในบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรซึ่งใช้บรรจุภัณฑ์จากฟิล์ม

oriented polypropylene (OPP) ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นระยะเวลา 10 วัน ไม่สามารถชะลอการเจริญเติบโตของ *Listeria monocytogenes* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสภาวะบรรยากาศตัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์ (ณ ที่นี้คือ ความเข้มข้น O₂ 3% (v/v)) ยังไม่สอดคล้องกับการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ (Pothakos et al., 2015) ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเก็บรักษาด้วยระบบ passive MAP เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา

ปัจจุบันมีแนวทางการเพิ่มศักยภาพการเก็บรักษาผักและผลไม้สดด้วยการใช้การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (active packaging) ซึ่งมีการเพิ่มระบบแอคทีฟ (active system) เช่น วัสดุดูดออกซิเจนและเอทิลีน หรือระบบปล่อยไอระเหยที่มีฤทธิ์ชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ เข้าไปให้กับการบรรจุภัณฑ์ passive MAP เพื่อชะลออัตราการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวเรียกโดยรวมว่า active MAP (Charles et al. 2003; Devlieghere et al., 2004; Rooney, 1995; วีรเวทย์ อุทโธ และคณะ, 2555) ระบบแอคทีฟที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล (ethanol vapour controlled release sachet) เนื่องจากไอระเหยเอทานอลมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคจัดให้อยู่ในกลุ่มของ GRAS (generally recognised as safe) ไอระเหยเอทานอลสามารถทำปฏิกิริยากับเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารจึงช่วยชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ (Utto, 2014) นอกจากนี้ไอระเหยเอทานอลอาจเพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัสให้กับผลิตภัณฑ์ผักผลไม้สดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงไอระเหยเอทานอลผ่านกระบวนการทางชีวภาพ (biological conversion) ของผักและผลไม้ เอทานอลที่ถูกดูดซับส่วนหนึ่งถูกใช้ในกระบวนการสังเคราะห์สารให้กลิ่นในกลุ่มเอสเทอร์ โดยมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องคือ alcohol acyltransferase (AAT) ที่ส่งผลให้กลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ขึ้น (Bai et al., 2011; Candir et al., 2012; Utto et al., 2018; Choosung et al., 2019) ตัวอย่างการวิจัยที่ได้ประยุกต์ใช้ไอของเอทานอลเพื่อชะลอการเสื่อมเสียของผักและผลไม้สด เช่น องุ่น (Lurie et al., 2006) มะเขือเทศ (Saltviet and Mencarelli, 1988) แอปเปิ้ลตัดแต่งพร้อมบริโภค (Bai et al., 2004) มะละกอตัดแต่งพร้อมบริโภค (Utto et al., 2012) หอมแดงสดปกเปลือก (พัชร มะลิลา, 2559)

พริกหวาน (bell pepper; *capsicum annum*) มีแนวโน้มของการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้รวดเร็วโดยเฉพาะบริเวณซั้วก้านซึ่งมีน้ำสามารถขังอยู่ได้จึงเป็นแหล่งเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อายุการเก็บรักษาที่สั้นเมื่อเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติกที่มีความชื้นที่สูงจากการเกิดหยดน้ำ (condensation) ภายในบรรจุภัณฑ์ แม้ว่าพริกหวานมีมูลค่าทางการตลาดและเศรษฐกิจที่สูง (Singh et al., 2013) ดังนั้นการบรรจุภัณฑ์ active MAP ที่มีซองควบคุมฯ จึงเป็นแนวทางสำคัญในการยืดอายุการเก็บรักษาของพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์พลาสติก อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่มี

การศึกษามูลของการบรรจุภัณฑ์ active MAP กับพริกหวาน จากการศึกษาเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องพบว่า อัตราการปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุมฯ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ขนาดของซองควบคุมฯ ปริมาณของเอทานอลในซองควบคุมฯ และชนิดของวัสดุที่ใช้ในการทำซองควบคุมฯ ทั้งนี้หากซองควบคุมฯ มีรูปร่างหรือขนาดที่เท่ากัน อัตราการปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุมฯ ขึ้นอยู่กับสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่าน (film permeability to ethanol vapour หรือ FPE) ของวัสดุที่ใช้ทำซองควบคุมฯ (Utto et al., 2014; Utto et al., 2018) หากซองควบคุมฯ ทำจากวัสดุฟิล์มพลาสติกที่มีค่า FPE ที่สูง เช่น ฟิล์ม low density polyethylene (LDPE) (พัชรมะลิลา, 2559) จึงส่งผลให้เกิดการซึมผ่านฟิล์มของไอระเหยเอทานอลได้ในอัตราที่สูง

เมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการสำรวจตลาดที่ห้างสรรพสินค้าในจังหวัดอุบลราชธานี พบว่า พริกหวานบรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิท (จัดเป็น passive MAP) เก็บรักษาที่ชั้นแช่เย็นมีการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่บริเวณก้นและซั้วภายใน 48 ชั่วโมงของการวางจำหน่าย ดังนั้นหากต้องมีการพัฒนาซองควบคุมฯ สำหรับบรรจุภัณฑ์ดังกล่าว ชนิดของฟิล์มพลาสติกต้องมีค่า FPE ที่ค่อนข้างสูง เพราะต้องให้มีการปล่อยไอระเหยเอทานอลออกจากซองควบคุมฯ ได้ในอัตราเร็วเพื่อชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ปัจจุบันฟิล์มพลาสติก LDPE เป็นฟิล์มที่มีค่า FPE ที่สูง (ดังที่ได้นำเสนอข้างต้น) แต่การปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุมฯ ที่มีฟิล์ม LDPE เป็นส่วนประกอบยังไม่สามารถชะลอเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 20°C ได้ดีเท่าที่ควร (วีรเวทย์ อุทโธ และคณะ, 2555; Utto et al., 2018) ทั้งนี้ อุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงกว่า 20°C เป็นสภาวะจำลองของ cool chain disruption ที่มักเกิดขึ้นในโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ของผักและผลไม้สด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดที่จะนำฟิล์มที่มีค่า FPE ที่สูงกว่าค่า FPE ของฟิล์ม LDPE มาทำเป็นซองควบคุมฯ จากการตรวจเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องพบว่าฟิล์ม Active Pak™ ที่พัฒนาโดยห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลาสติก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ค่า FPE สูงกว่าฟิล์ม LDPE (หทัยพร กัมพวงศ์, 2560) จึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาทำซองควบคุมในการบรรจุแอคทีฟ

ปัจจุบันยังไม่มีรายงานการนำซองควบคุมฯ ซึ่งทำจากฟิล์ม Active Pak™ มาร่วมใช้กับบรรจุภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์นั้น ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอข้อเสนอแนะวิจัยซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟประเภทซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลโดยใช้ฟิล์ม Active Pak™ เป็นส่วนหนึ่งของซองควบคุมฯ สำหรับพริกหวานสดทั้งลูก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาต้นแบบบรรจุภัณฑ์แอคทีฟประเภทซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลโดยใช้ฟิล์ม Active Pak™

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีของควบคุมา ซึ่งมีส่วนประกอบของฟิล์ม Active Pak™ ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพริกหวานในระหว่างการเก็บรักษา

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ของควบคุมาซึ่งทำจากฟิล์ม Active Pak™ สามารถปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลได้เร็วกว่าของควบคุมาที่ทำจากฟิล์ม LDPE

1.3.2 บรรจุภัณฑ์แอคทีฟซึ่งมีของควบคุมาสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพริกหวานในระหว่างการเก็บรักษา

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ฟิล์มของควบคุมาที่ใช้คือฟิล์ม Active Pak™ และฟิล์ม LDPE (ฟิล์ม LDPE ใช้เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับฟิล์ม Active Pak™)

1.4.2 อุณหภูมิในการเก็บรักษาที่ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 4 วัน ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มักเกิดขึ้นในระหว่างโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ของผัก และผลไม้รวมทั้งพริกหวาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1.5.1 ต้นแบบบรรจุภัณฑ์แอคทีฟประเภทของควบคุมาการปล่อยไอระเหยเอทานอลสำหรับพริกหวาน

1.5.2 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพริกหวานในการบรรจุแอคทีฟซึ่งมีของควบคุมาการปล่อยไอระเหยเอทานอล

1.6 ความหมายหรือนิยามศัพท์เฉพาะ

1.6.1 การบรรจุแอคทีฟ (active packaging) คือ การบรรจุที่บรรจุภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ และระบบแอคทีฟ และสิ่งแวดล้อมซึ่งมีปฏิสัมพันธ์กัน

1.6.2 ของควบคุมาการปล่อยไอระเหยเอทานอล คือ ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการใช้ของควบคุมาที่ 2 ประเภท ประกอบด้วย (1) ของควบคุมาที่ทำจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์ด้านหนึ่งเป็น Active Pak™ อีกด้านหนึ่งเป็นฟิล์มอะลูมิเนียมพอลิเอทิลีน (AL/PE) และ (2) ของควบคุมาที่ทำจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์ด้านหนึ่งเป็นฟิล์ม LDPE อีกด้านหนึ่งเป็นฟิล์ม AL/PE

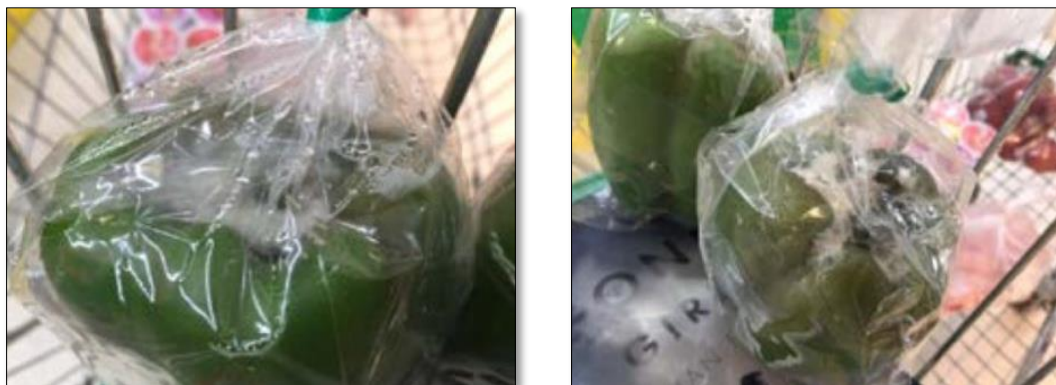
บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

ผักและผลไม้สดภายหลังการเก็บเกี่ยวผลิตผลยังคงมีชีวิตอยู่ส่งผลให้กระบวนการทางสรีรวิทยาและชีวเคมียังคงดำเนินอยู่ โดยเฉพาะการหายใจซึ่งเป็นกระบวนการทางชีวเคมีมีการใช้แก๊สออกซิเจนและปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และความร้อนออกมาส่งผลให้กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมตาบอลิซึมยังดำเนินการต่อเนื่องและนำไปสู่การเปลี่ยนแปลง เช่น การสูญเสียความแน่นเนื้อ และความกรอบ (Kays, 1991) การเก็บรักษาผลิตผลในสภาพความชื้นต่ำ และอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการคายน้ำมากยิ่งขึ้น เนื่องจากบรรยากาศรอบๆ ผลิตผลมีความดันไอน้ำที่ต่ำกว่าในผลิตผลส่งผลให้ไอน้ำจึงเคลื่อนที่ออกจากเนื้อเยื่อไปยังอากาศซึ่งมีความชื้นต่ำกว่า การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลให้ผลิตผลเหี่ยวลงอย่างรวดเร็ว (Wills et al., 1998) การเก็บรักษาผลิตผลที่อุณหภูมิห้องซึ่งมีอุณหภูมิที่สูงเช่น 30-35°C สามารถกระตุ้นการหายใจ และเมตาบอลิซึมของเนื้อเยื่อพืช และเร่งการเปลี่ยนแปลงและเสื่อมสลายคุณภาพโดยเฉพาะการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ทำให้เกิดลักษณะปรากฏที่ไม่พึงประสงค์สำหรับผู้บริโภค (King and Bolin, 1989) การเสื่อมคุณภาพจากกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่ไม่เหมาะสม เช่น การโยนและการวางกดทับ ส่งผลให้ผักและผลไม้เกิดความบอบช้ำ หรือมีบาดแผลซึ่งนำไปสู่การเร่งการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและมีการเข้าทำลายของจุลินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงและการเสื่อมเสียดังกล่าวเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ของผู้บริโภค (จิราภา เหลืองอรุณเลิศ, 2554) จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวของผักและผลไม้เพื่อชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพก่อนที่ผู้บริโภคจะทำการซื้อ และบริโภคผลิตผล (ณัฐวิวัฒน์ หมั่นมาณี และคณะ, 2559; Snowdon, 1990)

พริกหวาน (bell pepper) เป็นผลิตผลที่ได้รับความนิยมในการศึกษาวิจัยนี้เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการ โดยเฉพาะเป็นแหล่งวิตามินซีที่สำคัญ และมีมูลค่าทางเศรษฐกิจที่สูง จากการสำรวจตลาดที่จำหน่ายพริกหวานในห้างสรรพสินค้า จังหวัดอุบลราชธานี พบว่า ราคาจำหน่ายปลีกของพริกหวานเท่ากับ 15-20 บาท ต่อลูก พริกหวานสดได้รับการบรรจุในถุงพลาสติกจำนวน 1 หรือ 2 ลูกต่อถุง เก็บรักษาไว้ในชั้นจำหน่ายที่ควบคุมอุณหภูมิ 12-15°C อย่างไรก็ตามบริเวณหัวของพริกหวานมีการปรากฏของเชื้อจุลินทรีย์ที่มีสีดำเป็นใย (ภาพที่ 1) จากการศึกษาเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องพบว่า เชื้อจุลินทรีย์ที่มักเกิดบริเวณหัวของพริกหวานมักเป็นจุลินทรีย์ประเภท *Botrytis* spp. (เช่น *B. cinerea* ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญของราสีเทา หรือ grey mould) และ/หรือ *Alternaria* spp. (González-Aguilar et al., 2007; Wang et al., 2017) การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าว

เป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้ผู้บริโภคปฏิเสธการซื้อพริกหวาน นอกเหนือจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพริกหวานจากสาเหตุอื่น ๆ เช่น การสูญเสียน้ำหนัก การนิ่มของเนื้อสัมผัส เกิดรอยเหี่ยวยุบของผิว และการเปลี่ยนแปลงสีโดยเฉพาะพริกหวานสีเขียว เป็นอีกสาเหตุสำคัญซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ (undesirable effects) ของผู้บริโภค



ภาพที่ 1 ลักษณะปรากฏของเชื้อจุลินทรีย์บริเวณผิวของพริกหวาน

จากที่ได้กล่าวในบทที่ 1 งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟประเภทการปล่อยไอระเหยเอทานอลสำหรับพริกหวาน ดังนั้นในเนื้อหาในบทที่ 2 นี้ได้รวบรวมเนื้อหาจากเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง และแบ่งการนำเสนอเป็น 2 ส่วนประกอบด้วย (1) การเปลี่ยนแปลงหลังเก็บเกี่ยวที่สำคัญของพริกหวาน และ (2) การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับพริกหวาน รายละเอียดของเนื้อหาแสดงได้ดังต่อไปนี้

2.1 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพภายหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญของพริกหวาน

2.1.1 การหายใจ

ผลผลิตสดหลังการเก็บเกี่ยวจำเป็นต้องหายใจเพื่อสังเคราะห์พลังงานมาใช้ในการดำรงชีวิต โดยนำแก๊สออกซิเจนเข้าไปออกซิไดซ์ (oxidize) อาหารสะสมภายในผลผลิตพร้อมทั้งปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ พลังงานเคมีและความร้อน โดยทั่วไปการหายใจแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การหายใจแบบใช้ออกซิเจน (aerobic respiration) ซึ่งเกิดขึ้นในสภาพอากาศปกติ (21 % O_2 และ 0.03 % CO_2 (v/v)) และการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) เกิดขึ้นในสภาพที่มีแก๊สออกซิเจนต่ำหรือไม่มีอาหารสะสมถูกนำไปใช้ในกระบวนการ glycolysis ทำให้ pyruvate ถูกเปลี่ยนไปเป็น acetaldehyde และ ethanol โดยเอนไซม์ carboxylase และ alcohol dehydrogenase ผลผลิตจากการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนทำให้เนื้อเยื่อพืชมีกลิ่นผิดปกติ

จึงจำเป็นต้องป้องกันไม่ให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนขึ้น อัตราการหายใจของผลผลิตมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา เนื่องจากหากผักและผลไม้มีอัตราการหายใจที่สูง (เช่น อัตราการหายใจของมะม่วงที่ใกล้สุก ซึ่งมีค่าเท่ากับ $150 \text{ mgCO}_2 \text{ kg}^{-1}\text{-hr}^{-1}$) สามารถนำไปสู่การลดลงของอายุการเก็บรักษาได้ ทั้งนี้พริกหวานจัดเป็นพืชที่มีอัตราการหายใจต่ำ ซึ่งอัตราการหายใจของพริกหวานที่อุณหภูมิ 8°C มีค่าเท่ากับ $21 \text{ mgCO}_2 \text{ kg}^{-1}\text{-hr}^{-1}$ (Singh et al., 2014)

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการหายใจสามารถแบ่งออกได้ 2 กลุ่มประกอบด้วย ปัจจัยภายใน เช่น พันธุกรรม ขนาดและรูปร่าง และปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิ และความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 รายละเอียดโดยสรุปของปัจจัยทั้งสองสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

ปัจจัยภายในตัวอย่างของปัจจัยภายในและผลของปัจจัยต่ออัตราการหายใจ สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) พันธุกรรม ที่แตกต่างกันของผลผลิตย่อมส่งผลให้มีอัตราการหายใจที่แตกต่างกันไป เช่น ผลส้มหลังการเก็บเกี่ยวไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลง จึงมีอัตราการหายใจต่ำกว่าผลไม้ชนิดอื่น เช่น กล้วย มะม่วงมีการสุกเกิดขึ้นอย่างชัดเจน (จริงแท้ ศิริพานิช, 2548: 41)

(2) ขนาดและรูปร่าง ผลไม้ที่มีขนาดเล็กมีอัตราการหายใจสูงกว่าผลไม้ที่มีขนาดใหญ่ เพราะมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร (surface area to volume ratio: SA to V ratio) สูง ส่งผลให้เกิดการสัมผัสกับอากาศภายนอกมากกว่าทำให้มีการถ่ายโอนของแก๊ส O_2 ไปยังผลผลิตได้ง่าย จึงเกิดอัตราการหายใจสูงขึ้นส่งผลให้เกิดการเสื่อมเสียได้เร็วกว่าผลไม้ที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีค่า SA to V ratio ต่ำกว่า (จิรา ณ หนองคาย, 2531: 59) ตัวอย่างของอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของผักและผลไม้บางประเภท แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างของอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของผักและผลไม้บางประเภท

พื้นที่ผิวต่อปริมาตร ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-3}$)	ชนิดของผักและผลไม้
500 – 1000	พืชที่มีช่องว่างระหว่างเซลล์มากใกล้ผิวใบ
50 – 100	พืชที่มีแต่ใบสัมผัสอากาศโดยตรง
10 – 15	เมล็ดธัญพืช
5 – 10	เมล็ดถั่ว ผลไม้ขนาดเล็ก
2 – 5	ผักถั่ว ผลไม้เนื้ออ่อนขนาดใหญ่ เช่น สตอเบอร์รี่ หอมต้น
0.5 - 1.5	พืชหัว เช่น มันฝรั่ง มันเทศ แครอท เผือก ผลไม้ประเภท Pome เช่น แอปเปิล สาลี่ ผลไม้ประเภท Stone fruit เช่น ท้อ พลัม เนคทารีน
0.2 - 0.5	กะหล่ำปลีที่ห่อหุ้มแน่น เทอร์นิพ แยม มะพร้าว

ที่มา: จริงแท้ ศิริพานิช (2548: 90)

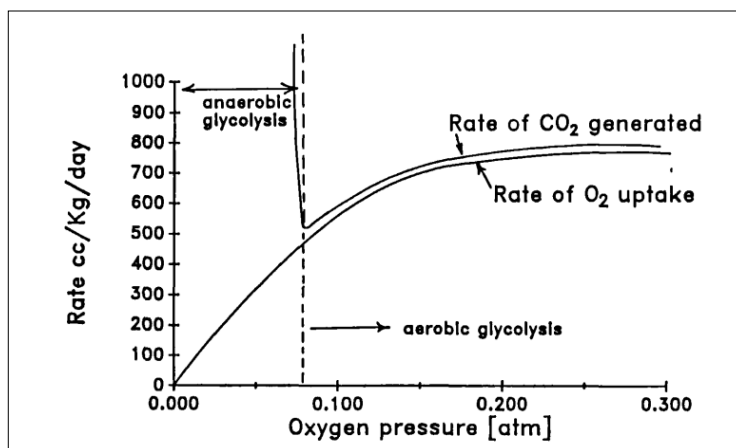
(3) สารตั้งต้น (substrate) ของการหายใจ ถ้าใช้คาร์โบไฮเดรตเป็น substrate ค่า respiratory quotient (R.Q.) ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างแก๊ส CO_2 ต่อแก๊ส O_2 มีค่าเท่ากับ 1 ถ้าใช้ไขมันเป็น Substrate ทำให้ค่า R.Q. มีค่าน้อยกว่า 1 และถ้าใช้กรดอินทรีย์ (organic acid) เป็น substrate ทำให้ค่า R.Q. มีค่า R.Q. มีค่ามากกว่า 1 สำหรับการหายใจแบบใช้แก๊ส O_2 นั้น มีค่า R.Q. อยู่ระหว่าง 0.7 ถึง 1.3 แต่ถ้าค่า R.Q. สูงมากกว่นี้ แสดงให้ทราบว่ามีการหายใจแบบไม่ใช้แก๊ส O_2 (จริงแท้ ศิริพานิช, 2548: 44)

(4) ส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยทั่วไปผลิตผลที่เป็นส่วนของพืชที่กำลังเจริญเติบโต เช่น ยอดอ่อนของผักจะมีอัตราการหายใจสูง เพราะต้องใช้พลังงานในการส่งเสริมส่วนต่าง ๆ ในขณะที่ยอดผลิตที่อยู่ระหว่างพักตัว เช่น มันฝรั่ง มันเทศ และเมล็ดเคียวมันมีอัตราการหายใจต่ำมาก (จริงแท้ ศิริพานิช, 2548: 42)

ปัจจัยภายนอก ตัวอย่างของปัจจัยภายนอกและผลของปัจจัยเหล่านี้ต่ออัตราการหายใจสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

(1) ความเข้มข้นของแก๊ส O_2 อัตราการหายใจแปรผันตามความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนตามความสัมพันธ์แบบ Michaelis-Menten (ภาพที่ 2) กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของแก๊ส O_2 เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยส่งผลให้อัตราการหายใจมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก จนถึงระดับคงที่แม้ว่าเพิ่มความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ต่อไป หากความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ลดต่ำลงส่งผลให้อัตราการหายใจลดลง แต่ถ้าความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ลดลงต่ำเกินไป เช่น ต่ำกว่า 1% (v/v) ผักและผลไม้จะหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ผลลัพธ์ได้คือ แอลกอฮอล์และแอลดีไฮด์ ทำให้เกิดกลิ่นรสที่ผิดปกติและอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สั้นลงดังที่ได้กล่าวข้างต้น (งามทิพย์ ภู่วโรตม, 2549: 339-341)



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแก๊ส O_2 และอัตราการหายใจ
ที่มา: Labuza and Breene (1989)

(2) ความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่มีความเข้มข้นสูงๆ (เช่น ตั้งแต่ 5% v/v ขึ้นไป) สามารถชะลอการหายใจของพืชได้ แต่หากมีความเข้มข้นสูงเกินไปอาจทำให้เกิดเมตาบอลิซึมและการหายใจที่ผิดปกติ เป็นสาเหตุให้พืชเสื่อมและเน่าเสียเร็วยิ่งขึ้น (งามทิพย์ ภู่วโรตม, 2549: 339-341)

(3) เอทิลีน เป็นฮอร์โมนพืชชนิดเดียวที่มีสถานะเป็นแก๊ส โดยผักและผลไม้ทุกชนิดสามารถสร้างขึ้นได้ และมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของผักและผลไม้โดยกระตุ้นกระบวนการทางชีวเคมีต่าง ๆ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ เช่น การสุก และสามารถกระตุ้นการหายใจ แม้มีความเข้มข้นของ เอทิลีนต่ำถึงระดับ 0.01 ppm ทั้งนี้พริกหวานจัดเป็นพืชที่ผลิตเอทิลีนในระดับต่ำหรือจัดอยู่ในกลุ่มพืชประเภท non-climacteric นอกจากนี้พริกหวานมีการตอบสนองต่อเอทิลีนต่ำ ส่งผลให้เกิดการสุกและเปลี่ยนแปลงคุณภาพ เช่น สี หรือเนื้อสัมผัสเกิดขึ้นได้ในอัตราที่ไม่สูง (งามทิพย์ ภู่วโรตม, 2549: 339-341)

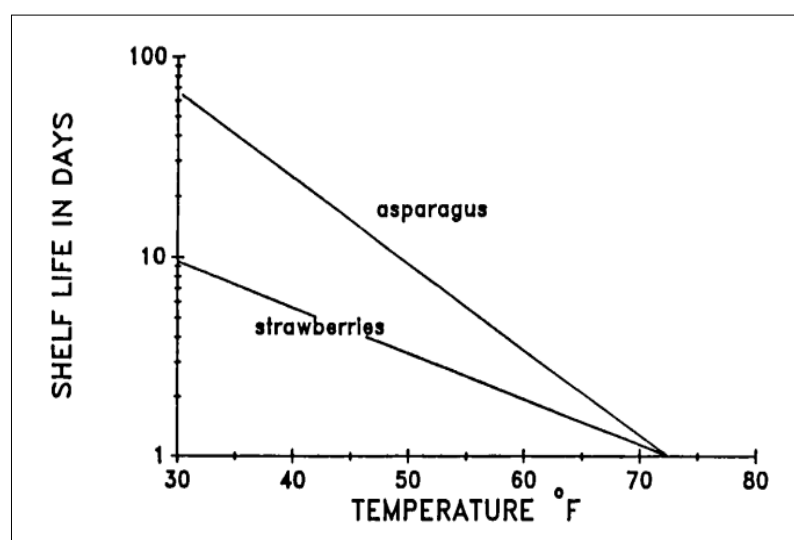
(4) รอยขีดที่เกิดจากแรงกระทำต่าง ๆ จะทำให้อัตราการหายใจและการผลิตเอทิลีนของผักและผลไม้สูงขึ้น อายุการเก็บรักษาจึงลดลง ดังนั้น ขั้นตอนต่าง ๆ ตั้งแต่เก็บเกี่ยว ขนส่งและการจัดจำหน่ายให้ผู้บริโภค จะต้องมีการบรรจุที่ดีเพื่อป้องกันแรงกระทำต่าง ๆ ได้ (งามทิพย์ ภู่วโรตม, 2549: 339-341)

(5) อุณหภูมิ เป็นปัจจัยสำคัญมากต่อการเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยว หากอุณหภูมิการเก็บรักษาหรือระหว่างการเก็บเกี่ยวอยู่ในระดับที่สูง สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีให้

เกิดขึ้นได้เร็ว ส่งผลให้อัตราการหายใจสูงขึ้น ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอื่น ๆ อัตราเร็วของกระบวนการทางชีวเคมีมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์อาร์เรเนียส (Arrhenius relationship) (สมการที่1) แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วในรูปแบบเอกซ์โปเนนเชียล (exponential) เมื่ออุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้น และทำให้ผลิตภัณฑ์อายุการเก็บรักษาที่สั้นลง (ภาพที่ 3)

$$k = A \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (1)$$

โดย k คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็ว (rate constant) A คือ ค่าคงที่ของอาร์เรเนียส (Arrhenius constant) Ea คือ พลังงานกระตุ้น (activation energy, kJ mol^{-1}) R คือ ค่าคงที่ของแก๊สในอุดมคติ (ideal gas constant $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature, K) ค่าพลังงานกระตุ้นแสดงถึงความไว (sensitivity) ของอัตราเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอายุการเก็บรักษาของหน่อไม้ฝรั่งและสตรอเบอรี่
ที่มา: Labuza and Breene (1989)

จากความสัมพันธ์แบบอาร์เรเนียส ระหว่างอัตราการหายใจและอุณหภูมิ ทำให้เห็นได้ว่าการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ González-Aguilar et al. (2004) รายงานว่า อายุการเก็บรักษาพริกหวานที่อุณหภูมิ 5°C และ 10°C เท่ากับ 21 และ 14 วันตามลำดับ โดยพิจารณาอายุการเก็บรักษาจากคุณภาพในภาพรวมของพริกหวาน และการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามการลดอุณหภูมิต่ำอาจนำไปสู่อาการผิดปกติที่อุณหภูมิต่ำเรียกว่า

อาการสะท้อนหนาว (chilling injury) ขึ้นได้ อาการสะท้อนหนาวเป็นลักษณะที่ผิดปกติของเนื้อเยื่อที่เกิดเนื่องจากการตอบสนองของเนื้อเยื่อพืชต่อสภาพอุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นอาการผิดปกติทางสรีรวิทยาที่เกิดเนื่องจากการที่พืชได้รับอุณหภูมิต่ำกว่าเนื้อเยื่อเยือกแข็ง (chilling temperature) โดยเฉพาะพืชในเขตร้อนหรือกึ่งร้อนที่อุณหภูมิ 10°C หรือต่ำกว่า เพราะพืชแต่ละชนิดมีความสามารถทนทานต่ออุณหภูมิต่ำไม่เท่ากัน (Kader, 1983) พริกหวานเป็นพืชชนิดหนึ่งที่อ่อนแอต่ออาการสะท้อนหนาวเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 7°C ทั้งนี้ Snowdon (1991) ; Liu et al. (2015) กล่าวว่า ลักษณะของอาการสะท้อนหนาวที่สำคัญของพริกหวาน คือ การยุบตัวของเนื้อเยื่อที่ผิว (หรือเป็นจุดหรือรอยบวม) ทั้งนี้ผลพริกหวานที่ยังไม่แก่จะสูญเสียความแน่นเนื้อ และมีการเน่าเสียเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ร่วมกับอาการสะท้อนหนาว อาการเหล่านี้ปรากฏได้ชัดมากขึ้น เมื่อผลิตผลถูกย้ายไปไว้ในสภาพที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นช่วงอุณหภูมิการเก็บรักษาที่ดีของพริกหวานควรอยู่ระหว่าง 7-13°C (González -Aguilar, 2004)

(6) สภาวะบรรยากาศรอบ ๆ ผลิตผล เมื่อพิจารณาภาพที่ 2 พบว่าในบรรยากาศปกติ อัตราการหายใจมีค่าที่สูงสุด เนื่องจากความเข้มข้นของแก๊ส O_2 มีค่าประมาณ 21% (v/v) ซึ่งเป็นค่าที่สูงสุดในบรรยากาศปกติ ดังนั้นหากมีการปรับลดความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ในบรรยากาศรอบ ๆ ผลิตผลจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดอัตราการหายใจ เช่น หากความเข้มข้นของแก๊ส O_2 เท่ากับ 2-10% (v/v) (สภาวะดังกล่าวเรียกว่าสภาวะบรรยากาศดัดแปร) สามารถชะลออัตราการหายใจและการเจริญเติบโตของ Gram-negative aerobes เช่น *Pseudomonas* spp. และหากความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 อยู่ในช่วง 5-15% (v/v) พบว่ามีประสิทธิภาพในการควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์แอโรบิกแบคทีเรียแกรมลบ (gram negative bacteria) และรา แต่ไม่สามารถยับยั้งยีสต์ส่วนใหญ่ได้ (Al-Ati and Hotchkiss, 2002) ตัวอย่างสภาวะบรรยากาศดัดแปรที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาพริกหวาน เช่น ความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ในช่วง 2-5% (v/v) ที่อุณหภูมิ 8°C เป็นช่วงที่เหมาะสมในการเก็บรักษาพริกหวานสีเขียว ทำให้การหายใจและการสูก้างและคงไว้ซึ่งสีเขียวเริ่มต้น (Saltveit, 2001; Wang, 1977) ทั้งนี้ Bussel and Kenigsberger (1975) ได้เสนอแนะสภาวะบรรยากาศดัดแปรสำหรับการเก็บพริกหวานสด คือ ความเข้มข้นของแก๊ส O_2 4-8% (v/v) และความเข้มข้นแก๊ส CO_2 2-8% (v/v) ตามลำดับ ที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 7-12°C

2.1.2 การคายน้ำ

การคายน้ำคือการสูญเสียน้ำของพืชในรูปของไอน้ำ ผักและผลไม้ต้องคายน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อระบายความร้อนที่เกิดจากการหายใจ ประกอบกับปริมาณความชื้นภายในผลิตผลที่มีสูงกว่าความชื้นของอากาศภายนอก น้ำภายในผักและผลไม้จึงเคลื่อนตัวออกสู่ภายนอกทั้งทางปากใบ รอยแตกบริเวณผิวหน้า หรือบาดแผลต่าง ๆ จึงทำให้มีการสูญเสียน้ำอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้การสูญเสียน้ำจากผลิตผลเป็นสาเหตุสำคัญของการสูญเสียน้ำหนัก หากเกิดการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 3-10%

ส่งผลให้คุณภาพของผักและผลไม้ลดลงอย่างมาก (งามทิพย์ ภู่วโรดม, 2549: 341) โดยเฉพาะคุณภาพเนื้อสัมผัส (texture) ผักและผลไม้สูญเสียความกรอบ และผิวเหี่ยวยุ่น (สายชล เกตุษา, 2528: 87) นอกจากนี้การสูญเสียน้ำหนักของผักและผลไม้ยังเกิดขึ้นจากการปอก หั่น ตัดแต่งหรือแปรรูปเบื้องต้นทำให้เนื้อเยื่อของผักและผลไม้เกิดความเสียหาย และมีอัตราการหายใจเพิ่มมากขึ้นจึงเร่งให้เกิดการสูญเสียจากผลผลิต สาเหตุสำคัญของการสูญเสียที่มีความสัมพันธ์กับการเก็บรักษาในสภาวะที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อความดันภายในและภายนอกของผลผลิตทำให้เกิดการคายน้ำขึ้น (จรัสศิริพานิช, 2549: 29) ตัวอย่างปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการคายน้ำของพืช มีดังนี้

2.1.2.1 อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตร ดังที่ได้กล่าวข้างต้นผลผลิตที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมีอัตราการหายใจ ซึ่งมีอัตราการคายน้ำที่สูงด้วย ทั้งนี้พืชผักประเภทใบจะมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงกว่าพืชหัว (ตารางที่ 1) ดังนั้นผักใบและผลไม้ที่มีขนาดเล็กมีอัตราการสูญเสียได้มากกว่าผักประเภทหัวและผลไม้ที่มีขนาดใหญ่ (จิรา ณ หนองคาย, 2531: 64)

2.1.2.2 บาดแผล การที่มีบาดแผลเกิดขึ้นมากหรือน้อยมีผลไปกระตุ้นการสูญเสียน้ำมากขึ้น โดยเฉพาะรอยแผลที่ลึกมากซึ่งจะไปทำลายเซลล์ชั้นผิวที่ทำหน้าที่ป้องกัน ทำให้เนื้อเยื่อที่อยู่ข้างในมีลักษณะผนังบางและสัมผัสกับอากาศโดยตรง จึงเป็นเหตุให้มีการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น (จิรา ณ หนองคาย, 2531: 29)

2.1.2.3 อุณหภูมิ ความร้อนจากสภาวะแวดล้อม และความร้อนที่เกิดจากการหายใจของพืชเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เกิดการเร่งการคายน้ำของพืช เช่นเดียวกับการเร่งอัตราการหายใจเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาสูงขึ้น (งามทิพย์ ภู่วโรดม, 2549: 342)

2.1.2.4 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อัตราการคายน้ำของพืชมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อความดันไอน้ำในอากาศมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำสมดุลของพืช โดยทั่วไปควรเก็บผักและผลไม้ไว้ในที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่สูง และที่อุณหภูมิต่ำ ในการศึกษาการเก็บรักษาพริกหวาน Janssens (1993) รายงานว่า สภาวะการเก็บรักษาที่เหมาะสมสำหรับพริกหวาน คือ ความชื้นสัมพัทธ์ 90–95% ที่อุณหภูมิ 8°C อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาดังกล่าวจำเป็นต้องระวังเรื่องการควบแน่นเป็นหยดน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เร่งการเจริญของจุลินทรีย์ และนำไปสู่การเสื่อมเสียของผลผลิตได้เร็วขึ้น (งามทิพย์ ภู่วโรดม, 2549: 342) ทั้งนี้การสูญเสียน้ำหนักของพริกหวานจากการคายน้ำ ที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 5% ที่อุณหภูมิ 25°C ระดับดังกล่าวแสดงให้เห็นทราบว่าหากมีการสูญเสียน้ำหนักของพริกหวานในระดับที่สูงกว่านี้ ผลผลิตจะไม่สามารถจำหน่ายได้ (เกศรัตน์ วิศวไพศาล และคณะ, 2555)

2.1.3 การสูญเสียวิตามินซี

ผักและผลไม้หลังการเก็บเกี่ยวปริมาณวิตามินซีมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าวิตามินชนิดอื่น เนื่องจากวิตามินซีมีการสูญเสียได้ทั้งจากการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด เช่น กรดแอสคอร์บิก

ออกซิเดส (ascorbic acid oxidase) พอลิฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase) และ เพอร์ออกซิเดส (peroxidase) ที่อยู่ในผลผลิต และอาจเกิดจากออกซิเดชันที่ไม่ใช้เอนไซม์แต่จะมี โลหะหนัก เช่น ทองแดง เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามกรดซิตริก (citric acid) และ กรดมาลิก (malic acid) สามารถยับยั้งการสลายตัวของกรดแอสคอร์บิกได้ เพราะมีสมบัติในการ chelate ไอออนของโลหะเอาไว้ นอกจากนี้สภาพแวดล้อมในระหว่างการเก็บรักษามีผลอย่างมากต่อการสลายตัวของกรดแอสคอร์บิก เมื่ออุณหภูมิสูงและความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ส่งผลให้การสูญเสีย กรดแอสคอร์บิกของผักและผลไม้มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น (จริงแท้ ศิริพานิช, 2548: 100)

พริกหวานเป็นแหล่งของวิตามินซีที่สำคัญ (Bae et al., 2012; Conforti et al., 2007) วิตามินซีเป็นสารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบอินทรีย์ที่สำคัญของผักและผลไม้ (Liu et al., 2015) ปริมาณวิตามินซีของพริกหวานมีความแตกต่างกันตามสายพันธุ์หรือความสมบูรณ์ของพริก หวาน เช่นพริกหวานสีเขียวมี่มีความเข้มข้นของวิตามินซีเท่ากับ $98\text{mg } 100\text{g}^{-1}$ ในขณะที่พริกหวานสีส้ม ให้วิตามินซีสูงถึง $108\text{mg } 100\text{g}^{-1}$ (Simonne et al., 1997) การลดลงของวิตามินซีในระหว่างการ เก็บรักษาเกิดจากการเปลี่ยนกรดแอสคอร์บิกเป็นกรดดีไฮโดรแอสคอร์บิก (dehydroascorbic acid) โดยเอนไซม์แอสคอร์บิกออกซิเดส (ascorbic acid oxidase) (Singh et al., 2005) นอกจากนี้ วิตามินซี มีความสามารถละลายในน้ำได้ดีจึงอาจเกิดการสูญหายในระหว่างการตัดแต่งและการล้างทำ ความสะอาด ดังนั้นการชะลอการสูญเสียของวิตามินซีของผักและผลไม้สดภายหลังการเก็บเกี่ยวและ การแปรรูปจึงมีความสำคัญ

2.1.4 การเปลี่ยนแปลงสี

การชราของพืช (senescence) มีผลทำให้เกิดการสูญเสียสีเขียวซึ่งเกิดจากการสลายตัว ของคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ทำให้เห็นสีเหลืองชัดขึ้นเนื่องจากรงควัตถุแคโรทีนอยด์ (carotenoid) นอกจากนี้มีแนวโน้มการเห็นสีที่เพิ่มขึ้นบนผิวของพืชเนื่องจากการสร้างรงควัตถุ anthocyanin ซึ่งมี สีน้ำเงิน-ม่วงแดง เช่น ผลของแอปเปิลและเชอรี่ หรือการสร้างรงควัตถุ lycopene ซึ่งมีสีแดง เช่น มะเขือเทศ การเปลี่ยนแปลงสีดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผลไม้เริ่มสุก ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลง เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลาการเก็บรักษา และองค์ประกอบของบรรยากาศในห้องเก็บรักษา โดยเฉพาะแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 (จริงแท้ ศิริพานิช, 2548: 88-94)

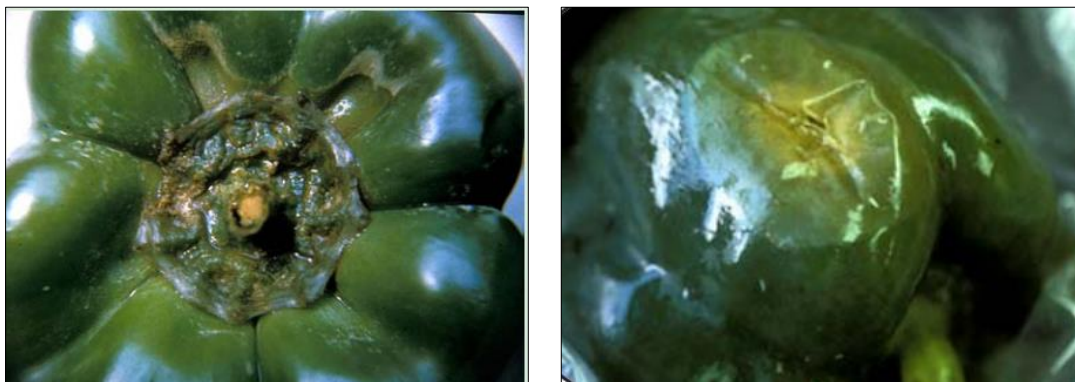
การเปลี่ยนแปลงสีของพริกหวานสีเขียวเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสี ทั้งนี้พริก หวานสีเขียวมีคลอโรฟิลล์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เมื่อเริ่มสุกมากขึ้นส่งผลให้คลอโรฟิลล์เกิดการ สลายตัวและนำไปสู่การปรากฏของสีจากรงควัตถุอื่นชัดเจนขึ้น โดยเฉพาะจากกลุ่มแคโรทีนอยด์ เช่น ลูทีน (lutein) และเบต้า-แคโรทีน (β -carotene) ซึ่งมีสีเหลือง และสีส้ม หรือ แอสตาแซนธิน (astaxanthin) ซึ่งมีสีแดงสด นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาสายพันธุ์ของพริกหวานทำให้มีสีสั นที่หลากหลายมากขึ้น เช่น สีม่วง (Frank et al., 2001)

2.1.5 การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส

เมื่อผลผลิตมีอายุมากขึ้นความแน่นแข็งของเนื้อเยื่อมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของผนังเซลล์บริเวณมิดเดิลลามลลา (middle lamella) โดยกิจกรรมของเอนไซม์ทำให้เนื้อเยื่ออ่อนตัวอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของเนื้อผล (texture) ขึ้นกับชนิดของผลผลิตและสภาพที่เก็บรักษา องค์ประกอบของผนังเซลล์และส่วนประกอบอื่นๆภายในเซลล์ (สายเซล เกตุษา, 2528: 121) ทั้งนี้การสูญเสียไอน้ำหรือน้ำในรูปของเหลวจากผลผลิตเป็นสาเหตุสำคัญหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส กล่าวคือ ทำให้เกิดความนิ่มหรือเหี่ยวยุบ ดังนั้นแนวทางของการชะลอการสูญเสียน้ำจากผลผลิตเป็นการชะลอการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสได้ทางหนึ่ง

2.1.6 การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์

การปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในผักและผลไม้เป็นสาเหตุทำให้ผลผลิตมีอายุการเก็บรักษาที่สั้นลง เชื้อจุลินทรีย์ที่สำคัญในผักและผลไม้ที่ก่อให้เกิดปัญหา คือ ยีสต์ รา แบคทีเรีย เช่น *Salmonella* และ *Escherichia coli* (สุมนธา วัฒนสินธ์, 2549) การเก็บเกี่ยว การขนส่ง และบรรจุภัณฑ์เป็นสาเหตุหลักของการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ พริกหวานมีความอ่อนแอต่อโรคหลังการเก็บเกี่ยวที่เกิดจากการเน่าเสียหรือแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคต่าง ๆ เช่น *Escherichia coli* *Salmonella enteritidis* *Bacillus subtilis* *Staphylococcus aureus* ทั้งนี้องค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา รายงานว่ามีการปนเปื้อนของเชื้อ *Salmonella* ในพริกหวานแดงและเขียวสด (Ramos et al., 2013) ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์มักเกิดบริเวณซั้วของพริกหวาน ตัวอย่างของโรคพืชสำคัญของพริกหวาน เช่น โรคผลเน่า (grey mold decay) มีสาเหตุสำคัญจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ *Botrytis cinerea* ลักษณะอาการเริ่มจากชั้นของเซลล์ใต้ epidermis นำไปสู่การฉ่ำน้ำและอ่อนตัวอย่างรวดเร็วของเซลล์ ในขณะที่สีของบริเวณที่เกิดโรคมักมีการเปลี่ยนสีซีดจางลงและนำไปสู่การเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ภายหลังจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมักพบว่าเกิดแผลชัดเจนและผิวของพริกเกิดการยุบตัวลง เมื่อผิว epidermis แตกออกมักพบเส้นใย (mycelium) โดยมีลักษณะเป็นผงฟูสีเทาหรือน้ำตาลอ่อนคลุมบริเวณรอยแผลเน่าดังกล่าว (มีลักษณะคล้ายการเจริญของเส้นใยซึ่งเกิดบริเวณซั้วของพริกหวานดังแสดงในภาพที่ 1) นอกจากนี้โรคเน่าละ (bacteria soft rot) (ภาพที่ 4) เป็นการเปลี่ยนแปลงทางจุลินทรีย์ที่ไม่พึงประสงค์ที่สำคัญของพริกหวาน ทั้งนี้โรคเน่าละมีสาเหตุสำคัญจากเชื้อจุลินทรีย์ *Erwinia carotovora* pv. *carotovora* และ *Erwinia carotovora* subsp. *atroseptica* เชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าวเข้าทำลายผลพริกหวานขณะอยู่บนต้นในแปลงปลูกหรือในระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา



ภาพที่ 4 ลักษณะปรากฏของโรคเน่าและของพริกหวาน

ที่มา: ชมภู ยิ้มโต (2557; อ้างอิงจาก Black, 2001)

2.2 การบรรจุแบบบรรยากาศดัดแปรแอคทีฟประเภทการควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลสำหรับผักและผลไม้สด

2.2.1 การบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรสำหรับผักและผลไม้สด

การบรรจุผักและผลไม้สดนิยมบรรจุในรูปแบบของการบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (modified atmosphere packaging systems; MAP หรือที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า คือ passive MAP ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 1) เช่น การบรรจุผลิตภัณฑ์บนถาดและหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติก หรือบรรจุในถุงพลาสติก และเก็บรักษาภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ เป็นการสร้างสภาวะบรรยากาศที่มีความเหมาะสมสำหรับผักและผลไม้สดที่ต้องการเก็บรักษาโดยอาศัยคุณสมบัติในการซึมผ่านของฟิล์มพลาสติกที่ยอมให้แก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ที่สมดุลกับอัตราการหายใจของผลิตภัณฑ์ระดับอุณหภูมิที่เก็บรักษา (Sandhya, 2010) ในการเก็บรักษาสลิตผลสดด้วยฟิล์มพลาสติกสามารถสร้างบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์ได้ เนื่องจากผลผลิตสดหลังการเก็บเกี่ยวยังคงมีชีวิตอยู่ จึงมีการใช้ปริมาณแก๊ส O_2 ภายในบรรจุภัณฑ์ เพื่อใช้ในการหายใจส่งผลให้ตอนแรกอัตราการหายใจจะสูงเนื่องจากปริมาณแก๊ส O_2 ภายในบรรจุภัณฑ์ยังคงมีปริมาณสูงอยู่ และแก๊ส CO_2 ยังมีอยู่ในปริมาณที่น้อยหลังจากนั้นอัตราการหายใจจึงมีการลดลงตามการลดลงของปริมาณแก๊สออกซิเจน การบรรจุแบบบรรยากาศดัดแปรสามารถชะลออัตราการหายใจและเมตาบอลิซึม เนื่องมาจากการลดลงของความเข้มข้นแก๊ส O_2 และการเพิ่มความเข้มข้นแก๊ส O_2 ภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งเป็นผลจากสมดุลระหว่างอัตราการหายใจและอัตราการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของแก๊สทั้งสอง (Oliveira et al., 2015)

จากข้อมูลที่ได้นำเสนอในเบื้องต้นในบทที่ 1 พบว่า การบรรจุแบบ passive MAP อาจมีข้อจำกัดด้านการชะลอการสุกและการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ เมื่ออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ในระหว่างการขนส่ง และการเก็บรักษา (Kader and Saltveit, 2003) จากข้อจำกัดดังกล่าวนักวิจัยจึงได้พัฒนาและเพิ่มระบบแอคทีฟ (active system) เข้าไปร่วมกับ passive MAP เพื่อช่วยเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ (Charles et al. 2003; Devlieghere et al. 2004; Rooney 1995; วีรเวทย์ อุทโธ และคณะ, 2555) การบรรจุภัณฑ์ passive MAP ซึ่งมีการเพิ่มระบบแอคทีฟมีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า การบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแอคทีฟ หรือ active MAP ตัวอย่างของระบบแอคทีฟที่สำคัญที่ประยุกต์ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ active MAP สำหรับผักและผลไม้ ได้แก่ วัตถุดูดออกซิเจน วัตถุดูดเอทิลีน วัตถุดูดความชื้น วัตถุปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ หรือวัตถุยับยั้งจุลินทรีย์ โดยอาจบรรจุใส่ในซองขนาดเล็ก (sachet) หรือผสมกับฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์โดยตรง (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562) ทั้งนี้ระบบแอคทีฟที่จะทำการศึกษาในวิจัยนี้ คือ ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล (ethanol vapour controlled release sachet) หรือเรียกโดยย่อว่า ซองควบคุมฯ โดยไอระเหยเอทานอลสามารถทำปฏิกิริยากับเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิวหน้าของอาหาร (Utto, 2014)

2.2.2 ระบบแอคทีฟประเภทการควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล

ระบบแอคทีฟซึ่งควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปซองขนาดเล็ก (sachet) บรรจุภายในบรรจุภัณฑ์โดยไม่สัมผัสกับผลิตภัณฑ์ ที่มีสมบัติชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ ปัจจุบันมีการจัดจำหน่ายภายใต้ตราสินค้า (Antimold Mild[®], Freund Ltd., Japan) ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล ทำจากวัสดุฟิล์มพลาสติก โดยวัสดุที่นิยม คือ ฟิล์ม Tyvek[®] ซึ่งเป็นพลาสติก High Density Polyethylene (HDPE) ที่มีการปั่นพันระ (spun-bonding) และจัดเรียงโครงสร้างของพอลิเมอร์ ทำให้ได้วัสดุที่มีความเป็นรูพรุนสูง (Robertson, 1993)

ไอระเหยเอทานอลมีความปลอดภัยต่อการบริโภค (หรือมีสมบัติ generally-recognised-as-safe, GRAS) โดยสามารถใช้ในการควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ (Candir et al., 2012) จากการวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้ไอของเอทานอลกับผลิตภัณฑ์สด เช่น องุ่น (Lurie et al., 2006) มะเขือเทศ (Saltviet and Mencarelli, 1988) แอปเปิ้ลตัดแต่งพร้อมบริโภค (Bai, 2004) และมะละกอตัดแต่งพร้อมบริโภค (Utto et al., 2012) ในการศึกษาของ Candir et al. (2012) พบว่าการบรรจุของควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลร่วมกับองุ่นในถุงพลาสติกโพลีเอทิลีนที่อุณหภูมิ 0°C สามารถลดการเสื่อมสภาพเนื่องจากเชื้อราในระหว่างการเก็บรักษา 3 เดือน พลุกซ์ ชูสัง และคณะ (2556) รายงานว่า ไอระเหยเอทานอลจากการสาลีซึ่งเปียกชุ่มด้วยเอทานอลเหลวความเข้มข้น 25-100% สามารถชะลอการเน่าในผลหม่อนได้ เนื่องจากคุณสมบัติของเอทานอลที่ยับยั้งการเจริญหรือการงอกและทำให้หยุดกิจกรรมในการดำรงชีพของสปอร์เชื้อจุลินทรีย์ จึงยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในผลหม่อนได้ดี นอกจากนี้ Choosung et al. (2019) ได้รายงานประสิทธิภาพของซองควบคุมฯ ในการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์โดยซองควบคุมฯ ที่พัฒนาขึ้นจากฟิล์มประเภท FF3 (มีส่วนประกอบสำคัญ คือพอลิเอทิลีน) สามารถปล่อยไอระเหยเอทานอลโดยความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่

สะสมในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์มีค่าสูงกว่า 250 ppm ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลต่ำสุดที่ยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ หรือ minimal inhibition concentration (MIC)

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาก่อนหน้า พบว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ พัชรีย์ มะลิลา (2559) พบว่า ไอระเหยที่ปล่อยจากซองควบคุมฯ จากฟิล์ม Nylon/PE และ LDPE ควบคุมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในหอมแดงสดปกเปิดเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C ในการศึกษาของ วีรเวทย์ อุทโท และคณะ (2555) พบว่า ซองควบคุมฯ ประกอบด้วยกระดาษกรองดูดซับเอทานอลเหลวที่บรรจุในฟิล์ม LDPE ซึ่งมีปริมาตร 0.5, 1.0 และ 1.5 ml สามารถปล่อยไอระเหยเอทานอลเข้าสู่บรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ตลอดอายุการเก็บรักษา อัตราการปล่อยและความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศสัมพันธ์กับปริมาณเอทานอลเหลวในซองควบคุมฯ นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์ระบบ active MAP มีศักยภาพในการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และเพิ่มคุณภาพด้านกลิ่นมะละกอสุกตัดสด

ในการศึกษาการเก็บรักษาลำไย วาริช ศรีละออง และคณะ (2558) ทำการศึกษาผลของการใช้ไอระเหยของเอทานอลต่อคุณภาพการเก็บรักษา โดยนำผลลำไยสดบรรจุในถาดพลาสติก polyethylene terephthalate (PET) ร่วมกับการใช้ ethanol pad (EP) ที่มีเอทานอล 0.3g และ 3g หลังจากนั้นทำการปิดผนึกถาดด้วยฟิล์ม polypropylene (PP) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C โดยชุดควบคุม คือ ผลลำไยที่เก็บรักษาในถาดที่ไม่มี EP และฟิล์มหุ้มปิดถาด ผู้วิจัยรายงานว่ ผลลำไยที่เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ทั้งที่มีและไม่มี EP ชะลอการสูญเสียน้ำหนักได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมเนื่องจากชุดควบคุมไม่มีบรรจุภัณฑ์จึงเกิดการถ่ายเทของไอน้ำออกจากผลลำไยไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ง่ายกว่าเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้บรรจุภัณฑ์ทั้งที่มีและไม่มี EP ชะลอการสะสมของรงควัตถุสีน้ำตาลในเปลือกผลได้ดีกว่าชุดควบคุม ในขณะที่การใช้ EP ซึ่งมีเอทานอล 3g ชะลอการเกิดโรคในลำไยได้ดีกว่า 0.3g

ไอระเหยเอทานอลมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์โดยอาจทำให้เกิดการเสียสภาพของเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ สอดคล้องกับผลการวิจัยเก็บรักษาลองกอง โดยนพรัตน์ ทัดมาลา และคณะ (2560) รายงานว่า ชุดการทดลองที่ใช้ EP ซึ่งมีปริมาณเอทานอล เท่ากับ 3g ชะลอการสูญเสียน้ำหนักสดได้ดีที่สุดโดยมีการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 0.34% ต่อวัน รองลงมาได้แก่การใช้ EP 5g และ 1g ซึ่งมีการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 0.38 และ 0.45% ต่อวัน ตามลำดับ ในขณะที่ชุดควบคุมมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับ 0.41% ต่อวัน ความแตกต่างดังกล่าวอาจเป็นผลจากการใช้ EP ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถชะลอการหายใจของผลลองกองจึงทำให้ลดการสูญเสียน้ำซึ่งเป็นส่วนหนึ่งจากการหายใจ นอกจากนี้การทดลองที่ใช้ EP 3g ชะลอการเปลี่ยนแปลงการเกิดสีน้ำตาลของเปลือกได้ดีเมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ใช้ EP เนื่องจากการใช้ไอระเหยเอทานอลอาจมีผลต่อการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

polyphenol oxidase ที่เปลี่ยนโมเลกุลของสารประกอบฟีนอล (phenolic compounds) ไปเป็น ควิโนน (quinone) แล้วรวมตัวกันเป็นเมลานินซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นมีสีน้ำตาล (Jiang, 2000)

ไอระเหยเอทานอลอาจช่วยป้องกันการเกิด oxidative stress ที่นำไปสู่การเสื่อมสภาพ โดยการลดการสะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ภายในเซลล์และกระตุ้นกลไก ascorbate-glutathione ของเปลือกผลลองกองได้และมีอายุการเก็บรักษานานที่สุด 14 วัน ในขณะที่ชุดควบคุมมีอายุการเก็บรักษาเพียง 8 วัน อย่างไรก็ตามไอระเหยเอทานอลไม่แสดงผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ในทุกชุดการทดลอง เนื่องจากการใช้เอทานอลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ไม่มีผลต่อคุณภาพภายในของผลลองกอง สอดคล้องกับการศึกษาการใช้ไอระเหยของเอทานอล 1g กับผลส้มพันธุ์ชูดาชิ Noma et al. (2009) รายงานว่า ไอระเหยเอทานอลไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้

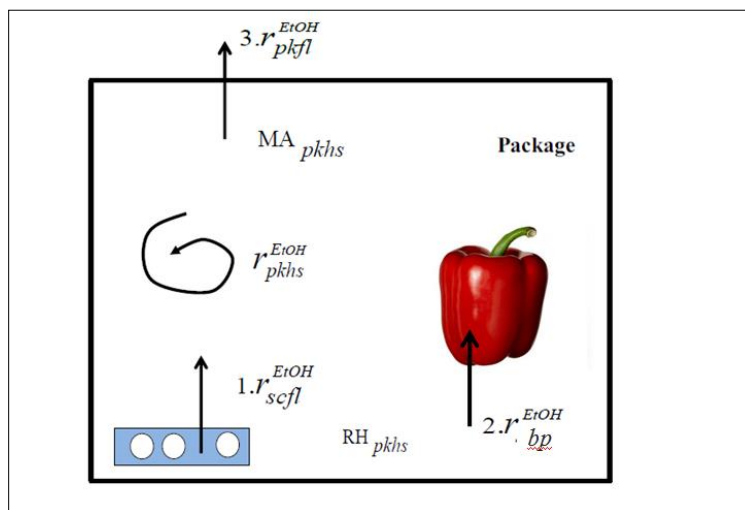
จากรายงานในเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง ตารางที่ 2 พบว่า ไอระเหยเอทานอลอาจเพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัสให้กับผลิตภัณฑ์ผักผลไม้สด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงไอระเหยเอทานอลผ่านกระบวนการทางชีวภาพ (biological conversion) ของผักและผลไม้ให้กลายเป็นสารในกลุ่ม เอสเตอร์ที่ส่งผลให้กลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างกรดอินทรีย์กับแอลกอฮอล์ โดยมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง เช่น alcohol dehydrogenase (ADH) (Bai et al., 2011; Candir et al., 2012; Utto et al., 2018) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีกลิ่นที่ดีขึ้นเมื่อใช้กับบรรจุภัณฑ์แอคทีฟซึ่งมีการปล่อย ไอระเหยเอทานอล เช่น การใช้ไอระเหยเอทานอลกับเชอร์รี่ตัดสด Bai et al. (2011) รายงานว่า เอทานอลที่ถูกดูดซับโดยเชอร์รี่ตัดสดนั้นส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์สารให้กลิ่นกลุ่ม เอสเตอร์ โดยกระบวนการเอนไซม์ ซึ่งเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง เช่น เอนไซม์ AAT (ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 1) (Song et al., 1996) และไอระเหยเอทานอลสามารถเพิ่มคุณภาพทางด้านกลิ่นในมะละกอสุกหั่นชิ้นได้ (วีรเวทย์ อุทโท และคณะ, 2555)

ตารางที่ 2 ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ไธราเฮนทานอลสำหรับผลิตภัณฑ์พืชสวน และระดับความเข้มข้นของไธราเฮนทานอลที่มีประสิทธิภาพยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ และการเปลี่ยนแปลงสำคัญ

Horticultural products	Concentrations	References
Cherries	10 ppm	Bai et al. (2011)
fresh-cut sugarcane	300,000 ppm	Homaida et al. (2017)
Grape	4 or 8 ml/kg	Lurie et al. (2006)
Mulberry	252–265 ppm	Choosung et al. (2019)
Chinese bayberries	1,000 ppm	Zhang et al. (2007)
Broccoli	500- 2500 ppm	Corcuff et al. (1996)
Lettuce	200,000 ppm	Yan et al. (2015)
Grape	300,000 ppm	Karabulut et al. (2004)

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดีดแปรแอคทีฟประเภทการควบคุมการปล่อยไธราเฮนทานอลสำหรับผักและผลไม้สด

ในบทความวิชาการด้านการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับผักและผลไม้สด Utto (2014) ได้กล่าวว่า การสะสมของไธราเฮนทานอลในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ เป็นผลจากสมดุลมวล (mass balance) ของกระบวนการสำคัญ 3 กระบวนการ ประกอบด้วย (1) กระบวนการปล่อยไธราเฮนทานอลจากซองควบคุมฯ (2) กระบวนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไธราเฮนทานอลกับผลิตภัณฑ์ และ (3) กระบวนการซึมผ่านไธราเฮนทานอลในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ไปยังสิ่งแวดล้อม กระบวนการทั้งสามในบรรจุภัณฑ์ active MAP สำหรับพริกหวานสด สามารถนำเสนอผ่านแบบจำลองแนวคิด ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



Storage conditions

(e.g. Temp./RHenv)

ภาพที่ 5 แบบจำลองแนวคิดกระบวนการถ่ายโอนมวลที่สำคัญสำหรับการปล่อยและสะสม

ไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ของพริกหวาน โดยสัญลักษณ์

bp = พริกหวาน (bell pepper), EtOH = เอทานอล (Ethanol), scfl = ซอง

ควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล (sachet film), pkhs = ช่องว่างเหนือบรรจุ

ภัณฑ์ (package headspace), pkfl = พิล์มบรรจุภัณฑ์ (package film)

(1) กระบวนการปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุมฯ (หมายเลข 1 ในภาพที่ 5) เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในซองควบคุมฯ และความเข้มข้นในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ซึ่งไอระเหยเอทานอลเกิดการซึมผ่าน (permeation) พิล์มของซองควบคุมฯ กระบวนการซึมผ่านนั้นเกี่ยวข้องกับการดูดซับเอทานอล (ethanol sorption) บริเวณผิวหน้าของฟิล์ม และเกิดการแพร่ผ่าน (diffusion) ไปยังบริเวณผิวหน้าอีกด้านหนึ่ง (Klopffer and Flaconnèche, 2001)

(2) กระบวนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยกับผลิตภัณฑ์ (หมายเลข 2 ในภาพที่ 5) ทั้งนี้การเกิดปฏิกิริยาส่งผลต่อการควบคุมเป้าหมาย (target) เช่น การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาอาจเพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยเฉพาะด้านกลิ่น เนื่องมาจากผักและผลไม้สดสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงไอระเหย เช่น ไอระเหยประเภทอัลดีไฮด์ และแอลกอฮอล์ ให้เป็นสารเอสเตอร์ ดังที่ได้นำเสนอข้างต้นซึ่งช่วยให้กลิ่นของผักและผลไม้ดีขึ้น

(3) กระบวนการการซึมผ่านไอระเหยในบรรจุภัณฑ์ไปยังสิ่งแวดล้อม (หมายเลข 3 ในภาพที่ 5) ไอระเหยเอทานอลส่วนหนึ่งที่ซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของซองควบคุมฯ มายังบรรยากาศบรรจุภัณฑ์จะเกิดการซึมผ่านไปยังสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบ ๆ บรรจุภัณฑ์เนื่องจากความแตกต่างของ

ความเข้มข้นไอร่หะเหยเอทานอลระหว่างภายในบรรจุภัณฑ์และสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของการซึมผ่านของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ซึ่งสัมพันธ์กับสมบัติการยอมให้ไอร่หะเหยเอทานอลซึมผ่าน หรือ ค่า FPE ที่ได้นำเสนอมาข้างต้น

การปลดปล่อยไอร่หะเหยเอทานอลจากซองแอกทีฟและการสะสมไอร่หะเหยเอทานอลในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์มีความสำคัญต่อการควบคุมการเปลี่ยนแปลงคุณภาพผลิตผล ปัจจัยสำคัญสามารถสรุปได้ดังนี้ (วีรเวทย์ อุทธร, 2562; Utto, 2014)

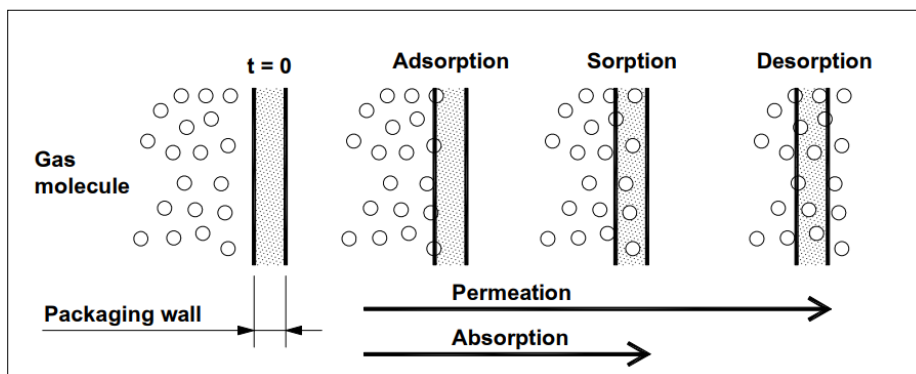
(1) ชนิดของตัวพาและปริมาณเอทานอลบนตัวพา

ตัวพาแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับและการคายการดูดซับของไอร่หะเหยที่ต่างกันเช่น กระดาษกรอง และ ซิลิกาเจล ที่ส่งผลต่ออัตราเร็วของการปล่อยไอร่หะเหยเอทานอลจากระบบแอกทีฟและการสะสมไอร่หะเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์ ทั้งนี้ระบบแอกทีฟที่มีอยู่ในรูปของซองขนาดเล็ก (sachet) หรือฟิล์มพลาสติก ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ให้มีการวิจัยเกี่ยวกับซองขนาดเล็ก ดังนั้นระบบแอกทีฟในรูปของซองขนาดเล็กจึงขอเรียกว่า “ซองแอกทีฟ” หรือ “ซองควบคุม” เพื่อความกระชับของการนำเสนอ

การปลดปล่อยไอร่หะเหยของเอทานอลนิยมใช้วิธีการบรรจุเอทานอลบนวัตถุดูดซับแล้วบรรจุในซองขนาดเล็กซึ่งอาจมีการเจาะรูขนาดเล็กระดับไมโครเมตร (micrometer) หรือการใช้ฟิล์มที่มีการควบคุมสภาพการซึมผ่านเพื่อให้ไอของเอทานอลแพร่ผ่านออกมาสู่บริเวณช่องว่างภายในบรรจุภัณฑ์ ทั้งนี้ความชื้นจากผลิตผลภายในบรรจุภัณฑ์มีผลต่อการปลดปล่อยไอร่หะเหยเอทานอลเนื่องจากความชื้นสามารถละลายเอทานอลและหรือเกิดการแทนที่เอทานอลบนวัตถุดูดซับส่งผลให้ไอร่หะเหยเอทานอลแพร่ผ่านจากวัตถุดูดซับและซองขนาดเล็กออกมา ส่งผลให้ความเข้มข้นของไอร่หะเหยของเอทานอลสูงเพิ่มขึ้น

(2) วัสดุของซองแอกทีฟและบรรจุภัณฑ์

การซึมผ่านของฟิล์ม (permeability) คือการเคลื่อนที่ของแก๊ส ไอและของเหลวผ่านวัสดุบรรจุภัณฑ์ ที่ไม่รวมการซึมผ่านรูหรือรอยร้าว (Hernandez et al., 1996) การซึมผ่านเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากต่อบรรจุภัณฑ์พลาสติก ภาพที่ 6 แสดงแบบจำลองของการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของ แก๊ส ไอและสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก โดยเกิดการละลาย (dissolve) เข้าไปในพลาสติกจากนั้นจะแพร่ผ่าน (diffusion) เพื่อสร้างสมดุลของศักย์ทางเคมี (chemical potential) ซึ่งจะทำการแพร่จากที่มีศักย์ (หรือความเข้มข้น) สูงกว่าไปสู่ที่มีศักย์ (ความเข้มข้น) ต่ำกว่า จนกระทั่งผ่านพลาสติกไปอีกด้านหนึ่ง (desorption) ทั้งนี้ van Willige et al. (2000) รายงานว่า การเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สผ่านบรรจุภัณฑ์เกิดขึ้นเมื่อความดันย่อย (partial pressure) ของโมเลกุลแก๊สระหว่างภายในและภายนอกบรรจุภัณฑ์มีความแตกต่างกัน การเคลื่อนที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อความแตกต่างของความความดันย่อยลดลง



ภาพที่ 6 แบบจำลองการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของแก๊ส ไอน้ำหรือสารประกอบโมเลกุลขนาดเล็ก
ที่มา: ดัดแปลงจาก van Willige et al. (2000)

การเลือกใช้วัสดุของช่องแอคทีฟมีความสำคัญต่ออัตราการปล่อยไอระเหยเอทานอล ทั้งนี้ค่า FPE ของฟิล์มพลาสติกมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิแบบเอกซ์โปเนนเชียล (exponential relationship) หรือความสัมพันธ์แบบอาร์เรเนียส (นำเสนอในบทที่ 1) โดยทั่วไปค่า permeability ของฟิล์มเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10°C ปัจจุบันฟิล์ม LDPE เป็นฟิล์มที่มีค่า FPE ที่สูงสุด แต่การปล่อยไอระเหยเอทานอลจากช่องควบคุมฯ ที่มีฟิล์ม LDPE เป็นส่วนประกอบยังไม่สามารถชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 20°C ได้ดีเท่าที่ควร (วีรเวทย์ อุทโช และคณะ, 2555; Utto et al., 2018) อุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงกว่า 20°C เป็นสภาวะจำลองของ cool chain disruption ที่มักเกิดขึ้นในโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ของผักและผลไม้สด จึงได้มีแนวคิดที่จะนำฟิล์มที่มีค่า FPE ที่สูงกว่าค่า FPE ของฟิล์ม LDPE มาทำเป็นช่องควบคุมฯ

ดังที่กล่าวในบทที่ 1 ฟิล์ม Active PakTM ที่พัฒนาโดยห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลาสติกศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) มีศักยภาพที่จะนำมาทำช่องควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลเนื่องจากมีสมบัติการยอมให้แก๊ส ไอน้ำและไอระเหยเอทานอลซึมผ่านได้เร็ว (Kampawong et al., 2018) ปัจจุบันยังไม่ได้มีการนำฟิล์ม Active PakTM มาเป็นส่วนหนึ่งของการบรรจุภัณฑ์ active MAP ทั้งนี้ฟิล์ม Active PAKTM หรือเมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นถุงพลาสติก มีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า ถุงหายใจได้ มีสมบัติเด่น คือ เป็นฟิล์มที่ยอมให้แก๊สที่ใช้ในกระบวนการหายใจผ่านเข้าออกได้ดี และสอดคล้องกับอัตราการใช้และสร้างแก๊สในกระบวนการหายใจของผักและผลไม้สดที่บรรจุ ทำให้เกิดบรรยากาศดัดแปลงแบบสมดุล (equilibrium modified atmosphere หรือ EMA) ขึ้นในถุง ส่งผลให้เกิดการชะลอการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ ถุงหายใจได้ Active PAKTM จึงสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้สดได้นานขึ้น 2-5 เท่า และผลิตผลยังคงมีคุณภาพและรสชาติที่ดี นอกจากนี้ถุงถูกออกแบบให้มีลักษณะใสด้วยพลาสติกชนิดพิเศษ จึงไม่ทำให้เกิดฝ้าขณะเก็บรักษา

ทำให้ผู้บริโภคสามารถมองเห็นสินค้าได้ พร้อมสร้างความเชื่อมั่นด้านคุณภาพให้กับผู้บริโภค (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2559)

2.2.4 ผลของการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์

2.2.4.1 การควบคุมเชื้อจุลินทรีย์

ไอระเหยเอทานอล (ethanol vapor) ทำหน้าที่เป็นสารยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพโดยไอระเหยเอทานอลสามารถทำปฏิกิริยากับเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ (Utto, 2014) เนื่องจากไอระเหยเอทานอลถูกดูดซับไปบริเวณผิวหน้าของผักและผลไม้สด ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยน pH ของเซลล์ผิวให้อยู่ในช่วงที่เป็นกรดส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ในสภาพที่ไม่เหมาะสม (Nguyen-the and Prunier, 1989) นอกจากนี้ไอระเหยเอทานอลที่ถูกดูดซับเข้าไปโดยเชื้อจุลินทรีย์นั้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติหรือการเสียสภาพของ cell membrane ของจุลินทรีย์เช่น alteration of cell permeability, membrane disruption หรือ deformation (Nychas, 1995; Davidson, 2001) ไอระเหยเอทานอลถูกนำมาใช้ในการฆ่าเชื้อของผักและผลไม้สดเพื่อชะลอการเสื่อมเสียและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เช่น องุ่น (Lurie et al., 2006) มะเขือเทศ (Saltviet and Mencarelli, 1988) แอปเปิ้ลตัดแต่งพร้อมบริโภค (Bai, 2004) มะละกอตัดแต่งพร้อมบริโภค (วีรเวทย์ อุทโธ และคณะ, 2555) หอมแดงสดปอกเปลือก (พัชรี มะลิลา, 2559)

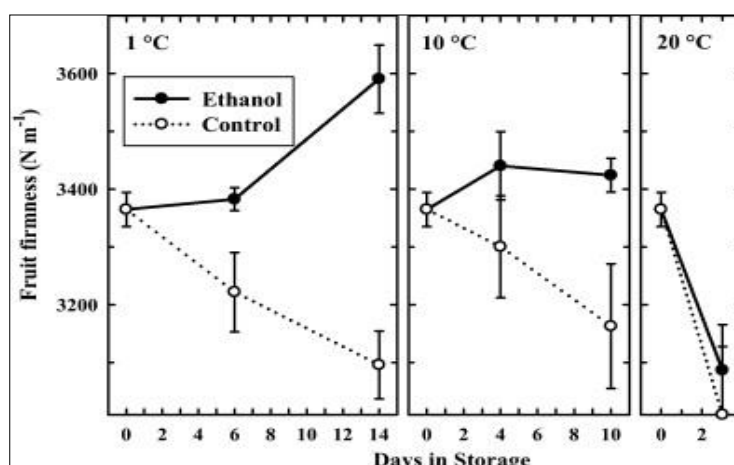
2.2.4.2 การหายใจ

การเก็บรักษาผักผลไม้โดยการบรรจุในสภาวะบรรยากาศดัดแปรสามารถช่วยชะลออัตราหายใจของผักผลไม้ได้ (El-Kazzaz et al., 1983; Ke et al., 1994) ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.2 แต่การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยเอทานอลกับผลิตภัณฑ์แอคทีฟประเภทของควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลไม่มีผลกระทบต่ออัตราการหายใจของผักและผลไม้อย่างชัดเจน อาจเกิดจากสภาวะบรรยากาศดัดแปรได้ลดอัตราการหายใจ จึงอาจส่งผลให้การตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลนั้นไม่ชัดเจน (พัชรี มะลิลา, 2559) อย่างไรก็ตาม นพรัตน์ ทัดมาลา และคณะ (2560) รายงานว่า เอทานอลสามารถชะลอการหายใจของผลลองกองได้จึงทำให้ลดการการสูญเสียน้ำออกจากผล เนื่องจากการระบายความร้อนที่เกิดจากการหายใจ

2.2.4.3 ความแน่นเนื้อและสี

การเก็บรักษาในสภาวะบรรยากาศดัดแปรที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงช่วยรักษาความแน่นเนื้อและลดการอ่อนนิ่มของเนื้อสัมผัสได้ (El-Kazzaz et al., 1983; Larsen et al., 1995) เนื่องจากในสภาวะบรรยากาศที่มีระดับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงจะช่วยยับยั้งการผลิตเอทิลีนซึ่งเป็นตัวเร่งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการอ่อนนุ่มของเนื้อเยื่อ (Abe and Watada, 1991) ไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรจุภัณฑ์มีศักยภาพในการชะลอการสุกหรือการ

เสื่อมสภาพของเซลล์ของผักและผลไม้ได้ (Suzuki et al, 2004) เนื่องจากมีกลไกสำคัญโดยที่ไธราเอทานอลสามารถชะลอกิจกรรมของเอนไซม์ 1-aminocyclopropene-1- carboxylic acid (ACC) oxidase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สำคัญในกระบวนการสร้างเอทิลีน ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับการวิจัยของ Bai et al. (2011) ซึ่งรายงานว่า ไธราเอทานอลสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านความแน่นเนื้อของเชอร์รี่ ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 1 °C และ 20 °C เป็นเวลา 14 วัน และ 3 วัน ตามลำดับ (ภาพที่ 7) อีกทั้งยังสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงสีของผลผลิตได้ (Wang et al. 2014) ในการศึกษาของ Opio และคณะ (2015) รายงานว่า การใช้ EP ที่มีเอทานอล 0.6g ช่วยชะลอการเปลี่ยนสีเปลือกและการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ในมะนาวพันธุ์แป้นได้เมื่อทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 30 วัน เนื่องจากเอทานอลมีผลต่อการยับยั้งการผลิตเอทิลีนและลดการตอบสนองของผลผลิตต่อเอทิลีนจึงส่งผลให้ชะลอกิจกรรมของเอนไซม์ chlorophyllase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เร่งการสลายโมเลกุลของคลอโรฟิลล์

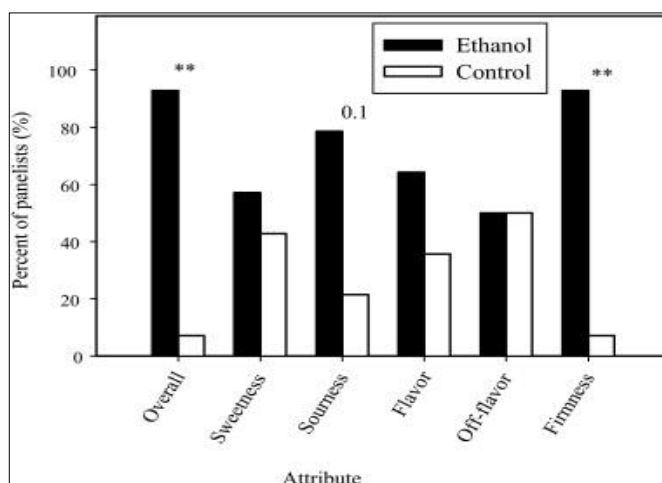


ภาพที่ 7 ผลของแผ่นเอทานอลต่อความแน่นเนื้อผลของเชอร์รี่หวานพันธุ์ Lapins ที่มีของ Antimold Mild® และไม่มี (control) ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 1, 10 และ 20 °C เป็นเวลา 14, 10 และ 3 วัน ตามลำดับ
ที่มา: Bai et al. (2011)

2.2.4.4 กลิ่นและรสชาติ

ไธราเอทานอลสามารถเพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัสให้กับผลิตภัณฑ์ผักผลไม้สดจากที่ได้กล่าวข้างต้น ในหัวข้อ 2.2.3 แต่การสะสมไธราเอทานอลในบรรจุภัณฑ์ อาจทำให้ผู้บริโภคสามารถรับรู้กลิ่นของเอทานอลเมื่อทำการเปิดบรรจุภัณฑ์ Bai et al. (2011) รายงานว่า ความเข้มข้นของไธราเอทานอลในช่วง 9-16 ppm ผู้บริโภคสามารถรับรู้ได้เมื่อเปิดบรรจุภัณฑ์

บรรจุเชื้อรี แต่ระดับความรุนแรงของกลิ่นยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้อย่างไรก็ตามผู้บริโภคสามารถรับรู้ถึงกลิ่นหอมในบรรยากาศและเนื้อผลิตภัณฑ์ (ภาพที่ 8) ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนไอระเหยเอทานอลเป็นสารกลุ่มเอสเตอร์ด้วยกระบวนการทางชีวเคมีที่กล่าวข้างต้น



ภาพที่ 8 คะแนนของคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของเชอร์รี่หวานพันธุ์ Lapins เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 4 วัน
ที่มา: Bai et al. (2011)

2.3 สรุปประเด็นสำคัญ

พริกหวานและผักและผลไม้สดมีอายุการเก็บรักษาที่ค่อนข้างสั้นเนื่องจากกิจกรรมทางชีวเคมียังดำเนินต่อเนื่องภายหลังการเก็บเกี่ยวและมีแนวโน้มเกิดการเน่าเสียได้ง่ายทั้งนี้การบรรจุภัณฑ์ active MAP มีศักยภาพในการชะลอการเสื่อมเสียโดยเฉพาะการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ระบบแอคทีฟประเภทของควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลเข้าสู่ภายในบรรจุภัณฑ์สามารถชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านอื่น ทั้งนี้สมบัติด้าน FPE มีความสำคัญต่ออัตราเร็วของการปล่อยไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์ แต่ยังไม่มีการศึกษาวิจัยการบรรจุภัณฑ์ active MAP ดังกล่าวกับพริกหวาน ในบทต่อไปได้รวบรวมวิธีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาบรรจุภัณฑ์ active MAP ซึ่งมีของควบคุมฯ สำหรับพริกหวาน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและวัสดุฟิล์มบรรจุภัณฑ์

3.1.1 พริกหวานที่จะใช้ในการศึกษาเป็นผลผลิตที่ซื้อจากผู้ขายส่งในตลาดวารินเจริญศรี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี สีเขียว สภาพสมบูรณ์ไม่มีรอยขีดหรือเน่าเสียน้ำหนัก 120 – 160 กรัม ต่อผล

3.1.2 วัสดุฟิล์มของควบคุมเป็นฟิล์ม Active Pak™ จากห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลาสติกศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และฟิล์ม LDPE ซึ่งมีจำหน่ายในอุตสาหกรรมบรรจุอาหารโดยทั่วไป

3.1.2.1 ฟิล์ม Active Pak™ ความหนา 32 μm สมบัติด้าน oxygen transmission rate (OTR), carbon dioxide transmission rate (CTR) และ water vapour transmission rate (WVTR) เท่ากับ 10,000-12,000 $\text{ml m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 20,000-32,000 $\text{ml m}^{-2} \text{day}^{-1}$ และ 10 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ตามลำดับ

3.1.2.2 ฟิล์ม LDPE ความหนา 30 μm สมบัติด้าน oxygen transmission rate (OTR) carbon dioxide transmission rate (CTR) และ water vapour transmission rate (WVTR) เท่ากับ 2,500 $\text{ml m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 13,500 $\text{ml m}^{-2} \text{day}^{-1}$ และ 8 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ตามลำดับ

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่สำคัญ

3.2.1 เครื่อง Flame-ionised detector (FID) Gas Chromatography (Shimadzu GC-2014) (Shimadzu, Japan)

3.2.2 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) LLODY model, LR series, USA

3.2.3 เครื่องวัดสี (Hunter lab) Color flex, Color global Co., Ltd., U.S.

3.2.4 เครื่อง Stomacher (MASITCATOR) BEC Thai Bangkok Equipment & Chemical co., Ltd., Thailand

3.2.5 เครื่อง Autoclave (HV-50, Japan)

3.2.6 เครื่อง Vortex-MS 1 Minishaker (Kika works (Asia) Sdn. Bhd., Malaysia)

3.2.7 Hot air oven Binder รุ่น ED และ FD (Scientific Promotion CO., Ltd., Thailand)

3.2.8 เครื่องวัดแก๊ส (Handheld gas analyser) รุ่น Checkpoint3 (PBI. Dansensor, Denmark)

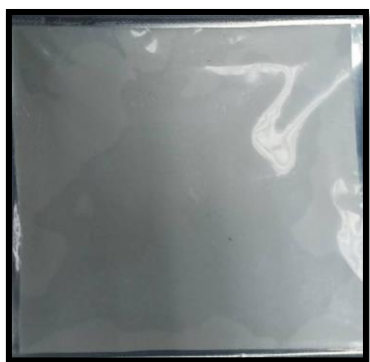
3.3 สารเคมี (Chemical)

- 3.3.1 Ethanol: C₂H₅OH Ethanol absolute for analysis (Merck, Germany)
- 3.3.2 Sodium Hypochlorite: NaOCl (Thai Poly Chemicals Co., Ltd., Thailand)
- 3.3.3 Potato Dextrose Agar (PDA) (HiMedia Laboratories Pvt. Ltd., India)
- 3.3.4 Plate Count Agar (PCA) (HiMedia Laboratories Pvt. Ltd., India)
- 3.3.5 Peptone Water (HiMedia Laboratories Pvt. Ltd., India)

3.4 วิธีดำเนินการ

3.4.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การปล่อยไอระเหยเอทานอลที่ปล่อยจากซองควบคุมฯ (ethanol vapour release kinetic)

การทดลองส่วนนี้จะได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลซึ่งปล่อยออกจากซองควบคุมฯ ในระบบปิดเพื่อลดการแพร่ผ่านวัสดุของไอระเหยเอทานอลที่อาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการแปลผลจลนพลศาสตร์ การทดลองจะใช้ซองควบคุมฯ ขนาด 8 x 8 cm โดยด้านหน้าของซองควบคุมฯ ทำจากฟิล์ม 2 ประเภทคือ Active Pak™ และ LDPE และปิดผนึกกับแผ่นฟิล์มด้านหลังจากฟิล์มอะลูมิเนียมลามิเนต (AL/PE) ที่ปิดผนึกแบบ 3-side-seal (ภาพที่ 9)



แผ่นฟิล์มด้านหน้าเป็นพลาสติก Active Pak™ หรือ LDPE



แผ่นฟิล์มด้านหลังจากฟิล์มอะลูมิเนียมลามิเนต (AL/PE)

ภาพที่ 9 ตัวอย่างของซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล

ที่มา: ดัดแปลงจากพัชรี มะลิลา (2559)

ในการศึกษานี้ใช้กระดาษกรอง (Whatman No. 1) เป็นวัสดุหรือตัวพาสำหรับเอทานอล (ethanol carrier) เนื่องจากดูดซับเอทานอลไว้ได้ดีและไอระเหยเอทานอลสามารถระเหยออกจากกระดาษกรองได้ง่าย การดูดซับเอทานอลทำได้โดยเตรียมกระดาษกรองขนาด 7×7 cm จากนั้นนำเอทานอลความเข้มข้น 99.9% (v/v) ปริมาตร 0.5 ml เทลงไปในกระดาษกรอง นำกระดาษกรองใส่ลงในช่องแอคทีฟที่เตรียมไว้ และทำการปิดผนึกช่องแอคทีฟในด้านที่เหลืด้วยการใช้ความร้อน (heat-sealing) จากนั้นนำซองควบคุมฯ ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 200 mL (1 ซองต่อบีกเกอร์) นำบีกเกอร์บรรจุลงในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์และปิดผนึกปากถุงเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C และทำการวัดความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลในช่วงเวลาต่าง ๆ

การวิเคราะห์ระดับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลด้วยเครื่อง gas chromatogram ประเภท flame ionised detector (FID) ตามวิธีที่รายงานโดยพัซรี (2559) สภาวะของเครื่องสามารถสรุปได้ดังนี้ประเภทของคอลัมน์คือ Porapak Q (2.0 m length, inner diameter 3.00 mm) โดยมี helium เป็น carrier gas (flow rate 50 mL/min) โดยสภาวะของการวิเคราะห์ คือ injector temperature 150°C, detector temperature 250°C, oven temperature 80°C เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10°C/นาที จนถึง 200°C คงไว้ 3 นาทีและแสดง standard curve และวิธีคำนวณความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลในภาคผนวก ก.

การวัดความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลในระบบปิดจะใช้เข็มฉีดยา (gas tight syringe; Hamilton, Nevada, US) ดูดตัวอย่างแก๊สในถุงออกมา 1 ml จากนั้นนำตัวอย่างฉีดเข้าไปใน Injection port ของเครื่อง Shimadzu GC-2014 เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นไอระเหยเอทานอล ปริมาณแก๊สเอทานอลที่สะสมอยู่ในถุงรายงานผลในหน่วย part per million (ppm หรือ $\mu\text{L/L}$) ภายหลังจากเก็บตัวอย่างแล้ว ทำการปิดรูที่ฉีดทันทีโดยใช้อลูมิเนียมเทป

ทั้งนี้เพื่อเป็นการศึกษาสภาวะจำลองของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (temperature alterations) เช่นการเคลื่อนย้ายสินค้าจากที่อุณหภูมิเย็นไปยังอุณหภูมิที่สูงกว่าหรือการชำรุดของระบบการทำความเย็น ผู้วิจัยจะทำการทดลองเพิ่มเติมโดยจะทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การปล่อยไอระเหยเอทานอลที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 10 วัน จากนั้นได้ย้ายระบบ (ซึ่งเป็นถุงอะลูมิเนียมบรรจุซองควบคุมฯ) ไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 4 วัน

3.4.2 การศึกษาสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์มพลาสติกเจาะรู

ในการศึกษาส่วนนี้จะบรรจุพริกหวานถุงพลาสติก LDPE ซึ่งเป็นถุงพลาสติกที่นิยมใช้ในการเก็บรักษาผักและผลไม้โดยทั่วไปเนื่องจากมีสมบัติยอมให้แก๊สออกซิเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึมผ่านได้ง่าย และมีสมบัติการต้านการซึมผ่านของความชื้นที่สูงทำให้บรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์มีระดับความชื้นสูงและลดการสูญเสียน้ำหนักของผลิตผลได้ อย่างไรก็ตามในบางครั้งการใช้ฟิล์ม LDPE บางรุ่นซึ่งมีความหนาที่มากอาจมีสมบัติการยอมให้แก๊สออกซิเจนซึมผ่าน

ไม่เหมาะสมกับอัตราการหายใจส่งผลให้ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ลดลงอย่างมาก และนำไปสู่การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนและเกิดการสะสมความชื้นในบรรจุภัณฑ์ที่สูงมากนำไปสู่การก่อตัวเป็นหยดน้ำ (condensation) เมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาไม่คงที่ลักษณะของหยดน้ำดังกล่าวอาจไม่เป็นที่พึงปรารถนาของผู้บริโภคและสามารถเป็นแหล่งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ดังนั้นจึงมีการเจาะรู (perforation) บรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติกเพื่อเพิ่มอัตราการซึมผ่านของแก๊ส และไอน้ำทำให้ความเข้มข้นแก๊สออกซิเจนไม่ต่ำจนเกินไปและช่วยระบายไอน้ำจากบรรจุภัณฑ์ไปสู่ภายนอกได้เร็วมากขึ้น

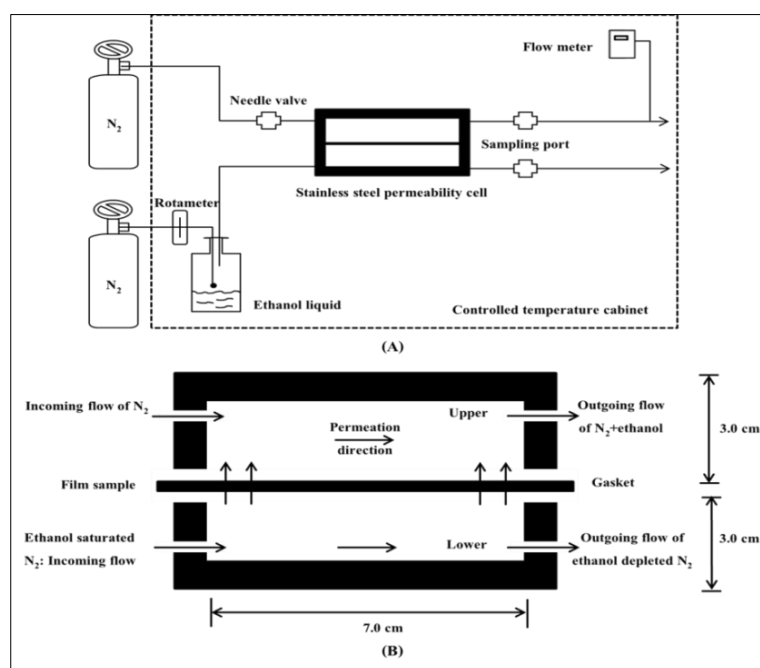
การศึกษานี้จะทำการเจาะรูฟิล์มพลาสติกให้ได้ระดับที่เหมาะสมกับการสะสมความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำภายในบรรจุภัณฑ์ โดยใช้บรรจุภัณฑ์ถุงฟิล์มพลาสติกขนาด 12.70×15.24 cm (หรือ 5×6 นิ้ว) นำฟิล์มพลาสติก LDPE มาทำการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm จำนวน 30 รู หรือมีพื้นที่ของรูที่เจาะเท่ากับ 0.6 % ทั้งนี้การเจาะรูดังกล่าวได้ประยุกต์จากงานวิจัยของ Meir et al. (1995) ที่ได้รายงานเกี่ยวกับการใช้ถุงพลาสติกเจาะรูบรรจุพริกหวาน (*Capsicum annuum* 'Maor') ในการศึกษาที่ผู้วิจัยได้ทำการเจาะรูใช้หัวตะปูเหล็กขนาดตามที่ได้รายงานข้างต้นและใช้ค้อนตีเพื่อเจาะผ่านฟิล์มพลาสติก ภายหลังจากได้ถุงพลาสติกเจาะรูที่เหมาะสมแล้วจะได้นำฟิล์มมาศึกษาสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์ม (FPE) ตามวิธีที่รายงานในพัชรี มะลิลา (2559) ซึ่งสามารถสรุปวิธีการวัดค่า FPE ได้ดังต่อไปนี้

3.4.2.1 การศึกษาสมบัติ FPE ของฟิล์มพลาสติกได้ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C และความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลอย่างน้อย 3 ระดับความเข้มข้นในแต่ละอุณหภูมิ เป็นระบบ Isostatic ที่ทำการวัด FPE ด้วย permeability cell ที่ทำจากวัสดุสแตนเลส (ภาพที่ 10) isostatic method เป็นวิธีการที่ใช้วัดความเข้มข้นของปริมาณไอระเหยเอทานอลที่ซึมผ่านฟิล์ม ภายใตสภาวะคงที่ (steady-state)



ภาพที่ 10 stainless steel cell ใช้ในการวัด film permeability to ethanol vapour (FPE)
ที่มา: พชรี มะลิลา (2559; อ้างอิงจาก Utto, 2008)

ในภาพที่ 10 ซึ่งแสดงภาพของ permeability cell ซึ่งประกอบด้วยสองส่วน (compartment) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในและด้านนอกเท่ากับ 7 และ 10 cm ตามลำดับ โดยแต่ละส่วนจะมีช่องเก็บตัวอย่างซึ่งเป็น Union stainless steel tube fitting ขนาด 1/4 นิ้ว (Swagelok®, US) ที่เชื่อมต่อเข้ากับ permeability cell และด้านที่เก็บตัวอย่างของ ports จะปิดด้วย blue septum ซึ่งเป็นส่วนกันการรั่วของไอระเหยเอทานอล ทั้งนี้การจัด permeability cell เพื่อเชื่อมต่อกับแหล่งไอระเหยเอทานอลและแก๊สไนโตรเจนตลอดจนทิศทางการซึมผ่านของไอระเหยเอทานอลและแก๊สไนโตรเจนใน permeability cell สามารถแสดงดังแผนภาพ (diagram) (ภาพที่ 11A)



ภาพที่ 11 การจัดวาง (settings) ของ permeability cell สำหรับการวัด FPE ของฟิล์ม LDPE และฟิล์ม ActivePAK™ (A) และภาพตัดหลักการทำงานของ Permeability cell (B)

ที่มา: พชร มะลิลา (2559; อ้างอิงจาก Utto, 2008)

3.4.2.2 การจัดวาง (setting) แผ่นฟิล์มพลาสติกเพื่อวัดค่า FPE ทำโดยวางแผ่นฟิล์มพลาสติกในแนวระหว่าง compartments ทั้งสองของ permeability cell โดยมีแผ่นประเก็นยางวางรองติดกันกับ cell ทั้งสองด้านก่อนเพื่อป้องกันการรั่ว จากนั้นทำการกดให้ compartments ด้านบนปิดทับ compartments ด้านล่าง โดยใช้ตัวกดเหล็กหล่อที่ต่อเชื่อมกับแท่งเกลียว ผู้วิจัยหมุนแท่งเกลียวเพื่อให้ตัวกดบีบอัด compartments ด้านบนให้ปิดสนิทกับด้านล่าง ทั้งนี้ไอระเหยเอทานอลที่เข้าสู่ compartments ด้านล่าง ผลิตจากการเป่าแก๊สไนโตรเจนลงเอทานอลบริสุทธิ์ (99.9% v/v) ที่มีการ

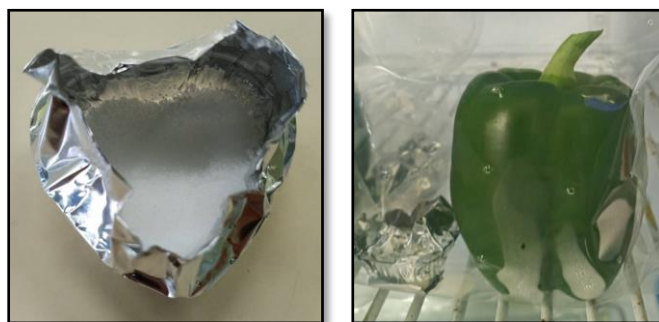
ใช้ Rotameter เป็นอุปกรณ์ปรับและควบคุมความเร็วของแก๊สไนโตรเจน ความเร็วที่ต่างกันของแก๊สไนโตรเจนทำให้ได้ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลแตกต่างกันการศึกษานี้กำหนดความเร็วอยู่ในช่วง $10-60 \text{ ml min}^{-1}$

3.4.2.3 ส่วน compartments ด้านบนของ permeability cell หรือบริเวณ inlet จะเชื่อมกับแหล่งแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ด้วยท่อพลาสติก Nylon ขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้ว ทั้งนี้ความเร็วของแก๊สไนโตรเจนได้ควบคุมไว้ที่ 60 ml min^{-1} ด้วย rotameter (ภาพที่ 12A)

3.4.3 การศึกษาผลของการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟซึ่งมีของควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพริกหวานบรรจุถุงพลาสติก LDPE เจาะรูในระหว่างการเก็บรักษา

เตรียมพริกหวาน โดยนำพริกหวานมาล้าง และนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์ 100 ppm เป็นเวลา 3 นาที ทิ้งไว้ให้แห้งบนกระดาษทิชชูที่สะอาด หลังจากนั้นบรรจุพริกหวานจำนวน 1 ลูกต่อถุงพลาสติก LDPE ซึ่งมีระดับการเจาะรู 0.6 % พร้อมกับของควบคุมฯ แล้วปิดปากถุงด้วยความร้อนพร้อมกันนี้ทำการบรรจุที่เหมือนกันแต่ไม่มีการใส่ของควบคุมฯ โดยจัดให้เป็นสิ่งทดลองควบคุม (control) ภายหลังจากการปิดผนึกนำบรรจุภัณฑ์ไปเก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 2 ประเภทประกอบด้วย (1) สภาวะอุณหภูมิคงที่ 10 และ 25°C และ (2) สภาวะอุณหภูมิไม่คงที่โดยนำพริกหวานซึ่งเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 10°C ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C (ดังเช่นการศึกษาจลนพลศาสตร์การปล่อยไอระเหยเอทานอล) ทั้งนี้ระยะเวลาการเก็บรักษาในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่คือจำนวน 10 วันที่อุณหภูมิ 10°C และจำนวน 4 วันที่อุณหภูมิ 25°C

จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C เกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำ (condensation) ภายในบรรจุภัณฑ์จำนวนมาก จึงได้มีการใช้เทคนิคควบคุมความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์ โดยการใช้เกลือแกง (NaCl) น้ำหนัก 10g บรรจุลงในถ้วยพลาสติกและห่อด้านข้างด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ (ภาพที่ 12) บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์พร้อมพริกหวาน ดัดแปลงจาก Rux et al. (2015) ซึ่งมีการใช้เกลือแกง (NaCl) บรรจุลงใน ถาดบรรจุเห็ด เพื่อควบคุมความชื้น (humectant) ภายในบรรจุภัณฑ์ให้อยู่ระหว่าง 75-80%RH (ภาคผนวก ค) และทำการวิเคราะห์คุณภาพ พบว่า การใช้ถาดที่มีการเติมเกลือจะช่วยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งทำให้เห็นมีคุณภาพ และลักษณะปรากฏที่ดีกว่าการบรรจุในถาด PP ปกติ



ภาพที่ 12 การใช้เกลือแกง (NaCl) 10g ร่วมกับบรรจุภัณฑ์ถุงเจาะรูเพื่อลดการเกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำในบรรจุภัณฑ์พริกหวาน

ในระหว่างการเก็บรักษาจะทำการสุ่มตรวจวัดคุณภาพด้านต่าง ๆ ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.3.1 ความเข้มข้นแก๊ส CO_2 และแก๊ส O_2 และไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์การวัดและวิเคราะห์ความเข้มข้นแก๊ส CO_2 แก๊ส O_2 และไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ ดำเนินการตามวิธีที่รายงานใน พชร ะลิขิ และคณะ (2559) การวิเคราะห์ความเข้มข้นแก๊ส CO_2 และแก๊ส O_2 จะใช้เครื่อง Handheld gas analyser รุ่น Checkpoint3 (PBI. Dansensor, Denmark) (รายงานในหน่วย % v/v) (ภาพที่ 13) ในขณะที่การวิเคราะห์ความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลจะใช้เครื่อง Gas Chromatogram ดังที่รายงานข้างต้น



ภาพที่ 13 เครื่องวัดแก๊ส O_2 และ แก๊ส CO_2 Handheld gas analyser รุ่น Checkpoint3 (PBI. Dansensor, Denmark) (ได้รับความเอื้อเฟื้อจากห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลาสติก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

3.4.3.2 การวัดคุณภาพของพริกหวานประกอบด้วย

1) ความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อโดยประยุกต์จากวิธีที่รายงานใน พชร มะลิลา และคณะ (2559) การวัดความเข้มข้นเอทานอลในพริกหวานสด โดยนำตัวอย่างพริกหวานสด 15g ผสมกับสารละลายเกลืออิ่มตัว 7.5g และน้ำ Deionized 7.5g ทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกันแล้วมา 3g ใส่ในขวดขนาดเล็ก (vial) ขนาด 20 ml และปิดผนึก นำไปต้มที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้น ดูดแก๊สจากบรรยากาศในขวดขนาดเล็กด้วยปริมาตร 1 ml จากนั้นทำการฉีดเข้าเครื่อง Gas chromatography (GC) เพื่อทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลต่อไป

2) การตรวจนับจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และรา

2.1) การตรวจนับจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total Plate Count) นี้จะทำโดยการสุ่มตัวอย่าง แต่ละสิ่งทดลอง (Treatments) สิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ แล้วทำการตรวจนับปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด โดยการ Pour Plate โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ PCA (Plate Count Agar) ดัดแปลงจากวิธีของ A.O.A.C (1990) อ้างอิงใน รุ่งรัตน์ จันทาศ และคณะ (2554) รายงานในหน่วย CFU/g ทั้งนี้รายละเอียดของการวิเคราะห์จุลินทรีย์ทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข

2.2) การตรวจนับจำนวนเชื้อยีสต์ (Yeast) และเชื้อรา (Molds) นั้นจะทำการสุ่มตัวอย่าง ในแต่ละสิ่งทดลอง (Treatments) สิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ เมื่อครบกำหนดทุก 2 วัน แล้วทำการตรวจนับปริมาณเชื้อยีสต์ (Yeast) และเชื้อรา (Molds) โดยการ Spread plate โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ PDA (Potato Dextrose Agar) ดัดแปลงจากวิธีของ A.O.A.C (1990) รายงานในหน่วย CFU/g ทั้งนี้รายละเอียดของการวิเคราะห์จุลินทรีย์ทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข

3) ปริมาณกรดแอสคอร์บิกด้วยการไทรเดรท (AOAC 1990)

การตรวจวัดปริมาณกรดแอสคอร์บิก โดยการสุ่มตัวอย่างพริกหวานสดในแต่ละสิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ วิธีการวัดค่า กรดแอสคอร์บิก นั้นประยุกต์มาจากวิธีของ AOAC (1990) การวัดค่า Ascorbic Acid จะดำเนินการเมื่อครบกำหนดทุก ๆ 2 วัน ทำการไทรเดรทด้วยสารละลาย indophenols standard solution คำนวณหาปริมาณกรดทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำผลไม้โดยคิดเป็น มิลลิกรัมกรดแอสคอร์บิก ต่อ 100 กรัม น้ำผลไม้ โดยได้อธิบายเพิ่มเติมในภาคผนวก ก เรื่องการวิเคราะห์ทางเคมี-กายภาพ

4) ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก โดยทำการชั่งน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์บรรจุพริกหวานและ/หรือของแอดทิฟ (gross weight) ณ วันที่ทำการศึกษา แล้วทำการเปรียบเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของบรรจุภัณฑ์ (initial gross weight)

$$Weight\ Loss(\%) = \frac{(\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักสุดท้าย})}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100$$

5) เนื้อสัมผัสทำการวัดเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Universal Testing (LLOYD model, LR, series, USA) หากมีการเปลี่ยนแปลง Test cells ทุกครั้งให้ทำการ Calibrate force และ Calibrate probe หรือ Test cells โดยใช้หัวทดสอบแบบ Cylinder Probe เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.3 มิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการทดลองดังนี้ Puncture Test Cell เตรียมตัวอย่าง จากนั้นตั้งค่าความเร็ว 100 มิลลิเมตร/นาที ค่า high extension 18 มิลลิเมตร ที่ใช้ในการกดตัวอย่าง แล้วกดปุ่มเดินเครื่องเพื่อให้ Test cell แทะทะลุลงไปเนื้อตัวอย่างอ่านค่าแรงที่จุดยอดแรกของกราฟคือ ค่าที่แสดงถึงความแน่นเนื้อของผลไม้ (maximum load; หน่วยที่รายงานคือ N) รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยจาก 5 ซ้ำ ต่อ 1 ตัวอย่าง

6) วัดสีด้วยเครื่อง (Hunter lab) โดยสุ่มตัวอย่างพริกหวานในแต่ละสิ่งทดลอง (Treatment) มาทำการวัดสีด้วยเครื่อง Chroma Meter (ColorFlex 4510) เป็นการวัดด้วยระบบ Color space CIE L^* a^* และ b^* โดยใช้

ค่า L^* เป็นค่าที่รายงานถึงความสว่างของสีมีค่าตั้งแต่ 0-100

กรณีที่ค่า L^* เท่ากับ 100 หมายถึง ความสว่าง

ค่า L^* เท่ากับ 0 หมายถึง ความมืด

ค่า a^* เป็นค่าที่รายงานถึงการเปลี่ยนแปลงของสีในช่วงสีเขียวถึงสีแดง

กรณีที่ค่า a^* เป็นลบ หมายถึง สีเขียว

ค่า a^* เป็นบวก หมายถึง สีแดง

ค่า b^* เป็นค่าที่รายงานถึงการเปลี่ยนแปลงสีในช่วงสีน้ำเงินถึงสีเหลือง

กรณีที่ค่า b^* เป็นลบ หมายถึง สีน้ำเงิน

ค่า b^* เป็นบวก หมายถึง สีเหลือง

ในงานวิจัยนี้ รายงานเฉพาะ ค่า L^* และ a^* เนื่องจากสีของพริกหวานไม่มีการเปลี่ยนสีไปในทางของสีเหลืองมากนัก จึงไม่นำเสนอค่า b^*

3.5 การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์เชิงสถิติ

การศึกษานี้วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 5 ซ้ำ การทดลอง (replicates) ค่าที่วัดได้จะนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) และความแตกต่างค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% โดยใช้โปรแกรม SAS

3.6 สรุปประเด็นที่สำคัญ

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการพัฒนาการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับพริกหวาน พร้อมกับการนำเสนอวิธีการทดสอบ และวิเคราะห์คุณภาพของบรรจุภัณฑ์ และพริกหวานในระหว่างการเก็บรักษาต่อไปแสดงผลและการอภิปรายจากการวิจัยนี้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

บทนี้นำเสนอผลของการศึกษาใน 3 ประเด็นประกอบด้วย (1) สมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์ม LDPE ที่มีการเจาะรู และ จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากของควบคุมาที่ทำจากฟิล์ม Active Pak™ และฟิล์ม LDPE ภายในระบบปิด และ (2) ผลของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟซึ่งมีของควบคุมาที่ทำจากฟิล์ม Active Pak™ และฟิล์ม LDPE ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านเคมี-กายภาพ ของพริกหวานบรรจุถุงพลาสติก LDPE เจาะรูในระหว่างการเก็บรักษาทั้งในสภาวะอุณหภูมิคงที่และมีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเพื่อจำลองสภาวะการเกิดความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น (cool chain disruption) ผลการศึกษาแสดงในหัวข้อต่อไป

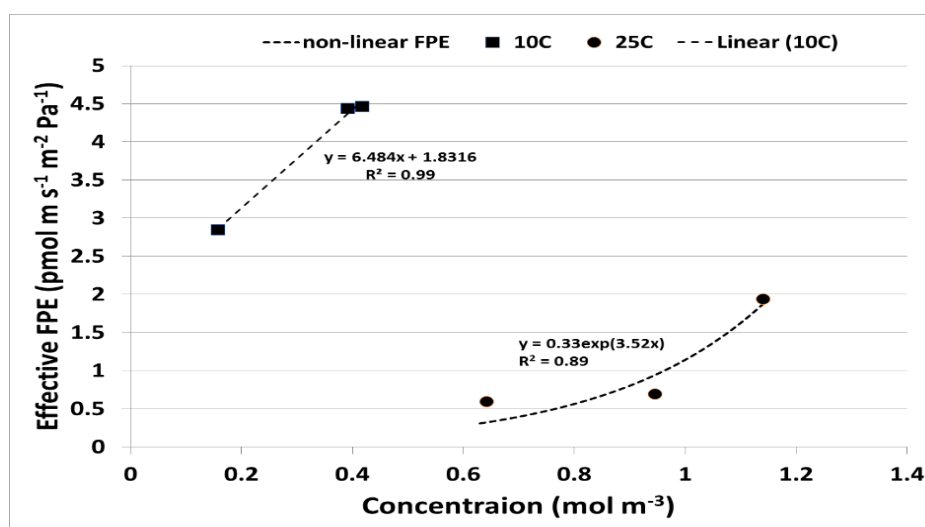
4.1 สมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์ม LDPE ที่มีการเจาะรู และ จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากของควบคุมาที่ทำจากฟิล์ม Active Pak™ และฟิล์ม LDPE ภายในระบบปิด

4.1.1 สมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์ม LDPE ที่มีการเจาะรู

จากที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 ชนิดของบรรจุภัณฑ์สำหรับพริกหวาน คือ ถุงพลาสติก LDPE ที่ได้มีการเจาะรูเพื่อเป็นการลดการสะสมความชื้นในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ที่อยู่ในระดับสูงและอาจเกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ เมื่ออุณหภูมิของการเก็บรักษาไม่คงที่ เมื่อพิจารณาในลักษณะดังกล่าวของบรรจุภัณฑ์ พบว่า การถ่ายโอน (film transfer) หรือซึมผ่านฟิล์ม LDPE (LDPE film permeation) ของไอระเหยเอทานอลจากภายในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอกสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งผ่านทางบริเวณฟิล์มที่ไม่เจาะรู (non-perforated) และทางรูที่เจาะ (perforated) ในหลักการทั่วไปการซึมผ่านฟิล์มพลาสติก หรือ Fick's law (กล่าวถึงในบทที่ 2) การแพร่ผ่านรูเกิดขึ้นได้เร็วกว่าผ่านชั้นฟิล์มเนื่องจาก permeant ต้องละลายลงในโครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มแล้วเกิดการแพร่ผ่านโครงสร้างพอลิเมอร์เนื่องจากความแตกต่างความเข้มข้นของ permeant ในโครงสร้าง อย่างไรก็ตามการศึกษาสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์ม LDPE (LDPE film permeability to ethanol vapour หรือ LDPE FPE) ที่เจาะรูไม่ได้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติดังกล่าวที่แยกระหว่างรูที่เจาะ หรือส่วนที่ไม่ได้มีการเจาะรูบนฟิล์มแผ่นเดียวกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการวัดค่า FPE ของทั้งแผ่นฟิล์มที่เจาะรู ค่าของ FPE จึงเป็นค่า effective FPE ซึ่งเป็นผลจาก

การซึมผ่านทั้งส่วนที่เจาะและไม่เจาะรูบนแผ่นฟิล์ม ปัจจุบันยังไม่พบรายงานในเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องในค่าของ effective FPE ของฟิล์ม LDPE หรือฟิล์มอื่นๆ ซึ่งเจาะรู

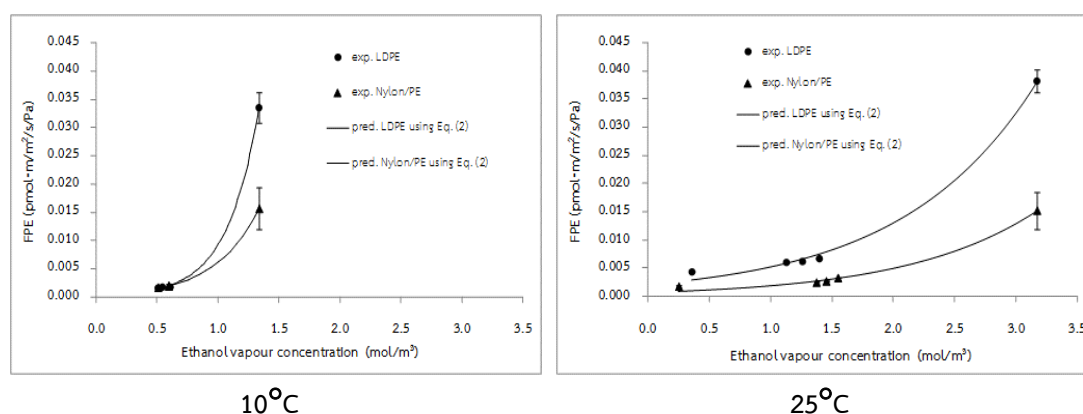
ภาพที่ 14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า effective FPE ของฟิล์มพลาสติก LDPE ซึ่งได้มีการเจาะรูที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล โดยค่า effective FPE เหล่านี้ได้ทำการวัดที่อุณหภูมิ 10°C และ 25°C จากข้อมูลพบว่าค่า effective FPE มีค่าที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นไอระเหยเอทานอล ค่า effective FPE ที่อุณหภูมิ 10°C มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 25°C อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงมีลักษณะที่ต่างกันทั้งสองอุณหภูมิ กล่าวคือ ค่า effective FPE ที่อุณหภูมิ 10°C มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง (linear) ในช่วงความเข้มข้นที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ 10°C มีข้อสังเกต คือการเพิ่มความเข้มข้นระหว่าง 0.4-0.5 mol m⁻³ ไม่ได้ทำให้ค่า FPE เพิ่มขึ้นมาก อาจเป็นผลจากการแพร่ผ่านรูที่เจาะมากกว่าชั้นฟิล์ม การซึมผ่านรูเป็นการแพร่ผ่านในอากาศ จึงทำให้มีค่า FPE ไม่ต่างกันมาก ในขณะที่ค่า effective FPE ที่อุณหภูมิ 25°C มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียล เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สูงขึ้น



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของค่า effective FPE (n=5) ของฟิล์มพลาสติก LDPE ซึ่งมีการเจาะรู 0.6% และความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล ที่อุณหภูมิ 10°C (■) และ 25°C (●)

จากการศึกษาเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง พบว่า ค่า film permeability มีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตามความสัมพันธ์อาร์เรเนียส อย่างไรก็ตามค่า FPE ของฟิล์ม LDPE เจาะรูที่ 10°C มีค่าสูงกว่า 25°C เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่ใกล้เคียงกัน ผลการศึกษานี้มี

ความคล้ายคลึงกับค่า FPE ของฟิล์ม LDPE และ Nylon/PE ที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C รายงานโดย พัชรีย์ มะลิลา (2559) (ภาพที่ 15) ผลการศึกษาดังกล่าวอาจเป็นผลจากระบวนการดูดซับไอระเหยเอทานอลโดยฟิล์มพลาสติกเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะของการเกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน (endothermic reaction) ดังนั้นจึงอาจเป็นสาเหตุให้ค่า effective FPE ของฟิล์มซึ่งวัดที่อุณหภูมิ 10°C มีค่าสูงกว่าที่ 25°C ทั้งนี้ค่า FPE เป็นผลของทั้งการดูดซับและการแพร่ เมื่อการดูดซับจึงเกิดได้สูง จึงมี permeant ซึ่งเคลื่อนที่ได้มาก จึงส่งผลให้ค่า effective FPE ของฟิล์มซึ่งวัดที่อุณหภูมิ 10°C มีค่าสูงกว่าที่ 25°C นอกจากนี้การเจาะรูที่ใช้ เป็นการใช้ตะปู ดังนั้นรูที่เจาะอาจไม่ทำให้ฟิล์มเกิดการฉีกขาดเป็นรูที่สมบูรณ์ ดังการใช้แสงเลเซอร์ หรือหัวเข็มร้อน ข้อจำกัดดังกล่าวจึงอาจส่งผลให้การแพร่ผ่านของไอระเหยเอทานอลผ่านชั้นฟิล์มที่อาจเกิดแบบเชื่อมประสานกัน แม้จะไม่แนบสนิทก็ตาม ประเด็นความไม่ชัดเจนนี้จะได้อธิบายต่อไปในอนาคต



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก LDPE และ Nylon/PE (ฟิล์มไม่เจาะรู) และความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล ที่อุณหภูมิ 10°C (■) และ 25°C (●) ข้อมูลเส้นทึบ คือ ค่าที่ทำนายโดยใช้ non-linear regression
ที่มา: พัชรีย์ มะลิลา (2558)

การเพิ่มขึ้นของค่า effective FPE ที่ 25°C อย่างช้า ๆ เมื่อสัมผัสกับไอระเหยเอทานอล ความเข้มข้นต่ำ (ภาพที่ 15) อาจเนื่องจากการดูดซับเอทานอลเข้าสู่ฟิล์มเกิดขึ้นได้ต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 10°C (ปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดขึ้นได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ) อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลเพิ่มขึ้น พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่า effective FPE แบบเอกซ์โปเนนเชียล (เพิ่มขึ้นในลักษณะทวีคูณ) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจมีสาเหตุจากการเพิ่มขึ้นของการแพร่ของโมเลกุลเอทานอล (ethanol permeant) ที่ถูกดูดซับในโครงสร้าง และที่สำคัญมีการแพร่ผ่านรูของฟิล์มเจาะรูโดยตะปู จึงส่งผลให้เกิดการแพร่ผ่านของ permeant ในอัตราที่เร็วขึ้นทวีคูณ จึงนำไปสู่

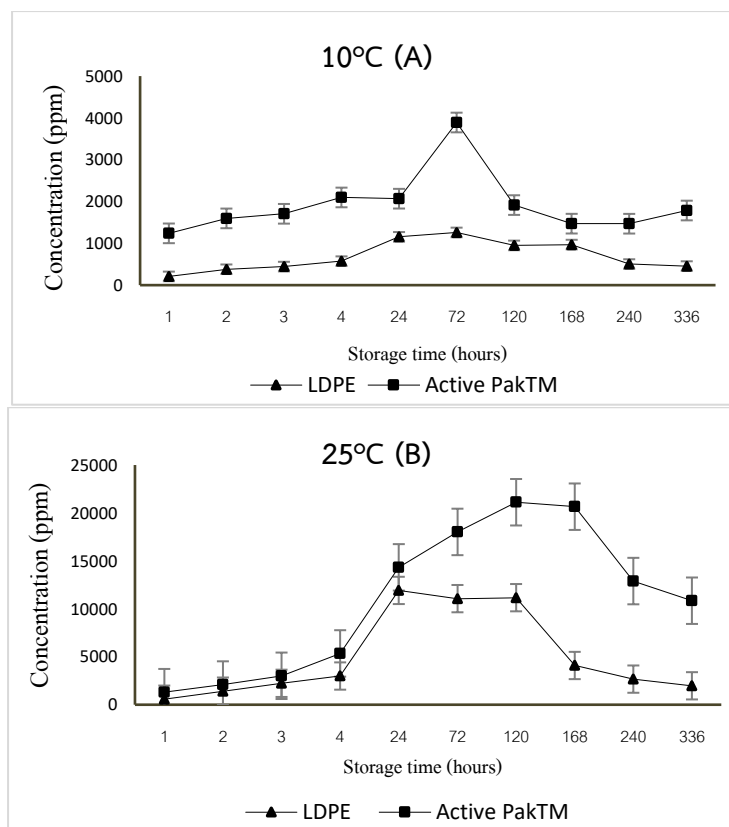
การเพิ่มขึ้นของค่า FPE การเปลี่ยนแปลงของค่า effective FPE ในลักษณะดังกล่าวได้รายงานในฟิล์มพลาสติก polyethylene terephthalate (PET) (พัชรี มะลิลา, 2560) ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusivity) ของ permeant ในโครงสร้างของฟิล์มและความเข้มข้นของไธเรเฮเอทานอลหรือไธเรเฮของสารอินทรีย์เป็นความสัมพันธ์แบบเอกซ์โปเนนเชียล (Robertson, 1993)

ข้อมูลค่า effective FPE ของฟิล์ม LDPE เจาะรูที่ได้นำเสนอข้างต้นยังไม่พบการรายงานในเอกสารอ้างอิง จึงจัดได้ว่าเป็นข้อมูลใหม่และเป็นประโยชน์ในการวางแผนการใช้ฟิล์มพลาสติกเจาะรูในรูปแบบของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ ตัวอย่างเช่น หากเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (เช่น 10°C) ควรใช้ฟิล์มเจาะรูร่วมกับช่องควบคุมฯ ที่ทำจากฟิล์มซึ่งยอมให้ไธเรเฮเอทานอลซึมผ่านได้เร็ว (ดังเช่นฟิล์ม Active Pak™ ที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป) เพื่อทดแทนไธเรเฮเอทานอลที่จะเกิดการซึมผ่านบรรจุภัณฑ์เจาะรูไปยังบรรยากาศรอบ ๆ ได้ง่าย

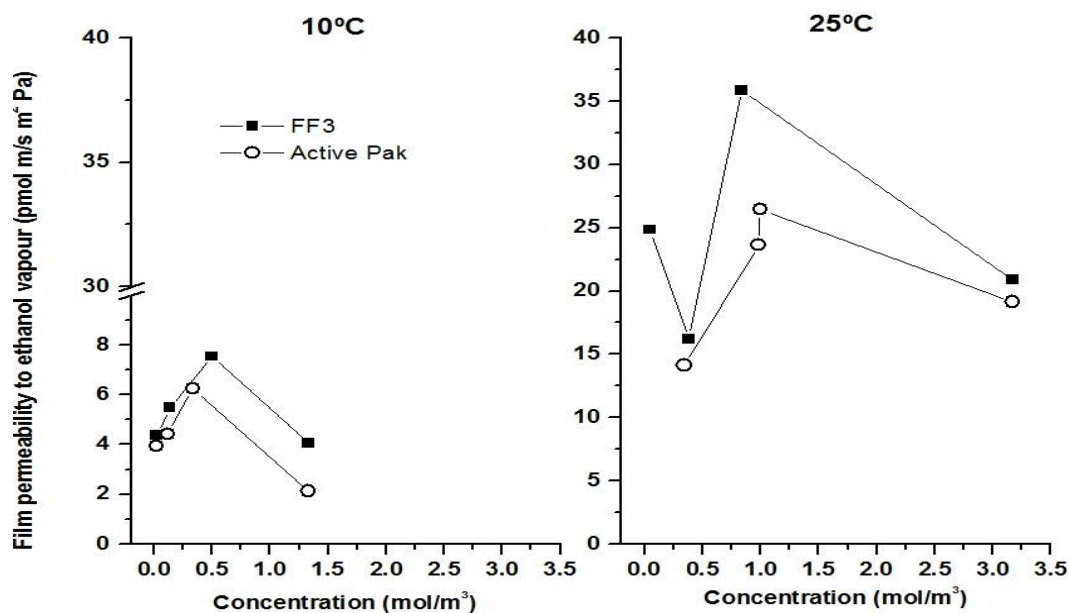
4.1.2 จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไธเรเฮเอทานอลจากช่องควบคุมฯที่ทำจากฟิล์ม Active Pak™ และฟิล์ม LDPE ภายในระบบปิด

การวิจัยในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไธเรเฮเอทานอลจากช่องควบคุมฯ ที่ทำจากฟิล์ม 2 ประเภทคือ Active Pak™ และ LDPE โดยเป็นการปลดปล่อยในระบบปิด (ดังแสดงรายละเอียดในบทที่ 3) ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์ที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ 10 และ 25°C แสดงในภาพที่ 16 เมื่อพิจารณาในแต่ละอุณหภูมิ พบว่า ช่องควบคุมฯที่ทำจากฟิล์ม Active Pak™ สามารถปลดปล่อยไธเรเฮเอทานอลได้ในอัตราเร็วที่สูงกว่าฟิล์ม LDPE ส่งผลให้มีการสะสมของไธเรเฮเอทานอลในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ในระดับความเข้มข้นที่สูงกว่า ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไธเรเฮเอทานอลมีลักษณะเหมือนกัน คือ มีค่าความเข้มข้นที่สูงมาก (หรือเรียกว่า initial release peak) เนื่องจากมีความแตกต่างที่สูงมากระหว่างความเข้มข้นของไธเรเฮเอทานอลในช่องควบคุมฯ และบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ กล่าวคือ ในตอนเริ่มต้นของการปลดปล่อยไธเรเฮเอทานอลจากช่องควบคุมฯ ($t=0$) ความดันไอหรือความเข้มข้นของไธเรเฮเอทานอลมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าที่จุดอิ่มตัว ในขณะที่ความดันไอในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์มีค่าประมาณ 0 ppm ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยไธเรเฮเอทานอลด้วยอัตราที่สูง (พิจารณาตามหลักของการแพร่ Fick's laws) ภายหลังจาก initial peak ค่าความเข้มข้นที่สะสมในบรรยากาศลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของไธเรเฮเอทานอลในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแตกต่างของความดันไอลดลง และปริมาณเอทานอลบนกระดาชกรองซึ่งเป็นตัวพาในช่องควบคุมฯ มีค่าลดลง และเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady-state) (ภายหลังจาก 5 วันของการเก็บรักษา) ทั้งนี้ระดับความเข้มข้นของไธเรเฮเอทานอลในระบบที่มีช่องควบคุมฯ ซึ่งทำจากฟิล์ม Active Pak™ ที่สูงกว่าในระบบมีช่องควบคุมฯ ซึ่งทำจากฟิล์ม LDPE เป็นผลจากค่า FPE ของฟิล์ม Active Pak™ ที่มีค่าสูง

กว่าค่า FPE ของฟิล์ม LDPE ประมาณ 10-100 เท่า ดังแสดงในภาพที่ 17 (หทัยพร กัมพวงค์, 2560) และภาพที่ 15 (พัชรี มะลิลา, 2558) ผลการศึกษานี้ได้สนับสนุนความรู้ในค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก ซึ่งมีความสำคัญต่อระดับของความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการควบคุมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศของระบบปิด ซึ่งเป็นผลจากการปลดปล่อยจากช่องควบคุมฯ ที่ทำจากฟิล์ม 2 ประเภทคือ Active PakTM และ LDPE ที่อุณหภูมิ 10 (A) และ 25°C (B) (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n=5)



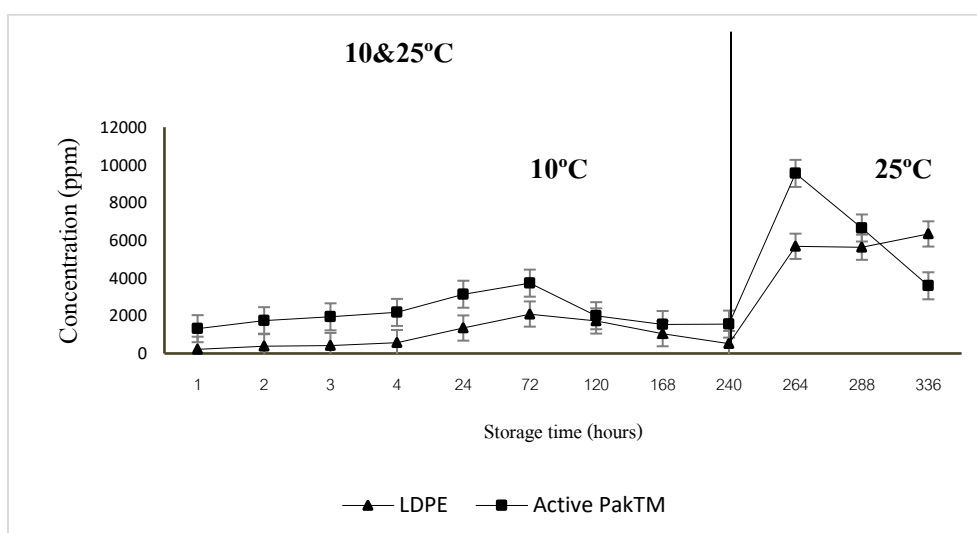
ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลและค่า FPE ของฟิล์ม FF3 และฟิล์ม ActivePak™ ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C และ 25°C (ค่าที่แสดงคือค่าเฉลี่ย $n=3$)

ที่มา: หทัยพร กัมพวงค์ (2560)

เมื่อพิจารณาระหว่างอุณหภูมิ พบว่า ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรจุภัณฑ์เก็บรักษาที่ 25°C มีค่าความเข้มข้นสูงกว่าที่เก็บรักษาที่ 10°C (ทั้งสองประเภทของของควบคุมฯ) โดยเฉพาะในช่วง 24-120 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่ 10°C เฉลี่ยประมาณ 10 เท่า (ภาพที่ 16) ผลการศึกษาดังกล่าวมีสาเหตุสำคัญมาจากค่า FPE ของทั้งฟิล์ม LDPE และ ActivePak™ ที่มีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าที่สูงขึ้น (ภาพที่ 15 และภาพที่ 17) ค่า FPE ที่สูงส่งผลให้อัตราเร็วของการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลมีค่าที่สูงขึ้นจึงทำให้เกิดการสะสมไอระเหยเอทานอลได้ในระดับความเข้มข้นที่สูง ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่า FPE มีลักษณะเป็นเอกซ์โปเนนเชียล หรือเรียกว่าความสัมพันธ์อาร์เรเนียส โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่า FPE แบบทวีคูณ (พัชรี มะลิลา, 2558)

การศึกษานี้ได้จำลองสภาวะของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (temperature alterations) เช่น การเคลื่อนย้ายสินค้าจากที่อุณหภูมิเย็นไปยังอุณหภูมิที่สูงกว่าหรือการชำรุดของระบบการทำความเย็นผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยนำระบบซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 4 วัน ผลการศึกษานี้แสดงในภาพที่ 18 โดยพบว่า เมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาสูงขึ้น ทำให้อัตราเร็วของการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจาก

ของควมคุมฯ มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นไปตามความสัมพันธ์อาร์เรนียสดังที่ได้กล่าวข้างต้น โดยเฉพาะในวันที่ 10 ที่มีการย้ายระบบอุณหภูมิจาก 10°C ไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 25°C มีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญต่ออัตราเร็วของการปล่อยไอระเหยเอทานอล ส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งการเคลื่อนที่ของสายโซ่ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อความสามารถในการซึมผ่านของฟิล์มสูงขึ้นด้วย จากผลการทดลอง (ภาพที่ 18) มีแนวโน้มว่าฟิล์ม Active Pak™ มีความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สูงกว่าฟิล์ม LDPE และทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายโซ่ที่มีการจัดเรียงตัวหรือส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) จะเป็นส่วนที่ยอมให้แก๊สหรือไอระเหยซึมผ่านได้ดี (สุภารัตน์ รักชลธี, 2556)

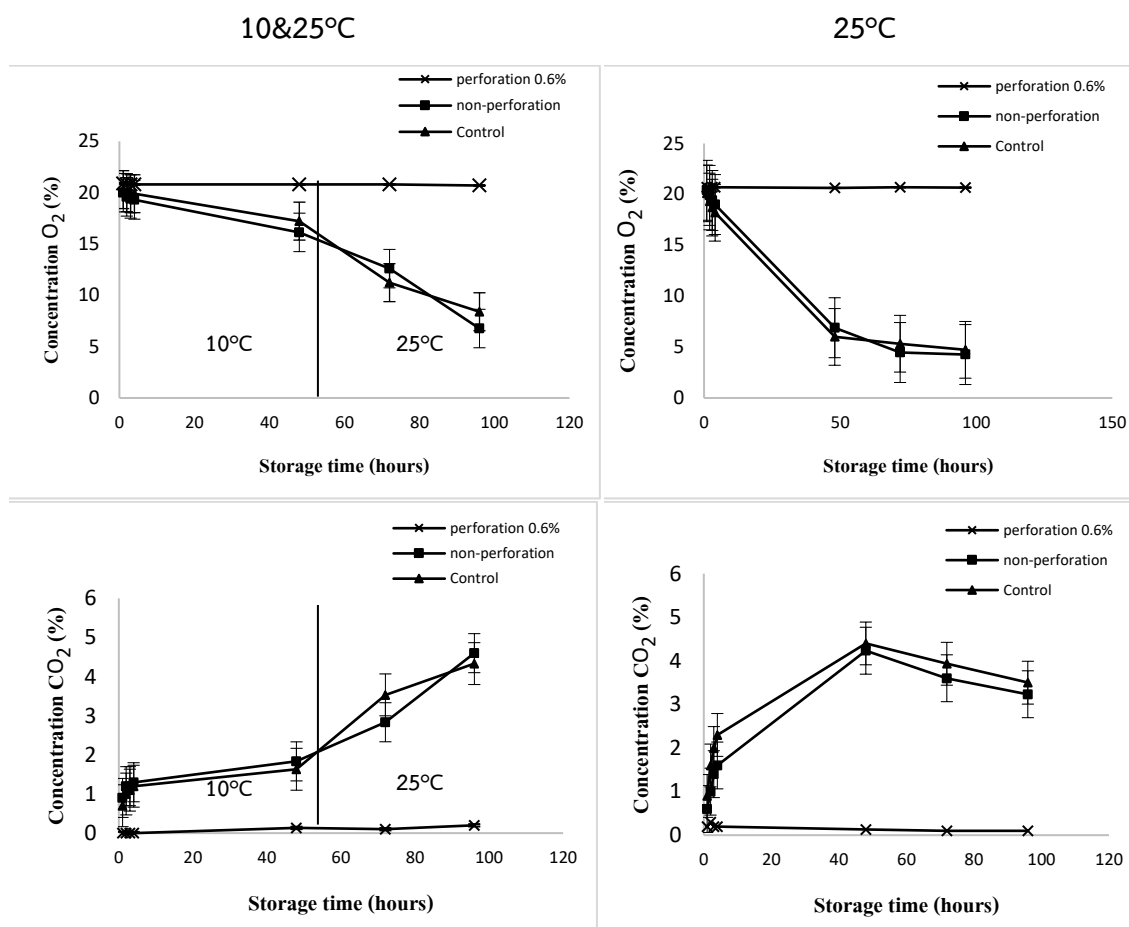


ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลจากของควมคุมฯ ที่ทำจากฟิล์มประเภทคือ Active Pak™ และ LDPE ที่สะสมในบรรยากาศของระบบปิด ในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่ โดยจะเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 10 วัน และย้ายไปที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 4 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $n=5$)

4.2 การศึกษาผลของการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟซึ่งมีของควบคุมาต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพริกหวานบรรจุถุงพลาสติก LDPE เเจาะรูในระหว่างการเก็บรักษา

4.2.1 ความเข้มข้นแก๊ส CO₂ และแก๊ส O₂ ในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์

ผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส O₂ และแก๊ส CO₂ แสดงในภาพที่ 19 จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่เจาะรูที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C พบว่า ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนลดลงตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา และความเข้มข้นของแก๊ส O₂ ที่อุณหภูมิ 25°C เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เร็วกว่าอุณหภูมิ 10°C เนื่องจากอัตราการหายใจที่อุณหภูมิ 25°C สูงกว่าที่อุณหภูมิ 10°C สอดคล้องกับรายงานของ วรารคณา ทองพระพักตร์ (2547) พบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจของพริกหวานที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C พบว่ามีอัตราการหายใจสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่วันแรกของการเก็บรักษาจนถึงวันที่ 9 ซึ่งอัตราการหายใจมีค่าสูงกว่าที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำอย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษานับสนุนความรู้ในประเด็นการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำสามารถชะลอการหายใจได้ (Robertson, 1993) ภายหลังจากการเก็บรักษา 2 วัน (48 ชั่วโมง) ผู้วิจัยได้ทำการย้ายพริกหวานซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C ไปเก็บรักษาที่ 25°C พบว่า ในวันที่ 4 (ชั่วโมงที่ 96) ความเข้มข้นของแก๊ส O₂ ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นเพราะอุณหภูมิที่สูงขึ้นไปเร่งอัตราการหายใจของพริกหวาน เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ พบว่าในทุกๆ อุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีแนวโน้มคงที่เมื่อระยะเวลาผ่านไป (พิจารณาในช่วง 48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 10°C และ 96 ชั่วโมงอุณหภูมิ 25°C) โดยความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ภายในบรรจุภัณฑ์ที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 25°C มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 10°C ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจโดยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจและอุณหภูมิเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล หรือความสัมพันธ์อาร์รีเนียส ดังเช่นในกรณีของฟิล์มพลาสติก ทั้งนี้ความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ที่อุณหภูมิ 25°C ภายหลังจากการเก็บรักษา 72 ชั่วโมง มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาที่ผ่านมา อาจมีสาเหตุสำคัญจากการชราภาพและ/หรือการเริ่มเสื่อมคุณภาพจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (ภาพที่ 19)



ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊ส O₂ และแก๊ส CO₂ ในบรรจุภัณฑ์ เก็บรักษาที่สถานะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C เก็บรักษาไว้ 48 ชั่วโมงจากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 2 วัน เพื่อจำลองสถานะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C เก็บเป็นเวลา 96 ชั่วโมง¹ (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n=3)

ในภาพที่ 19 พบว่า เมื่อทำการย้ายพริกหวานซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C ไปยังอุณหภูมิ 25°C ส่งผลให้ความเข้มข้นของแก๊ส CO₂ ในบรรยากาศของถุงพลาสติกมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (เพิ่มขึ้นจากประมาณ 1.5% (v/v) เป็น 4.0% (v/v) เมื่อครบระยะเวลาที่ศึกษา) การเพิ่มขึ้นดังกล่าวเป็นผลจากอัตราการหายใจของพริกหวานเพิ่มขึ้น ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงผลของการ

¹ ระยะเวลาในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส O₂ และแก๊ส CO₂ ดำเนินการ 4 วันเนื่องจากผู้วิจัยต้องไปใช้เครื่องวัดแก๊สทั้งสองห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลาสติก จึงวัดความเข้มข้นแก๊สได้ในเวลาที่จำกัด ทั้งนี้เครื่องวัดแก๊สที่คณะเกษตรศาสตร์ฯรุดนอกจากนี้ในการศึกษาความเข้มข้นแก๊ส O₂ และแก๊ส CO₂ ศึกษาโดยใช้เพียงฟิล์ม ActivePak™ เพียงอย่างเดียวเนื่องจากการตรวจเอกสารอ้างอิงทำให้ทราบว่า การใช้ฟิล์ม LDPE ทำของควบคุมฯ ซึ่งรายงานในพัชรี มะลิลา (2558) และหทัยพร กัมพวงศ์ (2560) ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแก๊สทั้งสอง

ไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ที่มีแนวโน้มเกิดขึ้นได้ในการจัดการโซ่อุปทานของประเทศไทย ความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวทำให้อุณหภูมิการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นจึงนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของอัตราการหายใจและเร่งการเปลี่ยนแปลงคุณภาพต่างๆ ข้อมูลนี้จึงสนับสนุนการประยุกต์ใช้โซ่ความเย็นในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์สดที่มีมูลค่าและคุณค่าทางโภชนาการ

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่เจาะรู (non-perforation) ซึ่งมีหรือไม่มีช่องควบคุมฯ (control) (ภาพที่ 19) พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและมีทิศทางการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มช่องควบคุมฯ ในบรรจุภัณฑ์ passive MAP ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อกระบวนการหายใจและการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลที่สำคัญต่อการพัฒนาสภาวะบรรยากาศดัดแปร (modified atmosphere condition) ที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ที่ไม่แตกต่างกันระหว่าง passive MAP และ active MAP มีสาเหตุสำคัญเนื่องจากสภาวะบรรยากาศดัดแปรที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์ (กล่าวคือความเข้มข้นแก๊ส O_2 และความเข้มข้นแก๊ส CO_2 เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของแก๊สทั้งสองในบรรยากาศปกติ) ทำให้อัตราการหายใจลดลงและอาจทำให้การตอบสนองต่อไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์เกิดขึ้นในระดับที่ต่ำ ข้อมูลดังกล่าวนี้สนับสนุนผลการศึกษการเพิ่มช่องควบคุมฯ เข้าใน passive MAP ของผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น มะเขือเทศเชอร์รี่ (Kampawong et al., 2018) และผลหม่อนสด (Choosung et al., 2019) ผลการศึกษาดังกล่าวทำให้ทราบได้ว่าการเพิ่มช่องควบคุมฯ ได้ให้ผลดีในการควบคุมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในขณะที่ไม่ส่งผลด้านลบต่อคุณภาพด้านอื่น ๆ (รายละเอียดเหล่านี้ได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป)

เมื่อพิจารณาบรรจุภัณฑ์ที่มีการเจาะรู (perforated) พบว่า ความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ในบรรจุภัณฑ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของแก๊สทั้งสองในบรรยากาศปกติ ($21\% O_2$ และ $0.03\% CO_2$ (v/v)) โดยความเข้มข้นของแก๊สมีแนวโน้มคงที่ตลอดอายุการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงในลักษณะดังกล่าวเป็นผลมาจากการเจาะรูส่งผลให้แก๊สทั้งสองสามารถซึมผ่านฟิล์มเข้ามาได้ในอัตราที่เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับถุงฟิล์มพลาสติกที่ไม่ได้เจาะรู (ภาพที่ 19) นอกจากนี้การเจาะรูเป็นแนวทางสำคัญในการลดการสะสมความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติก เนื่องจากฟิล์มพลาสติกมีสมบัติด้านการซึมผ่านของความชื้นที่สูง การสะสมความชื้นที่สูงอาจเกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำหากอุณหภูมิการเก็บรักษาไม่คงที่ การวิจัยนี้จึงได้ทำการเจาะรูพบว่าช่วยชะลอการเกิดหยดน้ำขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์ ทั้งนี้การเจาะรูเพื่อลดความชื้นควรใช้ควบคู่กับสาร humectant ที่คอยควบคุมระดับของชื้นภายในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562) การวิจัยนี้ได้ใช้เกลือแกง (NaCl) ช่วยควบคุมความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์จึงเป็นการลดความชื้นและหยดน้ำได้อีกทางหนึ่ง

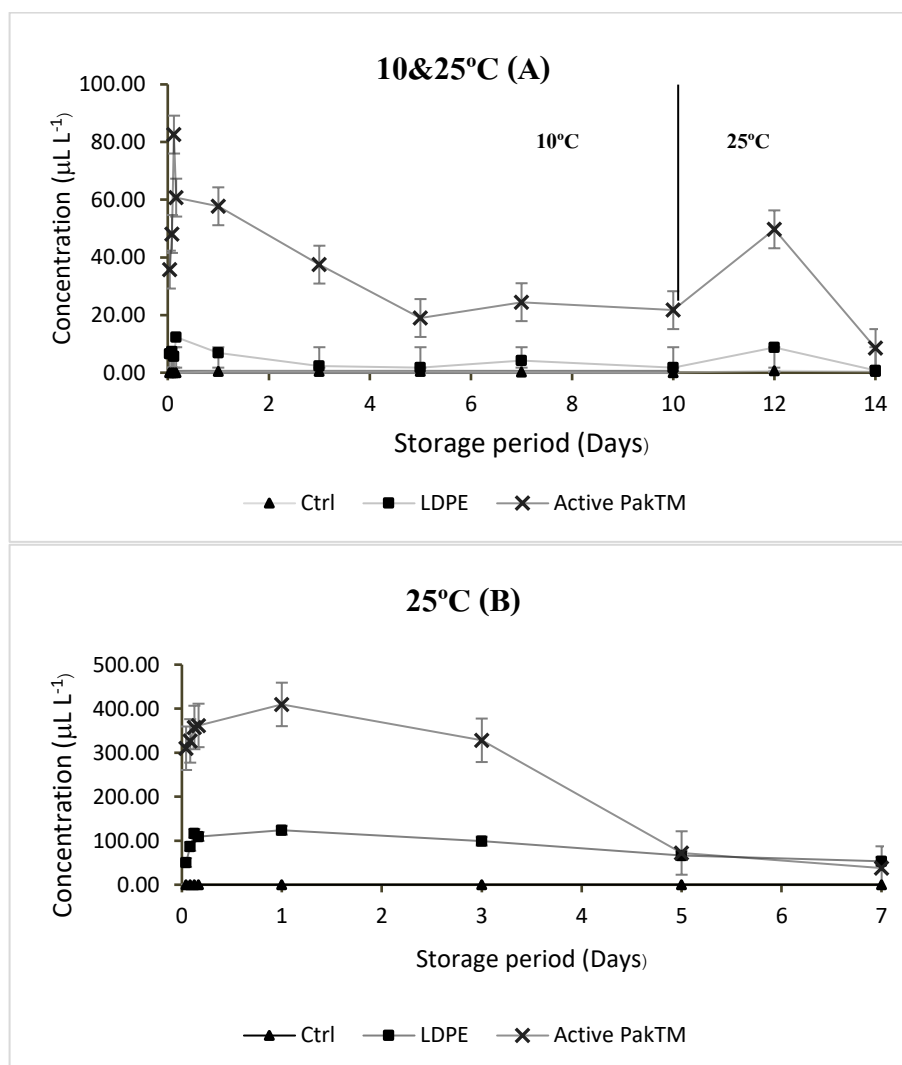
4.2.2 ความเข้มข้นของไธราเฮเอทานอลในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์

การศึกษานี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไธราเฮเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์เจาะรู ที่มีซองควบคุมฯ ที่ทำจากฟิล์ม Active Pak™ และฟิล์ม LDPE ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C ผลการศึกษาแสดงในภาพที่ 20 และทำให้ทราบว่า ในช่วง 4 ชั่วโมงแรกของการเก็บรักษา ความเข้มข้นของไธราเฮเอทานอลมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเข้าถึงจุดสูงสุด หรือ initial release peak เป็นผลจากความแตกต่างของความเข้มข้นไธราเฮเอทานอลระหว่างซองควบคุมฯ และบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ กล่าวคือ ในช่วงแรกภายหลังจากการใส่ซองแอคทีฟเข้าไปในบรรจุภัณฑ์จะยังไม่มีค่าความเข้มข้นของไธราเฮเอทานอลส่งผลให้มีความแตกต่างที่สูง ดังในกรณีการศึกษาจลนพลศาสตร์การปล่อยไธราเฮเอทานอล ดังนั้นอัตราเร็วของการปลดปล่อยไธราเฮเอทานอลจากซองแอคทีฟจึงเกิดได้สูงมาก แต่ภายหลังจากการเก็บรักษา 24 ชั่วโมง พบว่ามีค่าความเข้มข้นลดลง เป็นผลจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไธราเฮเอทานอลระหว่างซองควบคุมฯ และบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์มีค่าลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของไธราเฮเอทานอลในบรรจุภัณฑ์ลดลงซึ่งเป็นผลจากปริมาณเอทานอลในซองแอคทีฟลดลง และการทำปฏิกิริยาระหว่างไธราเฮเอทานอลและพริกหวานส่งผลให้มีการดูดซับไธราเฮเอทานอลเข้าไปในเนื้อเยื่อพริกหวาน (Utto, 2014) เมื่อความแตกต่างของความเข้มข้นดังกล่าวลดลงจึงทำให้อัตราการปลดปล่อยไธราเฮเอทานอลลดลงด้วย ทั้งนี้ผลการศึกษาแสดงในภาพที่ 20 แสดงให้เห็นว่าระดับความเข้มข้นของไธราเฮเอทานอลที่สะสมในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุมฯ ทำจากฟิล์ม Active Pak™ มีค่าที่สูงกว่าในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุมฯ ทำจากฟิล์ม LDPE ผลการศึกษาดังกล่าวสนับสนุนความรู้ของค่า FPE ของฟิล์มทั้งสอง (หัวข้อที่ 4.1) โดยค่า FPE ของฟิล์ม Active Pak™ มีค่าที่สูงกว่าค่า FPE ของฟิล์ม LDPE เมื่อพิจารณา ณ ระดับความเข้มข้นที่เท่ากันและ/หรือใกล้เคียงกัน (Kampawong et al., 2018) ในกรณีของความเข้มข้นไธราเฮเอทานอลในบรรยากาศของสิ่งทดลองควบคุม (control) มีค่าเท่ากับ $0 \mu\text{L L}^{-1}$ ตลอดอายุการเก็บรักษาเนื่องจากสิ่งทดลองดังกล่าวไม่มีบรรจุซองควบคุมฯ (ภาพที่ 20) ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าไธราเฮเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์พริกหวานนั้นมาจากการปลดปล่อยจากซองควบคุมฯ

เมื่อพริกหวานที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C ได้ถูกย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ภายหลังจากการเก็บรักษา 10 วัน พบว่า ความเข้มข้นของไธราเฮเอทานอลที่สะสมในบรรจุภัณฑ์สูงขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้ง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่า FPE ของทั้งฟิล์ม Active Pak™ และ LDPE มีค่าที่เพิ่มขึ้น (พัชร, 2558 และ Kampawong et al., 2018) กรอบกับความดันไอของไธราเฮเอทานอลมีค่าเพิ่มสูงขึ้นสอดคล้องกับอุณหภูมิ (หลักของ ideal gas law) จึงทำให้ไธราเฮเอทานอลสามารถซึมผ่านซองควบคุมฯ เข้าสู่บรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ได้เพิ่มขึ้น ภายหลังจากนั้นความเข้มข้นของไธราเฮเอทานอลลดลงเนื่องจากปริมาณของเอทานอลบนกระดาศกรงมีค่าที่ลดลง

ในทำนองเดียวกันกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิคงที่ 10°C พบว่า ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์ที่มีช่องควบคุมฯ ทำจากฟิล์ม Active Pak™ มีความเข้มข้นที่สูงกว่าในบรรจุภัณฑ์ที่มีช่องควบคุมฯ ทำจากฟิล์ม LDPE ส่วนในบรรจุภัณฑ์ของสิ่งทดลองควบคุมไม่พบการสะสมไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศ ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วงระยะเวลาที่ศึกษาไม่ส่งผลให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการสะสมเอทานอลหรือสารอื่นๆ เช่น อะซีตัลดีไฮด์ (acetaldehyde) ทั้งนี้อาจเป็นผลจากระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงขึ้นไม่นานเพียงพอ แต่อาจคาดการณ์ได้ว่าหากระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้เกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นการจัดการอุณหภูมิในโซ่อุปทานจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บรักษา

เมื่อพิจารณาจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C พบว่า ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 10°C ทั้งนี้ระดับความเข้มข้นที่อุณหภูมิ 25°C มีค่าเฉลี่ยที่สูงกว่าอุณหภูมิ 10°C เป็นผลมาจากค่า FPE ที่มีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงขึ้น (วีรเวทย์ อุทโย, 2562; Utto, 2014) ในการศึกษาการเก็บรักษาของอุ้งน Candir et al. (2012) รายงานว่า อุณหภูมิในการเก็บรักษามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ โดยอุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงส่งผลให้เกิดการสะสมของไอระเหยเอทานอลที่เพิ่มขึ้น ระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการควบคุมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่มีแนวโน้มเจริญเติบโตได้เร็วภายใต้อุณหภูมิที่สูง ผลของไอระเหยเอทานอลต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์เจาะรู เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C (A) เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C (B) เก็บเป็นเวลา 7 วัน² (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n=5)

4.2.3 ความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อของพริกหวาน

ผลของความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อพริกหวานแสดงในภาพที่ 21 ผลการศึกษาดังกล่าวสนับสนุนผลการศึกษาความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศ กล่าวคือ พริกหวานในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีช่องควบคุมฯ (control) มีค่าต่ำมาก ในขณะที่พริกหวานซึ่งบรรจุในถุงที่มีช่อง

² สาเหตุที่เก็บรักษาเพียง 7 วันเนื่องจากพริกหวานเกิดการเน่าเสีย

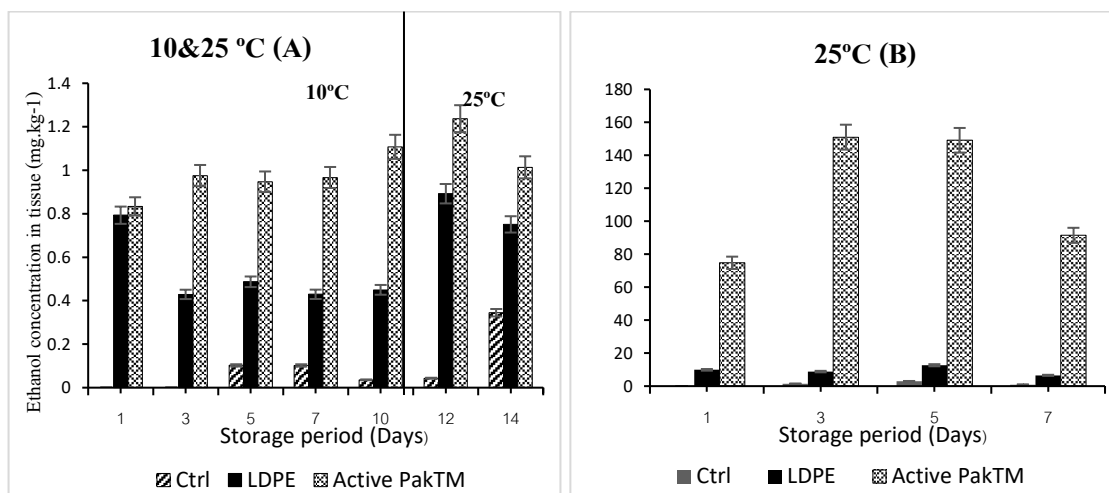
ควบคุมฯ ที่ทำจากฟิล์ม Active Pak™ มีความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อพริกหวานสูงมาก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 25°C มีการเพิ่มขึ้นจากความเข้มข้นเริ่มต้นอย่างชัดเจน เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 1 3 5 และ 7 วัน มีค่าความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อพริกหวานเท่ากับ 74.80 151.02 149.15 และ 91.46 mg.kg⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุมฯ ที่ทำจากฟิล์ม LDPE (ภาพที่ 21) เนื่องจากฟิล์ม Active Pak™ ยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านได้ในอัตราที่สูงกว่าฟิล์ม LDPE ทั้งนี้การสะสมเอทานอลในพริกหวานเป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยเอทานอลกับพริกหวานซึ่งนำไปสู่การดูดซับและแพร่ผ่านของเอทานอลในเนื้อเยื่อ ตลอดจนทำปฏิกิริยากับเชื้อจุลินทรีย์ ส่งผลให้ชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (Utto, 2014) สอดคล้องกับ Candir et al. (2012) พบว่า ในเดือนแรกของการเก็บรักษามีปริมาณเอทานอลในผลเบอร์รี่เพิ่มขึ้นจากปกติ 2-3 เท่า หลังจากที่มีการดูดซับไอระเหยเอทานอลที่ปลดปล่อยออกมาจากซอง Antimold® โดยเฉพาะในผลเบอร์รี่ที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ประเภทถุง ZOEpac (ถุง LDPE ที่ไม่เจาะรู) ซึ่งบรรจุของ Antimold® 80 (บรรจุผงเอทานอล 8 กรัม) หรือ Antimold® 60 (บรรจุผงเอทานอล 6 กรัม) หลังจากนั้นความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลลดลงสู่ระดับเริ่มต้นในเดือนที่ 4 ของการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงในลักษณะดังกล่าวอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนเอทานอลในเนื้อเยื่อให้เป็นสารประกอบประเภทอื่น เช่น อะซีตัลดีไฮด์ และหรือสารกลุ่มเอสเตอร์โดยเกิดจากกระบวนการเอนไซม์ เช่น การเปลี่ยนเอทานอลเป็นอะซีตัลดีไฮด์ โดยเอนไซม์แอลกอฮอล์ดีไฮโดรจีเนส (alcohol dehydrogenase; ADH) หรือการเปลี่ยนเอทานอลให้เป็นสารเอสเตอร์ด้วยเอนไซม์แอลกอฮอล์อะซีทิลทรานเฟอร์เรส (alcohol acetyltransferase; AAT) (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562)

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 10°C พบว่า มีการเพิ่มขึ้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อของพริกหวานในสิ่งทดลองควบคุม (control) แม้ว่าสิ่งทดลองดังกล่าวไม่มีซองควบคุมฯ แต่การเพิ่มขึ้นของเอทานอลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอาจเป็นผลจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์เพราะไม่มีไอระเหยเอทานอลที่สะสมอยู่ในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์จึงทำให้เชื้อจุลินทรีย์มีแนวโน้มที่จะเจริญเติบโตได้ง่าย ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงผลของไอระเหยเอทานอลในการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อ
พริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C
เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 4 วัน
เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C
เก็บเป็นเวลา 7 วัน (ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n=5)

Storage time (days)	Packaging		
	Ctrl	LDPE	Active Pak™
อุณหภูมิไม่คงที่ 10°C ย้ายไป 25°C (ภายหลังเก็บรักษา 10 วัน)			
1	0.00 ^c $\pm$ 0.00	0.79 ^b $\pm$ 0.15	0.83 ^a $\pm$ 0.10
3	0.00 ^c $\pm$ 0.00	0.43 ^b $\pm$ 0.19	0.98 ^a $\pm$ 0.20
5	0.10 ^c $\pm$ 0.00	0.49 ^b $\pm$ 0.09	0.95 ^a $\pm$ 0.15
7	0.10 ^c $\pm$ 0.04	0.43 ^b $\pm$ 0.12	0.97 ^a $\pm$ 0.22
10	0.04 ^c $\pm$ 0.01	0.45 ^b $\pm$ 0.13	1.11 ^a $\pm$ 0.05
12	0.04 ^c $\pm$ 0.02	0.89 ^b $\pm$ 0.23	1.24 ^a $\pm$ 0.20
14	0.34 ^c $\pm$ 0.07	0.75 ^b $\pm$ 0.09	1.01 ^a $\pm$ 0.06
อุณหภูมิคงที่ 25°C			
1'	0.00 ^c $\pm$ 0.00	9.87 ^b $\pm$ 1.71	74.80 ^a $\pm$ 0.46
3	1.44 ^c $\pm$ 0.25	8.82 ^b $\pm$ 1.40	151.02 ^a $\pm$ 0.27
5	2.97 ^c $\pm$ 0.78	12.67 ^b $\pm$ 1.40	149.15 ^a $\pm$ 1.28
7	0.87 ^c $\pm$ 0.14	6.55 ^b $\pm$ 1.39	91.46 ^a $\pm$ 2.59

หมายเหตุ: ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 5) และตัวอักษรแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูล อักษรที่เหมือนกันในแถวเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Ctrl = สิ่งทดลองควบคุม, LDPE และ Active Pak™ การบรรจุแควคที่ฟที่มีช่องควบคุมฯ ทำจากฟิล์ม LDPE และ Active Pak™ ตามลำดับ)



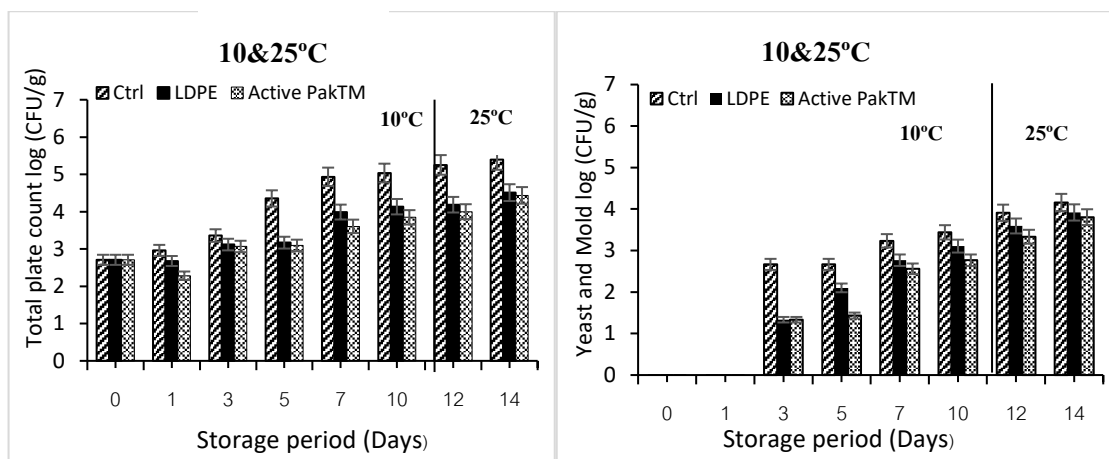
ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C (A) เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C (B) เก็บเป็นเวลา 7 วัน³ (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n=5)

4.2.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์รา

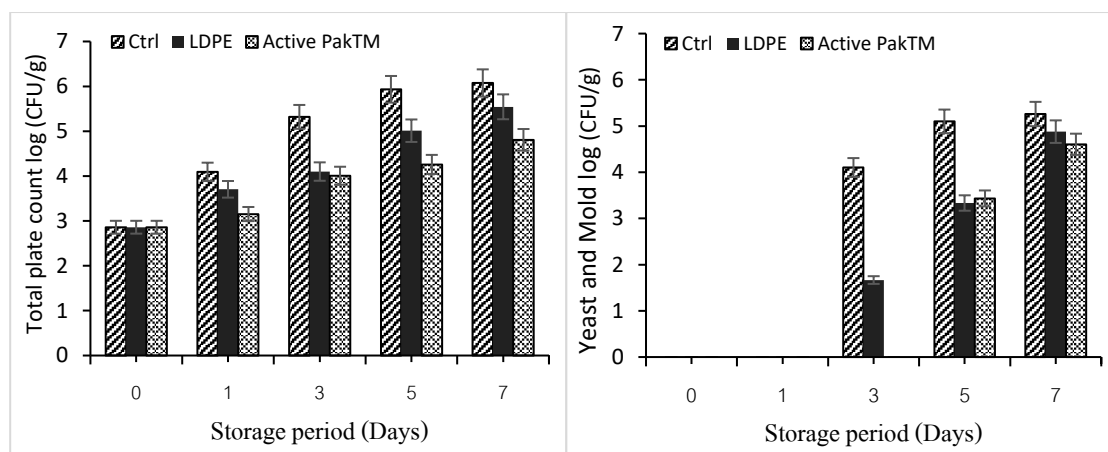
เมื่อพิจารณาจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในพริกหวานระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C พบว่า ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของพริกหวานเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C มีการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดช้ากว่าที่ 25°C (ภาพที่ 22) สอดคล้องกับการใช้อุณหภูมิเย็นหรือโซ่ความเย็น (cool chain) สามารถชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ (Roberston, 1993) และไม่มี ความแตกต่างกันในช่วงแรกของการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามภายหลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 3 วัน พบว่า ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟทั้งสองประเภทมีค่าต่ำกว่าใน สิ่งทดลองควบคุม (ภาพที่ 22) ผลการทดลองนี้สนับสนุนความสามารถของการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟซึ่งมี ของควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลในการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในผักและผลไม้สด (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562; พัชร มะลิลา, 2563) การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ของพริกหวานในทุกสิ่งทดลอง มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดอายุการเก็บรักษา ค่าเฉลี่ยของจุลินทรีย์ทั้งหมดในสิ่งทดลองควบคุมมีค่าสูงกว่าในสิ่ง ทดลอง active MAP ทั้งสองประเภท ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในสิ่งทดลอง Active PakTM มีค่าต่ำกว่าสิ่งทดลอง LDPE แม้ว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 22) ข้อมูลดังกล่าวสนับสนุนผลการศึกษาที่ได้นำเสนอข้างต้นและการใช้ฟิล์ม Active PakTM เป็นวัสดุของ

³ สาเหตุที่เก็บรักษาเพียง 7 วันเนื่องจากพริกหวานเกิดการเน่าเสีย

ของควบคุมฯ เนื่องจากสามารถปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลสู่บรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ได้ในอัตราที่เร็วส่งผลให้มีแนวโน้มชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของควบคุมฯที่ใช้ฟิล์ม LDPE



ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และรา ในพริกหวาน เก็บรักษาที่สถานะอุณหภูมิ 10°C โดยเก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n=5)



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และยีสต์และรา ในพริกหวาน เก็บรักษาที่สถานะอุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 7 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n=5)

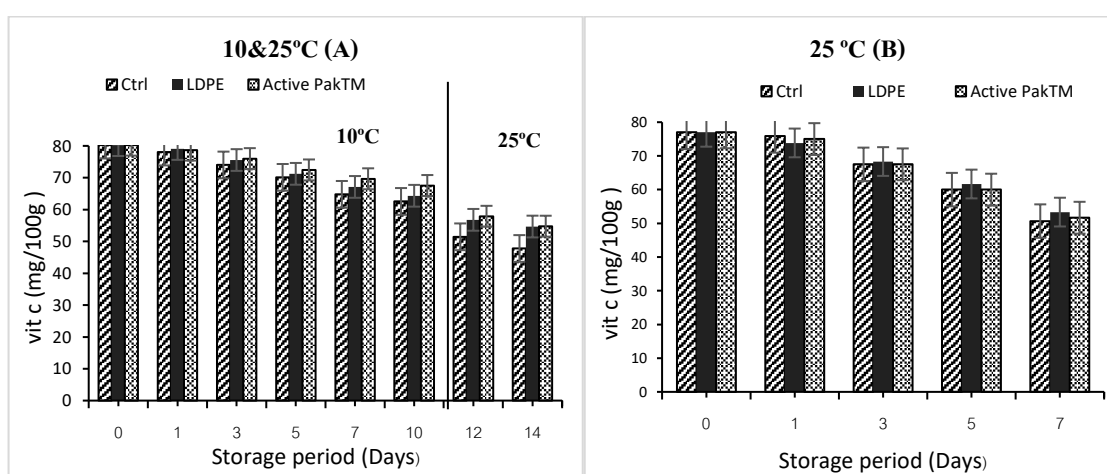
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณยีสต์และราของพริกหวาน (ภาพที่ 23) พบว่ามีทิศทางเดียวกันกับเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด กล่าวคือ ปริมาณยีสต์และราของพริกหวานในสิ่งทดลองควบคุมมีค่าสูงกว่าสิ่งทดลองอื่นๆ และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งสองในสิ่งทดลอง Active Pak™ มีค่าที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลอง LDPE จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรที่มีศักยภาพในการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในผักและผลไม้ เนื่องจากสภาวะบรรยากาศดัดแปรที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์ (Kader et al., 1983) และของควบคุม มีศักยภาพในการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลองควบคุม ทั้งนี้ประสิทธิภาพของซองแอคทีฟสัมพันธ์กับบรรจุภัณฑ์ที่ได้เลือกใช้ ทั้งนี้ความสามารถในการต้านการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ของโอโรเซเหทานอลสัมพันธ์กับความเข้มข้นของโอโรเซเหทานอล (Utto, 2014)

ผลการศึกษาในประสิทธิภาพของโอโรเซเหทานอลที่ปลดปล่อยจากซองควบคุมฯ ที่ได้จากการศึกษานี้ พบว่า มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาที่รายงานในเอกสารอ้างอิงต่างๆ (วีรเวทย์ อุทโร, 2562; Utto, 2014) รวมถึง Herppich et al. (2014) ซึ่งได้รายงานว่ เทานอลที่ความเข้มข้นต่ำสามารถลดการเติบโตของจุลินทรีย์ในหน่อไม้ฝรั่งสีขาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลานาน 4 วัน ในขณะที่ Dao & Dantignym (2011) รายงานว่า การสัมผัสของผลลูกพีชกับโอโรเซเห ของเอทานอล พิสูจน์แล้วว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา ลูกพีชที่สัมผัสกับโอโรเซเหทานอล 70% หรือ 100% ได้รับการปกป้องจากการติดเชื้อราได้นานถึง 30 วัน เมื่อเก็บไว้ที่ 4°C หรืออุณหภูมิห้อง ในทางตรงกันข้ามลูกพีชที่ไม่ได้สัมผัสกับโอโรเซเหทานอลจะถูกเชื้อราทำลายหลังจากผ่านไป 2 และ 3 วันตามลำดับ

จากข้อมูลที่ได้นำเสนอในภาพที่ 20 ทำให้ทราบถึงระดับความเข้มข้นของโอโรเซเหทานอลที่ชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (พิจารณาทั้งเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและเชื้อยีสต์และรา) ให้อยู่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดในเกณฑ์มาตรฐานเกณฑ์ของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์กระทรวงสาธารณสุขที่กำหนดให้ผักผลไม้สดมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดมีค่าต่ำกว่า 6 log CFU/g และค่ายีสต์และรามีค่าต่ำกว่า 4 log CFU/g จากการสืบค้นเอกสารอ้างอิงพบว่า ยังไม่มีรายงานการศึกษาการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับการเก็บรักษาพริกหวาน ดังนั้นการวิจัยนี้จึงขอเสนอระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ หรือ minimum inhibition concentration (MIC) สำหรับพริกหวาน โดยอยู่ในช่วง 10-50 $\mu\text{L L}^{-1}$ เมื่อพิจารณาค่านี้กับค่าที่รายงานในเอกสารอ้างอิง เช่น Choosung et al. (2019) รายงานว่าค่า MIC เท่ากับ 250 ppm ซึ่งพบว่ามีค่าที่สูงกว่าค่าที่รายงานในการวิจัยนี้ ความแตกต่างดังกล่าวอาจมีสาเหตุจากการเพิ่มเกลือแกงในบรรจุภัณฑ์เพื่อควบคุมความชื้น ทั้งนี้เกลือสามารถดูดซับโอโรเซเหทานอลได้

4.2.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิก

จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกรดแอสคอร์บิกของพริกหวาน ระหว่างการเก็บรักษา (ภาพที่ 24) พบว่า ปริมาณกรดแอสคอร์บิกของพริกหวาน ทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงในลักษณะดังกล่าวของกรดแอสคอร์บิกมีความคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงวิตามินซีในอาหารทั่วไป (Robertson, 1993) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาในทุกสิ่งทดลองพบว่า ปริมาณกรดแอสคอร์บิกในสิ่งทดลองควบคุมมีค่าเฉลี่ยที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลอง active MAP ทั้งสองประเภท ในขณะที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานในสิ่งทดลอง Active Pak™ และ LDPE ข้อมูลของความแตกต่างในการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกระหว่างสิ่งทดลองควบคุม และสิ่งทดลองประเภท active MAP สนับสนุนความรู้ของการชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผักผลไม้ด้วยไอระเหยเอทานอล โดยเฉพาะเกี่ยวกับการชราภาพ (senescence) เช่น ในการศึกษาการเก็บรักษาบรอกโคลี Suzuki et al. (2004) รายงานว่าไอระเหยเอทานอลชะลอการเปลี่ยนแปลงปริมาณคลอโรฟิลล์



ภาพที่ 24 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C (A) เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C (B) เก็บเป็นเวลา 7 วัน⁴ (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n=5)

⁴ สาเหตุที่เก็บรักษาเพียง 7 วันเนื่องจากพริกหวานเกิดการเน่าเสีย

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C เก็บเป็นเวลา 7 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n=5)

Storage time (days)	Packaging		
	Ctrl	LDPE	Active Pak™
อุณหภูมิไม่คงที่ 10°C ย้ายไป 25°C (ภายหลังเก็บรักษา 10 วัน)			
1	78.06 ^a $\pm$ 2.00	79.03 ^a $\pm$ 2.84	78.67 ^a $\pm$ 0.07
3	74.00 ^{ab} $\pm$ 2.49	75.56 ^{ab} $\pm$ 2.76	76.00 ^a $\pm$ 7.21
5	70.11 ^b $\pm$ 0.39	71.22 ^a $\pm$ 2.19	72.44 ^a $\pm$ 7.95
7	64.78 ^c $\pm$ 0.87	67.11 ^b $\pm$ 5.98	69.67 ^a $\pm$ 2.74
10	62.56 ^c $\pm$ 0.24	64.33 ^b $\pm$ 3.50	67.56 ^a $\pm$ 6.90
12	51.44 ^c $\pm$ 5.68	56.78 ^a $\pm$ 7.38	57.89 ^a $\pm$ 6.17
14	47.78 ^c $\pm$ 5.55	54.67 ^a $\pm$ 4.16	54.78 ^a $\pm$ 5.58
อุณหภูมิคงที่ 25°C			
1	75.93 ^a $\pm$ 2.71	73.85 ^{ab} $\pm$ 5.03	75.00 ^a $\pm$ 3.23
3	67.50 ^{ab} $\pm$ 4.33	68.33 ^a $\pm$ 5.20	67.50 ^{ab} $\pm$ 6.61
5	60.00 ^a $\pm$ 5.00	61.67 ^a $\pm$ 2.89	60.00 ^a $\pm$ 5.00
7	50.67 ^c $\pm$ 1.15	53.33 ^a $\pm$ 2.89	51.67 ^b $\pm$ 2.89

หมายเหตุ: ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 5) และตัวอักษรแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูล อักษรที่เหมือนกันในแถวเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Ctrl = สิ่งทดลองควบคุม, LDPE และ Active Pak™ การบรรจุแอกทีฟที่มีช่องควบคุมฯ ทำจากฟิล์ม LDPE และ Active Pak™ ตามลำดับ)

เมื่อพิจารณาในทุกสิ่งทดลองซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C พบว่า ปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานที่เก็บที่อุณหภูมิ 25°C มีค่าเฉลี่ยที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่เก็บรักษาในทุกสิ่งทดลองที่อุณหภูมิ 10°C ทั้งนี้เป็นผลจากการเสื่อมสลายของกรดแอสคอร์บิกซึ่งมีแนวโน้มที่ถูกออกซิไดส์ได้ง่ายและการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นผลจากปฏิกิริยาเอนไซม์กลุ่มออกซิเดส ซึ่งกิจกรรม

ของเอนไซม์มีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับอุณหภูมิแบบอาร์เรเนียส ดังที่ได้กล่าวข้างต้น ผลการทดลองในการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกทำให้ทราบได้ว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำและมีไอระเหยเอทานอลในระบบสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในเนื้อพริกหวานได้

สืบเนื่องจากข้อมูลที่ได้นำเสนอข้างต้นเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟแบบต่างๆ ผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลง (kinetics of changes) ของกรดแอสคอร์บิกเพื่อสร้างความเข้าใจในอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญประการหนึ่งในการจัดการและวางแผนการบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว จากการศึกษาเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง (Labuza and Breene, 1989; Robertson, 1993) พบว่า การเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกในอาหารซึ่งรวมถึงผักและผลไม้สดเป็นปฏิกิริยาทางเคมี (chemical reaction) ประเภทอันดับที่ 1 หรือ first-order kinetic reaction กล่าวคือ อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับระดับปริมาณหรือความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่หลงเหลืออยู่ในแต่ละช่วงเวลา จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้นำสมการ first-order kinetic reaction equation (สมการที่ 2) ซึ่งอยู่ในรูปของ analytical solution of ordinary differential equation มาทำนายการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟต่างๆ ซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C ดังแสดงผลการทำนายในภาพที่ 25 ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้หลักของการแบบจำลองถดถอยที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (nonlinear regression) เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 2 โดยความสอดคล้องกันระหว่างค่าที่ทำนายโดยสมการ 2 และค่าที่ได้จากการทดลองได้พิจารณาจากค่า root mean square of errors (RMSE) ซึ่งควรมีค่าต่ำกว่า 2 และค่า R^2 ที่ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 (พัชรี, 2563) ตารางที่ 3 ได้รวบรวมค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ ค่า RMSE และค่า R^2

$$C_{bell}^{AA} = C_{bell,\infty}^{AA} + \left((C_{bell,ini}^{AA} - C_{bell,\infty}^{AA}) \exp(-k_{bell}^{AA} \cdot t) \right) \quad (2)$$

โดยที่

C_{bell}^{AA}	=	ความเข้มข้นกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานสด ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$)
$C_{bell,ini}^{AA}$	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานสด ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$)
$C_{bell,\infty}^{AA}$	=	ความเข้มข้นกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานสด เมื่อเวลา infinite time ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$)
k_{bell}^{AA}	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของ first-order kinetic reaction (day^{-1}) การเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกในพริกหวาน
t	=	เวลาการเก็บรักษา (day)

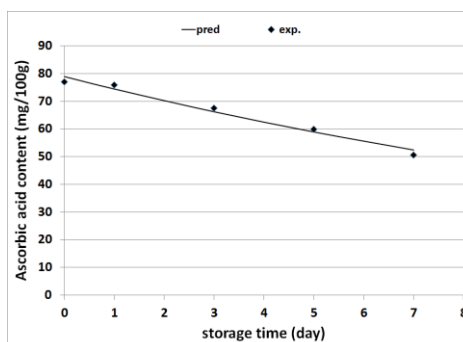
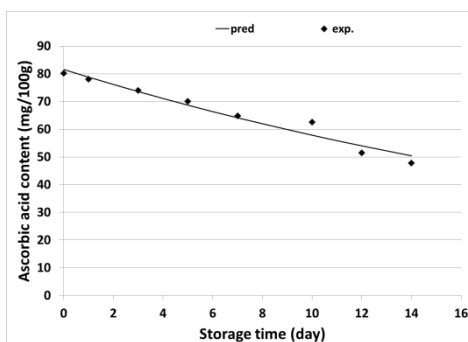
ในภาพที่ 25 และตารางที่ 3 แสดงให้ทราบว่าจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอบิกในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสามารถทำนายได้ดีด้วยสมการที่ 2 โดยพิจารณาทั้งจากการสังเกตลักษณะของการบรรจบกัน (convergence) ที่สอดคล้องระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง (exp.) และค่าที่ได้จากการทำนาย (pred.) และพิจารณาจากค่า RMSE ที่ต่ำกว่า 2 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.769-1.593 และค่า R^2 ที่อยู่ในช่วง 0.943-0.985 ซึ่งมีค่าใกล้ 1 ทั้งนี้ช่วงของค่า R^2 นั้นทำให้ทราบได้ว่าค่าที่ทำนายจากสมการที่สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ถึง 94-98% อันเป็นดัชนีสำคัญที่แสดงให้ทราบว่าสมการที่ใช้นั้นเหมาะสมกับข้อมูล เมื่อพิจารณาค่า k_{bell}^{AA} พบว่าค่าสัมประสิทธิ์นี้ของการเปลี่ยนแปลงในพริกหวานที่เก็บรักษาในสิ่งทดลองควบคุม (Ctrl) มีค่าสูงสุดทั้งการเก็บรักษาทั้งสองอุณหภูมิ ซึ่งแสดงให้ทราบว่ามีการเปลี่ยนแปลง/สูญเสียวิตามินซีในอัตราเร็วสูงสุด (ตารางที่ 3) ข้อมูลนี้สนับสนุนผลของไอระเหยเอทานอลที่ชะลอการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอบิกในพริกหวานดังที่ได้รายงานข้างต้น

Active
Packaging

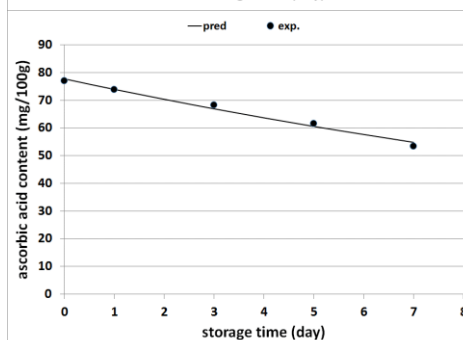
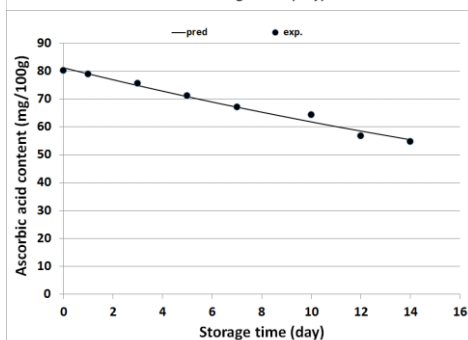
10°C

25°C

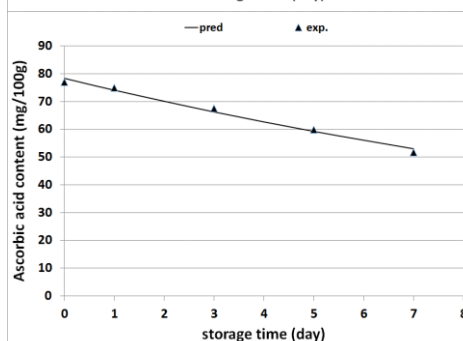
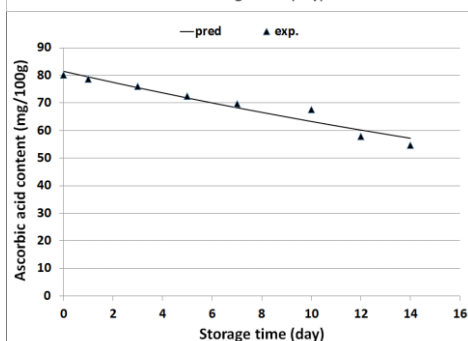
Ctrl



LDPE



Active
Pak™



ภาพที่ 25 จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวาน (exp. ข้อมูลศึกษาในห้องปฏิบัติการ) ซึ่งเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C และ 25°C ที่ทำนายด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับ 1 (first-order kinetic reaction model หรือ pred.) ตัวอย่าง Ctrl หมายถึง บรรจุภัณฑ์ passive MAP (ไม่มีซองควบคุมฯ) ส่วน LDPE และ Active Pak™ หมายถึงบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ

ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ของจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานซึ่งเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C และ 25°C ที่ทำนายด้วยสมการ ปฏิกริยาอันดับ 1 และค่าทางสถิติสำหรับ non-linear regression (root mean square of errors (RMSE) และ R²)

Active packaging	Storage temperatures					
	10°C			25°C		
	k_{bell}^{AA}	RMSE	R ²	k_{bell}^{AA}	RMSE	R ²
Ctrl	0.034	1.593	0.958	0.058	1.084	0.976
LDPE	0.027	0.851	0.982	0.050	0.769	0.983
Active Pak TM	0.025	1.458	0.943	0.056	0.804	0.985

ในการเก็บรักษาที่ 10°C พบว่าค่า k_{bell}^{AA} ที่ประมาณจากการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีของควบคุมห่าจากฟิล์ม Active PakTM มีค่าต่ำกว่าในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีของควบคุมห่าจากฟิล์ม LDPE (ตารางที่ 3) ข้อมูลนี้สนับสนุนความรู้จากซึ่งได้รายงานข้างต้นว่า ของควบคุมห่าจากฟิล์ม Active PakTM ปลดปล่อยเอทานอลสู่บรรจุภัณฑ์ได้ในอัตราที่เร็วกว่าส่งผลให้เกิดการสะสมเอทานอลในความเข้มข้นที่สูง จึงทำให้เกิดการชะลอของการสูญเสียกรดแอสคอร์บิกได้ดี ทั้งนี้ อัตราเร็วของการเกิดปฏิกริยาระหว่างผลิตภัณฑ์และเอทานอลสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเอทานอล (วีระเวทย์ อุทโย, 2562) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีของควบคุมห่าจากฟิล์ม Active PakTM จึงเกิดขึ้นได้ช้ากว่าในบรรจุภัณฑ์ที่มีของควบคุมห่าจากฟิล์ม LDPE อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 25°C พบว่ามีความแตกต่างจากที่ 10°C กล่าวคือค่า k_{bell}^{AA} ที่ประมาณจากการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีของควบคุมห่าจากฟิล์ม Active PakTM มีค่าสูงกว่า (ตารางที่ 3) ผู้วิจัยคาดคะเนว่าเป็นผลจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิที่สูงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำและอาจมีผลจากความแปรปรวน เช่น ระดับความสมบูรณ์ (maturity) ของพริกหวานที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกได้เร็วกว่า ปัจจุบันยังไม่พบข้อมูลการศึกษาการตอบสนองหรือการทำปฏิกริยาระหว่างเอทานอลกับพริกหวาน แต่มีการศึกษาในหอมแดงสดปอกเปลือก (Utto, 2016) ซึ่งพบว่ามีผลของความแปรปรวนของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญต่อการตอบสนองของพืชต่อเอทานอล ทั้งนี้ผู้วิจัยจะได้ศึกษาต่อไปในอนาคตถึงการเกิดปฏิกริยาระหว่างพริกหวานและเอทานอล

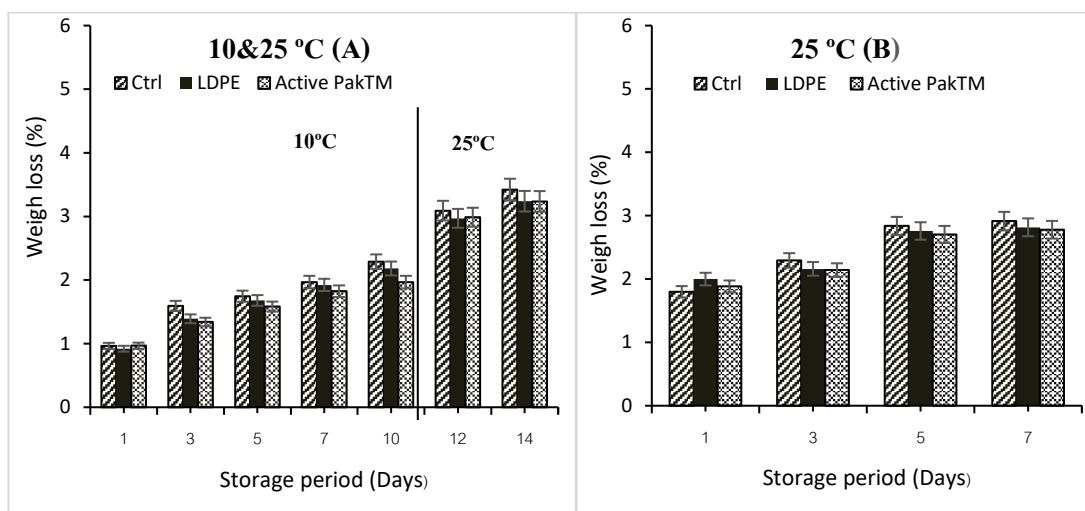
4.2.6 การสูญเสียน้ำหนักและการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อ

การสูญเสียน้ำหนักหลังการเก็บเกี่ยวเป็นลักษณะอาการอย่างหนึ่งที่บ่งบอกถึงการเสื่อมสภาพ ทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณของผลิตผลพืชสวน (Ullah, 2009) ผลการทดลองแสดงให้เห็นทราบว่าพริกหวานสดทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตลอดเวลา เมื่อพิจารณาในสิ่งทดลองที่มีของควบคุมาที่ทำจากฟิล์ม Active PakTM และฟิล์ม LDPE มีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีของควบคุมา (สิ่งทดลองควบคุมา) (ภาพที่ 26) อาจเป็นผลจากไอระเหยเอทานอลชะลอการหายใจซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งของการสูญเสียน้ำหนัก ทั้งนี้การสูญเสียไอน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนัก ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ นพรัตน์ ทัดมาลา และคณะ (2560) รายงานว่าไอระเหยเอทานอลสามารถชะลอการหายใจของผลลองกอง จึงช่วยลดการคายน้ำออกจากผล ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักช้าลง เมื่อพิจารณาระหว่างสิ่งทดลองประเภท active MAP พบว่า ผลของไอระเหยเอทานอลที่ปล่อยจากของควบคุมาที่ทำจากฟิล์ม Active PakTM และฟิล์ม LDPE ต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพริกหวานไม่มีความแตกต่างกัน (ภาพที่ 26) ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ไม่ทำให้เกิดการเร่งการสูญเสียน้ำหนักของสินค้าที่บรรจุในถุงพลาสติก ทั้งนี้ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ active MAP สนับสนุนความรู้ที่รายงานในเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องว่าไอระเหยเอทานอลมีแนวโน้มชะลอการลดลงของน้ำหนักได้จากการชะลอกระบวนการหายใจ หรือเมตาบอลิซึม นอกเหนือจากผลที่เกิดจากการใช้ฟิล์มพลาสติกสำหรับการบรรจุสินค้า เนื่องจากบรรจุภัณฑ์พลาสติกป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีจึงลดการสูญเสียไอน้ำจากผลิตผลเข้าสู่ภายในบรรจุภัณฑ์

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบทางสถิติของร้อยละการสูญเสียน้ำหนักในพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25° เก็บเป็นเวลา 7 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n=5)

Storage time (days)	Packaging		
	Ctrl	LDPE	Active Pak™
อุณหภูมิไม่คงที่ 10°C ย้ายไป 25°C (ภายหลังเก็บรักษา 10 วัน)			
1	0.96 ^a ±0.26	0.92 ^b ±0.43	0.96 ^a ±0.16
3	1.59 ^a ±0.03	1.39 ^b ±0.23	1.34 ^b ±0.07
5	1.74 ^a ±0.18	1.67 ^{ab} ±0.33	1.58 ^{ab} ±0.28
7	1.96 ^a ±0.30	1.92 ^a ±0.08	1.82 ^b ±0.21
10	2.28 ^a ±0.45	2.18 ^b ±0.04	1.96 ^c ±0.28
12	3.09 ^a ±0.47	2.97 ^b ±0.74	2.98 ^b ±0.21
14	3.42 ^a ±0.36	3.23 ^b ±0.42	3.23 ^b ±0.07
อุณหภูมิคงที่ 25°C			
1	1.79 ^c ±0.30	1.99 ^a ±0.17	1.88 ^b ±0.16
3	2.29 ^a ±0.62	2.15 ^b ±0.40	2.14 ^b ±0.15
5	2.83 ^a ±0.24	2.75 ^b ±0.14	2.70 ^b ±0.19
7	3.42 ^a ±0.36	3.23 ^b ± 0.42	3.23 ^b ±0.07

หมายเหตุ: ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 5) และตัวอักษรแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูล อักษรที่เหมือนกันในแถวเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Ctrl = สิ่งทดลองควบคุม, LDPE และ Active Pak™ การบรรจุแอคทีฟที่มีช่องควบคุมฯ ทำจากฟิล์ม LDPE และ Active Pak™ ตามลำดับ)



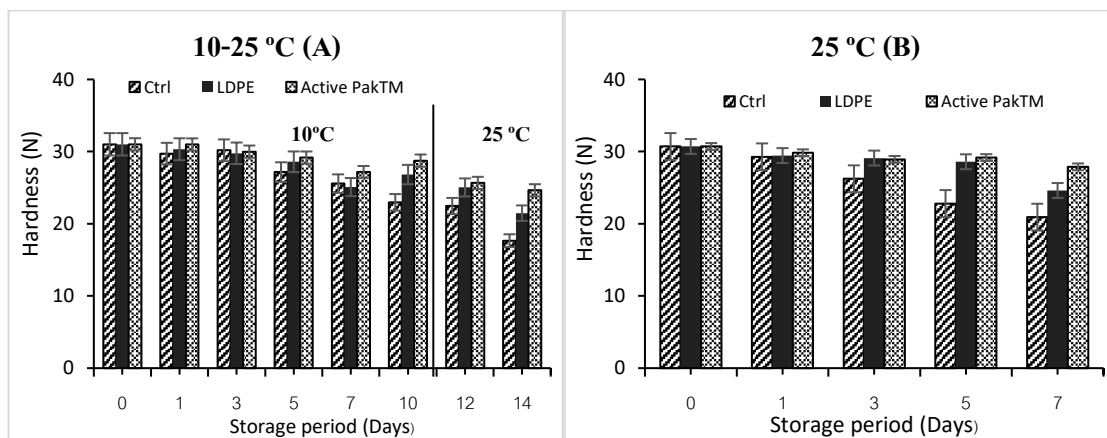
ภาพที่ 26 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักในพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C (A) เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C (B) เก็บเป็นเวลา 7 วัน⁵ (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n=5)

เมื่อพิจารณาการสูญเสียน้ำหนักในอุณหภูมิที่ต่างกันพบว่า พริกหวานซึ่งเก็บรักษาในทุกสิ่งทดลองที่อุณหภูมิ 25°C มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักสูงกว่าพริกหวานที่เก็บรักษาที่ 10°C เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่สูงส่งผลให้สมบัติการยอมให้อิอน้ำซึมผ่านเนื้อเยื่อของพริกหวาน (หรือ water vapour permeance) มีค่าสูงขึ้น และความดันไอน้ำในพริกหวานมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ดังนั้นจึงนำไปสู่การสูญเสียไอน้ำจึงเกิดขึ้นในอัตราที่สูงกว่า ในการศึกษาการเก็บรักษากระเจี๊ยบเขียว Phungam et al (2017) รายงานว่าค่า water vapour permeance ของกระเจี๊ยบเขียวมีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเก็บรักษาแบบเอกซ์โปเนนเชียล ความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ถูกรายงานในการศึกษา water vapour permeance ของลูกแอปเปิ้ล (Maguire, 1998) ดังนั้นผลจากการศึกษานี้และจากเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องสนับสนุนความรู้ว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้เกิดการเร่งการสูญเสียน้ำหนักและคุณภาพของพริกหวาน

ในภาพที่ 27 แสดงการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อ โดยพบว่า การเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับร้อยละการสูญเสียน้ำหนักดังที่ได้นำเสนอข้างต้น กล่าวคือค่าความแน่นเนื้อมีแนวโน้มลดลงโดยพริกหวานที่เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟมีการลดลงของความแน่นเนื้อช้ากว่าสิ่งทดลองควบคุม ทั้งนี้การสูญเสียน้ำเป็นสาเหตุสำคัญของการสูญเสียความแน่นเนื้อเนื่องจากความดันไอน้ำในเซลล์ของ

⁵ สาเหตุที่เก็บรักษาเพียง 7 วันเนื่องจากพริกหวานเกิดการเน่าเสีย

เนื้อเยื่อพืชลดลง นอกจากนี้พริกหวานซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C มีความแน่นเนื้อโดยเฉลี่ยสูงกว่าพริกหวานที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ผลการศึกษานี้สะท้อนให้ทราบถึงความสำคัญของสภาวะบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์และอุณหภูมิการเก็บรักษา โดยมีความสอดคล้องกับรายงานของ Meir et al. (1995) กล่าวคือ บรรจุภัณฑ์ฟิล์มพลาสติกเจาะรูช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักและความแน่นเนื้อของพริกหวาน โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับพริกหวานที่ไม่ได้เก็บในบรรจุภัณฑ์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพได้อย่างรวดเร็ว และ หลังจาก 7 วัน ทุกการทดลองมีแนวโน้มลดลงตลอดการเก็บรักษา เป็นผลเนื่องมาจากการการสูญเสียของพริกหวานส่งผลให้สูญเสียความต่งของเซลล์ ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของการเก็บรักษาพริกหวานพันธุ์ 'Maor' โดยการบรรจุด้วยฟิล์ม HDPE ที่อุณหภูมิต่ำ สามารถลดการสูญเสียและลดกิจกรรมของเอนไซม์ Polygalacturonase ส่งผลให้มีความแน่นเนื้อดีกว่าพริกหวานที่ไม่ได้บรรจุในฟิล์ม (Ben-Yehoshua et al., 1983) จากปัจจัยของของควบคุมฯ พบว่าสิ่งทดลองควบคุม (Control) มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อที่สูงที่สุด (แสดงโดยค่าแรงเฉือนสูงสุด หรือ Maximum force) โดยมีค่าเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ 17.67 N (ภาพที่ 27) จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าเอทานอลสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของพริกหวานได้สอดคล้องกับ Bai et al. (2011) รายงานว่า ไอระเหยเอทานอลสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านความแน่นเนื้อของเชอร์รี่ ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 1 10 และ 20°C เป็นเวลา 14, 10 และ 3 วัน



ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อในพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C (A) เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C (B) เก็บเป็นเวลา 7 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n=5)

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อในพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C เก็บเป็นเวลา 7 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n=5)

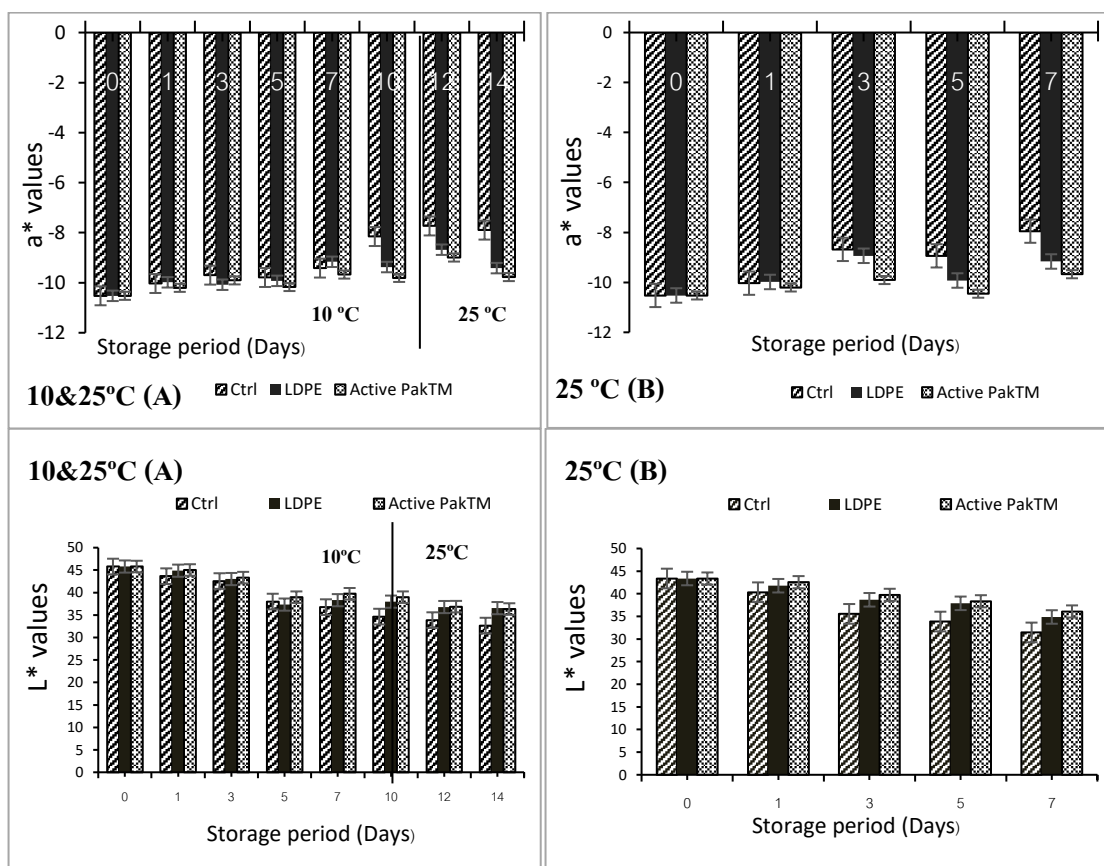
Storage time (days)	Packaging		
	Ctrl	LDPE	Active Pak™
อุณหภูมิไม่คงที่ 10°C ย้ายไป 25°C (ภายหลังเก็บรักษา 10 วัน)			
1	29.73 ^b ±0.99	30.33 ^a ±0.43	30.99 ^a ±0.67
3	30.18 ^a ±0.49	29.77 ^a ±0.39	30.00 ^a ±1.72
5	27.16 ^b ±0.95	28.59 ^a ±1.39	29.17 ^a ±0.27
7	25.57 ^b ±0.33	25.09 ^b ±0.25	27.16 ^a ±1.59
10	22.97 ^c ±0.48	26.82 ^b ±1.94	28.76 ^a ±0.73
12	22.46 ^b ±0.42	25.04 ^a ±0.18	25.66 ^a ±0.24
14	17.67 ^c ±0.91	21.47 ^b ±0.39	24.64 ^a ±0.40
อุณหภูมิคงที่ 25°C			
1	29.28 ^a ±0.99	29.45 ^a ±0.14	29.84 ^a ±0.48
3	26.24 ^b ±1.18	29.11 ^a ±0.96	28.92 ^a ±0.61
5	22.81 ^b ±1.19	28.59 ^a ±0.39	29.17 ^a ±1.27
7	20.92 ^c ±0.37	24.62 ^b ±1.49	27.88 ^a ±1.59

หมายเหตุ: ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 5) และตัวอักษรแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูล อักษรที่เหมือนกันในแถวเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Ctrl = สิ่งทดลองควบคุม, LDPE และ Active Pak™ การบรรจุแอคทีฟที่มีช่องควบคุมฯ ทำจากฟิล์ม LDPE และ Active Pak™ ตามลำดับ)

4.2.7 การเปลี่ยนแปลงสีเขียวของผิวพริกหวาน

ค่าสีเขียวของผิวของพริกหวานซึ่งแสดงด้วยค่า a^* พบว่ามีค่าติดลบ แสดงให้ทราบว่าสีของเปลือกพริกหวานที่ทำการรักษามีสีเขียวตลอดอายุการเก็บรักษา นอกจากนี้ไม่พบความแตกต่างอย่างชัดเจนด้านการเปลี่ยนแปลงสีเขียวหรือค่า a^* และค่าความสว่างหรือค่า L^* ในระหว่างสิ่งทดลองอาจเป็นผลของอุณหภูมิการเก็บรักษาไม่สูงจนเกิดการเร่งการเปลี่ยนสี (ภาพที่ 28) แต่พริกหวานในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีช่องควบคุมฯ (สิ่งทดลองควบคุม) มีแนวโน้มเกิดการเปลี่ยนแปลงสีมากที่สุด ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงสี ดังเช่น การเปลี่ยนจากสีเขียวไปเป็นสีอื่นๆ เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสลายของคลอโรฟิลล์ และอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับอุณหภูมิแบบเอกซ์โปเนนเชียล หรือเป็นความสัมพันธ์แบบอาร์รีเนียส (González-Aguilar et al., 2004) ผลของเอทานอลและอุณหภูมิต่ำที่พบในการศึกษานี้ สอดคล้องกับรายงานของ Yan et al. (2015) พบว่า ก้านผักกาดหอมได้รับการแช่เอทานอลที่มีความเข้มข้น 200 ml L^{-1} เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 15°C สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงสีเขียวได้ดี และเมื่อเปรียบเทียบกับการเก็บรักษาที่ 5°C พบว่าอุณหภูมิที่ต่ำช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงสีเขียวได้ดีกว่า ในรายงานของ นพรัตน์ ทัดมาลา และคณะ (2560) ซึ่งได้ศึกษาการใช้ Ethanol Vapor Releasing Pad (EP) ในการควบคุมคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลลองกอง พบว่าการใช้ EP 3 กรัม สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกได้ โดยมีการลดลงของค่า L^* ขั้นต่ำที่สุด รองลงมาได้แก่ชุดการทดลองที่ใช้ EP 5 กรัม ในขณะที่การใช้ EP 1 กรัมและชุดควบคุมมีการลดลงของค่า L^* ในแนวโน้มเดียวกันและไม่มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ในการศึกษาของ Opio et al. (2017) ซึ่งได้มีการใช้ EP กับผลมะนาว พบว่าไอระเหยเอทานอลช่วยชะลอการย่อยสลายคลอโรฟิลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ย่อยสลายคลอโรฟิลล์ chlorophyllase chlorophyll degrading peroxidase Mg-dechelataze และ pheophytinase

ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงสีที่อุณหภูมิ 25°C เกิดขึ้นได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิ 10°C (ภาพที่ 28) ผลการศึกษาดังกล่าวสนับสนุนการเปลี่ยนแปลงคุณภาพที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงสีเป็นผลจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ต่างๆ ซึ่งกิจกรรมของเอนไซม์แปรผันแบบเอกซ์โปเนนเชียลกับอุณหภูมิ ดังนั้นการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงจึงเป็นการเร่งการเปลี่ยนแปลงคุณภาพดังที่ได้นำเสนอมาข้างต้น



ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลงค่าสี a^* และ L^* ของพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C (A) เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C (B) เก็บเป็นเวลา 7 วัน⁶ (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $n=5$)

⁶ สาเหตุที่เก็บรักษาเพียง 7 วันเนื่องจากพริกหวานเกิดการเน่าเสีย

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงค่าสีเขียว (a^*) ของผิวพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C เก็บเป็นเวลา 7 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $n=5$)

Storage time (days)	Packaging		
	Ctrl	LDPE	Active Pak TM
อุณหภูมิไม่คงที่ 10°C ย้ายไป 25°C (ภายหลังเก็บรักษา 10 วัน)			
1	-10.03 ^a $\pm$ 0.46	-9.98 ^a $\pm$ 0.50	-10.21 ^a $\pm$ 0.64
3	-9.70 ^b $\pm$ 1.01	-10.08 ^a $\pm$ 0.48	-9.91 ^a $\pm$ 0.58
5	-9.79 ^b $\pm$ 0.50	-9.93 ^b $\pm$ 0.69	-10.17 ^a $\pm$ 0.36
7	-9.42 ^a $\pm$ 0.94	-9.16 ^a $\pm$ 0.46	-9.68 ^a $\pm$ 0.86
10	-8.15 ^c $\pm$ 1.03	-9.37 ^b $\pm$ 1.12	-9.81 ^a $\pm$ 0.47
12	-7.73 ^c $\pm$ 1.12	-8.68 ^b $\pm$ 1.26	-8.99 ^a $\pm$ 0.92
14	-7.90 ^c $\pm$ 1.32	-9.42 ^b $\pm$ 1.25	-9.78 ^a $\pm$ 1.08
อุณหภูมิคงที่ 25°C			
1	-10.03 ^a $\pm$ 0.46	-9.98 ^a $\pm$ 0.50	-10.21 ^a $\pm$ 0.64
3	-8.68 ^b $\pm$ 1.26	-8.94 ^b $\pm$ 0.69	-9.91 ^a $\pm$ 0.58
5	-8.94 ^c $\pm$ 0.85	-9.93 ^b $\pm$ 0.69	-10.45 ^a $\pm$ 0.43
7	-7.95 ^c $\pm$ 1.17	-9.16 ^b $\pm$ 0.46	-9.68 ^a $\pm$ 0.86

หมายเหตุ: ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n = 5$) และตัวอักษรแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูล อักษรที่เหมือนกันในแถวเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Ctrl = สิ่งทดลองควบคุม, LDPE และ Active PakTM การบรรจุแอคทีฟที่มีช่องควบคุมฯ ทำจากฟิล์ม LDPE และ Active PakTM ตามลำดับ)

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L^*) ของผิวพริกหวาน เก็บรักษาที่สภาวะอุณหภูมิ 10 และ 25°C โดยที่อุณหภูมิ 10°C เก็บรักษาไว้ 10 วัน จากนั้นได้ย้ายไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ต่ออีก 4 วัน เพื่อจำลองสภาวะความไม่ต่อเนื่องของโซ่ความเย็น ในขณะที่อุณหภูมิ 25°C เก็บเป็นเวลา 7 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $n=5$)

Storage time (days)	Packaging		
	Ctrl	LDPE	Active Pak TM
อุณหภูมิไม่คงที่ 10°C ย้ายไป 25°C (ภายหลังเก็บรักษา 10 วัน)			
1	43.65 ^a $\pm$ 0.14	44.87 ^a $\pm$ 0.67	45.03 ^a $\pm$ 0.76
3	42.56 ^a $\pm$ 0.56	43.01 ^a $\pm$ 0.19	43.33 ^a $\pm$ 0.87
5	38.00 ^a $\pm$ 0.54	37.33 ^a $\pm$ 0.97	38.98 ^a $\pm$ 0.15
7	36.76 ^b $\pm$ 0.65	38.31 ^a $\pm$ 0.43	39.74 ^a $\pm$ 0.18
10	34.65 ^b $\pm$ 0.19	37.98 ^a $\pm$ 0.14	38.98 ^a $\pm$ 0.34
12	33.87 ^b $\pm$ 0.76	36.78 ^a $\pm$ 0.16	36.87 ^a $\pm$ 0.18
14	32.65 ^b $\pm$ 0.67	36.04 ^a $\pm$ 0.56	36.34 ^a $\pm$ 0.14
อุณหภูมิคงที่ 25°C			
1	40.34 ^a $\pm$ 0.68	41.78 ^a $\pm$ 0.17	42.56 ^a $\pm$ 0.67
3	35.56 ^b $\pm$ 0.98	38.67 ^a $\pm$ 0.23	39.76 ^a $\pm$ 0.87
5	33.87 ^b $\pm$ 0.45	37.89 ^a $\pm$ 0.54	38.34 ^a $\pm$ 0.16
7	31.46 ^c $\pm$ 0.27	34.87 ^b $\pm$ 0.28	36.09 ^a $\pm$ 0.13

หมายเหตุ: ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($n = 5$) และตัวอักษรแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูล อักษรที่เหมือนกันในแถวเดียวกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Ctrl = สิ่งทดลองควบคุม, LDPE และ Active PakTM การบรรจุแฉกที่มีช่องควบคุมฯ ทำจากฟิล์ม LDPE และ Active PakTM ตามลำดับ)

4.3 สรุปประเด็นสำคัญ

เนื้อหาในบทนี้แสดงผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับพริกหวาน โดยพบว่า สมบัติ FPE ของฟิล์มพลาสติก ซึ่งเป็นวัสดุของซองควบคุมฯ และบรรจุภัณฑ์ มีผลสำคัญต่อคุณภาพการเก็บรักษานอกเหนือจากอุณหภูมิ ทั้งนี้ไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรจุภัณฑ์สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ โดยเฉพาะเชื้อจุลินทรีย์ ส่งผลให้ยืดอายุการเก็บรักษาพริกหวานได้ ในบทต่อไปแสดงสรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะในการพัฒนา

บทที่ 5

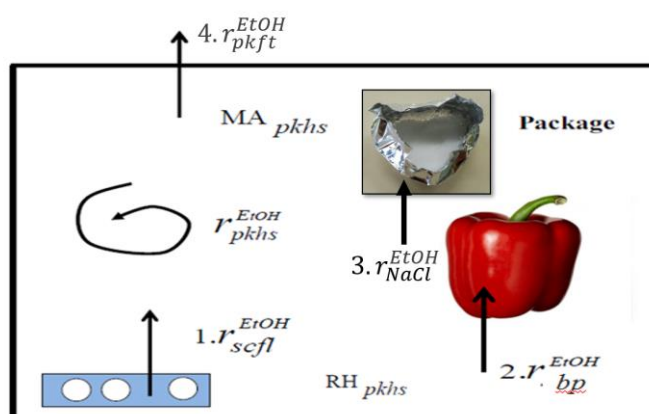
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปการวิจัยในภาพรวม

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ การพัฒนาการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟต้นแบบสำหรับพริกหวาน ซึ่งมีระบบแอคทีฟคือ ช่องควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่สามารถปลดปล่อยและส่งผลให้เกิดการสะสมของไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์ และนำไปสู่การชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ โดยเฉพาะบริเวณซีกด้านของพริกหวานที่เกิดการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ง่าย และสังเกตได้ด้วยตาเปล่าภายในระยะเวลาที่สั้น แม้ว่าได้เก็บรักษาพริกหวานในบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่อุณหภูมิแช่เย็น เช่น 10-12°C จากลักษณะการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าว ทำให้ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ฟิล์มพลาสติก Active Pak™ ซึ่งมีสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอล หรือ ค่า FPE ที่สูง เป็นวัสดุทำช่องควบคุมฯ จึงส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากช่องควบคุมฯ ด้วยอัตราเร็วที่สูง และเกิดการสะสมของไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติกในระดับสูง และภายในเนื้อเยื่อของพริกหวาน ซึ่งช่วยชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอบิก ความแน่นเนื้อ และการเปลี่ยนสีเขียวของผิวพริกหวาน ทั้งนี้การสะสมของไอระเหยเอทานอลไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊สออกซิเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งมีสภาวะของบรรยากาศตัดแปรจากสมดุลระหว่างกระบวนการหายใจของพริกหวาน และการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของแก๊สทั้งสอง ข้อมูลที่ได้นำเสนอดังกล่าว สนับสนุนองค์ความรู้ของระบบแอคทีฟประเภทของควบคุมฯ ที่ชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผักและผลไม้สด และความสำคัญของค่า FPE ของวัสดุที่นำมาทำเป็นช่องควบคุมฯ ต่อประสิทธิภาพของช่องควบคุมฯ โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิของการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นได้ง่ายในโซ่ความเย็น และส่งผลให้เร่งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ ดังนั้นภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังกล่าวจึงต้องมีการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลที่เร็วเพิ่มขึ้นซึ่งฟิล์ม Active Pak™ สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวนี้ ได้เป็นอย่างดี

ในการวิจัยนี้พบว่า ระดับความชื้นที่สูงภายในบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติกบรรจุพริกหวานดังมีแนวโน้มเกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำได้ง่ายเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และนำไปสู่การเร่งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ดังนั้นการวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้ถุงพลาสติกฟิล์ม LDPE ที่มีการเจาะรู เพื่อลดการสะสมความชื้นในบรรจุภัณฑ์ นอกจากนี้การวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เกลือแกง (NaCl) ซึ่งเป็นสาร

ควบคุมความชื้น (humectant) ในบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติกเจาะรูเพื่อควบคุมความชื้นในบรรจุภัณฑ์ให้อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับความชื้นสัมพัทธ์ที่สมดุลของเกลือแกง ซึ่งอยู่ในช่วง 75-80% RH ผลการวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ถุงพลาสติกเจาะรู และเกลือแกงช่วยลดความชื้นในบรรจุภัณฑ์ลงได้ โดยเฉพาะการเกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ แม้ว่าการซึมผ่านรูที่เจาะและการดูดซับไอระเหยเอทานอลด้วยเกลือแกงทำให้ไอระเหยเอทานอลหายไปจากบรรจุภัณฑ์ นอกเหนือจากการทำปฏิกิริยากับพริกหวาน ผู้วิจัยพบว่าไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ที่แม้มีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่รายงานในเอกสารอ้างอิง แต่ยังสามารถชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ ความรู้ด้านการเจาะรูและเลือกใช้สารควบคุมความชื้นร่วมกับซองควบคุมฯ จึงเป็นการต่อยอดความรู้จากการพัฒนาบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่ผ่านมา ในภาพรวมของการวิจัยนี้ พบว่าวิธีการศึกษาในการวิจัยนี้มีความเหมาะสมช่วยให้การวิจัยบรรลุวัตถุประสงค์ โดยเฉพาะต้นแบบของบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับการขายปลีกพริกหวานสด แนวคิดการพัฒนาต้นแบบนี้สามารถประยุกต์และปรับใช้ให้เหมาะสมกับผักและผลไม้ประเภทอื่น เพื่อชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ และเป็นหนทางสำคัญหนึ่งในการสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจของผักและผลไม้สดของประเทศไทยต่อไป



ภาพที่ 29 แบบจำลองแนวคิดกระบวนการถ่ายโอนมวลที่สำคัญสำหรับการปล่อยและสะสม

ไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ของพริกหวาน โดยสัญลักษณ์

bp = พริกหวาน (bell pepper), EtOH = เอทานอล (Ethanol), scfl = ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล (sachet film), pkhs = ช่องว่างเหนือบรรจุภัณฑ์ (package headspace), pkfl = ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ (package film), NaCl= เกลือแกง

5.2 ข้อเสนอแนะการวิจัยต่อไป

จากที่ได้นำเสนอสรุปผลการวิจัยข้างต้น ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคต ประกอบด้วย

5.2.1 การพัฒนาของควบคุมฯ ที่กระตุ้นการปล่อยไธระเหยเอทานอลด้วยความชื้นสูงที่สะสมในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์

5.2.2 การพัฒนาสารควบคุมความชื้นเพื่อเป็นตัวพาของไธระเหยเอทานอล สำหรับการทำหน้าที่ทั้งดูดซับความชื้นและปลดปล่อยไธระเหยเอทานอล

5.2.3 การคัดเลือกฟิล์มเจาะรูให้สอดคล้องกับอัตราการคายน้ำของผักและผลไม้ เพื่อเป็นแนวทางของการควบคุมความชื้นในบรรจุภัณฑ์

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- เกศรัตน์ วิศวไพศาล และคณะ. “การยืดอายุการวางจำหน่ายของผลไม้สดโดยสารเคลือบผิวจากไข่
ผึ้ง”, วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 43(3พิเศษ): 323-326; พฤษภาคม-ธันวาคม, 2555.
- งามทิพย์ ภู่วโรดม. การบรรจุอาหาร. กรุงเทพมหานคร: เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์, 2549.
- จริงแท้ ศิริพาณิชย์. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.
- _____. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549.
- จิรา ณ หนองคาย. เทคโนโลยีหลังการผักผลไม้และดอกไม้. กรุงเทพมหานคร: แมสพับดิชชีง,
2531.
- จิราภา เหลืองอรุณเลิศ. (2554). “ผักและผลไม้”, บรรจุกัญชีผักผลไม้.
<https://www.phtnet.org/2005/04/50>. 7 มีนาคม, 2562.
- ชมภู ยิ้มโต. การพัฒนาสารเคลือบเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาพริกหวาน. วิทยานิพนธ์ปริญญา
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2557.
- ณัฐวิวัฒน์ หมิ่นมาณี, รุ่งนภา ไกลถิ่น และปาริชาติ เทียนจุมพล. “ผลของการรมโอโซนต่อคุณภาพ
หลังการเก็บเกี่ยวผลองุ่นพันธุ์บิวตี้ ซีดเลส”, วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์. 3(I):
82-90; กรกฎาคม, 2559.
- นพรัตน์ ทัดมาลา, วาริช ศรีละออง และสมักร แก้วสุกแสง. “การประยุกต์ใช้ Ethanol Vapor
Releasing Pad ในการควบคุมคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของผลองุ่น”, วารสารแก่น
เกษตร. 45(1): 1191-1196; มกราคม, 2560.
- พฤกษ์ ชูสังข์ และคณะ. “ประสิทธิภาพของไอรยะเหยาทานอลต่อการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพของ
ผลหม่อน (*Morus alba* L.) พันธุ์เชียงใหม่ระหว่างการวางจำหน่าย”, วารสาร
วิทยาศาสตร์เกษตร. 44(3): 386-389; กันยายน-ธันวาคม, 2556.
- พัชรี มะลิลา. การศึกษาสมบัติการยอมให้ไอรยะเหยาทานอลซึมผ่านของฟิล์มพลาสติกที่แปรตาม
อุณหภูมิและความเข้มข้นเพื่อการพัฒนาของควบคุมการปล่อยไอรยะเหยาทานอลใน
การบรรจุแอคทีฟสำหรับอาหาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต:
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2559.
- วรางคณา ทองพระพักตร์. ผลของอุณหภูมิสาร Diphenylamine และสารเคลือบผิว Sta-fresh
7055 ต่ออาการสั้หนาวในพริกหวาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร
มหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2547.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- วาริช ศรีละออง และคณะ. “ผลของการใช้โอโรเซพของเอทานอลต่อคุณภาพของผลลำไย”,
วารสารแก่นเกษตร. 46(3): 513-516; กรกฎาคม, 2558.
- วีรเวทย์ อุทโธ, เอกสิทธิ์ อ่อนสอาด และเรวัตี ชัยราช. “การพัฒนาต้นแบบของควบคุมการปล่อยโอโรเซพเอทานอลสำหรับมะละกอดัดสด”, วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 30(2พิเศษ): 39-49; พฤษภาคม-สิงหาคม, 2555.
- วีรเวทย์ อุทโธ. การบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแอคทีฟสำหรับผักและผลไม้สด. อุบลราชธานี: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2562.
- สายชล เกตุษา. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2528.
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2559). “ฟิล์มบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเพื่อยืดอายุและรักษาคุณภาพของผักและผลไม้สด”, Active PAK™ ถูกหายใจได้.
<https://www.nstda.or.th>. 26 มีนาคม, 2562.
- สุภารัตน์ รักชลธิ. รายงานการวิจัยอิทธิพลของการใช้ LDPE ต่อการขึ้นรูปและสมบัติของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE/LDPE/EVA ที่มีซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติม. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- สมณฑา วัฒนสินธุ์. ตำราจุลชีววิทยาทางอาหาร. กรุงเทพมหานคร: จามจุรีโปรดักต์, 2549.
- หทัยพร กัมพวงศ์. การศึกษาสมบัติการยอมให้โอโรเซพเอทานอลซึมผ่านฟิล์มพลาสติกแอคทีฟสำหรับการบรรจุภัณฑ์มะเขือเทศเชอร์รี่. โครงการวิจัย2: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2560.
- รุ่งรัตน์ จันทาศ และคณะ. “การพัฒนาระบบควบคุมการปล่อยโอโรเซพเอทานอลในการบรรจุแบบบรรยากาศดัดแปรเชิงแอคทีฟสำหรับมะละกอดัดสด”, วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 42 (1 พิเศษ): 635-638; มกราคม-เมษายน, 2554.
- Abe, K., and Watada, A. E. “Ethylene absorbent to maintain quality of lightly processed fruits and vegetables”, *Journal of Food Science*. 56(6): 1589-1592; November, 1991.
- Al-Ati, T. and Hotchkiss, JH. “Application of packaging and modified atmosphere to fresh-cut fruits and vegetables”, *Fresh-cut fruits and vegetables: Science, technology, and market*. 14: 305-338; February, 2002.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Bae, H. and et al. "Variation of antioxidant activity and the levels of bioactive compounds in lipophilic and hydrophilic extracts from hot pepper (*Capsicum* spp.) cultivars", **Food Chemistry**. 134(4): 1912-1918; October, 2012.
- Bai, J. and et al. "Effect of Pretreatment of Intact 'Gala' Apple with Ethanol Vapor, Heat, or 1-Methylcyclopropene on Quality and Shelf Life of Fresh-cut Slices", **Journal of the American Society for Horticultural Science**. 129(4): 583-593; July, 2004.
- _____. "Ethanol vapor and saprophytic yeast treatments reduce decay and maintain quality of intact and fresh-cut sweet cherries", **Postharvest Biology and Technology**. 62(2): 204-212; May, 2011.
- Ben-Yehoshua, S. and et al. "Mode of action of plastic film in extending life of lemon and bell pepper fruits by alleviation of water stress", **Plant Physiology**. 73(1): 87-93; September, 1983.
- Black, L.L. (2001). "Bacterial Soft Rot", **Vegetable Diseases**.
www.avrdc.org/LC/pepper/bactsoftrot.html. March 26, 2019
- Bussel, J. and Kenigsberger, Z. "Packaging green bell peppers in selected permeability films", **Journal of Food Science**. 40(6): 1300-1303; November, 1975.
- Candir, E. and et al. "Modified atmosphere packaging and ethanol vapor to control decay of 'Red Globe' table grapes during storage", **Postharvest Biology and Technology**. 63(1): 98-106; January, 2012.
- Charles, F., Sanchez, J. and Gontard, N. "Active modified atmosphere packaging of fresh fruits and vegetables: modeling with tomatoes and oxygen absorber", **Journal of Food Science**. 68(5): 1736-1742; June, 2003.
- Choosung, P. and et al. "Ethanol vapor releasing sachet reduces decay and improves aroma attributes in mulberry fruit", **Food Packaging and Shelf Life**. 22: 100398; December, 2019.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Conforti, F., Statti, G. A., and Menichini, F. “Chemical and biological variability of hot pepper fruits (*Capsicum annuum* var. *acuminatum* L.) in relation to maturity stage”, **Food Chemistry**. 102(4): 1096-1104; January, 2007.
- Corcuff, R. and et al. “Storage of broccoli florets in ethanol vapor enriched atmospheres”, **Postharvest Biology and Technology**. 7(3): 219-229; February, 1996.
- Dao, T. and Dantigny, P. “Control of food spoilage fungi by ethanol”, **Food Control**. 22(3-4): 360-368; March, 2011.
- Davidson, P.M. “Chemical Preservatives and natural antimicrobial compounds”, In **Food Microbiology: Fundamentals and Frontiers**. Doyle. M.P. Beuchat, L.R. and Montville, T.J. Editors. p. 593-627. 2nd ed. Washington, D.C: ASM Press, 2001.
- Devlieghere, F., Vermeiren, L. and Debevere, J. “New preservation technologies: possibilities and limitations”, **International Dairy Journal**. 14(4): 273-285; April, 2004.
- El-Kazzaz, M. K., Sommer, N. F. and Fortlage, R. J. “Effect of different atmospheres on postharvest decay and quality of fresh strawberries”, **Phytopathology**. 73(2): 282-285; January, 1983.
- Frank, C. A. and et al. “Consumer preferences for color, price, and vitamin C content of bell peppers”, **HortScience**. 36(4): 795-800; July, 2001.
- Gardas, B. B., Raut, R. D. and Narkhede, B. “Evaluating critical causal factors for post-harvest losses (PHL) in the fruit and vegetables supply chain in India using the DEMATEL approach”, **Journal of Cleaner Production**. 199: 47-61; October, 2018.
- González-Aguilar, G. A. and et al. “Effect of temperature and modified atmosphere packaging on overall quality of fresh-cut bell peppers”, **LWT - Food Science and Technology**. 37(8): 817-826, 2004.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- González-Aguilar, G. A., Zavaleta-Gatica, R., and Tiznado-Hernández, M. E. “Improving postharvest quality of mango ‘Haden’ by UV-C treatment”, **Postharvest Biology and Technology**. 45(1): 108-116; July, 2007.
- Hernandez, R.J. **Plastic, Elastomers and Composites**. New York: McGraw-Hill. 1996
- Herppich, W. B., Huyskens-Keil, S. and Hassenberg, K. “Impact of ethanol treatment on physiological and microbiological properties of fresh white asparagus (*Asparagus officinalis* L.) spears”, **LWT-Food Science and Technology**. 57(1): 156-164; June, 2014.
- Homaida, M. A., Yan, S. and Yang, H. “Effects of ethanol treatment on inhibiting fresh-cut sugarcane enzymatic browning and microbial growth”, **LWT-Food Science and Technology**. 77: 8–14; April, 2017.
- Ioannidis, A.-G. and et al. “Characterization of spoilage markers in modified atmosphere packaged iceberg lettuce”, **International Journal of Food Microbiology**. 279: 1–13; August, 2018.
- Janssens, M. F. M. “Sea transportation of bell peppers by a controlled atmosphere container”, In **6th International. Controlled Atmosphere Research. Conference**. p.378-399. New York: Cornell University, 1993.
- Jiang, Y.M. “Role of anthocyanins, polyphenol oxidase and phenols in lychee pericarp browning”, **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 80(3): 305-165; February, 2000.
- Kader AA. **Postharvest quality maintenance of fruits and vegetables in developing countries**. In **Post-harvest physiology and crop preservation**. Boston, Massachusetts: Springer, 1983.
- Kader, A. A. and Saltveit, M. E. “Atmosphere modification”, **Postharvest Physiology and Pathology of Vegetables**. 229-246, 2003

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Kampawong, H., Utto, W. and Pruthitkul, R. “Extending Shelf Life of Fresh Cherry Tomatoes Using Ethanol Vapour Controlled release Based Active Packages”, In **Proceedings of the 1st Rajamangala Surin International Conference of Rajamangala University of Technology Isan**. p. 29–31. Surin: Rajamangala University of Technology Isan, 2018.
- Karabulut, O. A. and et al. “Postharvest ethanol and hot water treatments of table grapes to control gray mold”, **Postharvest Biology and Technology**. 34(2): 169–177; November, 2004.
- Kays, S. J. **Postharvest physiology and handling of perishable plant products**. New York: Springer, 1991.
- Ke, D., Zhou, L., & Kader, A. A. “Mode of oxygen and carbon dioxide action on strawberry ester biosynthesis”, **Journal of the American Society for Horticultural Science**. 119(5): 971-975; September, 1994.
- King, A. D. and Bolin, H. R. “Physiological and microbiological storage stability of minimally processed fruits and vegetables”, **Food Technology**. 43(2): 132-139; May, 1989.
- Klopffer, M. H. and Flaconnache, B. “Transport properdines of gases in polymers: bibliographic review”, **Oil & Gas Science and Technolog**. 56(3): 223-244; May, 2001.
- Labuza, T. P. and Breene, W. M. “Applicat of “active packaging” for improvement of shelf-life and nutritional quality of fresh and extended shelf-life foods”, **Journal of Food Processing and Preservation**. 13(1): 1-69; February, 1989.
- Larsen, T. O. and Frisvad, J. C. “Chemosystematics of *Penicillium* based on profiles of volatile metabolites”, **Mycological Research**. 99(10): 1167-1174; October, 1995.
- Liu, L. and et al. “Intermittent warming improves postharvest quality of bell peppers and reduces chilling injury”, **Postharvest Biology and Technology**. 101: 18–25; March, 2015.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Lurie, S. and et al. “Modified ethanol atmosphere to control decay of table grapes during storage”, **Postharvest Biology and Technology**. 42(3): 222-227; December, 2006.
- Maguire, K. M. **Factors Affecting Mass Loss of Apples**. Doctor’s thesis: Massey University, 1998.
- Meir, S. and et al. “Improvement of the postharvest keeping quality and color development of bell pepper (cv. ‘Maor’) by packaging with polyethylene bags at a reduced temperature Postharv”, **Postharvest Biology and Technology**. 5: 303-309; April, 1995.
- Miyauchi, M., Nakanishi, Y. and Sagara, Y. “Permeation of water and volatile flavors through packaging films”, **Food Science and Technology International**. 2: 217-222; August, 1996.
- Nguyen-The, C. and Prunier, J. P. “Involvement of pseudomonads in deterioration or ‘ready-to-use’ salads”, **International Journal of Food Science & Technology**. 24(1): 47-58; February, 1989.
- Noma, Y. and et al. “Effects of Postharvest Ethanol Vapor Treatment on Quality of Sudachi (*Citrus suchachi* hort. ex. shurai) Fruit”, **Food Preservation Science**. 35(4): 187-193; 2009.
- Nychas, G. J. E. “Natural antimicrobials from plants”, **New methods of food Preservation**. Boston, Massachusetts: Springer, 1995.
- Oliveira, M. and et al. “Application of modified atmosphere packaging as a safety approach to fresh-cut fruits and vegetables–A review”, **Trends in Food Science & Technology**. 46(1): 13-26; November, 2015.
- Opio, P. and et al. “Postharvest ethanol vapor treatment delays chlorophyll degradation and maintains quality of Thai lime (*Citrus aurantifolia* Swingle cv. Paan) Fruit”, **Agricultural Science**. 46(3): 173-176; September, 2015.
- _____. “Efficacy of hot water immersion on lime (*Citrus aurantifolia*, Swingle cv. Paan) fruit packed with ethanol vapor in delaying chlorophyll catabolism”, **Scientia Horticulturae**. 224: 258-264; October, 2017.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Phungam, N., Utto, W. and Pruthikul, R. "Interaction between surface coating using cabbage leaf wax extract and temperature on water vapour and gas exchange properties of fresh okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench)", **International Food Research Journal**. 25(5): 1885-1892; September, 2018.
- Pothakos, V. and et al. "Lactic acid bacteria and their controversial role in fresh meat spoilage", **Meat Science**. 109: 66–74; November, 2015.
- Ramos, C.L. and et al. "Evaluation of stress tolerance and fermentative behavior of indigenous *Saccharomyces cerevisiae*", **Brazilian Journal of Microbiology**. 44(3): 935-944; September, 2013.
- Robertson, G. L. **Food Packaging: Principles and Practice**. New York: Marcel Dekker Inc. 1993.
- Rojas-Grau, M. A. and et al. "The use of packaging techniques to maintain freshness in fresh-cut fruits and vegetables: a review", **International Journal of Food Science & Technology**. 44(5): 875-889; April, 2009.
- Rooney, M. L. "Overview of active food packaging" **Active food packaging**. Boston, Massachusetts: Springer, 1995.
- Rux, G. and et al. "Application of humidity-regulating tray for packaging of mushrooms", **Postharvest Biology and Technology**. 108: 102-110; October, 2015.
- Saltveit, M. E. and Mencarelli, F. "Inhibition of ethylene synthesis and action in ripening tomato fruit by ethanol vapors", **American Society for Horticultural Science**. 113: 572-576; March, 1988.
- Saltveit, Mikal E. "A summary of CA requirements and recommendations for vegetables", **VIII International Controlled Atmosphere Research Conference**. 600: 723-727; July, 2001.
- Sandhya. "Modified atmosphere packaging of fresh produce: Current status and future needs", **LWT-Food Science and Technology**. 43(3): 381-392; April, 2010.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Simonne, A.H. and et al. "Ascorbic acid and provitamin a contents in unusually colored bell peppers (*Capsicum annuum* L.)", **Journal of Food Composition and Analysis**. 10(4): 299-311; December, 1997.
- Singh, R., Giri, S. K. and Kotwaliwale, N. "Shelf-life enhancement of green bell pepper (*Capsicum annuum* L.) under active modified atmosphere storage", **Food Packaging and Shelf Life**. 1(2): 101–112; June, 2014.
- Singh, R., Giri, S.K. and Kulkarni, S.D. "Respiratory behaviour of mature light green guava (*Psidium guajava* L.) under closed system Poljoprivredna Tehnika", **Agricultural Engineering**. 1: 23-28; January, 2013.
- Singh, S., Singh, A. K., and Joshi, H. K. "Prolonging storability of Indian gooseberry (*Emblica officinalis*) under semi-arid ecosystem of Gujarat", **Indian Journal of Agricultural Science**. 75(10): 647-650; June, 2005.
- Snowdon, Anna L. **A Color Atlas of post-harvest diseases and disorders of fruits and vegetables, Volume 1: Fruits and general introduction**. London: Wolf Scientific, 1990.
- _____. **A Colour Atlas of post-harvest diseases and disorders of fruit and vegetables, Volume 2: vegetables**. London: Wolf Scientific, 1991.
- Soliva-Fortuny, R. C., & Martín-Belloso, O. "New advances in extending the shelf-life of fresh-cut fruits: a review", **Trends in Food Science & Technology**. 14(9): 341-353; September, 2003.
- Song, J. Q. and Fujiyama, H. "Difference in-response of rice and tomato subjected to sodium salinization to the addition of calcium", **Soil Science and Plant Nutrition**. 42(3): 503-510; September, 1996.
- Suzuki, Y., Uji, T. and Terai, H. "Inhibition of senescence in broccoli florets with ethanol vapor from alcohol powder", **Postharvest Biology and Technology**. 31(2): 177-182; February, 2004.
- Utto, W. "Factors affecting release of ethanol vapour in active modified atmosphere packaging systems for horticultural products", **Maejo International Journal of Science and Technology**. 8(1): 75-85; April, 2014.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Utto, W. and et al. “Active packaging technologies for horticultural produce”, **Food New Zealand**. 5(2): 21-32; February, 2005.
- _____. “Delaying microbial proliferation in freshly peeled shallots by active packaging incorporating ethanol vapour-controlled release sachets and low storage temperature”, **Food Science and Technology International**. 24(2): 132-144; October, 2018.
- van Willige, R. W. G., Linssen, J. P. H. and Voragen, A. G. J. “Influence of food matrix on absorption of flavour compounds by linear low-density polyethylene: proteins and carbohydrates”, **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 80(12): 1779-1789; September, 2000.
- Wang C.Y. “Effect of CO₂ [carbon dioxide injury] treatment on storage and shelf life of sweet peppers”, **Journal of the American Society for Horticultural Science**. 102(6): 808-812; 1977.
- Wang Q., Nie X. and Cantwell M. “Hot water and ethanol treatments can effectively inhibit the discoloration of fresh-cut sunchoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers”, **Postharvest Biology and Technology**. 94: 49–57; August, 2014.
- Wang, J. and et al. “Effects of various blanching methods on weight loss, enzymes inactivation, phytochemical contents, antioxidant capacity, ultrastructure and drying kinetics of red bell pepper (*Capsicum annuum* L.)”, **LWT - Food Science and Technology**. 77: 337–347; April, 2017.
- Wills, R. B., Ya'acov, Y. L. and Ku, V. V. V. “Evidence for the function of the free radical gas-nitric oxide (NO•)-as an endogenous maturation and senescence regulating factor in higher plants”, **Plant Physiology and Biochemistry**. 36(11): 825-833; November, 1998.
- Yan, S., Yang, T. and Luo, Y. “The mechanism of ethanol treatment on inhibiting lettuce enzymatic browning and microbial growth”, **LWT - Food Science and Technology**. 63(1): 383–390; September, 2015.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Zhang, W. and et al. “Ethanol vapour treatment alleviates postharvest decay and maintains fruit quality in Chinese bayberry”, **Postharvest Biology and Technology**. 46(2): 195–198; November, 2007.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์ทางเคมี – กายภาพ

ภาคผนวก ก1: การทำ Calibration curve สำหรับการวิเคราะห์ไอระเหยเอทานอล

1. การเตรียมสารละลาย Stock Solution

เตรียมสารละลาย Stock 200,000 ppm ปริมาตร 500 ml

- เตรียมขวด 500 ml
- เติมเอทานอลเหลว 100 ml
- เติมน้ำกลั่น 500 ml

2. ทำการเจือจาง 12 ความเข้มข้น ปริมาตร 10 ml เติมปริมาณสารละลาย Stock Solution และน้ำกลั่น

ความเข้มข้นที่ต้องการ (ppm)	ปริมาตรที่จะดึงมาจาก Stock solution 200,000ppm (ml)	ปริมาตรน้ำกลั่นที่จะเติมเข้า ไปเพิ่มในขวดที่ทำกรเจือจาง (ml)
200	0.01	9.99
400	0.02	9.98
600	0.03	9.97
800	0.04	9.96
1,000	0.05	9.90
2,000	0.10	9.75
10,000	0.5	9.5
20,000	1.0	9.0
50,000	2.5	7.5
100,000	5.0	5.0
150,000	7.50	2.50
200,000	10.0	0.0

3. ทำการฉีดสารละลายในแต่ละความเข้มข้น รวมทั้ง 200,000 ppm ปริมาตร 1 μ l ลงในเครื่อง GC และทำการจดบันทึกพื้นที่ใต้กราฟ ของเอทานอล (Retention time ประมาณ 7.3xx-7.7xxx)

4. ทำการ plot ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน mol ของเอทานอลที่อยู่ในปริมาตรสารละลายที่ฉีดเข้าไป 1 μl และ พื้นที่ใต้กราฟของแต่ละความเข้มข้น ทั้งนี้จำนวน mol ของแต่ละความเข้มข้นเท่ากับค่าในตารางต่อไปนี้

ความเข้มข้นที่เจือจาง (ppm)	จำนวน mol
200	3.43E-09
400	6.85E-09
600	1.03E-08
800	1.37E-08
1,000	1.71E-08
2,000	3.43E-08
10,000	1.71E-07
20,000	3.42E-07
50,000	8.56E-07
100,000	1.71E-06
150,000	2.57E-06
200,000	3.42E-06

ภาคผนวก ก2: การวิเคราะห์หาปริมาณกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid หรือ Vitamin C)

2.1 วัสดุและอุปกรณ์กับสารเคมี

1. บิวเรต
2. ปิเปตขนาด 5 และ 10 มิลลิลิตร
3. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
4. บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
5. กระดาษกรองเบอร์ 1
6. 2,6- dichlorophenolindophenol sodium salt
7. Sodium bicarbonate
8. Trichloroacetic acid
9. ascorbic acid

2.2 การเตรียม indophenols standard solution

ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของ 2,6- dichlorophenolindophenol sodium salt 0.05 กรัม และ Sodium bicarbonate 0.042 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร นำไปกรองแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 200 มิลลิลิตร

2.3 การเตรียม 5% Trichloroacetic acid

ชั่งน้ำหนัก Trichloroacetic acid ที่แน่นอน 5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร

2.4 การเตรียม ascorbic acid standard solution

ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของ ascorbic acid 0.2 กรัม ละลายใน Trichloroacetic acid 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น (สารละลายมาตรฐานเข้มข้น 2 มิลลิกรัม/ 100 มิลลิลิตร

2.5 การเตรียมตัวอย่าง

ชั่งตัวอย่างที่สับละเอียด แล้วคั้นเอาน้ำกรองด้วยผ้าขาวบาง ปิเปตน้ำพริกหวานสด 1 มิลลิลิตร ผสม Trichloroacetic acid 9 มิลลิลิตร แล้วไตเตรทกับสารละลาย indophenols standard solution

2.6 วิธีการไตเตรท

1. ปรับมาตรฐานสี

ปิเปตสารละลาย ascorbic acid 5 มิลลิลิตร เติม Trichloroacetic acid 5 มิลลิลิตร นำไปไตเตรทด้วยสารละลาย indophenols standard solution ให้ถึงจุดยุติ เป็นสีชมพูอ่อน จดปริมาตรที่ใช้ในการไตเตรท

2. ไตเตรท Blank standard

โดยใช้ 5% Trichloroacetic acid ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันทันทีแล้วนำไปไตเตรทเช่นเดียวกับสารละลายมาตรฐาน บันทึกปริมาตรของ indophenols standard solution ที่ใช้ในการไตเตรท

2.7. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. ตัวอย่างพริกหวานสดที่เตรียมไว้โดยใช้ผ้าขาวบางกรองเอาเฉพาะส่วนที่เป็นน้ำ

2. ปิเปตน้ำตัวอย่างพริกหวานสดมา 1 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติม 5% trichloroacetic acid ปริมาตร 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันทันที แล้วทำการไตเตรททันทีกับ indophenols solution จนถึงจุดยุติ คือ เปลี่ยนเป็นสีชมพูที่คงตัว บันทึกปริมาตรของ indophenols solution ที่ใช้ในการไตเตรท

3. ไตเตรท Blank Sample โดยใช้ 5% trichloro acid ปริมาตร 10 มิลลิลิตรแล้วไตเตรทเช่นเดียวกันกับสารละลายมาตรฐาน บันทึกปริมาตรของ indophenols solution ที่ใช้ในการไตเตรท

3. วิธีการคำนวณ

$$\text{Mg ascorbic acid/100g sample} = ((X-B) \times (F \times E) \times 100)/(V-Y)$$

เมื่อ X คือ ปริมาณ indophenols solution ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง

B คือ ปริมาณ indophenols solution ที่ใช้ในการไตเตรท Blank Sample

F คือ ความเข้มข้นของ ascorbic acid standard solution

E คือ ปริมาตรของ ascorbic acid standard solution (กรัม)

V คือ ปริมาณ indophenols standard ที่ใช้ในการไตเตรท ascorbic acid standard solution (มิลลิลิตร)

Y คือ ปริมาณ indophenols standard ที่ใช้ในการไตเตรท Blank Sample (มิลลิลิตร)

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์

ภาคผนวก ข1: การตรวจวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์

การตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด

วัสดุและอุปกรณ์

- Sterile 0.1% Peptone Water สำหรับเจือจางตัวอย่างอาหาร
- เครื่อง Stomacher
- จานเพาะเชื้อที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อแล้ว (Sterile Petri Plates)
- Plate Count Agar (PCA), pH 7
- ปิเปตขนาด 0.1 และ 1 มิลลิลิตร
- ตู้บ่มเชื้อ (Incubator)

2. การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อละลายอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar (PCA) 23.5 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร นำสารละลายอาหารเลี้ยงเชื้อไปต้มและคนเป็นช่วงๆ จากนั้น ทำการถ่ายเทอาหารเลี้ยงเชื้อที่ต้มแล้วลงในขวด และฆ่าเชื้อที่ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

3. วิธีวิเคราะห์

3.1 เจือจางตัวอย่างอาหาร 25 กรัม ใน 0.1% peptone water 25 มิลลิลิตร และตีผสมอาหารด้วยเครื่อง Stomacher เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นปิเปตตัวอย่างที่ผสมเข้ากันแล้วมา 1 มิลลิลิตร ไปเจือจางใน 0.1% peptone water 9 มิลลิลิตร ทำต่อไปจนได้ความเจือจาง 10^{-3}

3.2 ดูดตัวอย่างอาหารแต่ละความเจือจางระดับ 10^{-1} , 10^{-2} และ 10^{-3} ใส่ลงจานเพาะเชื้อจานละ 1 มิลลิลิตร ระดับความเจือจางละ 3 ซ้ำ

3.3 เทอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate count agar (PCA) ที่ผ่านการฆ่าเชื้อและหลอมเหลวแล้วที่อุณหภูมิ 45-50 องศาเซลเซียส ปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร ใส่ลงจานเพาะเชื้อ ทุก ๆ ความเจือจางที่เตรียมไว้

3.4 ทำการ Pour plate โดยหมุนจานเพาะเชื้อไปด้านขวาและด้านซ้ายด้านละ 10-20 ครั้ง

3.5 นำไปบ่มใน Incubator ที่อุณหภูมิ 37 ± 1 องศาเซลเซียส ในลักษณะคว่ำจานเพาะเชื้อนาน 24-48 ชั่วโมง

3.6 ตรวจนับจำนวนโคโลนีบนจานอาหารเพาะเชื้อ ที่อยู่ในช่วง 30-300 โคโลนี ที่ได้จากการเจือจางระดับ ที่มีความเจือจางมากน้อยต่างกัน 10 เท่า เช่น 10^{-2} และ 10^{-3} คำนวณหาจำนวนจุลินทรีย์ต่ออาหาร 1 กรัมหรือมิลลิลิตร แสดงผลการคำนวณเป็น CFU (Colony Forming Unit) /g ดังนี้

$$N = \frac{\sum C}{(n_1 + 1.0n_2)d}$$

เมื่อ $\sum C$ คือผลบวกของโคโลนีที่นับได้จากทุกจาน
 n_1 คือจำนวนโคโลนีที่ใช้ระดับความเจือจางแรก
 n_2 คือจำนวนโคโลนีที่ใช้ระดับความเจือจางที่ 2
 d คือระดับความเจือจางของระดับแรก

ภาคผนวก ข2: การตรวจวิเคราะห์ยีสต์ (Yeast) และรา (Molds)

วัสดุและอุปกรณ์

- Sterile 0.1% Peptone Water สำหรับเจือจางตัวอย่างอาหาร
- เครื่อง Stomacher
- จานเพาะเชื้อที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อแล้ว (Sterile Petri Plates)
- อาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar (PDA), pH 3.5
- ปิเปตขนาด 0.1 และ 1 มิลลิลิตร
- ตู้บ่มเชื้อ (Incubator)
- Tartaric acid 10% w/v

2. การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อละลายอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar (PDA) 39.0 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร นำสารละลายอาหารเลี้ยงเชื้อไปต้ม และคนเป็นช่วงๆ จากนั้น ทำการเทอาหารเลี้ยงเชื้อที่ต้มแล้วลงในขวด และฆ่าเชื้อที่ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

3. วิธีวิเคราะห์

3.1 เจือจางตัวอย่างอาหาร 25 กรัม ใน 0.1% peptone water 25 มิลลิลิตร จากนั้นตีผสมอาหารด้วยเครื่อง Stomacher เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นปิเปตตัวอย่างที่ผสมเข้ากันแล้วมา 1 มิลลิลิตร ไปเจือจางใน 0.1% peptone water 9 มิลลิลิตร ทำต่อไปจนได้ความเจือจาง 10^{-3}

3.2 เติมกรดทาร์ทาริก (tartaric acid) 10 ปริมาณ 1% ในอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato dextrose agar (PDA) ที่หลอมเหลวแล้วอุณหภูมิ 45 -50 องศาเซลเซียส ผสมให้เข้ากัน

3.3 เทอาหารเลี้ยงเชื้อใส่ในจานเพาะเชื้อทุกจานทันทีประมาณ 15-20 มิลลิลิตร เฝ้ารอจนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็งตัว

3.4 ปิเปตตัวอย่างแต่ละความเจือจางมา 0.1 มิลลิลิตร ใส่ลงในจานเพาะเชื้อที่เตรียมที่ระดับ 10^{-1} , 10^{-2} และ 10^{-3} ระดับความเจือจางละ 3 ซ้ำ และทำการ Spread plate

3.5 บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

3.6 ตรวจนับจำนวนโคโลนีบนจานอาหารเพาะเชื้อที่อยู่ในช่วง 30-300 โคโลนีแสดงผลการคำนวณเป็น CFU/g หรือมิลลิลิตรของตัวอย่างอาหาร เช่นเดียวกับการตรวจหาจุลินทรีย์ทั้งหมด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ภาคผนวก ค

การหาความสัมพันธ์ในบรรจุภัณฑ์พริกหวาน



ภาพที่ 30 การหาความชื้นสัมพัทธ์ในบรรจุภัณฑ์พริกหวาน

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-ชื่อสกุล	นางสาวนฤมล พิลาคูณ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	89 ถ.พิทักษ์สันติราษฎร์ ต.วารินชำราบ อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2556-2559 มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเกษตรศาสตร์
ผลงาน	นฤมล พิลาคูณ, วีรเวทย์ อุทโธ, ฤทธิรงค์ พฤตภูมิกุล และเฉลิมชัย วงษ์อารีย์. ผลของไอระเหยเอทานอลที่ ปลดปล่อยในการบรรจุภัณฑ์บรรยากาศตัดแปรแอคทีฟ และการเจาะรูบรรจุภัณฑ์ต่อคุณภาพการเก็บรักษาของ พริกหวานสด. การประชุมวิชาการพืชสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 18. 5-7 พฤศจิกายน 2562 ณ โรงแรมริชมอนด์ สไต์ลีส คอนเวนชั่น นนทบุรี
ทุนการศึกษา	ทุนการศึกษาจากสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ไทย (TGIST) ปี 2561 ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้การสนับสนุน และส่งเสริมการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ ผ่านเครือข่ายความ เชื่อมโยงระหว่างนักวิจัยของ สวทช. อาจารย์มหาวิทยาลัย และนักศึกษา