การพัฒนาซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลด้วยการกระตุ้นโดยความชื้นเพื่อการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับพริกหวานสด

หทัยพร กัมพวงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

DEVELOPMENT OF RELATIVE HUMIDITY TRIGGERED ETHANOL VAPOR CONTROLLED RELEASE SACHET FOR ACTIVE PACKAGING OF BELL PEPPER

HATAIPORN KAMPAWONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

MAJOR IN FOOD TECHNOLOGY

FACULTY OF AGRICULTURE

UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2020

COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์

เรื่อง การพัฒนาซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลด้วยการกระตุ้นโดยความชื้น เพื่อการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับพริกหวานสด

ผู้วิจัย นางสาวหทัยพร กัมพวงค์

คณะกรรมการสอบ

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

อาจารย์ที่ปรึกษา

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรเวทย์ อุทโธ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. ฤทธิรงค์ พฤฑฒิกุล)

....
(ดร. นรินทร บุญพราหมณ์) (รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)
คณบดีคณะเกษตรศาสตร์ รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2563

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรเวทย์ อุทโธ และขอบพระคุณ ดร.ฤทธิรงค์ พฤฑฒิกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ตรวจแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ รวมทั้งการเป็นแบบอย่างที่ดีแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมชัย วงษ์อารี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ อ่อนสอาด ที่ได้ร่วมเป็นคณะกรรมการในการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ และให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงเนื้อหาให้มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่สนับสนุนทุนการศึกษาระดับปริญญาโทตลอดระยะเวลาในการศึกษา ภายใต้โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (Thailand Graduate Institute of Science and Technology: TGIST) และเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลการรับทุนทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลืออำนวยความสะดวก และประสานงานต่าง ๆ ในการรับทุนครั้งนี้ ขอขอบคุณคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่ได้สนับสนุนทุนเพื่อการพัฒนาวิชาการระดับบัณฑิตศึกษาสำหรับการทำวิจัย และอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคณะเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการพลาสติกทุกท่าน ที่คอยให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในด้านการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณบิดา มารดา น้องชาย ที่ให้กำลังใจ ส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการศึกษาที่ดี คุณค่าและประโยชน์ที่เกิดจากการศึกษาครั้งนี้ ขอมอบแด่ผู้ที่อยู่เบื้องหลังในการส่งเสริมความสำเร็จ ทั้งที่ได้กล่าวนามถึงและมิได้กล่าวนามถึงทุกท่าน และขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

หทัยพร กัมพวงค์

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง	:	การพัฒนาซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลด้วยการกระตุ้นโดยความชื้นเพื่อการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับพริกหวานสด
ผู้วิจัย	:	หทัยพร กัมพวงค์
ชื่อปริญญา	:	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	:	เทคโนโลยีการอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษา	:	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรเวทย์ อุทโธ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	:	ดร.ฤทธิรงค์ พฤฑฒิกุล
คำสำคัญ	:	การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ, ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล, ฟิล์มชอบน้ำ, การบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร

การเสื่อมเสียจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้มูลค่าทางตลาดของผักและผลไม้ลดลง การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟเป็นเครื่องมือสำคัญในการชะลอการเสื่อมเสียคุณภาพ การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลด้วยการกระตุ้นโดยความชื้น ซองควบคุม ฯ ทำจากฟิล์มพลาสติกหลายชั้น (ฟิล์มพลาสติก ENP) มีสมบัติชอบน้ำประกอบด้วย ethylene vinyl acetate (EVA) และ Nylon/PE ในการศึกษาสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์มได้ (ค่า FPE) ที่อุณหภูมิ 10ºC พบว่า ฟิล์มพลาสติก ENP มีค่า FPE ที่ต่ำ (54.84-142.18 pmol m^{-2} s^{-1} Pa^{-1}) ทั้งนี้ค่า FPE มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลเพิ่มขึ้นในช่วง 0.1-0.7 mol m^{-3} แต่มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลมีค่าเพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของความชื้นสัมพัทธ์ส่งผลให้ค่า FPE มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทดสอบที่ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลเท่ากับ 0.1-0.4 mol m^{-3} แต่ระดับความชื้นสัมพัทธ์และความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่มีค่าสูงมากกลับส่งผลให้ค่า FPE ลดลง เมื่อทำการทดสอบจลนพลศาสตร์ของการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ซึ่งใช้ฟิล์มพลาสติก ENP (ซองควบคุม ฯ ENP) ภายใต้สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ พบว่า ฟิล์มพลาสติก ENP ชะลอการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลได้อย่างน้อย 24 ชั่วโมงภายหลังจากการเตรียมซองควบคุม ฯ ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 90-99% RH ส่งผลให้อัตราเร็วของการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลเกิดขึ้นได้เร็วกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60-89% RH ผลของความชื้นในบรรยากาศต่ออัตราเร็วสอดคล้องกับผลของการดูดซับความชื้นเข้าสู่โครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มพลาสติก ENP ทั้งนี้ระดับการดูดซับความชื้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อระดับความชื้นในสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น เมื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ซองควบคุมฯ ENP กับถุงพลาสติกบรรจุพริกหวานสด (1 ซองควบคุม ฯ ในถุงที่บรรจุพริกหวาน 1 ลูก) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน พบว่า การปลดปล่อยไอระเหย

เอทานอลสามารถชะลอได้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง เอทานอลที่สะสมในบรรยากาศ เนื้อเยื่อ และโพรงช่องว่างของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ ENP ชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงวิตามินซีและความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ได้ใกล้เคียงกับบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ ซึ่งมีฟิล์ม low density polyethylene (LDPE) เป็นวัสดุ ในภาพรวมต้นแบบซองควบคุม ฯ สามารถปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลได้ด้วยการกระตุ้นของความชื้นสัมพัทธ์ที่สูง ซึ่งเป็นผลจากฟิล์มพลาสติก ENP มีสมบัติชอบน้ำและมีค่า FPE ที่เปลี่ยนแปลงได้ภายใต้สภาวะความชื้นต่าง ๆ ดังนั้นซองควบคุม ฯ จึงมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เพื่อชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผักและผลไม้ได้

ABSTRACT

TITLE	:	DEVELOPMENT OF RELATIVE HUMIDITY TRIGGERED ETHANOL VAPOR CONTROLLED RELEASE SACHET FOR ACTIVE PACKAGING OF BELL PEPPER
AUTHOR	:	HATAIPORN KAMPAWONG
DEGREE	:	MASTER OF SCIENCE
MAJOR	:	FOOD TECHNOLOGY
ADVISOR	:	ASST. PROF. WEERAWETE UTTO, Ph.D.
CO-ADVISOR	:	RITTIRONG PRUTHTIKUL, Ph.D.
KEYWORDS	:	ACTIVE PACKAGING, ETHANOL VAPOR CONTROLLED RELEASE SACHET, HYDROPHILIC FILM, PASSIVE PACKAGING

Deterioration attributed to microbial proliferation is considered a key factor reducing the value of fresh fruit and vegetables. Active packaging is an important tool utilized to delay microbial as well as other deteriorations in quality. The purpose of this research was to develop a prototype ethanol vapor control release sachet activated by humidity. The sachet was made of a multi-layer film (ENP plastic film), a hydrophilic plastic film comprised of ethylene-vinyl acetate (EVA), and Nylon/PE. In the study of ethanol vapor permeability properties (FPE value) at 10°C, it was discovered that ENP plastic film had very low FPE (54.84-142.18 pmol s^{-1} m^{-2} Pa^{-1}). The FPE values increased as the ethanol vapor concentrations were increased in the range of 0.1-0.7 mol m^{-3}. Conversely, the FPE values decreased when the concentrations were increased. Increases in relative humidity levels caused increases in the FPE values, in particular, when tested at 0.1-0.4 mol m^{-3}. However, extremely high relative humidity and ethanol vapor concentration levels consequently decreased FPE values. Kinetic releases of ethanol vapor from ENP-based sachets, tested under different relative humidity levels, indicated that the ENP film apparently caused delays in releases up to 24 h after preparing the sachet. Rates of ethanol release tested at 90-99% RH were higher than those tested at 60-89% RH. The effect of atmospheric humidity on the release rates was consistent with those of moisture

absorbed into the polymeric structures of ENP film. Moisture absorption levels increased when relative humidity levels in the environment were increased. When studying the application of ENP control sachets to a plastic bag containing a bell pepper (1 sachet containing 1 pepper per bag) stored at 10°C for 21 days, experimental results showed that ethanol vapor release could be delayed for 24 h. Ethanol accumulated in the package space, tissues, as well as the cavities of these bell peppers in packages containing the ENP-based sachets effectively reduced microbial growth. Changes in both vitamin C, O_2 and CO_2 concentrations in the packages were comparable to those observed in packages having low density polyethylene-based (LDPE) sachets. In general, the prototype sachet was able to release ethanol vapors stimulated by high relative humidity resulting from the plastic film. This is attributed to the hydrophilic properties of the ENP film and its FPE value which becomes changeable under different relative humidity levels. Therefore, the ethanol vapor control release sachet has potential applications for slowing changes in the quality of fruits and vegetables.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ก

บทคัดย่อภาษาไทย ข

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ง

สารบัญ ฉ

สารบัญตาราง ณ

สารบัญภาพ ฏ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 4

1.3 ขอบเขตการวิจัย 4

บทที่ 2 ตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ 5

2.2 การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ของผักและผลไม้สด 8

2.3 การปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ โดยความชื้น 12

2.4 สรุปประเด็นสำคัญ 16

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ 17

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่สำคัญ 17

3.3 สารเคมี (Chemical) 18

3.4 วิธีดำเนินการ 19

3.5 การทดสอบผลของการใช้ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยที่ทำจากฟิล์ม ENP ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพริกหวานในการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ 31

3.6 การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์เชิงสถิติ 33

3.7 สรุปประเด็นสำคัญ 34

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย: การพัฒนาฟิล์มพลาสติกหลายชั้นสำหรับซองควบคุมปล่อยไอระเหยเอทานอล

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1 สมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์มพลาสติกที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลและความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศ 35
4.2 จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่สัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ 43
4.3 การดูดซับความชื้นของฟิล์มพลาสติกที่สัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ 45
4.4 สรุปประเด็นสำคัญ 47

บทที่ 5 ผลการทดลองและอภิปราย: ผลของการประยุกต์ใช้ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่กระตุ้นด้วยความชื้นต่อคุณภาพของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแอคทีฟ

5.1 ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ ในเนื้อเยื่อและโพรงของพริกหวาน 48
5.2 ความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์และในโพรงช่องว่างของพริกหวาน 56
5.3 การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในพริกหวาน 60
5.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิก 64
5.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดทั้งหมดและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 68
5.6 การสูญเสียน้ำหนักและความแน่นเนื้อของพริกหวาน 70
5.7 การเปลี่ยนแปลงสีของพริกหวาน 73
5.8 สรุปประเด็นสำคัญ 74

บทที่ 6 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปการวิจัย 75
6.2 ข้อเสนอแนะการวิจัยต่อไป 76

เอกสารอ้างอิง **77**

ภาคผนวก

ก การวิเคราะห์ทางเคมี – กายภาพ 90
ข การวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ 98

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ค ตารางผลของการประยุกต์ใช้ซองควบคุม ฯ ที่กระตุ้นด้วยความชื้นต่อคุณภาพของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ 102

ประวัติผู้วิจัย **112**

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างของระบบแอคทีฟที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับ passive MAP สำหรับพริกหวาน	9
2.2	ค่า film permeance to ethanol vapour (FPE) ของฟิล์มพลาสติกบางประเภท	11
2.3	ฟิล์มชอบน้ำซึ่งมีสารแอคทีฟที่มีฤทธิ์ชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์	15
3.1	ความชื้นสัมพัทธ์ (% RH) ของสารละลายเกลือ	25
4.1	การประมาณค่าสัมประสิทธ์ของสมการ (1) ด้วยวิธี non-linear regression สำหรับการดูดซับน้ำของฟิล์มพลาสติก Nylon/PE EVA และ ENP	46
5.1	ตัวอย่างผลของไอระเหยเอทานอลในการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตผล	62
5.2	ตัวอย่างของผลของไอระเหยเอทานอลซึ่งชะลอการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกในผลิตผลพืชสวนบางประเภท	65
5.3	ค่าสัมประสิทธิ์ของ Eq. (4) จากการทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และ passive MAP	68
ก.1	ระดับทำการเจือจาง 5 ความเข้มข้น ปริมาตร 10 ml	92
ก.2	ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้นกับจำนวน mol ของเอทานอลที่อยู่ในปริมาตรสารละลายที่ฉีดเข้าไป 1 ul	93
ค.1	การเปลี่ยนแปลงเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และ passive MAP	103
ค.2	การเปลี่ยนแปลงยีสต์และราในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และ passive MAP	104
ค.3	การเปรียบเทียบทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ active MAP และ passive MAP	105
ค.4	การวิเคราะห์สถิติสำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดทั้งหมดของพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และ passive MAP	106
ค.5	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และ passive MAP	107
ค.6	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และ passive MAP	108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ค.7 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และ passive MAP 109
ค.8 การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L*) ของผิวพริกหวาน บรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และ passive MAP 110
ค.9 การเปลี่ยนแปลงค่าสีเขียว (a*) ของผิวพริกหวาน บรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และ passive MAP 111

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	แบบจำลองแนวคิด (Conceptual model) ของการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ โดยใช้ความชื้นเป็นตัวกระตุ้น	3
2.1	การแทงผ่านเข้าสู่ใบข้าวโพดของเชื้อ Colletotriohum graminicola A.	6
2.2	แบบจำลองแนวคิดกระบวนการถ่ายโอนมวลที่สำคัญสำหรับการปล่อยไอระเหยจากซองควบคุม ฯ มายังบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติกซึ่งบรรจุผักและผลไม้ตัดสด	10
3.1	แบบจำลองแนวคิดของฟิล์มหลายชั้นที่มีส่วนประกอบของฟิล์ม EVA และฟิล์มพลาสติก Nylon/PE หรือเรียกฟิล์มหลายชั้นนี้ว่าฟิล์มพลาสติก ENP	20
3.2	ขั้นตอนของการเตรียมฟิล์มแอคทีฟ ด้วยการทำฟิล์มหลายชั้นที่เกิดจากการประกบกันระหว่างฟิล์มพลาสติก EVA และฟิล์มพลาสติก Nylon/PE	21
3.3	ตัวอย่างของซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล	22
3.4	Stainless steel cell ใช้ในการวัด Film permeance to ethanol vapour (FPE)	23
3.5	การจัดวาง (Settings) ของ permeability cell สำหรับการวัด FPE ของฟิล์ม ENP ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ในระดับที่แตกต่างกัน	24
3.6	การเพิ่มระดับความชื้นสัมพัทธ์บน upper cell ของ permeability cell สำหรับการวัด FPE ของฟิล์ม	26
3.7	การเพิ่มระดับความชื้นในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ถุงอะลูมิเนียม โดยสารละลายเกลือ	28
3.8	การทดสอบการดูดซับความชื้นของฟิล์มพลาสติก Nylon/PE ฟิล์ม EVA และฟิล์ม ENP ที่อุณหภูมิ 10°C	29
3.9	เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านฟิล์มของไอน้ำ	30
3.10	การบรรจุพริกหวานในบรรจุภัณฑ์	31
3.11	เครื่องวิเคราะห์แก๊ส CO_2 และแก๊ส O_2 (Handheld gas analyser)	32
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลและค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก	36
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลและค่า FPE ของฟิล์ม FF3 และฟิล์ม ActivePAK^{TM}	38
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลกับค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก LDPE และ Nylon/PE	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลและค่า FPE ของฟิล์ม ENP และสภาวะความชื้นสัมพัทธ์	42
4.5	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศซึ่งปลดปล่อยจากซองควบคุม ฯ	44
4.6	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่ปล่อยจากซองควบคุม ฯ ซึ่งมีส่วนประกอบของฟิล์ม Active PET ในระบบที่มี CO_2	45
4.7	การดูดซับความชื้นของฟิล์มพลาสติก Nylon/PE (A) ฟิล์ม EVA (B) และฟิล์ม ENP (C)	46
4.8	แบบจำลองแนวคิดการดูดซับความชื้นของฟิล์มพลาสติก ENP	47
5.1	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ active MAP	49
5.2	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ active MAP และเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ passive MAP	52
5.3	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเอทานอลในเนื้อเยื่อพริกหวานเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ active MAP และในบรรจุภัณฑ์ passive MAP	54
5.4	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลในโพรงช่องว่างของพริกหวานเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ active MAP และในบรรจุภัณฑ์ passive MAP	55
5.5	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และ CO_2 ในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ active MAP และในบรรจุภัณฑ์ passive MAP	57
5.6	ลักษณะของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่แนบชิดกับพริกหวานคล้ายกับการเกิดสุญญากาศ	57
5.7	การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และ CO_2 ในโพรงช่องว่างของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ active MAP และในบรรจุภัณฑ์ passive MAP	59
5.8	การเปลี่ยนแปลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และบรรจุภัณฑ์ passive MAP	61
5.9	การเปลี่ยนแปลงของยีสต์และราในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และบรรจุภัณฑ์ passive MAP	63
5.10	การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และบรรจุภัณฑ์ passive MAP	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
5.11	จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวาน	67
5.12	การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดทั้งหมดของพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และบรรจุภัณฑ์ passive MAP	69
5.13	การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และบรรจุภัณฑ์ passive MAP	70
5.14	ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และบรรจุภัณฑ์ passive MAP	71
5.15	การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และบรรจุภัณฑ์ passive MAP	72
5.16	การเปลี่ยนแปลงค่าสีของผิวพริกหวาน โดยมีค่าความสว่าง (L*) ในบรรจุภัณฑ์ active MAP และบรรจุภัณฑ์ passive MAP	73
5.17	การเปลี่ยนแปลงค่าสีของผิวพริกหวาน โดยมีค่าสีเขียว (a*) บรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP และบรรจุภัณฑ์ passive MAP	74
ก.1	กราฟมาตรฐานระหว่างพื้นที่ใต้กราฟและจำนวณโมลของเอทานอล	93

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

ผักและผลไม้สดมีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงโดยเป็นสินค้าที่สามารถสร้างรายได้ที่สำคัญกับไทย นอกจากนี้ผลิตผลมีคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากเป็นแหล่งสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกาย เช่น วิตามินซี ไลโคปีน หรือสารต้านอนุมูลอิสระ (ดนัย บุญเกียรติ และนิธิยา รัตนาปนนท์, 2535; Rolle, 2011; Septembre-Malaterre, 2018) อย่างไรก็ตามผักและผลไม้มักมีอายุการเก็บรักษาที่ค่อนข้างสั้นและมีแนวโน้มเกิดการเน่าเสียได้ง่าย โดยเฉพาะการเก็บรักษา ณ อุณหภูมิห้อง เนื่องจากกิจกรรมทางชีวเคมียังคงดำเนินต่อเนื่องภายหลังการเก็บเกี่ยว ตลอดจนการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในระหว่างการขนส่งเคลื่อนย้ายการเก็บรักษาและการจัดจำหน่าย ทั้งนี้การบรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้นิยมใช้การบรรจุภัณฑ์แบบบรรยากาศดัดแปร (modified atmosphere packaging: MAP หรือที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า คือ passive MAP) เช่น การบรรจุผลิตผลบนถาดและหุ้มด้วยฟิล์มพลาสติกหรือบรรจุในถุงพลาสติก และเก็บรักษาภายใต้สภาวะอุณหภูมิแช่เย็น การบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวสามารถชะลออัตราการหายใจและเมตาบอลิซึม เนื่องมาจากการลดลงของความเข้มข้นแก๊ส O_2 และการเพิ่มความเข้มข้นแก๊ส CO_2 ภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งเป็นผลจากสมดุลระหว่างอัตราการหายใจและอัตราการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของแก๊สทั้งสอง (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562; Waghmare and Annapure, 2013; Sandhya, 2010) อย่างไรก็ตามการบรรจุภัณฑ์แบบ passive MAP อาจมีข้อจำกัดด้านการชะลอการสุกและการเจริญของเชื้อ เมื่ออุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา (Oliveira et al., 2015) การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (active packaging) ได้รับความสนใจในการศึกษาและประยุกต์ใช้ในการเก็บรักษาผักและผลไม้สดอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตผลได้ การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่สนใจสำหรับการวิจัยนี้ คือ การบรรจุภัณฑ์ที่มีการเพิ่มระบบแอคทีฟ (active system) ให้กับการบรรจุภัณฑ์ passive MAP เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตผลสด (พัชรี มะลิลา, 2562; Rooney, 1995; Charles et al., 2003; Devlieghere et al., 2004; Utto et al., 2005) ระบบแอคทีฟสามารถสร้างปฏิสัมพันธ์กับผลิตภัณฑ์ บรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ และ/หรือวัสดุบรรจุภัณฑ์โดยมีจุดประสงค์เพื่อชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผักและผลไม้สด ตัวอย่างของระบบแอคทีฟ เช่น วัตถุดูดซับแก๊ส O_2 และความชื้น หรือ วัตถุปล่อยแก๊ส CO_2 (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562)

ทั้งนี้การบรรจุภัณฑ์ passive MAP ที่มีการเพิ่มระบบแอคทีฟมีชื่อเรียกโดยทั่วไป คือ active modified atmosphere packaging หรือ active MAP

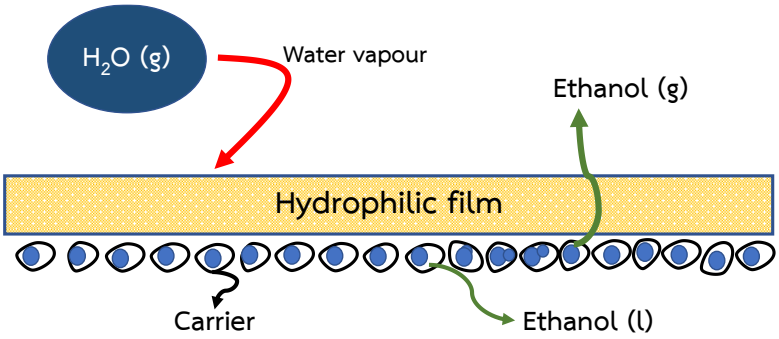
ระบบแอคทีฟที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล (ethanol vapor controlled release sachet) ไอระเหยเอทานอลมีความปลอดภัยถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของสารประเภท generally recognized as safe (GRAS) จึงมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคและมีความสามารถในการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในผัก ผลไม้และอาหารอื่น ๆ (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562; Utto, 2014; Utto et al., 2018) นอกจากนี้ไอระเหยเอทานอลอาจเพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัส เนื่องจากเนื้อเยื่อผักและผลไม้เปลี่ยนเอทานอลให้เป็นสารกลุ่มเอสเตอร์ซึ่งมีกลิ่นที่หอมด้วยเอนไซม์ที่สำคัญ เช่น alcohol acyl transferase (AAT) (Hamilton-Kemp et al., 1996; Bai et al., 2011; Candir et al., 2012; Wongs-Aree and Noichinda, 2018) จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาของผู้วิจัย[1] ได้พัฒนาซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่ปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลเข้าสู่บรรยากาศบรรจุภัณฑ์ได้ตลอดอายุการเก็บรักษาและควบคุมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในมะเขือเทศเชอรี่ จากผลการพัฒนาซองควบคุม ฯ ที่ผ่านมาผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการต่อยอดงานวิจัยโดยการพัฒนาซองควบคุม ฯ ให้ปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลภายใต้เงื่อนไข (conditional) เพื่อลดข้อจำกัดการใช้งานในทางปฏิบัติซึ่งเกิดจากการปลดปล่อยทันทีภายหลังจากเตรียมซองควบคุม ฯ แล้วเสร็จ โดยเฉพาะเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้นปริมาณเอทานอลในซองควบคุม ฯ อาจไม่เพียงพอต่อปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยได้พิจารณาว่าควรมีการยับยั้งการปล่อยไอระเหยเอทานอลก่อนใช้งานและต้องใช้ตัวกระตุ้นที่ส่งผลให้เกิดการปล่อยไอระเหยเอทานอลเมื่อบรรจุร่วมกับผลไม้ตัดสดในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งพบว่า ตัวกระตุ้นควรเป็น “ความชื้น (humidity as an ethanol vapor release trigger)” เนื่องจากความชื้นในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์พลาสติกบรรจุผักและผลไม้สดมีค่าที่สูงมาก เช่น 95-99% RH ระดับความชื้นที่สูงเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีความคิดว่าการปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ควรเกิดขึ้นเมื่อความชื้นรอบ ๆ มีค่าที่สูงขึ้นกว่าความชื้นในสภาวะอุณหภูมิห้องทั่วไป (อยู่ระหว่าง 65-75% RH) การปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลภายใต้สภาวะดังกล่าวนำไปสู่การสะสมของไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์อันเป็นแนวทางสำคัญในการชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้

ความชื้นได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นให้มีการปล่อยสารแอคทีฟ เช่น 1-methylcyclopropene (1-MCP) ออกจากตัวพาซึ่งเป็นสารกลุ่ม cyclodextrin (Hotchkiss et al., 2007; Ayala-Zavala et al., 2008) และสารประกอบซิลิกา (Wellinghoff et al., 2003) หรือปล่อยไอระเหยของซัลเฟอร์

---

[1] ภายใต้การสนับสนุนจากทุนการศึกษา โครงการสร้างปัญญาวิทย์ ผลิตนักเทคโน *(Young Scientist and Technologist Program : YSTP)* ของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ในปีการศึกษา 2559

ไดออกไซด์จากแผ่น SO_2 release pad ด้วยความชื้น จากข้อมูลในเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาซองควบคุม ฯ ที่สามารถใช้ความชื้นเป็นตัวกระตุ้นการปล่อยไอระเหยเอทานอลดังแสดงในภาพที่ 1.1 และมีรายละเอียดโดยสรุปดังต่อไปนี้



ภาพที่ 1.1 แบบจำลองแนวคิด (Conceptual model) ของการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ โดยใช้ความชื้นเป็นตัวกระตุ้น

(1) ซองควบคุม ฯ ทำจากฟิล์มพลาสติกที่ยอมให้ไอน้ำซึมผ่านได้ค่อนข้างเร็ว เนื่องจากไอน้ำต้องแพร่ผ่านจากภายในบรรจุภัณฑ์เข้ามายังภายในซองควบคุม ฯ ในขณะที่ฟิล์มพลาสติกดังกล่าวสามารถให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านได้ดี ดังนั้นวัสดุของซองควบคุม ฯ จึงควรเป็นฟิล์มที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic property) เช่น ฟิล์ม ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) ซึ่งมีกลุ่ม vinyl acetate ที่มีขั้วผสมภายในโครงสร้าง (Tham et al., 2015) การทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์มกับน้ำนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์โดยเฉพาะการเพิ่มปริมาตรอิสระ (free volume) และส่งผลให้การแพร่ผ่านภายในโครงสร้างพอลิเมอร์เกิดในอัตราเร็วที่สูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างพอลิเมอร์ดังกล่าวเป็นผลจากปรากฏการณ์พลาสติไซเซชัน (plasticization phenomena) (Robertson, 2013)

(2) ไอน้ำทำให้เกิดการปล่อยไอระเหยเอทานอลจากตัวพา (carrier for ethanol molecules) ซึ่งตัวพาที่จะเลือกใช้เป็นวัสดุที่สามารถจับยึดโมเลกุลเอทานอลและน้ำได้ เมื่อไอน้ำถูกดูดซับจากบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์มาบนตัวพาจะส่งผลให้เกิดกระบวนการ displacement desorption นำไปสู่การหลุดของโมเลกุลเอทานอลที่ถูกดูดซับไว้ก่อน (pre-adsorbed) ในภาพที่ 1.1 ได้จำลองสถานการณ์ว่าตัวพาดูดซับเอทานอลในรูปของเหลว หรือ ethanol (liquid status) ไว้ก่อน จากนั้นเอทานอลถูกปลดปล่อยจากตัวพาในรูปของไอระเหย หรือ ethanol (gaseous status)

ปัจจุบันยังไม่พบรายงานการพัฒนาซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่ใช้ความชื้นเป็นตัวกระตุ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีจุดมุ่งหมายในการดำเนินการวิจัยเพื่อพัฒนาซองควบคุม ฯ ซึ่งมีวัสดุเป็น

ฟิล์มพลาสติกที่มีสมบัติชอบน้ำในขณะที่มีความสามารถต้านการซึมผ่านของไอระเหยเอทานอลได้ดีในสภาวะแห้ง ตัวอย่างของฟิล์มชอบน้ำที่มีศักยภาพ เช่น ฟิล์มพลาสติก EVA ฟิล์ม Nylon/PE และฟิล์ม ethylene-vinyl alcohol (EVOH) แม้ฟิล์มเหล่านี้มีสมบัติต้านการซึมผ่านของแก๊สและไอระเหยได้ดีในสภาวะแห้ง แต่ยังไม่มีรายงานสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่าน (film permeance to ethanol vapor หรือ FPE) ในสภาวะแห้งและความชื้นสูง ทั้งนี้ค่า FPE เป็นสมบัติที่แสดงให้ทราบถึงความง่ายของไอระเหยเอทานอลที่เคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์ม ในการวิจัยนี้ฟิล์มพลาสติกที่ใช้ควรมีค่า FPE สูงเมื่ออยู่ภายใต้ความชื้นสูง แต่ค่า FPE มีค่าต่ำเมื่ออยู่ในสภาวะแห้ง ในการศึกษาของ พัชรี มะลิลา (2562) พบว่าฟิล์มพลาสติก polyethylene terephthalate (PET) มีค่า FPE ต่ำมากแต่ฟิล์มมีสมบัติชอบน้ำที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม EVA หรือ EVOH ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อพัฒนาฟิล์มพลาสติกชอบน้ำและมีค่า FPE ที่ต่ำโดยเฉพาะในสภาวะแห้ง (ก่อนบรรจุในบรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้) แต่ค่า FPE มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อฟิล์มอยู่ภายใต้ความชื้นที่สูง จากการศึกษาเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องพบเพียงฟิล์ม Nylon/PE ซึ่งมีชั้นฟิล์ม Nylon ที่มีสมบัติชอบน้ำและมีการรายงานค่า FPE (พัชรี มะลิลา, 2558) ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำฟิล์ม Nylon/PE มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาฟิล์มเพื่อใช้เป็นวัสดุซองควบคุม ฯ ที่กระตุ้นด้วยความชื้นได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยพบว่า ปัจจุบันยังไม่มีการรายงานการพัฒนาซองควบคุม ฯ ซึ่งมีวัสดุเป็นฟิล์มพลาสติกชอบน้ำ ดังนั้นการวิจัยนี้จึงเป็นการต่อยอดความรู้ในการพัฒนาระบบแอคทีฟสำหรับการประยุกต์ใช้ในการบรรจุภัณฑ์ active MAP สำหรับผักและผลไม้สดต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลโดยใช้ความชื้นเป็นตัวกระตุ้น

1.2.2 เพื่อทดสอบซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่พัฒนาขึ้นกับบรรจุภัณฑ์ผลิตผลพืชสวน โดยใช้พริกหวานเป็นตัวอย่าง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ซองควบคุม ฯ ที่ทำจากฟิล์มพลาสติก ซึ่งมีสมบัติการยอมให้ไอน้ำซึมผ่านได้ดีและฟิล์มดังกล่าวยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านได้ง่าย

1.3.2 อุณหภูมิในการศึกษา เท่ากับ 10°C

1.3.3 พริกหวาน เป็นผลิตผลตัวอย่างเนื่องจากเป็นผลิตผลที่มีศักยภาพทางการค้า และมีแนวโน้มเสื่อมเสียได้ง่าย

1.3.4 ซองควบคุม ฯ อยู่ในรูปซองขนาดเล็ก (sachet) ดังรูปแบบที่รายงานใน พัชรี มะลิลา (2558)

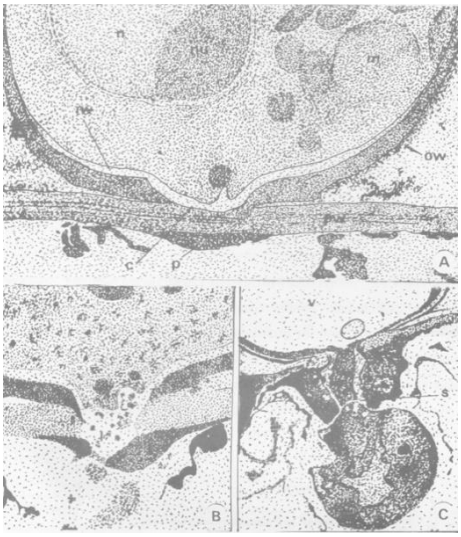
บทที่ 2
ตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอความรู้ที่ได้จากการตรวจเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับผักและผลไม้สด ด้วยการใช้ระบบการควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลหรือไอระเหยที่มีฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์ เช่น ไอระเหยจากน้ำมันหอมระเหย (essential oil) การวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นถึงการพัฒนาซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลซึ่งสามารถกระตุ้นด้วยความชื้นในบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นเนื้อหาที่นำเสนอได้คลอบคลุมถึงเทคนิคหรือการใช้ความชื้นเพื่อการกระตุ้นการปลดปล่อยหรือการใช้ฟิล์มชอบน้ำในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ

2.1 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์

ผลิตผลพืชสวนหลังการเก็บเกี่ยวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง เช่น การสูญเสียน้ำและความแน่นเนื้อ การเปลี่ยนสี และการเปลี่ยนแปลงกลิ่นและรสชาติ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลให้ผักและผลไม้เสื่อมคุณภาพลง (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562; Nunes, 2015) การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์เป็นการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญอย่างหนึ่งภายหลังจากการเก็บเกี่ยว ลักษณะปรากฏ (visual appearances) ของเชื้อจุลินทรีย์ เช่น ใยสีขาวหรือดำ หรือการเน่าเละ เป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ของผู้บริโภค หากเกิดลักษณะปรากฏดังกล่าวส่งผลให้ผลิตผลมีคุณภาพและราคาที่ต่ำลง (สมศิริ แสงโชติ, 2554) การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ทำให้เกิดการทำลายผลิตผลโดยผ่านชั้นคิวติเคิล (cuticle) โดยมีการผลิตเอนไซม์ เอนไซม์เพคทิเนส (pectinase) เร่งการย่อยสลายเพกทิน (pectin) ซึ่งเป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่เป็นตัวเชื่อมประสานทำให้โครงสร้างเซลล์ของผักและผลไม้ให้มีความแข็งแรง ทำให้ผักและผลไม้มีเนื้อสัมผัสกรอบ เชื้อราบางชนิด เช่น *Aspergillus* spp. *Rhizopus* spp., *Alternaria* spp. และ *Botrytis cinerea* เข้าทำลายเซลล์พืชโดยตรงซึ่งไม่ผ่านช่องเปิดหรือบาดแผล เชื้อราสามารถปลดปล่อยเอนไซม์ที่สามารถย่อยเนื้อเยื่อพืชโดยมีการเปลี่ยนแปลงเป็นด่าง ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการผลิตแอมโมเนีย (ammonification) ในเนื้อเยื่อพืชที่มีการเข้าทำลายของเชื้อรา เช่น *Colletotrichum* และ *Alternaria* ในขณะที่เกิดสภาวะความเป็นกรดเนื่องจากปฏิกิริยาการสร้างกรด (acidification) ที่อยู่ในกลุ่มกรดอินทรีย์ต่าง ๆ ในเนื้อเยื่อพืชที่มีการเข้าไปทำลายของเชื้อรา เช่น *Penicillium Botrytis* และ *Sclerotinia* (เนตรนภิส เขียวขำ, 2562) นอกจากนี้เชื้อราบางประเภท เช่น *Bacillus subtilis* และ *Penicillium digitatum* สามารถสร้างสปอร์บนผลิตผลในสภาวะที่เหมาะสม ทำให้สปอร์มีการงอกได้อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้การงอกอยู่ในลักษณะ

ท่อซึ่งเรียกว่า germ tube และมีการพัฒนาต่อเป็นโครงสร้างที่มีผนังหนาเกาะติดแน่นที่ผิวของผลิตผลด้วยการสร้างเมือกขึ้นมา โครงสร้างลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า appressorium โครงสร้างนี้มีการผลิตเอนไซม์ที่ย่อยสลายคิวติเคิลทำให้โครงสร้างพอลิเมอร์ของคิวติเคิลอ่อนแอลง ตลอดจนเนื้อเยื่อของพืชถูกทำลายจึงส่งผลให้ผักและผลไม้มีลักษณะอ่อนนุ่มและอาจสูญเสียความสามารถด้านการตลาดดังแสดงดังภาพที่ 2.1 นอกจากนี้ท่อ germ tube สามารถงอกเป็นแท่งขนาดเล็กซึ่งเรียกว่า Infection peg ที่แทงผ่านทะลุคิวติเคิลเข้าไปในเซลล์พืชโดยอาศัยแรงดันจาก appressorium (จริงแท้ ศิริพานิช, 2549)



ภาพที่ 2.1 การแทงผ่านเข้าสู่ใบข้าวโพดของเชื้อ *Colletotriohum graminicola* A.
ที่มา: ไทยเกษตรศาสตร์ (2013; อ้างอิงจาก Wheeler, 1975)

จากการศึกษาเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง พบว่า ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ประกอบด้วย ความชื้น บาดแผล แก๊ส O_2 และอุณหภูมิ ซึ่งได้รวบรวมและนำเสนอในส่วนต่อไป ทั้งนี้ในการศึกษานี้ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับการชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพริกหวาน (ดังที่กล่าวในบทนำ) ดังนั้นจึงได้เพิ่มเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับพริกหวานร่วมกับผลิตผลอื่น ๆ

2.1.1 ความชื้น ผักและผลไม้มีน้ำเป็นองค์ประกอบถึง 70-95% จึงส่งเสริมกิจกรรมทางชีวเคมีและการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ความชื้นที่สูงภายในผลิตผลทำให้มีการเกิดการคายน้ำจากผลิตผลไปสู่สิ่งแวดล้อมรอบ ๆ อันเป็นผลจากความแตกต่างของความดันไอน้ำ (water vapor gradient) ทั้งนี้การสะสมของความชื้นจากการคายน้ำภายในบรรจุภัณฑ์ช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำ เนื่องจากลดความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างผลิตผลและภายในบรรจุภัณฑ์ อย่างไรก็ตามความชื้นที่สะสมในบรรจุภัณฑ์พลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวยอมให้ไอน้ำซึมผ่านได้ช้า

ดังนั้นการเก็บรักษาที่มีอุณหภูมิที่ไม่คงที่สามารถนำไปสู่การควบแน่นเป็นหยดน้ำ และส่งเสริมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (งามทิพย์ ภู่วโรดม, 2549 และ วีรเวทย์ อุทโธ, 2562)

2.1.2 การเกิดบาดแผลของผลิตผล ผักและผลไม้มีการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์ โดยเฉพาะแบคทีเรีย ยีสต์ และรา ทั้งนี้การปนเปื้อนเกิดจากธรรมชาติ เช่น ดิน น้ำใช้ทางการเกษตร หรือเกิดการปนเปื้อนในระหว่างการผลิต การเก็บรักษาหรือจากภาชนะบรรจุ (สมศิริ แสงโชติ, 2554) บาดแผลบนผิวของผลิตผลเป็นช่องทางสำคัญที่เชื้อจุลินทรีย์ซึ่งปนเปื้อนอยู่บนผลไม้สามารถเข้าไปทำลายเซลล์พืชได้ เมื่อเกิดบาดแผล (ดังที่ได้นำเสนอไปข้างต้น) ส่งผลให้เกิดการสร้างสารเคมี เช่น กรดอินทรีย์และสารประกอบฟีนอล เช่น ในผักมิซูน่ามีปริมาณฟีนอลิก และสารต้านอนุมูลอิสระสูง (Khanam et al., 2012) ซึ่งช่วยป้องกันการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ เนื่องจากสารเหล่านี้มีความเข้มข้นสูง และมี pH ที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ หรือเกิดการตกตะกอนของโปรตีนบางประเภทซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของเอนไซม์ที่ผลิตได้จากเชื้อจุลินทรีย์ จึงทำให้เกิดการเจริญเติบโตหรือการออกฤทธิ์ของสารพิษจากจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ช้า (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562)

2.1.3 สภาวะบรรยากาศ การเก็บรักษาผลิตผลในบรรยากาศปกติ ซึ่งมีส่วนประกอบของแก๊สไนโตรเจน (N_2) 79% (v/v) แก๊สออกซิเจน (O_2) 20.99% (v/v) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 0.03% (v/v) ส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์โดยเฉพาะแบคทีเรียและราเจริญเติบโตได้ดี ในขณะที่จุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการอากาศ เช่น *Clostridium kluyveri* มักเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ที่ต่ำ (Yu et al., 2019) ปัจจุบันการบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปร (modified atmosphere packaging; MAP) ซึ่งเป็นการปรับสภาวะบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ให้แตกต่างจากความเข้มข้นในสภาวะปกติ หรือเรียกว่าสภาวะบรรยากาศดัดแปร (modified atmosphere condition หรือสภาวะ MA) ตัวอย่างเช่น ลูกแพร์ตัดสดบรรจุในบรรจุภัณฑ์พลาสติก polyethylene terephthalate (PET) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 21 วัน แก๊ส CO_2 ในวันสุดท้ายมีค่าสูงถึง 35.3% (v/v) ส่วนแก๊ส O_2 ลดลงเป็น 0% (v/v) หลังวันที่ 7 ของการเก็บรักษา (Siddiq et al., 2020) ทั้งนี้การสร้างสภาวะ MA ที่นิยมในการจำหน่ายแบบขายปลีก คือ การบรรจุผลิตผลในถุงพลาสติก โดยเมื่อเกิดสมดุลระหว่างอัตราการหายใจ (การใช้แก๊ส O_2 และการผลิตแก๊ส CO_2) และอัตราการซึมผ่านของแก๊สทั้งสองผ่านบรรจุภัณฑ์ส่งผลให้เกิดสภาวะบรรยากาศดัดแปรขึ้น ตัวอย่างของการบรรจุภัณฑ์ passive MAP สำหรับพริกหวาน เช่น Mahiques Cuesta (2016) รายงานว่าการเก็บรักษาพริกหวาน *Capsicum annuum* L. cv. Cupra ในถุงพลาสติก LDPE ที่อุณหภูมิ 10°C มีความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 0.33% ช่วยชะลอเส้นใยสีเทาและการเน่าเปื่อยที่ผิว ในขณะที่ Manolopoulou et al. (2012) รายงานว่าพริกหวาน (*Capsicum annuum* L.) เก็บรักษาในถุงพลาสติก high density poly ethylene (HDPE) ที่อุณหภูมิ 0-5°C โดยมีระดับความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และการผลิตแก๊ส CO_2 ในสภาวะคงที่

เท่ากับ 2.28 % (v/v) และ 19.6% (v/v) ตามลำดับ ชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาได้ในช่วง 5-10 วัน

2.1.4 อุณหภูมิ อุณหภูมิมีผลต่อทั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ อุณหภูมิที่สูงเร่งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ กล่าวคือ จุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคหลังการเก็บเกี่ยวเจริญได้ดีที่อุณหภูมิ 24-26°C การเก็บรักษาผักและผลไม้ที่อุณหภูมิต่ำสามารถชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตผล อย่างไรก็ตามระดับอุณหภูมิไม่ควรก่อให้เกิดการเสื่อมเสียจากความเย็น หรือเกิดสภาวะสะท้านหนาว (chilling injury) (Shi et al., 2018; Chaudhary et al., 2014) ซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นกับผักและผลไม้หลายชนิดเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำแต่สูงกว่าจุดเยือกแข็ง (จริงแท้ ศิริพานิช, 2549) โดยเฉพาะผลิตผลที่อยู่ในเขตร้อน หากเกิด chilling injury อาจนำไปสู่การเน่าเสียเละและส่งเสริมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ (สมศิริ แสงโชติ, 2554) เมื่ออุณหภูมิไม่คงที่ในระหว่างการเก็บรักษา โดยเฉพาะอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในห่วงโซ่ความเย็น (cold chain) เนื่องจากระบบทำความเย็นผิดปกติเกิดการเสียระหว่างขนส่งหรือการเก็บรักษา ความไม่ต่อเนื่องของระบบโซ่ความเย็นได้ส่งผลให้ผักและผลไม้มีอัตราการหายใจที่เร็วขึ้น ทั้งนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นกระตุ้นการหายใจและกระบวนการเมตาบอลิซึมเร่งให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตผล ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมคุณภาพทางโภชนาการและรสชาติของผักและผลไม้ (Kyriacou and Rouphael, 2018)

2.2 การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ของผักและผลไม้สด

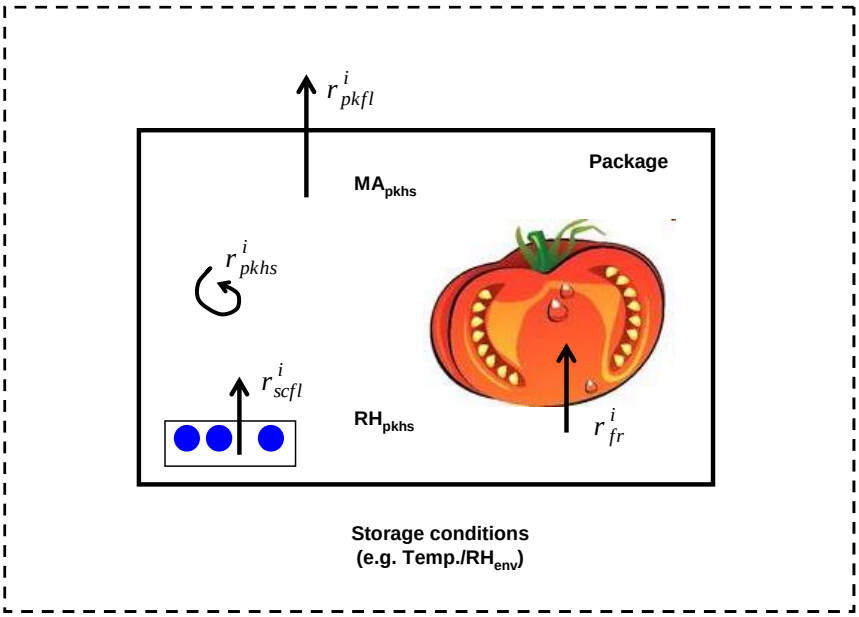
จากข้อมูลที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2.1.3 พบว่า การบรรจุภัณฑ์ passive MAP ซึ่งมีสภาวะบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์ กล่าวคือ ความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ลดลง และความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นแก๊สทั้งสองในบรรยากาศปกติ มีศักยภาพชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในการใช้งานโดยเฉพาะเมื่อมีอุณหภูมิการเก็บรักษาไม่คงที่ทั้งในระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา อาจนำไปสู่การควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำเพิ่มขึ้นในบรรจุภัณฑ์และส่งเสริมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562) ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ระบบแอคทีฟ (active system) ร่วมกับการบรรจุภัณฑ์ passive MAP ตัวอย่างของระบบแอคทีฟ เช่น วัตถุดูดออกซิเจน วัตถุดูดความชื้น วัตถุดูดเอทิลีน หรือระบบปลดปล่อยไอระเหยที่สามารถชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ ทั้งนี้การใช้ระบบแอคทีฟร่วมกับบรรจุภัณฑ์ passive MAP มีชื่อเรียกโดยรวมว่าบรรจุภัณฑ์ active MAP ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 1 รายละเอียดเพิ่มเติมของการบรรจุภัณฑ์ active MAP ได้รวบรวมไว้ในวีรเวทย์ อุทโธ (2562) ตัวอย่างของระบบแอคทีฟที่มีการประยุกต์ใช้กับพริกหวาน แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของระบบแอคทีฟที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับบรรจุภัณฑ์ passive MAP สำหรับพริกหวาน

ระบบแอคทีฟ	บรรจุภัณฑ์	สภาวะการเก็บ	สายพันธุ์พริกหวาน	เชื้อจุลินทรีย์	ผลการเกิดปฏิกิริยา	อ้างอิง
ซองดูดความชื้น	ถุงพลาสติก PP	8°C	*Capsicum annuum L.*	Non specified	กำจัดความชื้นและยืดอายุการเก็บรักษา 21 วัน	Singh et al. (2014)
สารเคลือบผิวด้วย lemongrass essential oil (EO) และ ไคโตซาน	การเคลือบผิว	25°C เป็นเวลา 21 วัน	*Capsicum annuum L.*	C. *capsica Colletotrichum* sp.	ควบคุมการเจริญของเชื้อราได้ที่ความเข้มข้นของ EO เท่ากับ 0.5% และ 1.0% ยืดอายุเก็บรักษา 7 วัน	Ali et al. (2015)
กระดาษกรองที่เอิบชุ่มด้วย เฮกซานอล	ถุงพลาสติก	12°C และ 90–95% RH เป็นเวลา 21 วัน	*Capsicum annuum L. cv. Felicitas*	Non specified	ยืดอายุการเก็บรักษา 14 วัน ชะลอด้านเนื้อสัมผัส ลดการสุก	Cheema et al. (2018)
ซองดูดซับออกซิเจน	ถุงพลาสติก LDPE	เก็บรักษาที่ 5 10 และ 15°C	Yellow bell pepper *Capsicum*	Non specified	ลดอัตราการหายใจ รักษาคุณภาพของพริกหวานนาน 28 วัน	Devgan et al. (2019)
ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล ทำจากฟิล์ม ActivePak™ และกระดาษกรองที่เอิบชุ่มด้วยเอทานอล	ถุงพลาสติก LDPE	เก็บรักษาที่ 10 และ 25°C	พริกหวานสีเขียว	Non specified	ชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ การเสื่อมเสียของวิตามิน ซี และการเปลี่ยนสี	นฤมล พิลาคุณ (2561)

ในการศึกษานี้ได้ให้ความสนใจระบบแอคทีฟประเภทซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล ซึ่งเป็นไอระเหยที่มีฤทธิ์ต้านการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ทั้งนี้ระบบแอคทีฟ นิยมใช้ในรูปของซองขนาดเล็ก หรือ sachet ซึ่งมีฟิล์มพลาสติกเป็นวัสดุของซองขนาดเล็ก ไอระเหยเอทานอลได้เกิดการเคลื่อนย้ายจากซองควบคุม ฯ มายังบรรยากาศรอบ ๆ ด้วยความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลภายในซึ่งมีตัวพา (carrier เช่น ซิลิกาเจล หรือกระดาษกรอง) ที่เอิบชุ่มด้วยเอทานอล และภายนอกซองควบคุม ฯ (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562) (ภาพที่ 2.2) การสะสมของไอระเหยเอทานอลภายในบรรจุภัณฑ์ active MAP (r^{i}_{pkhs}) เป็นผลจากสมดุลระหว่างกระบวนการสำคัญ ประกอบด้วย (1) กระบวนการปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ (r^{i}_{scfl})

(2) กระบวนการทำปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยเอทานอลและผลไม้ (r_{fr}^{i}) และ (3) กระบวนการซึมผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์ของไอระเหยเอทานอลจากภายในไปยังภายนอกบรรจุภัณฑ์ (r_{pkfl}^{i}) (Utto, 2014) (ภาพที่ 2.2) การสะสมของไอระเหยเอทานอลชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ชะลอการกระตุ้นจากเอทิลีน นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยเอทานอลและผลไม้ สามารถเพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยเฉพาะด้านกลิ่น เนื่องจากการเปลี่ยนไอระเหยเอทานอลให้เป็นสารประกอบประเภทเอสเตอร์ (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562) รายละเอียดโดยสรุปของแต่ละกระบวนการสามารถนำเสนอได้ดังนี้



ภาพที่ 2.2 แบบจำลองแนวคิดกระบวนการถ่ายโอนมวลที่สำคัญสำหรับการปล่อยไอระเหยจากซองควบคุม (ตัวอย่าง เช่น Antimold Mild®, Freund Industrial Co., Japan) มายังบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติกซึ่งบรรจุผักและผลไม้ตัดสด
ที่มา: วีรเวทย์ อุทโธ (2555)

(1) กระบวนการปล่อยไอระเหยเอทานอลจากตัวพาในซองควบคุม ฯ เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอระเหยในซองควบคุม ฯ และบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์เป็นแรงขับดันให้เกิดการปล่อยและซึมผ่านวัสดุของซองควบคุม ฯ ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการทำซองควบคุม ฯ เป็นปัจจัยในการควบคุมอัตราเร็วของการปล่อยไอระเหยเอทานอล สมบัติของวัสดุที่เกี่ยวกับอัตราการปลดปล่อย หรือค่า FPE (ดังที่กล่าวในบทที่ 1) หากวัสดุที่ใช้มีค่า FPE ที่สูง ส่งผลให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านวัสดุออกไปด้วยอัตราเร็วที่สูง ในตารางที่ 2.2 รวบรวมข้อมูลของค่า FPE ของฟิล์มที่

นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร การปล่อยไอระเหยออกจากตัวพาอาจเป็นผลมาจากกระบวนการต่าง ๆ เช่น การคายการดูดซับ (desorption) ของเอทานอลที่ถูกดูดซับไว้บนตัวพา หรือการทำปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับสารเคมีที่อยู่บนตัวพาทำให้เกิดการปล่อยไอระเหยเอทานอลออกมา

ตารางที่ 2.2 ค่า effective film permeance to ethanol vapour (FPE) ของฟิล์มพลาสติกบางประเภท

ชนิดฟิล์มพลาสติก	อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้น (mol m^{-3})	ค่า FPE (pmol m^{-2} s^{-1} Pa^{-1})
Nylon/PE	10	0.15-1.33	0.24-2.41
	25	0.25-3.17	0.30-3.01
LDPE	10	0.25-1.33	0.83-19.17
	25	0.50-3.17	2.5-20.83
PET/LLDPE	25	0.29-1.05	14.0-28.0
FF3	10	0.12-1.33	15.0×10^{4}-29.0×10^{4}
	25	0.10-3.17	57.0×10^{4}-132.9×10^{4}
ActivePAK™	10	0.10-1.33	12.5×10^{4}-18.8×10^{4}
	25	0.25-3.17	43.8×10^{4}-81.3×10^{4}

ที่มา: ดัดแปลงจาก Utto et al. (2016); พัชรี มะลิลา (2563); หทัยพร กัมพวงค์ (2560)

(2) การทำปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยเอทานอลและผลิตผล เมื่อไอระเหยเอทานอลได้ปลดปล่อยจากซองควบคุม ฯ จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยเอทานอลกับผลิตผล ส่งผลให้เกิดการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ เอทานอลทำปฏิกิริยากับเชื้อจุลินทรีย์โดยไปจับกับผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ ส่งผลให้การทำงานของเซลล์ผิดปกติ เซลล์เกิดการบวมและแตกตัว จึงทำให้การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ช้าลง (Wyrwa and Barska, 2017) ตัวอย่างผลของไอระเหยเอทานอลต่อการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ เช่น ไอระเหยเอทานอล (252-265 µL L^{-1}) สามารถชะลอการเกิดลักษณะปรากฏของเชื้อจุลินทรีย์บนผลหม่อนได้ นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาได้เพิ่มคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยเฉพาะด้านกลิ่น เนื่องมาจากผักและผลไม้สดเปลี่ยนแปลงไอระเหยเอทานอลให้เป็นสารประกอบกลุ่มเอสเตอร์ ช่วยให้กลิ่นของผลิตผลดีขึ้น (Choosung et al., 2019) ในการศึกษาของ Suzuki et al. (2004) ซึ่งได้รายงานว่า ไอระเหยเอทานอล (ความเข้มข้นเท่ากับ 25-150 µL L^{-1}) ชะลอการเปลี่ยนแปลงปริมาณของคลอโรฟิลล์โดยการชะลอการชราภาพ ในการศึกษาการบรรจุภัณฑ์ active MAP สำหรับพริกหวาน นฤมล พิลาคุณ (2561) รายงานว่า ไอระเหยเอทานอลที่ปลดปล่อยจาก

ซองควบคุม ฯ ที่ทำจากฟิล์ม Active Pak™ (ความเข้มข้นเท่ากับ 25-80 μL L^{-1}) ชะลอการสูญเสียปริมาณกรดแอสคอร์บิกได้ นอกจากนี้ Ji et al. (2021) ได้ศึกษาผลของไอระเหยเอทานอลต่อการยับยั้ง *Alternaria alternata* และ *Botrytis cinerea* ในบลูเบอร์รี่ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0±0.5°C เป็นเวลา 16 วัน โดยพบว่า ไอระเหยเอทานอล (ความเข้มข้นเท่ากับ 500 μL L^{-1}) สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ทั้งสองประเภทได้ดี ในการศึกษา Jin et al. (2013) รายงานว่าการใช้ไอระเหยเอทานอล (0.5 ml kg^{-1}) กับเมล่อน พบว่าชะลอการเปลี่ยนสีผิว การอ่อนตัวและสร้างสารเอทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสารให้กลิ่นที่ดีในผักและผลไม้ จากรายงานของ พัชรี มะลิลา (2562) ได้ใช้ซองควบคุม ฯ ที่ทำจากฟิล์ม PET/LLDPE เคลือบด้วยซิลิโคน ในบรรจุภัณฑ์มะละกอตัดแต่งพร้อมบริโภค รายงานว่าไอระเหยเอทานอล (ความเข้มข้นเท่ากับ 2.89-17.38 μL L^{-1}) ชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราได้

(3) การถ่ายโอนไอระเหยเอทานอลจากบรรจุภัณฑ์ไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอก นอกจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยเอทานอลและผลิตผลแล้ว ไอระเหยเอทานอลสามารถผ่านบรรจุภัณฑ์ของไอระเหยเอทานอลไปยังบรรยากาศรอบ ๆ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลภายในบรรจุภัณฑ์และสิ่งแวดล้อม อัตราเร็วของการซึมผ่านวัสดุบรรจุภัณฑ์ของไอระเหยเอทานอลถูกควบคุมโดยค่า FPE เช่นเดียวกับการซึมผ่านซองควบคุม ฯ ดังนั้นการเลือกใช้ฟิล์มพลาสติกเพื่อทำเป็นบรรจุภัณฑ์และซองควบคุม ฯ จึงมีความสำคัญต่อการกำหนดระดับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์

2.3 การปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ โดยความชื้น

ข้อจำกัดของซองควบคุม ฯ คือ ไอระเหยเอทานอลเกิดการเคลื่อนที่จากซองควบคุม ฯ ทันทีภายหลังจากการเตรียมซองควบคุม ฯ ส่งผลต่อความเสถียรของซองควบคุม ฯ และระยะเวลาการใช้งาน กล่าวคือ การเคลื่อนย้ายไอระเหยเอทานอลออกจากซองควบคุม ฯ อย่างต่อเนื่องอาจทำให้เอทานอลเหลือบนตัวพาไม่เพียงพอกับระยะเวลาการเก็บรักษาที่ต้องการ (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562) จากข้อจำกัดที่ได้นำเสนอข้างต้น ทำให้พิจารณาได้ว่าระบบการกระตุ้น (triggering system) ที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ภายใต้สภาวะที่ต้องการ จึงเป็นแนวทางสำคัญในการชะลอการสูญเสียไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ระบบกระตุ้นที่ใช้ในการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ เช่น แสง ultra violet (UV) ในการกระตุ้นการทำงานของวัตถุดูดออกซิเจน $ZerO_2$™ (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562 อ้างอิงจาก Rooney, 1995)

ในบรรจุภัณฑ์สำหรับผักและผลไม้สดมีความชื้นที่สูงมากประมาณ 90-99% RH ดังนั้นการประยุกต์ใช้ความชื้นเพื่อการกระตุ้นการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ จึงมีความเป็นไปได้ ทั้งนี้มีรายงานการใช้ความชื้นเป็นตัวกระตุ้น (trigger) ให้มีการปล่อยสารแอคทีฟ เช่น

1-methylcyclopropene (1-MCP) ออกจากตัวพาที่เป็นสารกลุ่ม cyclodextrin ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ที่บริเวณผิวหน้า ส่วนบริเวณด้านในเป็นส่วนประกอบที่ไม่ชอบน้ำจึงสามารถรวมกับสาร 1-MCP ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) กลไกสำคัญที่ควบคุมการปลดปล่อยสาร 1-MCP คือ ความชื้นถูกดูดซับโดยสาร cyclodextrin แล้วเข้าไปทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบในวงของ cyclodextrin ที่มีสมบัติชอบน้ำ แต่ 1-MCP ไม่เกิดการละลายน้ำ จึงเกิดการปลดปล่อยสู่บรรยากาศรอบๆ อย่างรวดเร็ว (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562; Hotchkiss et al., 2007; Ayala-Zavala et al., 2008) นอกจากนี้น้ำหรือความชื้นถูกใช้เป็นตัวกระตุ้นการปลดปล่อยสาร 1-MCP จากตัวพาประเภทสารประกอบซิลิกา หรือซิลิกาเจลซึ่งเป็นวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง สามารถดูดความชื้นที่อยู่ภายในบรรจุภัณฑ์และกักเก็บเอทานอลได้ดี เมื่อในบรรจุภัณฑ์มีความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์สูง ซิลิกาเจลจะดูดซับไอน้ำเข้าสู่โครงสร้าง จากนั้นโมเลกุลของสาร 1-MCP ที่ถูกดูดซับไว้ก่อนจึงถูกผลักออกมา (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562; Wellinghoff et al., 2003)

ปัจจุบันการใช้ไอน้ำเพื่อกระตุ้นการปล่อยไอระเหยเอทานอลยังไม่มีรายงานการพัฒนาในเอกสารอ้างอิง ดังนั้นหากขึ้นรูปซองควบคุมฯ จากฟิล์มพลาสติกประเภทชอบน้ำ (hydrophilic plastic) เช่น ethylene vinyl alcohol (EVOH) หรือ polyamide (Nylon) จึงอาจเป็นแนวทางการพัฒนาซองควบคุม ฯ ที่สำคัญ เนื้อหาในส่วนนี้ได้ทำการตรวจเอกสารเกี่ยวกับการใช้ความชื้นสูงเพื่อเป็นการกระตุ้นการปลดปล่อยสารสำคัญ (active ingredient) ที่อยู่ในโครงสร้างของฟิล์มประเภทชอบน้ำ ทั้งนี้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำฟิล์มพลาสติกชอบน้ำที่มีสารสำคัญในโครงสร้างของฟิล์ม (การนำสารสำคัญเข้าสู่โครงสร้างของฟิล์มเรียกว่า impregnation) และนำมาทดสอบการปลดปล่อยสารสำคัญจากฟิล์มภายใต้ความชื้นที่สูง ตัวอย่างของฟิล์มประเภทดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.3 ความรู้ดังกล่าวจึงน่าจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบกระตุ้นการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลด้วยการใช้ความชื้นต่อไป รายละเอียดโดยสรุปของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

ในการวิจัยและพัฒนาฟิล์มแอคทีฟประเภทฟิล์มหลายชั้น polypropylene /ethylene vinyl alcohol (PP/EVOH) โดยในชั้น EVOH มีสารแอคทีฟ คือ น้ำมันหอมระเหยออริกาโน (oregano) และ/หรือซิทรัล (citral) Muriel-Galet et al. (2013) รายงานว่าเมื่อนำฟิล์มแอคทีฟดังกล่าวไปวางบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีความชื้นสูง พบว่า เกิดการปลดปล่อยสารแอคทีฟออกมาจากฟิล์มและชะลอการเจริญของยีสต์และรา ทั้งนี้กระบวนการปลดปล่อยเกิดจากฟิล์มเกิดการดูดซับความชื้นเข้าสู่โครงสร้างของฟิล์ม ทำให้โครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มเกิดการขยายตัว ส่งผลให้สารแอคทีฟเกิดการแพร่ออกมาจากโครงสร้างได้เร็วมากขึ้น อย่างไรก็ตามฟิล์มแอคทีฟที่พัฒนาโดย Muriel-Galet et al. (2013) มีข้อจำกัดในด้านคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยเฉพาะเรื่องกลิ่นของสารแอคทีฟ กล่าวคือ น้ำมันหอมระเหยมีกลิ่นเฉพาะตัวทำให้ผู้บริโภคบางรายเข้าใจว่าน้ำมันหอมระเหยเป็นสารแปลกปลอมและไม่ปลอดภัยต่อการบริโภค ในการศึกษาของ Lan et al. (2019) รายงานว่า การเพิ่มสาร

พอลิฟีนอลจากชา (tea polyphenol; TP) ในโครงสร้างของฟิล์มแอคทีฟประเภทฟิล์ม polyvinyl alcohol (PVOH) ทำให้ฟิล์มมีฤทธิ์ในการชะลอการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย และเมื่อนำฟิล์มดังกล่าวไปหุ้มผลสตรอเบอร์รี่ทำให้เกิดการชะลอของเชื้อจุลินทรีย์ได้ เนื่องจากสตอเบอร์รีเกิดการคายน้ำทำให้ความชื้นภายในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์สูงขึ้น ฟิล์มพลาสติก PVOH ดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้างพอลิเมอร์ได้ดี แล้วทำให้เกิดการแทนที่ของสารแอคทีฟที่อยู่ในโครงสร้างฟิล์มด้วยโมเลกุลของน้ำ ส่งผลให้เกิดการแพร่ของสารแอคทีฟออกจากโครงสร้างฟิล์ม นอกจากนี้โมเลกุลน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์จึงทำให้เกิดการขยายตัวของโครงสร้างพอลิเมอร์ ดังนั้นสาร TP จึงแพร่ได้ง่ายเร็วขึ้น ทั้งนี้สาร TP ในโครงสร้างของฟิล์ม PVOH ชะลอการสูญเสียน้ำของสตรอร์เบอรี่ได้ดีกว่าฟิล์ม PVOH เพียงอย่างเดียว เนื่องจากสาร TP มีองค์ประกอบของ epigallo gallate ที่มีฤทธิ์ต้านการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญหนึ่งที่ทำให้เนื้อเยื่อเกิดบาดแผลและการสูญเสียน้ำจากเนื้อเยื่อ

ตารางที่ 2.3 ฟิล์มชอบน้ำซึ่งมีสารแอคทีฟที่มีฤทธิ์ชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์

Sachet/ฟิล์มแอคทีฟ	สารแอคทีฟ	ความชื้น (%)	เชื้อจุลินทรีย์เป้าหมาย	การควบคุมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์	อ้างอิง
LDPE/PGL	เคลือบด้วย Pyrogallol powder	Non specified	*Escherichia coli* *Staphylococcus aureus*	เกิดเคลียร์โซน	Gaikwad et al. (2019)
zein film	Ugenol Carvacrol Thymol	Non specified	*Listeria innocua* NRRL-B 33,314 *Escherichia coli*	เกิดเคลียร์โซน	Boyaci et al. (2019)
furcellaran/ gelatin films	Se-AgNPs	75 % RH	*Escherichia coli* *Staphylococcus aureus*	เกิดเคลียร์โซน E. coli (38 mm), S. aureus (22 mm) และ MRSA (26 mm)	Jamróz et al. (2019)
chitosan- thyme essential oil composite film solution	ethanol	80% RH	*Monilinia fructicola*	เกิดเคลียร์โซนบนอาหารเลี้ยงเชื้อ ขนาด 1.92 72 h/mm	Lian et al. (2020)
sweet potato starch films	potassium sorbate/ chitosan	75 % RH	*Escherichia coli, Staphylococcus aureus*	เกิดเคลียร์โซน	Shen et al. (2010)
carboxymethyl cellulose-poly vinyl alcohol-Aloe vera packaging film	Aloe vera	Non specified	S. aureus, B. cereus E. coli, S. oslo, S. weltevreden, S. dysentery, P. fluroscenes, Y. enterocolitica)	เกิดเคลียร์โซน	Kanatt and Makwana (2020)
gelatin/Polyethylene bilayer (GPB)	สารสกัดจากเปลือกทับทิม เปลือกมะละกอ และเปลือกขนุนผง	50 % RH	*B. cereus, L. monocytogenes, S. Typhimurium และ E. coli.*	เกิดเคลียร์โซน	Nur Hanani et al. (2018)
poly (vinyl chloride)	orange essential oil	Non specified	*S. aureus (ATCC 6538) and E. coli (ATCC 8739)*	เกิดเคลียร์โซน 21.6 mm และ 38.5 mm ตามลำดับ	Silva et al. (2018)

ในการวิจัยและพัฒนาฟิล์มแอคทีฟประเภท PVOH ซึ่งมีส่วนผสมของวัสดุดินเหนียวนาโน (clay nanocomposite) และสาร TP Chenwei et al. (2018) รายงานว่า ฟิล์มแอคทีฟมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ *E. coli* และ *S. aureus* และความสามารถในการยับยั้งสัมพันธ์กับปริมาณ TP ที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu et al. (2019) ที่ได้พัฒนาฟิล์มแอคทีฟจากแป้งซึ่งมีส่วนผสมของสารสกัดจากเปลือกส้มโอ (pomelo peel extracat) ร่วมกับสาร TP ผู้วิจัยรายงานว่าฟิล์มแอคทีฟนี้สามารถยับยั้งการเจริญของ *E. coli* และ *S. aureus* ได้ดี ในขณะที่ Mateo et al. (2017) ได้ศึกษาการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในข้าวโพด ผู้วิจัยรายงานว่าฟิล์มแอคทีฟประเภทฟิล์ม EVOH ซึ่งมีส่วนประกอบของน้ำมันหอมระเหยกานพูล (oregano) อบเชย (cinnamon) หรือสารสกัดน้ำมันหอมระเหย (carvacrol และ cinnamaldehyde) ชะลอการเจริญของ *A. flavus* โดยฟิล์มแอคทีฟที่มี cinnamaldehyde มีค่า Effective Dose 50% growth (ED_{50}) ที่ต่ำสุด (0.125 mg/petri plate) แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการชะลอการเจริญของเชื้อที่ดังกล่าวแม้ว่าใช้ในความเข้มข้นระดับที่ต่ำ

จากข้อมูลของการตรวจเอกสารที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า ฟิล์มพลาสติกชอบน้ำที่เพิ่มสารสำคัญมีศักยภาพชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี ฟิล์มพลาสติกชอบน้ำที่กล่าวมาข้างต้นดูดซับความชื้นเข้าสู่โครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มได้ง่าย ความชื้นที่เพิ่มขึ้นน้ำถูกดูดซับมากขึ้นและทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ ส่งผลให้โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดความยืดหยุ่นหรือโครงสร้าง/ปริมาตรอิสระเกิดการขยายสารสำคัญที่อยู่ภายในโมเลกุลจึงแพร่ผ่านฟิล์มในอัตราที่เร็วขึ้น (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562) จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำฟิล์มชอบน้ำมาใช้ประโยชน์เป็นส่วนหนึ่งของซองควบคุม ฯ

2.4 สรุปประเด็นสำคัญ

การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์เป็นสาเหตุสำคัญของเสื่อมเสียหลังการเก็บเกี่ยวของผลิตผล ระบบบรรจุภัณฑ์แอคทีฟจึงเป็นแนวทางชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ การใช้ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลเป็นระบบแอคทีฟสำคัญของการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟหรือการบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแอคทีฟสำหรับชะลอ/ควบคุมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในผักและผลไม้ ทั้งนี้การพัฒนาวัสดุของซองควบคุม ฯ ที่สามารถปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเป็นแนวทางในการรักษาเสถียรภาพของซองควบคุม ฯ ก่อนทำการใช้งาน โดยหากมีการใช้ฟิล์มที่ชอบน้ำจะทำให้สามารถใช้ความชื้นหรือไอน้ำได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นการปล่อยสารแอคทีฟออกจากระบบแอคทีฟทั้งในรูปซองขนาดเล็กและ/หรือฟิล์ม ในบทต่อไปได้นำเสนอเนื้อหาเกี่ยวกับระเบียบวิธีวิจัยที่จะได้นำมาใช้ในการศึกษานี้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้ได้นำเสนอภาพรวมของการดำเนินการวิจัย ประกอบด้วย วัตถุดิบ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่สำคัญ สารเคมี วิธีการศึกษาที่เกี่ยวกับงานวิจัย โดยเฉพาะการพัฒนาฟิล์มแอคทีฟมีสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์ม ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับความชื้นที่อยู่รอบฟิล์ม รายละเอียดของบทนี้แสดงในหัวข้อต่าง ๆ ต่อไป

3.1 วัตถุดิบ

3.1.1 พริกหวานที่คัดเลือกและซื้อจากห้างสรรพสินค้าแมคโคร สาขาวารินชำราบ อ. วารินชำราบ จ. อุบลราชธานี โดยควบคุมความบริบูรณ์ ลักษณะปรากฏ และ น้ำหนัก 140-170 กรัมต่อผล

3.1.2 ฟิล์มพลาสติก LDPE มีความหนาเท่ากับ 30 µm โดยมีสมบัติการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำ ดังนี้ O_2 transmission rate (OTR) CO_2 transmission rate (CTR) และ water vapour transmission rate (WVTR) เท่ากับ 2,500 ml m^{-2} day^{-1} 13,500 ml m^{-2} day^{-1} และ 8 g m^{-2} day^{-1} ตามลำดับ

3.1.3 ฟิล์มพลาสติก EVA (ตราสินค้า Heat n bond ultrahold iron-on adhesive) ความหนาเท่ากับ 154.50 µm สมบัติด้าน OTR CTR และ WVTR เท่ากับ 2,256.00 ml m^{-2} day^{-1} 8,181.24 ml m^{-2} day^{-1} และ 15.0 g m^{-2} day^{-1} ตามลำดับ

3.1.4 ฟิล์มลามิเนต Nylon/PE ความหนาเท่ากับ 83.67 µm สมบัติด้าน สมบัติด้าน OTR CTR และ WVTR เท่ากับ 28.88 ml m^{-2} day^{-1} 181.44 ml m^{-2} day^{-1} และ 5.29 g m^{-2} 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

3.2.4 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 เครื่อง 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

3.2.9 เครื่องวัด RH Mini data logger (Testo, Germany)

3.2.10 เครื่อง Turbo air pump รุ่นTwin MEGA 8000 (Twin, China)

3.3 สารเคมี (Chemical)

3.3.1 Ethanol: C_2H_5OH 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 Labolatories Pvt. Ltd., India)

3.3.4 Plate Count Agar (PCA) (HiMedia Labolatories Pvt. Ltd., India)

3.3.5 Peptone Water (HiMedia Labolatories Pvt. Ltd., India)

3.3.6 Sodium Chloride: NaCl (Elago Enterprises Pvt. Ltd., Australia)

3.3.7 Magnesium Nitrate: $Mg(NO_3)_2$ (LOBA Chemie Pvt. Ltd., India)

3.3.8 Magnesium Chloride: $MgCl_2$ (LOBA Chemie Pvt. Ltd., India)

3.3.9 2, 6-dichlorophenolindophenol sodium salt: $O:C_6H_2Cl_2:NC_6H_4ONa$ (Ajax Finechem Pvt. Ltd., Australia)

3.3.10 Trichloroacetic acid: CCl_3COOH (Panreac Applichem, Spain)

3.3.11 Ascorbic acid: $C_6H_8O_6$ (Elago Enterprises Pvt. Ltd., Australia)

3.3.12 Sodium bicarbonate: $NaHCO_3$ (Ajax Finechem Pvt. Ltd., Australia)

3.3.13 Sodium Hydroxide: NaOH (Ajax Finechem Pvt. Ltd., Australia)

3.3.14 Phenolphthalein: $C_{20}H_{14}O_4$ (Ajax Finechem Pvt. Ltd., Australia)

3.3.15 Potassium phthalate: $KHC_8H_4O_4$ (Carlo ERBA Reagents, France)

3.4 วิธีดำเนินการ

3.4.1 การเตรียมฟิล์มแอคทีฟสำหรับทำซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล

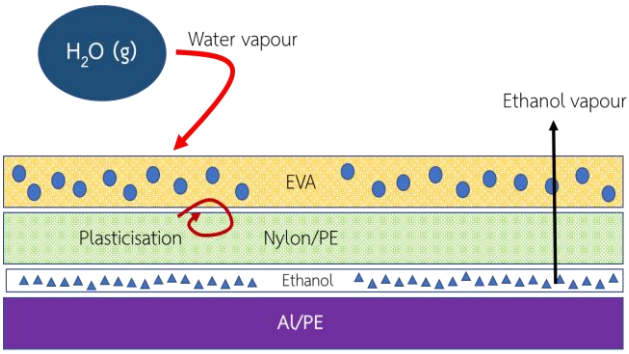
ดังที่ได้นำเสนอในบทที่ 1 ว่าการวิจัยนี้ได้พัฒนาฟิล์มแอคทีฟซึ่งสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์ม (หรือค่า FPE) ของฟิล์ม มีการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับความชื้นในบรรยากาศรอบ ๆ ฟิล์ม (จุดประสงค์หลักคือ ค่า FPE มีการเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความชื้นของสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น) ในการพัฒนาฟิล์มแอคทีฟจึงได้ใช้ฟิล์มพลาสติกที่ชอบน้ำหรือมีสมบัติ hydrophilic โดยเลือกใช้ฟิล์มพลาสติก 2 ประเภท ประกอบด้วย (1) เอทิลีนไวนิลอะซีเตท (ethylene vinyl acetate: EVA) ซึ่งมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำมีค่าที่ลดลง เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้างของฟิล์มทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ (Brandelero et al., 2010) นอกจากนี้ฟิล์ม EVA มีสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (tie) ด้วยความร้อน (heat-sealable) ได้ดี (Sonia and Dasan, 2013) และ (2) ฟิล์มหลายชั้น Nylon/PE ซึ่งชั้นฟิล์ม Nylon (polyamide หรือ PA) มีสมบัติ hydrophilic เช่นเดียวกับฟิล์ม EVA แนวคิดการพัฒนาฟิล์มแอคทีฟสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

3.4.1.1 จากงานวิจัยของพัชรี มะลิลา (2558) พบว่า ฟิล์มพลาสติก Nylon/PE มีค่า FPE ที่ต่ำ เมื่อนำฟิล์มมาทำซองควบคุม ฯ ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลในอัตราเร็วที่ต่ำ โดยเฉพาะเมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 10°C พัชรี มะลิลา (2558) รายงานว่าซองควบคุม ฯ ที่ทำจากฟิล์มพลาสติก Nylon/PE ชะลอการปลดปล่อยได้ประมาณ 1-2 ชั่วโมง นอกจากนี้ชั้นฟิล์มพลาสติก Nylon มีสมบัติเป็น hydrophilic จึงมีความเป็นไปได้ในการเพิ่มขึ้นของค่า FPE เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุของซองควบคุม ฯ สำหรับการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟของผักและผลไม้ที่ภายในบรรจุภัณฑ์มีความชื้นที่สูงมาก (90-95% RH) อย่างไรก็ตามระยะเวลาการชะลอการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ที่ทำจากฟิล์มพลาสติก Nylon/PE ยังอยู่ในเพียงช่วง 1-2 ชั่วโมง ภายหลังจากเตรียมซองควบคุม ฯ แล้วเสร็จ ระยะเวลาดังกล่าวค่อนข้างสั้นและอาจทำให้ผู้ผลิตต้องรีบทำการบรรจุซองควบคุม ฯ ลงในบรรจุภัณฑ์ก่อนซองควบคุม ฯ จะเริ่มปลดปล่อยไอระเหยเอทานอล

3.4.1.2 เมื่อพิจารณาข้อมูลของฟิล์มพลาสติก Nylon/PE ข้างต้น ทำให้เกิดแนวคิดของการลดค่า FPE ของฟิล์ม Nylon/PE ลงโดยทำเชื่อมประกบกับฟิล์มพลาสติก (ทำให้เป็นฟิล์มหลายชั้น) เนื่องจากการเพิ่มชั้นฟิล์มเป็นการเพิ่มความหนา ซึ่งส่งผลให้อัตราเร็วของการซึมผ่านมีค่าลดลงตามกฎการแพร่ของฟิกก์ (Fick's law of diffusion) ผู้วิจัยจึงได้เลือกฟิล์มพลาสติก EVA ซึ่งมีสมบัติ hydrophilic และเชื่อมประกบติดกับฟิล์มพลาสติก Nylon/PE ได้ง่ายโดยการใช้ความร้อน (รายละเอียดของการเชื่อมประกบแสดงในหัวข้อต่อไป) ทั้งนี้ผู้วิจัยคาดคะเนว่าฟิล์มหลายชั้นที่มีส่วนประกอบของฟิล์มพลาสติก EVA และ Nylon/PE มีความสามารถในการชะลอการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอล เนื่องจากมีฟิล์มที่หนาขึ้น (แม้ว่ามีความหนาเพิ่มแต่ฟิล์มยังคงลักษณะการอ่อนตัว

และเชื่อมประกบทำซองควบคุม ฯ ได้) และอัตราการปลดปล่อยมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นในบรรยากาศรอบ ๆ ฟิล์มมีค่าที่สูงขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์มพลาสติกทั้งสองและความชื้น ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์พลาสติไซเซชัน

3.4.1.3 ลำดับของฟิล์มในฟิล์มหลายชั้น พิจารณาจากด้านนอกสุดซึ่งเป็นด้านที่สัมผัสกับอากาศไปยังภายในที่สัมผัสกับตัวพา เมื่อทำเป็นซองควบคุม ฯ คือ EVA/Nylon/PE (ผู้วิจัย เรียกฟิล์มหลายชั้นนี้ว่าฟิล์ม ENP) (ภาพที่ 3.1) สาเหตุที่นำฟิล์มพลาสติก EVA มาไว้ด้านนอกสุดเนื่องจากฟิล์มพลาสติก EVA ทำปฏิกิริยากับความชื้นได้ง่ายจึงคาดว่าเกิดการขยายตัวของปริมาตรอิสระภายในโครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มพลาสติก EVA ส่งผลให้โมเลกุลของเอทานอลที่ซึมผ่านจากชั้นพอลิเมอร์ Nylon เกิดการเคลื่อนที่ผ่านชั้นพอลิเมอร์ EVA ได้เร็วมากขึ้น ทั้งนี้จากการศึกษาของพัชรี มะลิลา (2558); นิตยา ภูงาม (2556) พบว่า แม้ฟิล์มพลาสติก Nylon/PE มีสมบัติ hydrophilic แต่ผลของความชื้น (ในช่วง 60-90% RH) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า FPE หรือสมบัติการยอมให้แก๊ส O_2 ซึมผ่านนั้นไม่ชัดเจน อาจเป็นผลจากฟิล์มพลาสติก Nylon/PE ที่จำหน่ายเชิงการค้ามีการเคลือบผิวหน้า (surface coating/varnishing) ด้วยสารเคลือบผิวที่ลดการขีดข่วน หรือการฉีกขาด ดังนั้นสารเคลือบผิวจึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ลดสมบัติ hydrophilic ของฟิล์มพลาสติก Nylon/PE ได้ จากข้อมูลข้างต้นผู้วิจัยจึงคาดคะเนว่าความชื้นทำปฏิกิริยากับชั้นฟิล์มพลาสติก EVA แล้วส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างพอลิเมอร์ ในขณะที่โมเลกุลของน้ำบางส่วนเกิดการเคลื่อนที่จากชั้นพอลิเมอร์ EVA ไปยังชั้นพอลิเมอร์ Nylon แล้วส่งผลให้เกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ Nylon กับโมเลกุลของน้ำ (แม้ว่าระดับการเกิดปฏิกิริยาจะน้อยกว่าการเกิดกับพอลิเมอร์ EVA)



ภาพที่ 3.1 แบบจำลองแนวคิดของฟิล์มหลายชั้นที่มีส่วนประกอบของฟิล์ม EVA และฟิล์มพลาสติก Nylon/PE หรือเรียกฟิล์มหลายชั้นนี้ว่าฟิล์มพลาสติก ENP

จากแนวคิดของการพัฒนาฟิล์มแอคทีฟที่นำเสนอข้างต้น (ภาพที่ 3.1) ผู้วิจัยได้นำมาเป็นแนวทางของการพัฒนาฟิล์มที่ใช้ในการทำซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล ขั้นตอนโดยสรุปของการพัฒนาฟิล์มแสดงในภาพที่ 3.2 และมีรายละเอียดโดยสรุปดังต่อต่อไปนี้

(1) นำฟิล์มพลาสติก Nylon/PE วางบนแผ่นรองซึ่งเป็นกระดาษ จากนั้นวางฟิล์มพลาสติก EVA (ซึ่งเป็นด้านที่ลอกกระดาษปะหน้าออกแล้วด้านหนึ่ง) บนฟิล์มพลาสติก Nylon/PE

(2) ใช้เตารีดที่มีอุณหภูมิ 110°C รีดบนฟิล์มพลาสติก EVA (ด้านที่มีแผ่นกระดาษติดบนผิวหน้า) เป็นเวลา 3 นาที ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที

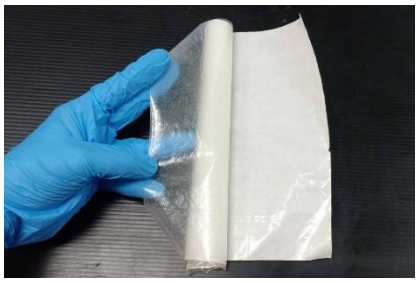
(3) จากนั้นนำฟิล์มพลาสติก ENP เก็บในถุงอะลูมิเนียมฟลอยด์จนกว่าจะใช้งาน ทั้งนี้ก่อนนำฟิล์มพลาสติก ENP ไปใช้ ผู้วิจัยได้ลอกกระดาษไขที่ติดอยู่ด้านหนึ่งของฟิล์มออกก่อน

1. วางฟิล์ม Nylon/PE บนแผ่นรอง

2. วางฟิล์ม EVA บนฟิล์ม Nylon/PE

3. วางกระดาษทับ แล้วใช้เตารีด รีดเป็นเวลา 3 นาที

4. ปล่อยให้เย็น 30 วินาที



5. ก่อนนำไปใช้ลอกกระดาษไขออก

6. ฟิล์มที่พัฒนาขึ้นใช้ชื่อย่อว่า ENP

ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนของการเตรียมฟิล์มแอคทีฟ ด้วยการทำฟิล์มหลายชั้นที่เกิดจากการประกบกันระหว่างฟิล์มพลาสติก EVA และฟิล์มพลาสติก Nylon/PE

3.4.2 การเตรียมซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล

การเตรียมซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล (ภาพที่ 3.3) ได้ประยุกต์ใช้วิธีที่รายงานโดย พัชรี มะลิลา (2562) ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล ประกอบด้วย (1) ฟิล์มพลาสติกด้านหน้าที่เป็นฟิล์มพลาสติก LDPE หรือ EVA หรือ ENP (2) ฟิล์มพลาสติกด้านหลังของซองควบคุม ฯ ซึ่งเป็นฟิล์มพลาสติก Al/PE (3) กระดาษกรองเบอร์ 1 (Whattman™, China) ขนาด 5×5 cm ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวพาเอทานอลเหลว โดยกระดาษกรองที่ใช้งานได้ถูกทำให้เอิบชุ่มด้วยเอทานอลเหลว 99.9% (v/v) (ปริมาตรเท่ากับ 0.2 ml) ขั้นตอนการเตรียมซองควบคุม ฯ สรุปได้ดังนี้

(1) วางฟิล์มประเภทชอบน้ำคือ EVA และฟิล์ม ENP บนฟิล์ม Al/PE เป็นส่วนที่อยู่ด้านหลัง ฟิล์มเหล่านี้มีขนาด 6×6 cm

(2) ทำการปิดผนึกด้วยความร้อน 3 ด้าน (3-side-seal) จากนั้นนำกระดาษกรองใส่ในซองควบคุม ฯ แล้วเติมเอทานอล และปิดผนึกด้วยความร้อนด้านที่เหลือจนครบทั้ง 4 ด้าน (4-side-seal)

(3) หลังจากเตรียมเสร็จแล้วนำไปทดสอบจลนพลศาสตร์ของการปล่อยไอระเหยเอทานอลในการทดลองถัดไป (หัวข้อ 3.4.3)

แผ่นฟิล์มด้านหน้าเป็นพลาสติกชอบน้ำเช่น EVA

แผ่นฟิล์มด้านหลังจากฟิล์มอะลูมิเนียมลามิเนต (Al/PE)

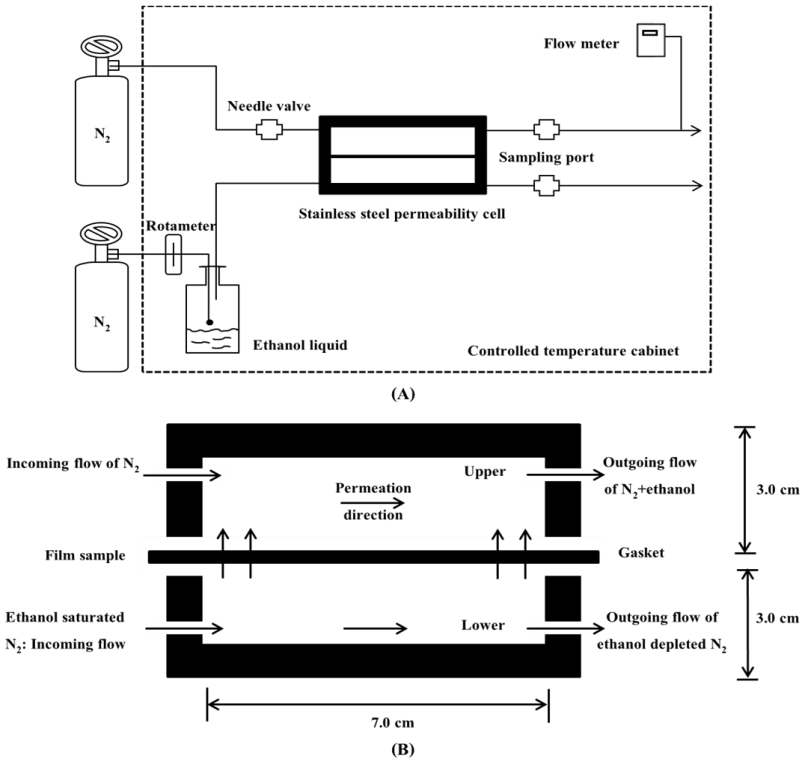
ภาพที่ 3.3 ตัวอย่างของซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล
ที่มา: ดัดแปลงจากพัชรี มะลิลา (2558)

3.4.3 การศึกษาสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์มพลาสติกที่แปรผันตามความชื้นสัมพัทธ์

ในการศึกษาสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์มพลาสติก (film permeance to ethanol vapor หรือ FPE) ของฟิล์ม EVA และฟิล์ม ENP (EVA/Nylon/PE) ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C และความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลอย่างน้อย 3 ระดับ โดยวิธีการศึกษานี้ได้ประยุกต์มาจากวิธีของพัชรี มะลิลา (2558) ซึ่งเป็นการวัดในระบบ isostatic ซึ่งใช้

permeability cell ที่ทำจากวัสดุสแตนเลส (ภาพที่ 3.4) ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนหลัก (compartment) ที่มีขนาดที่เท่ากัน คือ ส่วนบน (upper cell) และส่วนล่าง (lower cell) เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในและด้านนอกของทั้ง upper cell และ lower cell เท่ากับ 7 และ 10 cm ตามลำดับ ในแต่ละส่วนมีช่องเก็บตัวอย่างซึ่งเป็น Union stainless tube fitting ขนาด ¼ นิ้ว (Swagelok®, US) ที่เชื่อมต่อเข้ากับ cell ด้านที่เก็บตัวอย่างของ port ได้ปิดกันรั่วด้วย septum ทั้งนี้การจัด permeability cell เพื่อเชื่อมต่อกับแหล่งไอระเหยเอทานอลและแก๊ส N_2 ตลอดจนทิศทางการซึมผ่านของไอระเหยเอทานอลแก๊ส N_2 ใน permeability cell ดังแสดงในแผนภาพ (diagram) (ภาพที่ 3.5A)

ภาพที่ 3.4 Stainless steel cell ใช้ในการวัด Film permeance to ethanol vapour (FPE)
ที่มา: พัชรี มะลิลา (2558; อ้างอิงจาก Utto, 2008)



ภาพที่ 3.5 การจัดวาง (Settings) ของ permeability cell สำหรับการวัด FPE ของฟิล์ม ENP ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ในระดับที่แตกต่างกัน (A) และภาพตัดหลักการทำงานของ permeability cell (B)

ที่มา: พัชรี มะลิลา (2558; อ้างอิงจาก Utto, 2008)

การจัดวาง (settings) แผ่นฟิล์มพลาสติกเพื่อวัดค่า FPE แสดงในภาพที่ 3.4 และภาพที่ 3.5 ทำโดยวางแผ่นพลาสติกในแนวระหว่างส่วน upper cell และ lower cell โดยมีแผ่นประเก็นยางวางรองติดกันกับ cell ทั้งสองด้านก่อนเพื่อกันการรั่ว จากนั้นทำการกดให้ทั้งสองส่วนปิดทับกัน เมื่อทำการปิด permeability cell แล้ว ผู้วิจัยได้เชื่อมต่อส่วน lower cell กับส่วนผลิตไอระเหยเอทานอลด้วยท่อพลาสติกไนลอนขนาด ¼ นิ้ว ไอระเหยเอทานอลเกิดจากการเป่าแก๊ส N_2 ลงในเอทานอลบริสุทธิ์ (99.9% V/V) ในหลอดแก้วขนาด 2.5 L (หรือเรียกว่า ระบบ liquid-bubbling system) ที่มีการใช้เครื่องควบคุมความเร็วลม (rotameter) เพื่อปรับและควบคุมความเร็วของแก๊ส N_2 ให้อยู่ในช่วง 10-60 ml min^{-1} ในส่วนของ upper cell นั้นได้เชื่อมต่อกับแหล่งแก๊ส N_2 (99.9% V/V) ด้วยท่อพลาสติก Nylon ขนาด ¼ นิ้ว ทั้งนี้ความเร็วของแก๊ส N_2 ได้กำหนดและควบคุมไว้ที่ 60 ml min^{-1} ด้วยการใช้เครื่องควบคุมความเร็วลม ในการศึกษา FPE ค่าความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่อยู่ในทั้ง upper cell และ lower cell ได้ทำการวัดอย่างต่อเนื่องตามวิธีที่รายงานโดยพัชรี มะลิลา (2562) โดย

ผู้วิจัยได้เก็บตัวอย่างจาก sampling port และนำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FID-GC ดังที่ใช้กับการวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในการศึกษาจลนพลศาสตร์ (หัวข้อ 3.4.4)

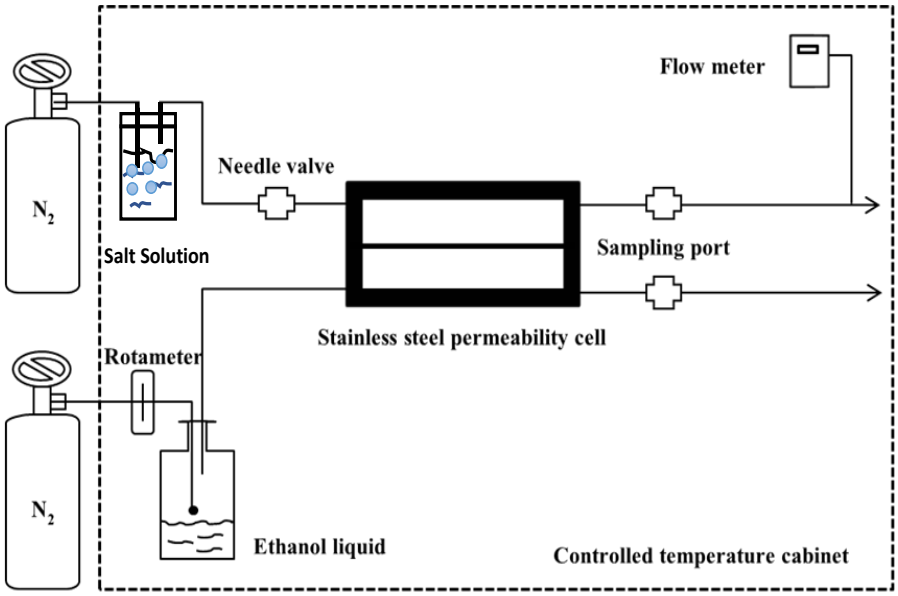
วิธีการวัดค่า FPE แบบ isostatic นี้เป็นการศึกษาในสภาวะที่ไม่มีความชื้น (≈0% RH) เนื่องจากได้ใช้แก๊ส N_2 ในทั้ง upper cell และ lower cell ในการวิจัยนี้ได้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของความชื้นต่อค่า FPE ดังนั้นการเพิ่มความชื้นเข้าสู่การจัดวางของระบบที่แสดงในภาพที่ 3.6 จึงได้ดำเนินการขึ้น และมีรายละเอียดโดยสรุปดังต่อไปนี้

ผู้วิจัยได้ทำการเชื่อมต่อส่วน upper cell กับแหล่งของแก๊ส N_2 ที่มีความชื้น 3 ระดับ ประกอบด้วย 60-75 % 80-89% และ 90-99% RH โดยการเป่าแก๊ส N_2 ลงในสารละลายเกลือ $MgCl_2$ $Mg(NO_3)_2$ (ตารางที่ 3.1) และน้ำกลั่น ตามลำดับ โดยใช้ท่อพลาสติก Nylon ขนาด ¼ นิ้ว (ภาพที่ 3.6) และควบคุมความเร็วของแก๊ส N_2 ไว้ที่ 60 ml min^{-1} ด้วยเครื่องควบคุมความเร็วลม ทั้งนี้การเชื่อมต่อระหว่างส่วน lower cell กับแหล่งกำเนิดไอระเหยเอทานอลยังคงดำเนินการเหมือนเดิมตามรายละเอียดที่นำเสนอข้างต้น

ตารางที่ 3.1 ความชื้นสัมพัทธ์ (% RH) ของสารละลายเกลือ

การเตรียมสารละลายเกลือ	ความชื้นสัมพัทธ์ (% RH)	
	ค่าทางทฤษฎี	ค่าที่วัดได้จริง[1]
$Mg(NO_3)_2$ 120 g : Water 18 ml	52.86	57.63 - 85.28
$MgCl_2$ 120 g : Water 15 ml	32.73	41.67 - 66.50

[1]ข้อมูลในตารางข้างต้น พบว่า ค่าของระดับ RH ที่วัดโดยเครื่องวัด RH (เปรียบเทียบแล้ว) เห็นได้ชัดว่ามีค่าสูงกว่าค่าทางทฤษฎี ผู้วิจัยสันนิษฐานว่าความเบี่ยงเบนดังกล่าวส่วนใหญ่เกิดจากการผสมระหว่างกระแสลมที่เกิดจากสารละลายเกลือกับอากาศที่มีอยู่ภายในถุงจากผลเบื้องต้น แม้ว่าอากาศภายในถุงจะถูกดูดก่อนที่จะมีนำอากาศที่มีความชื้นต่าง ๆ จากการใช้สารละลายเกลือ แต่ระดับ RH ที่วัดได้ภายในถุงก็ยังคงสูงกว่าค่าทางทฤษฎี ไม่ว่าจะใช้สุญญากาศหรือไม่ใช้สุญญากาศกับถุงก็ไม่ได้ให้ระดับ RH ที่แตกต่างกัน



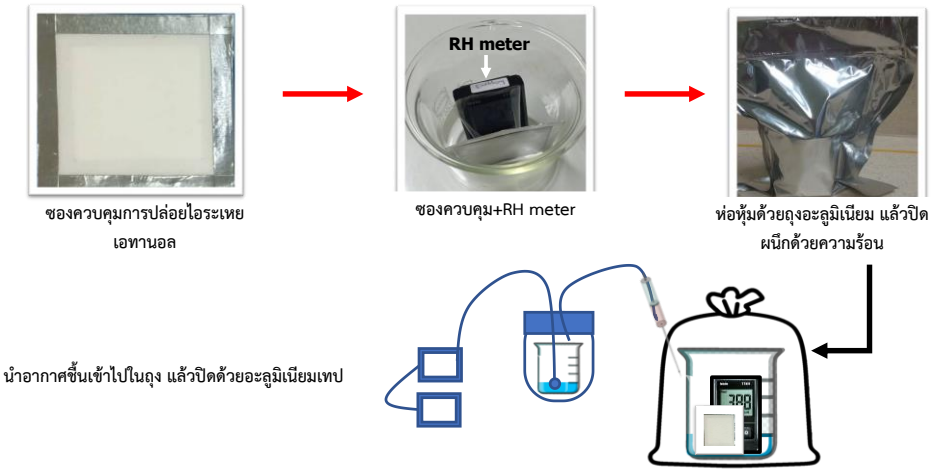
ภาพที่ 3.6 การเพิ่มระดับความชื้นสัมพัทธ์บน upper cell ของ permeability cell สำหรับการวัด FPE ของฟิล์ม

ที่มา: ดัดแปลงจากพัชรี มะลิลา (2558; อ้างอิงจาก Utto, 2008)

จากการศึกษาการวัดค่า FPE ด้วยวิธี isostatic พบว่า ระบบ liquid-bubbling system สามารถผลิตไอระเหยเอทานอลซึ่งมีความเข้มข้นประมาณครึ่งหนึ่งของความเข้มข้นที่อิ่มตัว (saturated vapor concentration) ข้อจำกัดดังกล่าวเกิดจากหลอดที่ใช้กำเนิดฟอง (bubbling tube) มีขนาดเล็กและจำนวนไม่มากพอ ดังนั้นการวัดค่า FPE ที่ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่ระดับอิ่มตัว จึงใช้วิธีการวัดแบบ gravimetric ตามวิธีที่รายงานใน พัชรี มะลิลา (2558) ซึ่งมีวิธีการโดยสรุปดังต่อไปนี้ นำซิลิกาเจล (silica gel grad 40 -of 6-12 mesh บริษัท Sigma-Aldrich, US) ที่อิ่มตัวด้วยเอทานอลเหลว (ทำการกรองเอทานอลเหลวส่วนเกินออก) บรรจุในซองขนาดเล็ก (sachet) และทำการปิดผนึกซอง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักพร้อมกับบันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซองขนาดเล็ก น้ำหนักที่ลดลงของซอง เกิดจากการซึมผ่านฟิล์มวัสดุของไอระเหยเอทานอล การชั่งน้ำหนักได้ดำเนินการจนกว่าการลดลงของน้ำหนักซองขนาดเล็กได้เข้าสู่สภาวะคงที่ (steady-state transmission rate) จากนั้นนำข้อมูลของฟิล์มประกอบด้วยความหนา และพื้นที่ผิวของซองขนาดเล็กมาคำนวณเป็นค่า FPE ต่อไป การวัดค่า FPE ด้วยวิธี gravimetric ดำเนินการที่อุณหภูมิ 10°C ตู้เย็นภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 60-99% RH

3.4.4 การศึกษาผลของระดับความชื้นต่อจลนพลศาสตร์ของการปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล

ในการศึกษานี้ได้ผลของระดับความชื้นต่อจลนพลศาสตร์ของการปล่อยไอระเหยเอทานอล (ethanol vapor release kinetic) จากซองควบคุม ฯ โดยประยุกต์วิธีที่นำเสนอในวีรเวทย์ อุทโธ และคณะ (2555) ซึ่งเป็นการปล่อยไอระเหยเอทานอลในระบบปิด โดยนำซองควบคุม ฯ ที่เตรียมเสร็จแล้วใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร (1 ซองต่อบีกเกอร์) แล้วนำบีกเกอร์บรรจุลงในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์และปิดผนึกถุง การวิจัยนี้ได้ศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C โดยมีความชื้นที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 3 ระดับ ประกอบด้วย 60-75% 80-89% และ 90-99% RH การสร้างสภาวะความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์ถุงอะลูมิเนียมทำได้โดยการเติมอากาศด้วยปั๊ม (Turbo air pump รุ่น Twin MEGA 8000) เข้าสู่สารละลายเกลือ (ตารางที่ 3.1) ดังแสดงในภาพที่ 3.7 ความเร็วลมของอากาศที่เข้าสู่สารละลายเท่ากับ 130 ml min^{-1} ฟองอากาศที่เกิดขึ้นในสารละลายเกลือได้ระเหยเข้าสู่ช่องว่างในภาชนะบรรจุเหนือสารละลายเกลือ และเคลื่อนที่ต่อไปยังท่อพลาสติกไนลอนที่เชื่อมติดกับฝาของภาชนะด้วยกาวร้อนและวัสดุซิลิโคนเพื่อป้องกันการรั่ว ปลายด้านหนึ่งของท่อพลาสติกเชื่อมติดกับหัวเข็ม (needle) จากนั้นใช้เข็มทิ่มเข้าไปในบรรจุภัณฑ์และทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบตามเวลาผู้วิจัยได้ดึงเข็มออกและปิดรูที่เกิดขึ้นด้วยเทปกาวอะลูมิเนียมเทป การศึกษานี้ได้ทำการวัดความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิภายในระบบปิดระหว่างการเก็บรักษาด้วยเครื่อง Mini data logger (Testo, Germany) ทั้งนี้ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่ปลดปล่อยจากซองควบคุม ฯ และสะสมในบรรจุภัณฑ์ได้ทำการวิเคราะห์ในช่วงเวลาต่าง ๆ ของการเก็บรักษาด้วยเครื่อง FID-Gas Chromatogram ตามวิธีที่รายงานโดย พัชรี มะลิลา (2562) การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการปล่อยไอระเหยเอทานอลในแต่ละระดับของความชื้นได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลกับเวลาด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ เช่น fractional first order kinetic model โดยประยุกต์การใช้ non-linear regression ซึ่งจะใช้ค่า root mean square error (RMSE) ที่มีค่าน้อยกว่า 2 (Yang and Chinnan, 1988) เป็นตัวชี้ว่าค่าความเข้มข้นที่ทำนายโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ (predicted data) สามารถเป็นตัวแทนที่ดีของค่าซึ่งได้จากการทดลอง (empirical data)



ภาพที่ 3.7 การเพิ่มระดับความชื้นในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ถุงอะลูมิเนียม โดยสารละลายเกลือ

3.4.5 การทดสอบการดูดซับความชื้นของฟิล์มพลาสติกที่สัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์

การศึกษาการดูดซับความชื้นของฟิล์มพลาสติก Nylon/PE ฟิล์มพลาสติก EVA และฟิล์มพลาสติก ENP ได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 10°C ในระบบปิด แสดงในภาพที่ 3.8 (บรรจุภัณฑ์ขวดพลาสติกแข็งปิดด้วยฝาเกลียวขนาด 1 L) ในระบบปิดมีการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ โดยการใช้ใส่สารละลายเกลือปริมาณ 40 ml (อ้างถึงรายละเอียดของสารละลายเกลือในตารางที่ 3.1) ในบรรจุภัณฑ์ขวด จากนั้นนำตัวอย่างฟิล์มทั้งสามชนิดขนาด 1×3 cm ซึ่งมีการเจาะรูที่ปลายด้านหนึ่งของฟิล์มพลาสติกด้วยเข็มที่ให้ความร้อนแล้วทำการนำแผ่นฟิล์มที่เจาะรูไปแขวนไว้กับเหล็กตะขอที่ติดอยู่บนฝาขวดด้านใน แล้วทำการปิดฝาให้สนิท ภายหลังจากนั้นทำบันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของฟิล์มทั้งสามชนิดทุก ๆ 2 วัน จนน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำข้อมูลของฟิล์มมาคำนวณอัตราส่วนของผลต่างของน้ำหนักฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละวันต่อน้ำหนักฟิล์มวันที่ 0 ($\Delta W/W_{day0}$) โดยผลต่างที่คำนวณได้คือ น้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้างของฟิล์ม

ภาพที่ 3.8 การทดสอบการดูดซับความชื้นของฟิล์มพลาสติก Nylon/PE ฟิล์ม EVA และฟิล์ม ENP ที่อุณหภูมิ 10°C

การศึกษานี้ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์และความสามารถในการดูดซับความชื้นของฟิล์มพลาสติกด้วยการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ ดังแสดงในสมการ (1) จากผลการศึกษาในเบื้องต้นพบว่า น้ำหนักสูงสุดของน้ำที่ถูกดูดซับเข้าในฟิล์มสัมพันธ์กับระดับของความชื้นสัมพัทธ์แบบเอกซ์โปเนนเชียล (exponential relationship) ซึ่งรูปสมการโดยทั่วไปของแบบจำลองคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์แบบเอกซ์โปเนนเชียล คือ

$$A_{film,sat}^{uptk} = k_{film}^{uptk} \exp\left(b_{film}^{uptk} \cdot RH\right) \quad (1)$$

โดยที่

$A_{film,sat}^{uptk}$ = การดูดซับไอน้ำของฟิล์ม ซึ่งฟิล์มดูดซับไอน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ตามที่กำหนด (g g^{-1})

k_{film}^{uptk} = ค่าสัมประสิทธิ์ exponential model (g g^{-1})

b_{film}^{uptk} = ค่าสัมประสิทธิ์ exponential model (dimensionless)

RH = ความชื้นสัมพัทธ์ (% RH หรือ g g^{-1})

3.4.6 การวัดสมบัติด้านการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของแก๊ส O_2 และไอน้ำ

นอกจากนี้จะได้ศึกษาสมบัติด้านอื่น ๆ เช่น oxygen และ water vapour transmission rate (OTR และ WVTR) ของฟิล์มพลาสติก EVA และ ENP ด้วยเครื่องมือที่ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลาสติก ศูนย์โลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) โดยมีรายละเอียดโดยสรุปของการวัดค่าของสมบัติทั้ง 2 ดังแสดงต่อไปนี้

3.4.6.1 อัตราการซึมผ่านฟิล์มของแก๊สออกซิเจน (oxygen transmission rate ; OTR)

การทดสอบอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน หรือ OTR ของฟิล์มจากพัฒนาขึ้นได้ดำเนินการโดยใช้เครื่อง Illinois instrument รุ่น 8000 ใช้สภาวะในการทดสอบ ณ อุณหภูมิ 23°C และความชื้น 0% RH (ASTM D3985) ซึ่งได้ทำการวัดค่า OTR ของตัวอย่าง ณ ห้องปฏิบัติการศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ หลักการการทดสอบการวิเคราะห์แบบมาโนเมตริกเป็นการวิเคราะห์โดยอาศัยความแตกต่างของความดันที่ผิวหน้าทั้งสองด้านของฟิล์มและแก๊สซึ่งซึมผ่านจากด้านที่มีความดันสูงไปยังด้านที่มีความดันต่ำ โดยการวัดการซึมผ่านที่เกิดขึ้นทำได้หลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนโดย Coulometric senser ทำการวัดภายใต้สภาวะการทดสอบที่แห้ง ซึ่งตัวอย่างถูกทดสอบในสภาวะปิดที่มีความดันบรรยากาศด้านหนึ่งของฟิล์มเป็นแก๊สออกซิเจน ส่วนอีกด้านหนึ่งเป็นแก๊สตัวพา คือ แก๊สไนโตรเจน และรายงานผลเป็นค่า oxygen transmission rate (OTR; หน่วย คือ ml m^{-2} day^{-1}) (นิตยา ภูงาม, 2556)

3.4.6.2 อัตราการซึมผ่านฟิล์มของไอน้ำ (water vapour transmission rate ; WVTR)

ทำการทดสอบอัตราการซึมผ่านฟิล์มของไอน้ำกับฟิล์มที่พัฒนาขึ้น โดยการใช้เครื่อง water vapor permeation analyzer (illinous Instruments Inc. รุ่น 7002 V1.9.4) ดังภาพที่ 3.9 ใช้สภาวะในการทดสอบ ณ อุณหภูมิ 25°C ช่วงใช้ stable P2O5 sensor ที่ละเอียดและเสถียรสำหรับการวัดความชื้นสัมพัทธ์ เครื่องวิเคราะห์ไอน้ำเหล่านี้มีช่วงการวัดกว้าง 0.002-1000 g m^{-2} day^{-1} และควบคุมอุณหภูมิความชื้นและการไหลได้อย่างแม่นยำ

ภาพที่ 3.9 เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านฟิล์มของไอน้ำ (water vapour transmission rate: WVTR)

3.5 การทดสอบผลของการใช้ซองควบคุม ฯ ที่ทำจากฟิล์ม ENP ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของพริกหวานในการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ

เตรียมพริกหวานเขียว ทำการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้น โดยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์ความเข้มข้น 150 ppm เป็นเวลา 30 วินาที ทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นบรรจุพริกหวาน 1 ลูก ต่อถุงพลาสติก LDPE พร้อมกับซองควบคุม ฯ ซึ่งมีซองควบคุม ฯ ที่ทำจากฟิล์ม LDPE และ ENP แล้วปิดปากถุงด้วยความร้อน (ภาพที่ 3.10B) พร้อมกันนี้ทำการบรรจุที่เหมือนกันแต่ไม่มีการใส่ซองควบคุม ฯ โดยจัดให้เป็นสิ่งทดลองควบคุม (Control) แสดงดังภาพที่ 3.10A ภายหลังจากการปิดผนึกนำบรรจุภัณฑ์ไปเก็บรักษาที่ 10°C เก็บรักษาเป็นเวลาอย่างน้อย 3 สัปดาห์ เพื่อทำการวัดคุณภาพและวัดไอระเหยเอทานอลต่อไป

(A) (B)

ภาพที่ 3.10 การบรรจุพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีซองควบคุม ฯ (A) บรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ (B)

3.5.1 การวิเคราะห์แก๊สและไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์โดยทำการประยุกต์วิธีที่รายงานใน พัชรี มะลิลา (2558) ประกอบด้วย

ความเข้มข้นก๊าซ CO_2 และก๊าซ O_2 ในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส (Handheld gas analyser) รุ่น Checkpoint3 (PBI. Dansensor, Denmark) ที่ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลาสติก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ที่สะสมภายในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ active MAP ที่ประกอบด้วยซองควบคุม ฯ ซึ่งมีวัสดุทำจากฟิล์มพลาสติก ENP และฟิล์มพลาสติก LDPE โดยเปรียบเทียบบรรจุภัณฑ์ที่มีพริกหวาน ที่บรรจุพริกหวาน (1 ลูกต่อบรรจุภัณฑ์) และ เครื่องแก้วปิดฝาสนิทที่มีปริมาตรใกล้เคียงกับพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ วัดความเข้มข้นด้วยเครื่อง Gas Chromatogram ประเภท Flame Ionised Detector (FID) ดังที่รายงานใน พัชรี มะลิลา และคณะ (2558) ทั้งนี้ความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 และก๊าซ O_2 และไอระเหยเอทานอล จะทำการวัดตามเวลา

ดังนี้ในวันที่ 0 (วันที่บรรจุ และปิดผนึก) จะทำการวัดทุก ๆ 2 ชั่วโมงเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการวัดในวันที่ 1 ถึงวันที่ 10

ภาพที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์แก๊ส CO_2 และแก๊ส O_2 (Handheld gas analyser) รุ่น Checkpoint3 (PBI. Dansensor, Denmark) ที่ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลาสติก MTEC

3.5.2 การวิเคราะห์คุณภาพของพริกหวาน โดยทำการประยุกต์วิธีที่รายงานใน พัชรี มะลิลา (2558) ประกอบด้วย

3.5.2.1 ความเข้มข้นของเอทานอลในโพรง (cavity) ของพริกหวาน ด้วยเครื่อง Gas Chromatogram (GC 2014, Shimadsu) ประเภท Flame Ionised Detector (FID) ทั้งนี้การเก็บตัวอย่างแก๊สจากโพรงจะได้ประยุกต์วิธีที่รายงานในการศึกษาของกระเจี๊ยบเขียว (นิตยา ภูงาม, 2560)

3.5.2.2 ความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อของพริกหวานโดยนำตัวอย่างพริกหวานสดบด 15 g ผสมกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว 7.5 g และน้ำ Deionized 7.5 g ทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกันมา 3 g ใส่ในขวดขนาดเล็ก (vial) ขนาด 20 ml และปิดผนึก นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นดูดแก๊สจากบรรยากาศในขวดขนาดเล็กปริมาตร 1 ml แล้วทำการฉีดเข้าเครื่อง Gas Chromatogram (GC 2014, Shimadzu) ประเภท Flame Ionised Detector (FID) ทั้งนี้การเก็บตัวอย่างแก๊สจากเนื้อเยื่อจะได้ประยุกต์วิธีที่รายงานในนิตยา ภูงาม (2560)

3.5.2.3 ความเข้มข้นก๊าซ CO_2 และก๊าซ O_2 ในโพรงช่องว่าง (cavity) ของพริกหวาน (ดังภาพที่ 3.11) ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส (Handheld gas analyser) รุ่น Checkpoint3 (PBI. Dansensor, Denmark) ที่ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลาสติก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

3.5.2.4 ปริมาณกรดแอสคอร์บิกในเนื้อเยื่อพริกหวาน โดยการสุ่มตัวอย่างพริกหวานในแต่ละสิ่งทดลอง ๆ ละ 3 ซ้ำ การวัดปริมาณกรดแอสคอร์บิกด้วยการไตเตรทด้วยสารละลาย indophenols standard solution คำนวณหาปริมาณกรดทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำผลไม้โดยคิดเป็นมิลลิกรัมกรดแอสคอร์บิก ต่อ 100 กรัม (AOAC, 1990) แสดงในภาคผนวก ก

3.5.2.5 ปริมาณ Titratable acidity (TA) ในเนื้อเยื่อพริกหวาน โดยการไตรเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มาตรฐานเข้มข้น 0.1 โมลาร์ คำนวณหาปริมาณกรดทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำผลไม้โดยคิดเทียบเป็นมิลลิกรัมกรดซิตริคต่อ 100 กรัม (AOAC, 2000) แสดงในภาคผนวก ก

3.5.2.6 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก โดยทำการชั่งน้ำหนักของบรรจุภัณฑ์พริกหวานและซองควบคุม ฯ (gross weight) ณ วันที่ทำการศึกษา และเปรียบเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นของบรรจุภัณฑ์ (initial gross weight) (AOAC, 1990)

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

3.5.2.7 เนื้อสัมผัสทำการวัดเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง Universal Testing (LLODY model, LR, series, USA) โดยใช้หัวทดสอบแบบ Cylinder Probe ขนาด 2 mm ใช้แรงกด 500 N โดยรายงานค่าแรงสูงสุด (maximum load; หน่วยที่รายงานคือ N)

3.5.2.8 สี ของผิวพริกหวาน โดยการใช้เครื่อง Hunter Lab (Color flex 4510, USA) (ในระบบ CIE; L*, a*, b*) โดย L* คือ Lightness โดยค่า L* ที่เข้าใกล้ 100 คือ white, ค่า L* ที่เข้าใกล้ 0 คือ Black ส่วน a* คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงช่วงสีเขียวถึงแดง กรณีที่ค่า a* เป็นลบ หมายถึง สีเขียว, a* เป็นบวก หมายถึง สีแดง สำหรับค่า b* คือ* คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงช่วงสีน้ำเงินถึงเหลือง โดยค่า b* เป็นลบ หมายถึง สีน้ำเงิน และค่า b* เป็นบวก หมายถึง สีเหลือง เนื่องจากพริกหวานไม่มีการเปลี่ยนแปลงสีเหลือง จึงไม่ได้รายงานค่า b*

3.5.2.9 การตรวจนับจุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count โดยการ Pour Plate โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Ager หรือ PCA) และยีสต์และรา (yeast and mold โดยการ Spread Plate โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Ager หรือ PDA) ทั้งนี้รายละเอียดการวิเคราะห์จุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และราแสดง (AOAC, 1990) ในภาคผนวก ข

3.6 การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์เชิงสถิติ

การศึกษานี้วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 2 ซ้ำ ค่าที่วัดได้จะนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) และความแตกต่างค่าเฉลี่ยแบบ Duncan’s multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % โดยใช้โปรแกรม SAS

3.7 สรุปประเด็นที่สำคัญ

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการพัฒนาซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่ทำจากฟิล์มประเภทชอบน้ำ เพื่อนำไปใช้ในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับพริกหวาน ซึ่งได้มีการนำเสนอวิธีการเตรียมฟิล์ม วิธีการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มที่พัฒนาขึ้น และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพภายในบรรจุภัณฑ์ และพริกหวานระหว่างการเก็บรักษา

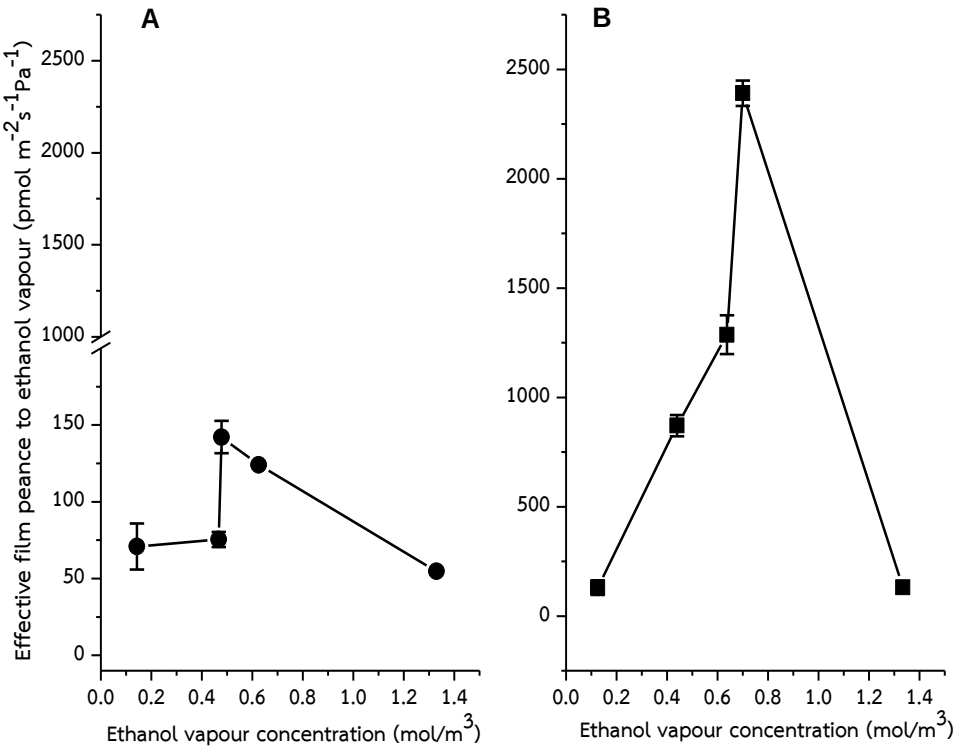
บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปราย
การพัฒนาฟิล์มพลาสติกหลายชั้นสำหรับซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาในการพัฒนาฟิล์มหลายชั้น (multi-layer film) สำหรับซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล โดยการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ได้ถูกกระตุ้นด้วยความชื้นในระดับที่สูงซึ่งมักเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นในบรรจุภัณฑ์ฟิล์มพลาสติกบรรจุผักและผลไม้ ดังนั้นฟิล์มหลายชั้นในการศึกษานี้มีสมบัติทั่วไปเป็นฟิล์มพลาสติกชอบน้ำตามที่ได้นำเสนอแนวคิดของการพัฒนาฟิล์มในบทที่ 1 และบทที่ 2 รายละเอียดของการพัฒนาฟิล์มหลายชั้น การทดสอบสมบัติบางประการของฟิล์มตลอดจนการปลดปล่อยของไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ที่มีส่วนประกอบของฟิล์มนี้ได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป

4.1 สมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์มพลาสติกที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลและความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศ

4.1.1 สมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์มพลาสติกที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล

จากการพัฒนาฟิล์มพลาสติกหลายชั้น ENP ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์มพลาสติก (film permeance to ethanol vapor หรือ FPE) ของฟิล์มพลาสติก ENP ที่อุณหภูมิ 10 °C และระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ของไอระเหยเอทานอลต่าง ๆ โดยทำการเปรียบเทียบกับฟิล์มพลาสติก EVA ดังข้อมูลแสดงในภาพที่ 4.1 ทั้งนี้เพื่อความกระชับของเนื้อหาจึงขอใช้คำว่า “ค่า FPE” ในการอ้างอิงถึงสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์มพลาสติกต่อไป เมื่อพิจารณาข้อมูลในภาพที่ 4.1 พบว่า ค่า FPE ของฟิล์มทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับระดับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่เพิ่มขึ้นในช่วง 0.1-0.7 mol m^{-3} การเพิ่มขึ้นของค่า FPE ดังกล่าวเป็นผลจากการที่ฟิล์มได้ดูดซับไอระเหยเอทานอลเข้าสู่โครงสร้าง เอทานอลที่ถูกดูดซับทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ ส่งผลให้โครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มเกิดการขยายตัวของปริมาตรอิสระ จากนั้นไอระเหยเอทานอลจึงแพร่ผ่านฟิล์มได้ในอัตราเร็วที่สูงขึ้น (พัชรี มะลิลา, 2562; Miyauchi et al., 1996; Utto et al., 2016) ปรากฏการณ์และกระบวนการถ่ายโอนมวลดังกล่าวจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่า FPE ของฟิล์มทั้ง 2 ชนิดมีค่าสูงขึ้น



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลและค่า FPE ของฟิล์มพลาสติกหลายชั้น ENP (A) และฟิล์มพลาสติก EVA (B) ที่อุณหภูมิ 10°C (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 3)

การเปลี่ยนแปลงของค่า FPE ที่สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในช่วงความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกัน ได้มีการรายงานในฟิล์มพลาสติกชนิดอื่น ๆ เช่น ฟิล์มพลาสติก LDPE และ Nylon/PE (พัชรี มะลิลา, 2558) ฟิล์มพลาสติก polypropylene (PP) และฟิล์มพลาสติก polyvinylidene coated PP (KPP) (Miyauchi et al., 1996) ฟิล์มพลาสติก silicone coated polyethylene terephthalate (silicone coated PET) และฟิล์ม PET (พัชรี มะลิลา, 2562) ตลอดจน ActivePak™ และฟิล์ม Fresh & Fresh (FF3)[1] (หทัยพร กัมพวงค์, 2560) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า FPE และความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลมีแนวโน้มในทิศทางการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียล (exponential relationship) เนื่องจากปรากฏการณ์พลาสติไซเซชันที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มพลาสติก (Miyauchi et al., 1996; Utto et al., 2016) อย่างไรก็ตามข้อมูลที่แสดงในภาพที่ 4.1 พบว่า ค่า FPE มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลเพิ่ม

[1] ฟิล์มทั้งสองประเภทนี้พัฒนาจาก polyethylene มีค่า FPE ที่สูงมากเนื่องจากมีการปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ให้มีช่องว่างขนาดที่ใหญ่มากกว่าฟิล์มปกติ (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562)

สูงขึ้นมากกว่า 0.7-0.8 mol m^{-3} การเปลี่ยนแปลงค่า FPE ดังกล่าวนี้ไม่สอดคล้องกับความสัมพันธ์เอกซ์โปเนนเชียล ทั้งนี้ผู้วิจัยได้อภิปรายในประเด็นความแตกต่างนี้ในส่วนต่อไปของเนื้อหา

เมื่อพิจารณา ณ ความเข้มข้นที่ใกล้เคียงหรือเท่ากันในภาพที่ 4.1 พบว่าค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก ENP ต่ำกว่าค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก EVA ประมาณ 20-30 เท่า ผลการศึกษาดังกล่าวนี้สามารถอธิบายด้วยกฎการแพร่ของฟิกก์ (Fick's law of diffusion) (Robertson, 2013) ที่ได้อธิบายปรากฏการณ์การแพร่ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นหรือค่าต่างศักย์ที่เป็นแรงขับดัน (driving force) ให้เกิดการแพร่ กล่าวคือ ฟลักซ์ (flux) ของการแพร่ผ่านฟิล์มสัมพันธ์แบบผกผันกับความหนาของฟิล์มดังแสดงในสมการ (2) หากฟิล์มมีความหนามากดังเช่นฟิล์มพลาสติก ENP จึงมีฟลักซ์หรืออัตราการแพร่ของโมเลกุลของเอทานอลในชั้นพอลิเมอร์ของฟิล์มเกิดขึ้นในระดับที่ต่ำ ในการศึกษาค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก LDPE และ Nylon/PE พัชรี มะลิลา (2558) และ Utto et al. (2016) รายงานว่า ฟิล์มพลาสติก LDPE ซึ่งมีความหนาเฉลี่ย 60 µm มีค่า FPE สูงกว่าฟิล์ม Nylon/PE ซึ่งมีความหนาเฉลี่ย 85 µm ประมาณ 3-4 เท่า (เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิและความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลที่ใกล้เคียงหรือเท่ากัน) ดังนั้นผลการทดลองในการศึกษานี้ได้สนับสนุนกฎการแพร่ของฟิกก์ที่ได้นำเสนอข้างต้น จากข้อมูลของการศึกษานี้ทำให้ทราบได้ว่าการเพิ่มความหนาของฟิล์มพลาสติกที่นำมาเป็นวัสดุของซองควบคุม ฯ จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการชะลอการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอล

$$J_{film}^{EtOH} = \frac{D_{film}^{EtOH}}{L_{film}} \Delta C_{film}^{EtOH} \qquad (2)$$

โดย

J_{film}^{EtOH} = ฟลักซ์ของการแพร่ของเอทานอลในฟิล์ม (diffusional flux of ethanol in film) (mol s^{-1} m^{-2})

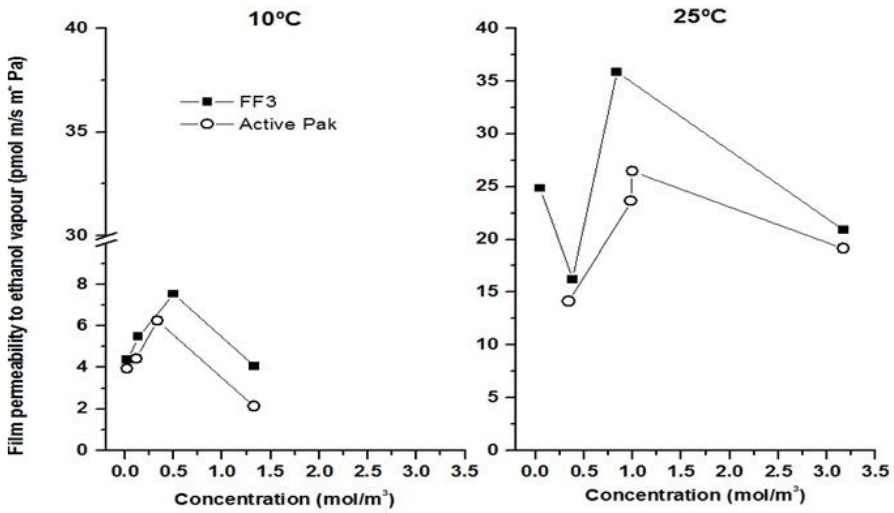
D_{film}^{EtOH} = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusivity) (m^2 s^{-1})

L_{film} = ความหนาของฟิล์ม (film thickness) (m)

ΔC_{film}^{EtOH} = ความแตกต่างของความเข้มข้นเอทานอลในฟิล์ม (ethanol concentration difference in film) (mol m^{-3})

จากที่ได้นำเสนอข้างต้น ค่า FPE ของทั้งฟิล์มพลาสติก ENP และฟิล์ม EVA มีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลมีค่าสูงกว่า 0.5 mol m^{-3} สำหรับฟิล์มพลาสติก ENP และสูงกว่า 0.7 mol m^{-3} สำหรับฟิล์มพลาสติก EVA ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของค่า FPE ในลักษณะดังกล่าวมีรายงานในฟิล์มพลาสติก Active PAK™ และฟิล์มพลาสติก FF3 (หทัยพร กัมพวงค์, 2560)

(ภาพที่ 4.2) การลดลงของค่า FPE เมื่อความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลเพิ่มขึ้นนั้นอาจเกิดจากการสะสมของโมเลกุลเอทานอลภายในโครงสร้างพอลิเมอร์จนเกิดเป็นกลุ่มใหญ่ หรือเรียกว่า permeant cluster ในงานวิจัยผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของไอระเหยสารอินทรีย์ (organic volatile compouds) Johansson and Leufven (1994) ได้ตั้งสมมติฐานว่า โมเลกุลของไอน้ำที่ถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้างของฟิล์มพลาสติกเป็นสาเหตุสำคัญของการชะลออัตราการแพร่ผ่านของโมเลกุลไอระเหยที่ถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้างของฟิล์มพลาสติก กล่าวคือ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้างพอลิเมอร์ หรือ permeant (กรณีนี้คือ โมเลกุลของน้ำและไอระเหยสารอินทรีย์) นั้นเกิดการจับกับกลุ่มกับบริเวณ active sites[2] ภายในโครงสร้างของฟิล์ม และ/หรือการจับกันเอง ดังนั้นการเกิดปรากฏการณ์ permeant cluster ขึ้นและมีกลุ่มขนาดใหญ่จึงส่งผลให้เกิดการแพร่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ได้ช้า



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลและค่า FPE ของฟิล์ม FF3 และฟิล์ม Active PAK™ ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย n = 5)

ที่มา: หทัยพร กัมพวงค์ (2560)

[2] ในหลักการของการดูดซับ (adsorption/absorption) การดูดซับของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) โดยวัสดุดูดซับ (adsorbent) เกิดขึ้นบริเวณที่ยังไม่ถูกดูดซับหรือเกิดปฏิกิริยาระหว่าง adsorbate และ adsorbent บริเวณดังกล่าวนี้มีชื่อเรียกโดยรวมว่า active site (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562)

จากข้อมูลในเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องนี้ ผู้วิจัยจึงขอนำเสนอแนวคิดของผลการเกิด permeant cluster ต่อการชะลอการถ่ายโอนหรือการแพร่ของโมเลกุลของเอทานอลในโครงสร้างพอลิเมอร์และส่งผลต่อค่า FPE ดังต่อไปนี้

ในกรณีของการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยคาดคะเนว่าโมเลกุลของเอทานอลที่ถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้างพอลิเมอร์ในปริมาณที่มากทำให้เกิด permeant cluster ขนาดใหญ่จึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของเอทานอลภายในโครงสร้างพอลิเมอร์ ทั้งนี้ค่า FPE เป็นผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D_{film}^{EtOH}) และค่าสัมประสิทธิ์การละลาย (S_{film}^{EtOH}) ของเอทานอลในโครงสร้างพอลิเมอร์ สมการ (3) ดังนั้นหากตั้งสมมติฐานว่าค่า S_{film}^{EtOH} มีค่าคงที่ในระหว่างการดูดซับไอระเหยเอทานอลเข้าสู่โครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มพลาสติก แต่ค่า D_{film}^{EtOH} มีค่าที่ลดลงเนื่องจากการเกิด permeant cluster ขนาดใหญ่ จึงส่งผลให้ค่า FPE มีค่าที่ลดลง เมื่อพิจารณาที่ค่าความเข้มข้นสูงสุดของไอระเหยเอทานอล (ภาพที่ 4.1) พบว่า ค่า FPE ของทั้งฟิล์ม ENP และ EVA มีค่าต่ำสุด เนื่องมาจากโมเลกุลของไอระเหยเอทานอลจำนวนมากมีโอกาสที่จะถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้างของฟิล์มได้มากกว่าที่ระดับความเข้มข้นที่ต่ำ (พัชรี มะลิลา และคณะ 2560) แม้ว่าโมเลกุลของเอทานอลในโครงสร้างอาจทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ แต่การมีจำนวนโมเลกุลของเอทานอลใน permeant cluster ที่มากจึงอาจทำให้ปรากฏการณ์พลาสติไซเซชันไม่ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลได้เร็ว

$$P_{film}^{EtOH} = D_{film}^{EtOH} \cdot S_{film}^{EtOH} \qquad (3)$$

โดย

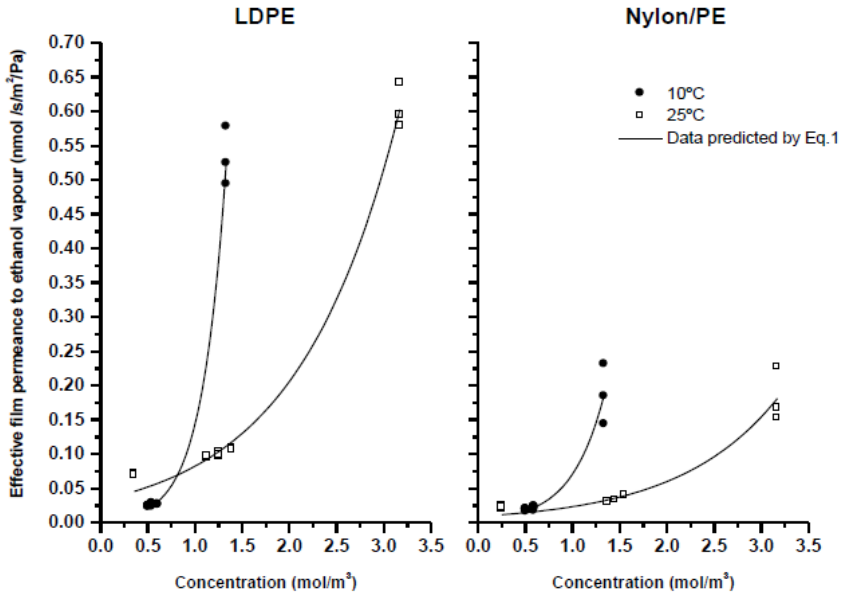
P_{film}^{EtOH} = สมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านของฟิล์มพลาสติก (film permeability[3] to ethanol vapour หรือ FPE) (mol m s^{-1} m^{-2} Pa^{-1})

S_{film}^{EtOH} = ค่าสัมประสิทธิ์การละลาย (solubility) (mol m^{-3} Pa^{-1})

จากที่ได้นำเสนอข้างต้นว่า ค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก LDPE และฟิล์มพลาสติก Nylon/PE นั้นมีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โปเนนเชียลกับการเพิ่มขึ้นของความเข้มของไอระเหยเอทานอล ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวได้รายงานในพัชรี มะลิลา (2558) และ Utto et al. (2016) โดยเฉพาะการวัดค่า FPE ที่ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล ณ จุดอิ่มตัว (saturated vapour concentration) ที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C ซึ่งมีค่าประมาณ 1.33 และ 3.17 mol m^{-3} ตามลำดับ

[3] ในการวิจัยนี้ ได้ใช้สมบัติ film permeance แทนสมบัติ film permeability เนื่องจากเป็นฟิล์มพลาสติกหลายชั้น ซึ่งความหมายทางกายภาพและเคมีของสมบัติทั้งสองคล้ายกันแต่ต่างกันที่หน่วย (unit) กล่าวคือ หน่วยของสมบัติ film permeance คือ mol s^{-1} m^{-2} Pa^{-1} ในขณะที่หน่วยของสมบัติ film permeability คือ mol m s^{-1} m^{-2} Pa^{-1} รายละเอียดเพิ่มเติมในการพิจารณาหน่วยของสมบัติทั้งสองได้แสดงในวีรเวทย์ อุทโธ (2562) ดังนั้นการอ้างอิงค่า FPE ในวิทยานิพนธ์นี้จึงมีความหมายเหมือนกันทั้ง film permeability to ethanol vapour หรือ film permeance to ethanol vapour

โดยพบว่า ค่า FPE ที่ความเข้มข้นดังกล่าวมีค่าสูงกว่าระดับความเข้มข้นต่ำสุดในช่วง 3-10 เท่า (ขึ้นกับระดับของอุณหภูมิที่ศึกษา) (ภาพที่ 4.3) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก LDPE และ Nylon/PE ที่แตกต่างจากฟิล์มพลาสติกในการศึกษานี้ (ฟิล์มพลาสติก ENP และ EVA) และฟิล์มพลาสติก Active PAK^{TM} และ FF3 (หทัยพร กัมพวงค์, 2560) อาจคาดคะเนได้ว่ามีสาเหตุมาจากการเกิด permeant cluster ภายในโครงสร้างพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน ในปัจจุบันยังไม่พบการรายงานลักษณะของ permeant cluster ของโมเลกุลของเอทานอลในฟิล์มพลาสติกเหล่านี้ ซึ่งผู้วิจัยเห็นว่าเป็นประเด็นที่ควรได้รับการศึกษาต่อไปในอนาคตเพื่อสร้างความเข้าใจในปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการซึมผ่านฟิล์มพลาสติกของไอระเหยเอทานอล



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลกับค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก LDPE และ Nylon/PE ที่อุณหภูมิ 10 และ 25°C (สมการ (1) ในภาพนี้คือแบบจำลองคณิตศาสตร์ประเภทเอกซ์โปเนนเชียล)
ที่มา: Utto et al. (2016)

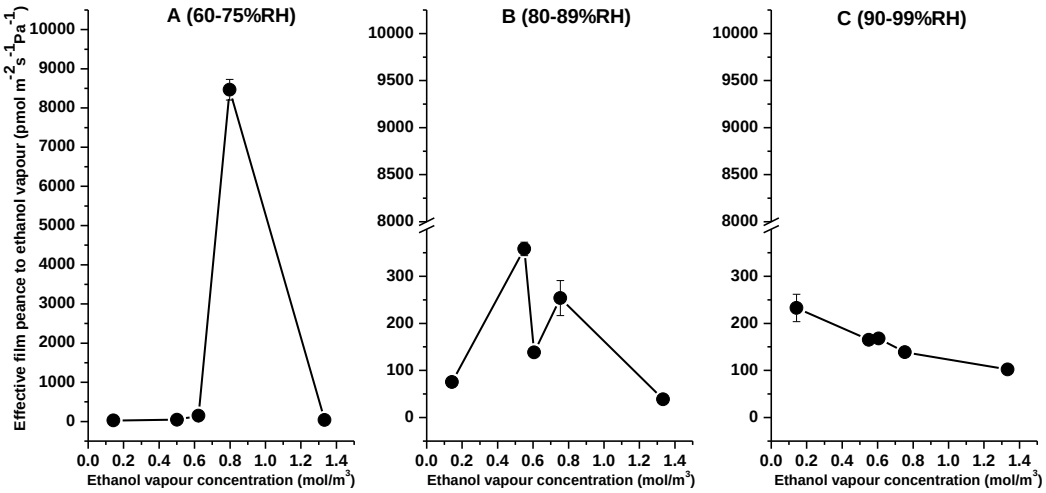
4.1.2 ผลของความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศต่อสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์มพลาสติก

ในหัวข้อ 4.1.1 ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลกับค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก ENP และฟิล์มพลาสติก EVA ซึ่งเป็นการทดสอบในสภาวะที่ไม่มีความชื้นเนื่องจากใช้แก๊ส N_2 (บริสุทธิ์ 99.99%) เป็นแก๊สและตัวพาในระบบ ทั้งนี้ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาฟิล์มพลาสติกเพื่อเป็นวัสดุของซองควบคุม ฯ ซึ่งการ

ปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลเกิดการกระตุ้นโดยความชื้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงนำเสนอข้อมูลการวิจัยในประเด็นผลของความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศต่อค่า FPE ของฟิล์ม ENP ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้[4]

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้นำฟิล์ม ENP มาหาค่า FPE ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 3 ระดับ ได้แก่ 60-75% RH 80-89% RH และ 90-99% RH (ภาพที่ 4.4) พบว่า ค่า FPE ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ 60-75% RH มีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกันกับค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก ENP ในสภาวะที่ไม่มีความชื้น (ภาพที่ 4.1) ข้อมูลดังกล่าวนี้แสดงให้ทราบว่า หากนำฟิล์มพลาสติก ENP มาเป็นวัสดุของซองควบคุม ฯ จะชะลอการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่ระดับความชื้นในสภาวะอุณหภูมิห้องทั่วไป เมื่อพิจารณาที่ระดับความชื้น 80-89% RH และ 90-99% RH พบว่าที่ความเข้มข้น 0.15-0.20 mol m^{-3} ค่า FPE มีค่าเพิ่มสูงกว่าที่ 60-75% RH โดยค่า FPE มีค่าสูงขึ้นเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้ทราบถึงผลของความชื้นที่กระตุ้นให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์ม ENP ได้ในอัตราเร็วที่สูงขึ้น อันเป็นผลมาจากปรากฏการพลาสติไซเซชันของโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้างของฟิล์มพลาสติก ENP อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลเพิ่มขึ้น ค่า FPE มีค่าลดลงสอดคล้องกับผลการศึกษาในกรณีที่ไม่มีความชื้น (ภาพที่ 4.1) เมื่อพิจารณาระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ 80-89%RH และ 90-99% RH พบว่า ค่า FPE ซึ่งทำการวัดที่ 90-99% RH มีค่า FPE ต่ำกว่าที่ 80-89% RH ยกเว้นที่ความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลต่ำ ข้อมูลนี้สนับสนุนแนวคิด permeant cluster โดยที่ความชื้นสูงทำให้มีโมเลกุลของน้ำถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มพลาสติก ENP เมื่อ permeant cluster มีขนาดใหญ่ขึ้นจึงขัดขวางการแพร่ผ่านของโมเลกุลในฟิล์มจึงทำให้ค่า FPE ลดลง (ภาพที่ 4.4B และภาพที่ 4.4C)

[4] ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยไม่ได้ศึกษาผลของความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก EVA เนื่องจากเมื่อนำฟิล์มพลาสติก EVA มาเป็นวัสดุของซองควบคุม ฯ พบว่า เกิดการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลอย่างทันทีทันได้ แม้ว่าภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำ ในขณะที่ฟิล์มพลาสติก ENP ให้การชะลอและเกิดการกระตุ้นการปลดปล่อยได้เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะความชื้นที่สูง (แสดงผลในหัวข้อ 4.3 ต่อไป) ดังนั้นหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาเพียงค่า FPE ของฟิล์มพลาสติก ENP



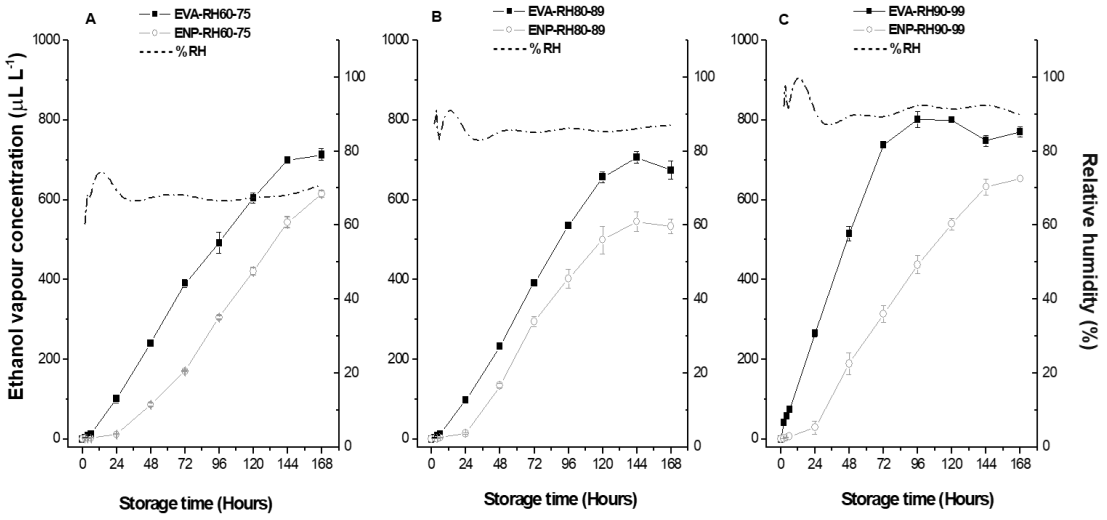
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลและค่า FPE ของฟิล์ม ENP ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 3 ระดับ ได้แก่ 60-75% RH (A), 80-89% RH (B) และ 90-99% RH (C) (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 3)

จากข้อมูลที่นำเสนอข้างต้นผู้วิจัยจึงได้ตั้งสมมติฐานว่า หากนำฟิล์ม ENP มาทำซองควบคุม ฯ ในบรรจุภัณฑ์ผักและผลไม้ ซึ่งบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์มีค่า ≥ 90% RH โมเลกุลของไอน้ำจะถูกดูดซับเข้าสู่ฟิล์มด้านนอกสุด (ในที่นี้คือฟิล์มพลาสติก EVA) ในขณะเดียวกันโมเลกุลของเอทานอลที่เริ่มปลดปล่อยในช่วงแรกที่ยังไม่มีจำนวนมากนักได้แพร่ผ่านชั้นฟิล์มที่ดูดซับความชื้นไว้ เมื่อโมเลกุลเอทานอลและความชื้นอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์พร้อมกันจึงส่งผลเสริมกัน (additive effect) ในการเกิดปรากฏการพลาสติไซเซชัน แล้วทำให้ค่า FPE มีค่าสูงขึ้นและนำไปสู่การซึมผ่านฟิล์มของโมเลกุลเอทานอลได้ในอัตราที่เร็วสูงขึ้น แต่เมื่อมีโมเลกุลของเอทานอลปลดปล่อยจากตัวพาและแพร่เข้าสู่ชั้นฟิล์มมากขึ้น อาจเกิดการชะลอของการแพร่ผ่านฟิล์ม เนื่องจากเกิด permeant cluster ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

อย่างไรก็ตามผู้วิจัยพิจารณาและตั้งสมมติฐานจากความรู้ที่นำเสนอโดย พัชรี มะลิลา (2562) ในประเด็นผลของการดูดซับความชื้นและการเกิดปรากฏการณ์พลาสติไซเซชันของฟิล์มพลาสติก ENP ว่าปรากฏการณ์พลาสติไซเซชันจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการใช้งานหรือการเก็บรักษา ทั้งนี้ในการทดสอบค่า FPE ผู้วิจัยใช้เวลาศึกษาเพียง 5 วัน ซึ่งคิดเป็นอย่างน้อยร้อยละ 50 ของระยะเวลาการเก็บรักษาพริกหวาน (14-21วัน) ดังนั้นการกระตุ้นการปลดปล่อยด้วยความชื้นจึงเกิดได้เพิ่มขึ้นเมื่อการสัมผัส (exposure time) ระหว่างฟิล์ม ENP กับความชื้นมีระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น จากข้อพิจารณานี้ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการทดลอง และนำเสนอผลอภิปรายในหัวข้อ 4.2

4.2 จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่สัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์

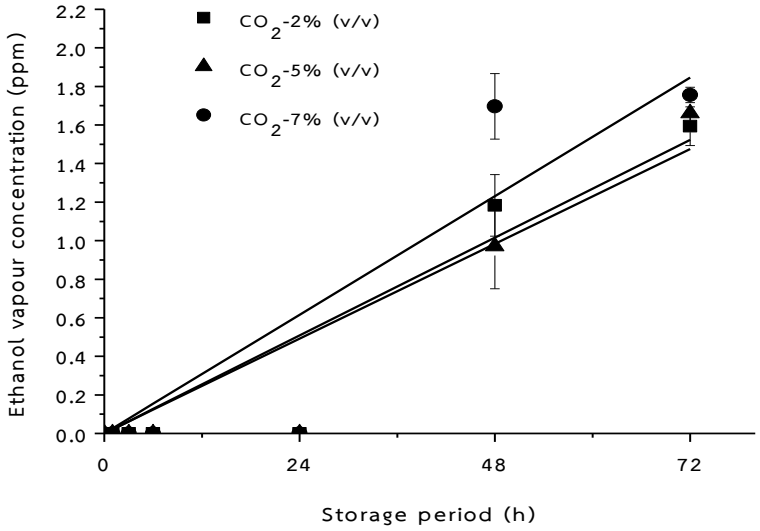
ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ซึ่งมีวัสดุทำจากฟิล์มพลาสติก EVA และ ENP ที่อุณหภูมิ 10°C ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 3 ระดับ คือ 60-75% RH 80-89% RH และ 90-99% RH แสดงดังภาพที่ 4.5 โดยพบว่า ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในทุกสิ่งทดลองมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นภายใน 120 ชั่วโมง และภายหลังจากนั้นความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady-state) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างซองควบคุม ฯ ทั้งสองประเภท พบว่า ซองควบคุม ฯ ENP ได้ชะลอการปล่อยไอระเหยเอทานอลได้ภายใน 24 ชั่วโมง ในขณะที่ซองควบคุม ฯ EVA เกิดการปล่อยไอระเหยเอทานอลทันทีภายหลังจากที่เตรียมซองควบคุม ฯ แล้วเสร็จ การปล่อยไอระเหยเอทานอลที่แตกต่างกันนี้ เป็นผลเนื่องจากค่า FPE ของฟิล์ม (ดังแสดงในภาพที่ 4.1A และภาพที่ 4.1B) ค่า FPE ของฟิล์ม EVA มีค่าสูงกว่าฟิล์ม ENP ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โมเลกุลของเอทานอลสามารถซึมผ่านในโครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มพลาสติก EVA ได้เร็วกว่าการซึมผ่านในโครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มพลาสติก ENP ทั้งนี้การชะลอการปลดปล่อยของไอระเหยเอทานอลของฟิล์มพลาสติก ENP มีสาเหตุจากค่า FPE ของฟิล์ม ENP ที่มีค่าต่ำ โดยฟิล์มพลาสติก ENP มีชั้นฟิล์มสองชั้นรวมกัน คือ EVA และ Nylon/PE ส่งผลให้มีการปล่อยไอระเหยจากซองควบคุม ฯ ที่ทำจากฟิล์ม ENP เกิดขึ้นในอัตราที่ต่ำ เนื่องจากฟิล์ม ENP มีชั้นฟิล์ม EVA อยู่ด้านนอกสุด ซึ่งเป็นฟิล์มที่ชอบน้ำจึงสามารถดูดซับความชื้นที่อยู่ภายในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ไว้ภายในโครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์ม ความชื้นจึงทำปฏิกิริยากับโครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มซึ่งมีขั้วเช่นกัน และทำปฏิกิริยากับเอทานอลที่แพร่ผ่านชั้นฟิล์มพลาสติก Nylon/PE ซึ่งยอมให้โมเลกุลของเอทานอลซึมผ่านในอัตราที่ต่ำ (Utto et al., 2018)



ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศ ซึ่งปลดปล่อยจากซองควบคุม ฯ ซึ่งมีส่วนประกอบของฟิล์มพลาสติก EVA และ ENP ที่อุณหภูมิ 10°C ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 3 ระดับ ได้แก่ 60-75% RH (A), 80-89% RH (B) และ 90-99% RH (C) (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 3)

นอกจากนี้ผู้วิจัยสังเกตได้ว่าในช่วง 24 ชั่วโมงแรก เกิดการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ได้ช้า (ภาพที่ 4.5) แต่ภายหลังจากนั้นอัตราการปล่อยไอระเหยเอทานอลจึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มเกิดการขยายตัว เป็นผลมาจากปรากฏการณ์พลาสติไซเซชัน โดยมีไอน้ำและเอทานอลเป็นพลาสติไซเซอร์ (ดังอภิปรายในหัวข้อ 4.1.2 การเพิ่มขึ้นของค่า FPE ที่ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลต่ำ 0.15-0.20 mol m^{-3} ถึงแม้ว่าซองควบคุม ฯ ENP จะมีชั้น EVA แต่โมเลกุลของเอทานอลต้องซึมผ่านฟิล์ม Nylon/PE ก่อนถึงชั้น EVA ปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยที่ช้าลง จึงส่งผลให้เกิดการสะสมของความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลที่ต่ำกว่าในระบบที่มีซองควบคุม ฯ ที่ทำจากฟิล์ม EVA เมื่อพิจารณาในภาพที่ 4.5 พบว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 60-89% RH จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ENP และ EVA ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น 90-99% RH พบว่าซองควบคุม ฯ ทั้ง 2 ประเภทปลดปล่อยได้อัตราเร็วที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการสะสมของไอระเหยเอทานอลที่มากขึ้น ข้อมูลดังกล่าวนี้สนับสนุนข้อสังเกตที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 4.1.2 (ภาพที่ 4.4) ในประเด็นที่ว่าหากฟิล์ม ENP ได้สัมผัสกับความชื้นเป็นระยะเวลานานขึ้นจะทำให้เกิดปรากฏการพลาสติไซเซชันเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะจากความชื้นที่ถูกดูดซับเข้าไปในโครงสร้างพอลิเมอร์

จากผลจลนพลศาสตร์การปล่อยไอระเหยเอทานอลทดสอบภายใต้สภาวะความชื้น พบว่าซองควบคุม ฯ ENP สามารถปล่อยไอระเหยเอทานอลได้ในอัตราที่เร็วขึ้นเมื่อมีระดับความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์มากกว่า 90% RH ความชื้นดังกล่าวใกล้เคียงกับความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ของผักและผลไม้ ปัจจุบันยังไม่มีรายการใช้ความชื้นเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ แต่มีรายงานการใช้แก๊ส CO_2 กระตุ้นการปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ที่ทำจากฟิล์ม Active PET (ได้จากการเคลือบด้วยชั้น Silicone บนฟิล์ม PET) การปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ เกิดได้ เมื่อได้รับการสัมผัสกับแก๊ส CO_2 ความเข้มข้นอย่างน้อย 5% (v/v) เป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน (ภาพที่ 4.6)



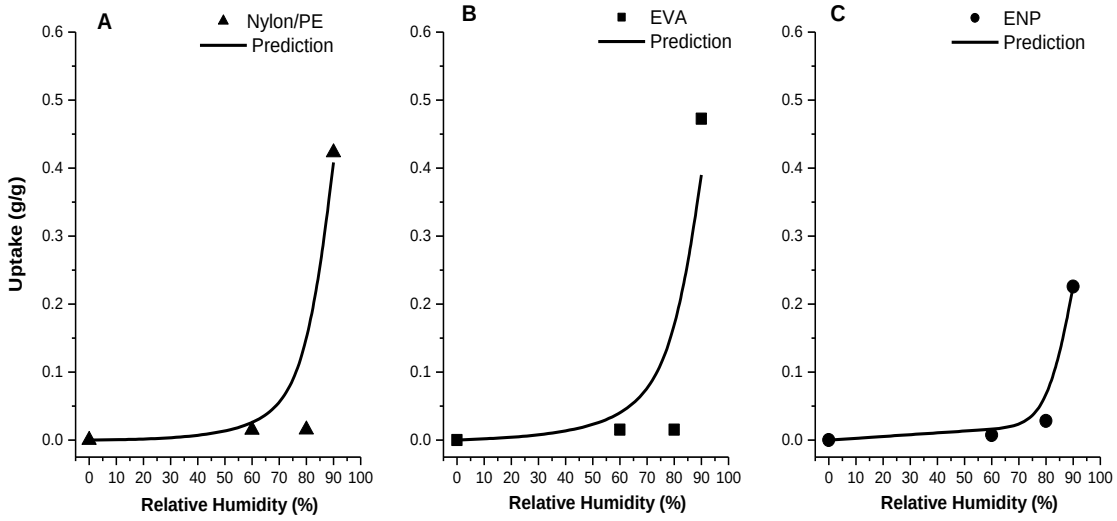
ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่ปล่อยจากซองควบคุม ฯ ซึ่งมีส่วนประกอบของฟิล์ม Active PET ในระบบที่มี CO_2 กระตุ้น 2 5 และ 7% (v/v) ที่อุณหภูมิ 25°C (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 3)

ที่มา: พัชรี มะลิลา (2562)

4.3 การดูดซับความชื้นของฟิล์มพลาสติกที่สัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์

ผลการดูดซับความชื้นของฟิล์มพลาสติกทั้ง 3 ชนิด ประกอบด้วย (1) Nylon/PE (2) EVA และ (3) ENP ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C แสดงดังภาพที่ 4.7 จากข้อมูลพบว่า การดูดซับความชื้นของฟิล์มชอบน้ำทั้งสามชนิดมีค่าที่ต่ำและไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการทดสอบที่ระดับความชื้นเท่ากับ 60-75% RH และ 80-89% RH อย่างไรก็ตามเมื่อระดับความชื้นอยู่ในช่วง 90-99% RH พบว่า ฟิล์มชอบน้ำสามารถดูดซับความชื้นได้สูงขึ้นและเกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณไอน้ำที่ดูดซับเข้าสู่โครงสร้างเกิดขึ้นได้เร็ว ลักษณะดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบเอกซ์โนเนนเชียล โดยผู้วิจัยได้

ทำการทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้างด้วยสมการ (1) (นำเสนอในบทที่ 3) และพบว่า สมการ (1) สามารถทำนายได้เป็นอย่างดี โดยมีค่า R^2 และ RMSE อยู่ในช่วง 0.92-0.99 และ 0.004-0.054 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) ข้อมูลค่า R^2 และ RMSE แสดงให้ทราบว่าแบบจำลองเอกซ์โพเนนเชียล เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการแสดงข้อมูลเชิงประจักษ์โดยเฉพาะค่า RMSE ต่ำกว่า 2 (Yang and Chinnan, 1988)

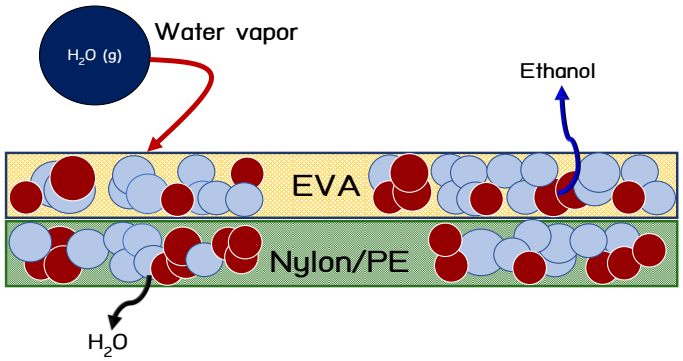


ภาพที่ 4.7 การดูดซับความชื้นของฟิล์มพลาสติก Nylon/PE (A) ฟิล์ม EVA (B) และฟิล์ม ENP (C) ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10 °C ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 3 ระดับ ได้แก่ 60-75% RH, 80-89% RH และ 90-99% RH (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 3)

ตารางที่ 4.1 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ (1) ด้วยวิธี non-linear regression สำหรับการดูดซับน้ำของฟิล์มพลาสติก Nylon/PE EVA และ ENP

Films	k_{film}^{uptk} (g g^{-1})	b_{film}^{uptk} (dimensionless)	R^2	RMSE
Nylon/PE	1.49×10^{-6}	0.14	0.95	0.03
EVA	1.20×10^{-6}	0.14	0.92	0.04
ENP	0.01	12.10	0.99	0.004

เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 5 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับฟิล์ม ENP มีค่าสูงกว่าฟิล์มพลาสติก Nylon/PE และ EVA เนื่องจากฟิล์ม ENP มีแนวโน้มของการดูดซับไอน้ำได้สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์ ≥80% RH (ภาพที่ 4.7C) อาจเป็นผลมาจากฟิล์ม ENP ประกอบด้วยฟิล์มที่ชอบน้ำสองชนิดที่ประกบกัน จึงสามารถดูดซับความชื้นได้สูงกว่า อย่างไรก็ตามที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ ≥90% RH ระดับของการดูดซับไอน้ำของฟิล์ม ENP มีค่าต่ำกว่าฟิล์ม Nylon/PE และ EVA ผู้วิจัยคาดคะเนว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นผลของการเกิด permeant cluster ของไอน้ำที่ดูดซับภายในในโครงสร้างของพอลิเมอร์ (ดังกรณีที่อภิปรายในหัวข้อ 4.1.1) ส่งผลให้ดูดซับความชื้นได้น้อยลง (ภาพที่ 4.8) ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อนี้สนับสนุนความรู้ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับฟิล์มพลาสติกที่ชอบน้ำ และผลของการเกิดปฏิกิริยานำไปสู่การเปลี่ยนแปลงด้านต่าง ๆ ที่รวมถึงการเกิดปรากฏการณ์พลาสติไซเซชันดังที่ได้นำเสนอข้างต้น



ภาพที่ 4.8 แบบจำลองแนวคิดการดูดซับความชื้นของฟิล์มพลาสติก ENP

4.4 สรุปประเด็นสำคัญ

จากผลการศึกษาสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์มพลาสติกประเภทชอบน้ำด้วยวิธี isostatic และ gravimetric การศึกษาการดูดซับไอน้ำของฟิล์ม และจลนพลศาสตร์การปล่อยไอระเหยเอทานอลที่ปล่อยจากซองควบคุม ฯ ที่สัมพันธ์กับความชื้น พบว่า การปล่อยไอระเหยเอทานอลจากฟิล์ม ENP สามารถชะลอการปล่อยไอระเหยเอทานอลได้ดีกว่าฟิล์ม EVA ดังนั้นฟิล์มที่พัฒนาขึ้นจึงเหมาะสำหรับที่จะนำมาทำซองควบคุม ฯ เพื่อประยุกต์ใช้กับผลิตผลพืชสวนต่อไป ในบทต่อไปนำเสนอการประยุกต์ใช้ซองควบคุม ฯ ENP ในการบรรจุภัณฑ์ active MAP สำหรับพริกหวานสด

บทที่ 5
ผลการทดลองและอภิปราย
ผลของการประยุกต์ใช้ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่กระตุ้นด้วยความชื้นต่อคุณภาพของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแอคทีฟ

บทนี้ได้นำเสนอผลของการทดลองประยุกต์ใช้ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่มีฟิล์มพลาสติกหลายชั้น ENP เป็นวัสดุต่อคุณภาพของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแอคทีฟ (active MAP) โดยมีถุงพลาสติกเป็นบรรจุภัณฑ์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน โดยได้ทำการเปรียบเทียบกับคุณภาพของพริกหวานใน (1) บรรจุภัณฑ์ active MAP ที่มีซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุฟิล์มพลาสติก LDPE และ (2) บรรจุภัณฑ์ passive MAP (ไม่มีซองควบคุม ฯ) รายละเอียดของผลการศึกษาแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

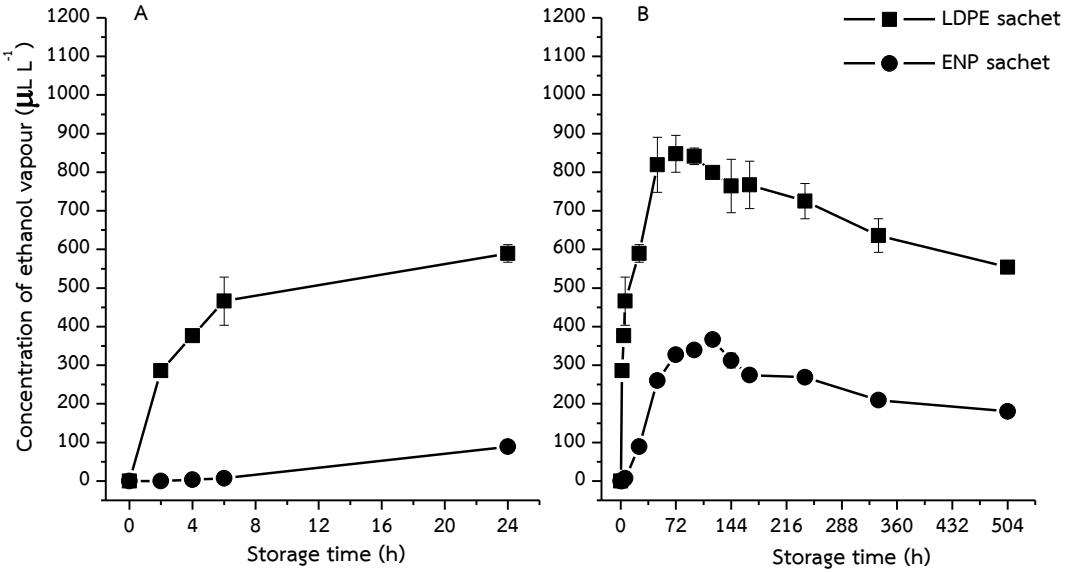
5.1 ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ ในเนื้อเยื่อ และโพรงของพริกหวาน

5.1.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์พริกหวาน

ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยนำเสนอผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมภายในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ active MAP ที่ประกอบด้วยซองควบคุม ฯ ซึ่งมีวัสดุทำจากฟิล์มพลาสติก ENP และฟิล์มพลาสติก LDPE (เพื่อความกระชับของเนื้อหาจะเรียกว่า ซองควบคุม ฯ ENP และซองควบคุม ฯ LDPE ตามลำดับ) ในการทดสอบนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาบรรจุภัณฑ์ active MAP ที่บรรจุพริกหวาน (1 ลูกต่อบรรจุภัณฑ์) หรือ เครื่องแก้วปิดฝาสนิทที่มีปริมาตรใกล้เคียงกับพริกหวานโดยการทดสอบกับเครื่องแก้วนั้นเพื่อเป็นการสร้างความเข้าใจในการปลดปล่อยและสะสมไอระเหยเอทานอลในสภาวะที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยากับผลิตผลและเปรียบเทียบกับในสภาวะที่มีพริกหวาน ผู้วิจัยนำเสนอการเปลี่ยนแปลงของไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์แต่ละประเภทดังต่อไปนี้

5.1.1.1 บรรจุภัณฑ์ active MAP ที่ไม่มีพริกหวาน

ภาพที่ 5.1 แสดงการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ทั้งสองประเภท และการสะสมไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีพริกหวาน โดยพบว่าซองควบคุม ฯ ENP ชะลอการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลได้อย่างน้อย 6 ชั่วโมง (กล่าวคือ ไม่สามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลได้ในช่วงเวลาดังกล่าว) ในขณะที่ซองควบคุม ฯ LDPE ปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลได้ทันทีภายหลังจากการบรรจุลงในถุงพลาสติก ระดับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ ENP มีค่าต่ำกว่าในบรรจุภัณฑ์มีซองควบคุม ฯ LDPE โดยเฉลี่ยประมาณ 3-4 เท่า (ภาพที่ 5.1) ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้ทราบว่าฟิล์มหลายชั้นที่ได้พัฒนาขึ้นลดอัตราเร็วของการซึมผ่านฟิล์มของไอระเหยเอทานอลได้ เนื่องจากฟิล์มมีความหนาที่มากกว่าฟิล์มพลาสติก LDPE และมีชั้นของฟิล์มพลาสติก Nylon/PE ที่ค่า FPE ที่ต่ำกว่าฟิล์ม LDPE (Utto et al., 2016)



ภาพที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ active MAP (ไม่มีพริกหวาน) ซึ่งมีซองควบคุม ฯ ENP และ LDPE ที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน โดยแสดงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล 24 ชั่วโมงแรก (A) และความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลตลอดช่วงการเก็บรักษา (B) (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

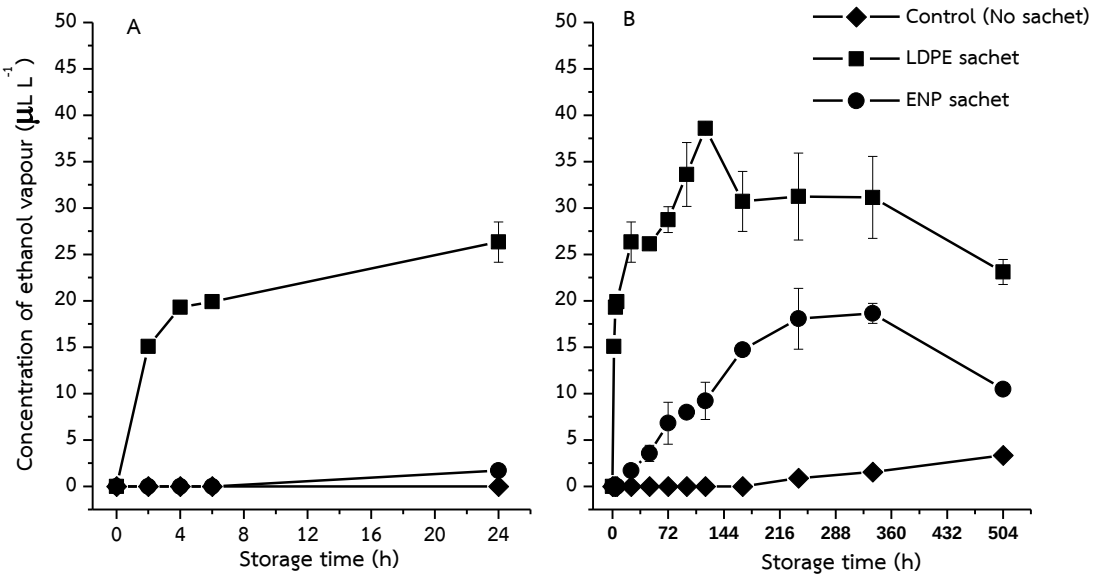
ผู้วิจัยสามารถวัดและวิเคราะห์ไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศถุงพลาสติกที่มีซองควบคุม ฯ ENP ในชั่วโมงที่ 24 (ภาพที่ 5.1) โดยความชื้นสัมพัทธ์ในถุงอยู่ในช่วง 70-75% RH (ระดับทั่วไปที่อุณหภูมิห้อง) ข้อมูลดังกล่าวนี้พบว่ามีความแตกต่างจากข้อมูลของการทดสอบจลนศาสตร์การปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลที่แสดงในภาพที่ 4.5 (ระบุในบทที่ 4 หัวข้อ 4.2) กล่าวคือ ซองควบคุม ฯ ENP บรรจุในถุง LDPE ชะลอการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลได้น้อยกว่าในถุง Al/PE (สามารถตรวจพบไอระเหยเอทานอลที่ 24 ชั่วโมงในถุง LDPE) ผู้วิจัยพิจารณาว่าความแตกต่างของผลการทดสอบจลนพลศาสตร์ในหัวข้อ 4.2 และหัวข้อนี้ (ซึ่งทดสอบในบรรจุภัณฑ์ที่มีเครื่องแก้วปิดฝาสนิทที่มีปริมาตรใกล้เคียงกับพริกหวาน) เกิดจากบรรจุภัณฑ์ของการทดสอบทั้งสองเป็นฟิล์มต่างชนิดกัน กล่าวคือ การทดสอบจลนพลศาสตร์ใช้ถุงอะลูมิเนียม ส่วนการจำลองสภาวะที่ไม่มีพริกหวานได้ใช้ถุง LDPE ฟิล์มอะลูมิเนียมมีสมบัติต้านการซึมผ่านของไอระเหยเอทานอลได้ดีมาก ดังนั้นไอระเหยเอทานอลที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากซองควบคุม ฯ จึงสะสมในบรรจุภัณฑ์ซึ่งปิดสนิท ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์อย่างต่อเนื่องจึงไม่ได้ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์และซองควบคุม ฯ สูงมากจนเกินไป แต่ฟิล์ม LDPE ซึ่งเป็นวัสดุของบรรจุภัณฑ์ที่ยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านได้ง่ายมาก (พัชรี มะลิลา, 2558; Utto et al., 2016) จึงทำให้ไอระเหยเอทานอลส่วนหนึ่งซึมผ่านจากภายในไปยังภายนอกบรรจุภัณฑ์ และส่งผลให้ความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลภายในบรรจุภัณฑ์ต่ำกว่าในซองควบคุม ฯ ความแตกต่างดังกล่าวเป็นแรงขับดันในการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุมฯ ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ENP ได้เร็วมากขึ้น เมื่อพิจารณาการถ่ายโอนมวลของไอระเหย เอทานอลที่เกิดขึ้นและความแตกต่างกันในการทดสอบจลนพลศาสตร์ (หัวข้อ 4.2) และการทดสอบในหัวข้อนี้ จึงทำให้ผู้วิจัยเข้าใจถึงระยะเวลาของการชะลอการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลที่ต่างกัน ทั้งนี้ข้อมูลการวิจัยนี้ทำให้ทราบได้ว่าซองควบคุม ฯ ENP สามารถชะลอการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลได้จริง

จากภาพที่ 5.1B พบว่า ในช่วง 48-96 ชั่วโมงแรกของการเก็บรักษามีการสะสมไอระเหยเอทานอลในความเข้มข้นที่สูง หรือเป็นในลักษณะของการปลดปล่อยที่เรียกว่า initial release peak เนื่องมากจากความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์และในซองควบคุม ฯ มีค่าที่สูง ทำให้อัตราเร็วของการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลออกจากซองควบคุม ฯ เกิดขึ้นได้รวดเร็ว (พิจารณาโดย Fick's law of diffusion) (Utto et al., 2014) ภายหลังจากนั้นการสะสมของไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์เข้าสู่สภาวะกึ่งคงที่ (quasi-steady sate) ซึ่งเกิดจากสมดุลของ (1) อัตราเร็วการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ และ (2) อัตราเร็วของการซึมผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์ของไอระเหยเอทานอลจากภายในสู่ภายนอกบรรจุภัณฑ์ สภาวะกึ่งคงที่นี้มีระยะเวลาอยู่จนถึงเวลา 240 ชั่วโมง จากนั้นความเข้มข้นของ

ไอระเหยเอทานอลลดลงประมาณ 1.5 เท่า เนื่องจากการลดลงของเอทานอลบนตัวพาในซองควบคุม ฯ ข้อมูลดังกล่าวนี้แสดงให้ทราบถึงความสำคัญของการรักษาปริมาณเอทานอลบนตัวพาให้เพียงพอต่อการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลในช่วงเวลาการเก็บรักษาที่ต้องการ ภายหลังจากการลดลงอัตราการสะสมของไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศได้เข้าสู่สภาวะกึ่งสมดุลอีกครั้งจนถึงชั่วโมงสุดท้ายของการทดสอบ

5.1.1.2 บรรจุภัณฑ์ active MAP ที่มีพริกหวาน

ภาพที่ 5.2 แสดงการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ทั้งสองประเภท และการสะสมไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุพริกหวาน (1 ลูก ต่อบรรจุภัณฑ์) และทำการเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์ passive MAP โดยพบว่าความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมภายในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ LDPE มีค่าสูงกว่าสิ่งทดลองอื่น สอดคล้องกับผลในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีพริกหวาน (ภาพที่ 5.1B) เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลในภาพที่ 5.2 พบว่า ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์ที่มีพริกหวานมีค่าต่ำกว่าในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีพริกหวาน ประมาณ 20-40 เท่า (พิจารณาจากซองควบคุม ฯ ทั้งสองประเภท) ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้ทราบถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยเอทานอลและพริกหวาน และการเกิดปฏิกิริยานั้นเป็นสาเหตุสำคัญให้เกิดการลดลงของความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศ หรือกล่าวได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาเป็น ethanol vapour sink ที่ทำให้เกิดการหายไปของเอทานอล (Utto et al., 2014) ในการศึกษาการบรรจุภัณฑ์ active MAP ของผลหม่อนสด Choosung et al. (2019) รายงานว่า การทำปฏิกิริยาระหว่างผลหม่อนกับไอระเหยเอทานอลเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ไอระเหยเอทานอลหายไปจากบรรจุภัณฑ์โดยคิดเป็นอย่างน้อยร้อยละ 90 เมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีผลหม่อน



ภาพที่ 5.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ active MAP (มีพริกหวาน) ซึ่งมีซองควบคุม ฯ ENP และ LDPE และเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ passive MAP (control/no sachet) ที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน โดยแสดงความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล 24 ชั่วโมงแรก (A) และความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลตลอดช่วงการเก็บรักษา (B) (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

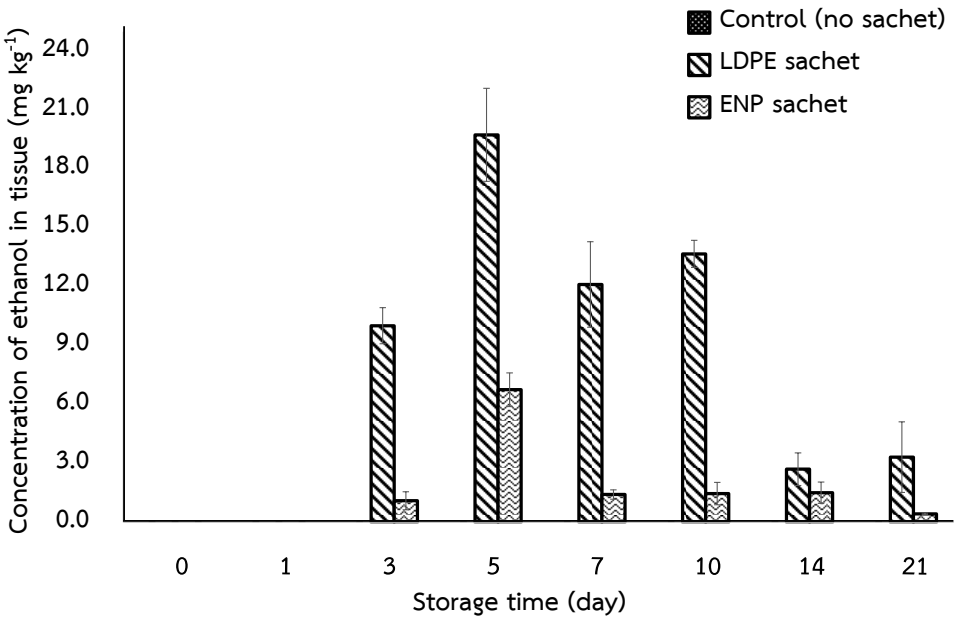
ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่ปลดปล่อยและสะสมในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ ENP มีค่าต่ำกว่าในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ LDPE ซึ่งสอดคล้องกับในการศึกษาบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีพริกหวาน ทั้งนี้ซองควบคุม ฯ ENP ยังสามารถชะลอการปลดปล่อยเอทานอลได้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ภาพที่ 5.2) ผู้วิจัยได้สังเกตว่าความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ ENP และ LDPE นั้นอยู่ในระดับที่ไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีพริกหวาน (ภาพที่ 5.1) ความแตกต่างที่ลดลงนั้นเป็นผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยเอทานอลและพริกหวาน จากข้อมูลใน Utto et al. (2016) พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยเอทานอลกับหอมแดงสดปอกเปลือกมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลมีค่าที่สูงขึ้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีรายงานในไอระเหยอื่น ๆ เช่น ไอระเหยเฮกซานาลกับมะเขือเทศ (Utto et al., 2008) และไอระเหยอินทรีย์หลายประเภท (เช่น เฮกซีนาล อะเซตัลดีไฮด์) กับสตรอเบอรี่ (Hamilton-Kemp et al., 1996) จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยนำมาประยุกต์กับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยเอทานอลกับพริกหวาน กล่าวคือ ซองควบคุม ฯ LDPE ปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลได้เร็วทำให้มีความเข้มข้นที่สูงในบรรจุภัณฑ์จึงทำให้เกิดปฏิกิริยากับ

พริกหวานได้ในอัตราเร็วที่สูง ส่งผลให้ไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศเหลืออยู่ในระดับที่ไม่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับระดับความเข้มข้นที่เกิดจากซองควบคุม ฯ ENP ซึ่งปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลได้ช้าและมีปริมาณเอทานอลในบรรยากาศไม่มาก ดังนั้นอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยากับพริกหวานจึงไม่สูง จากภาพที่ 5.2 พบว่า ผู้วิจัยสามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์ passive MAP ในวันที่ 21 ของการเก็บรักษา แต่ระดับความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.8-3.5 $\mu L\ L^{-1}$ ซึ่งมีค่าที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับการสะสมในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ ทั้งสองประเภท ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลใน passive MAP นั้นอาจเป็นผลจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ส่งให้เกิดการผลิตและสะสมของเอทานอลในเนื้อเยื่อและปลดปล่อยสู่บรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ ในหัวข้อ 5.1.1 และ 5.1.2 ผู้วิจัยได้นำเสนอผลและการอภิปรายในประเด็นเชื้อจุลินทรีย์ต่อไป

5.1.2 ความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อและโพรงช่องว่างของพริกหวาน

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลภายในเนื้อเยื่อพริกหวานที่เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ active MAP และ passive MAP แสดงในภาพที่ 5.3 โดยพบว่า ความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อของพริกหวานในทุกสิ่งทดลองไม่สามารถวัดได้ในช่วง 1 วันแรกของการศึกษา แต่ภายหลังจากการเก็บรักษาไว้ 3 วัน พบว่า ความเข้มข้นในเนื้อเยื่อของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ LDPE สูงกว่าในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ ENP ผลการศึกษานี้ได้สนับสนุนความรู้ที่นำมาอภิปรายข้างต้นว่า อัตราเร็วหรือระดับของการเกิดปฏิกิริยาสัมพันธ์เชิงบวกกับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล ในการศึกษาการเก็บรักษาผลหม่อนสดในการบรรจุภัณฑ์ active MAP Choosung et al. (2019) ได้รายงานว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยเอทานอลและผลหม่อนสดมีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โปเนนเชียล กล่าวคือ อัตราเร็วมีการเพิ่มขึ้นสูงเมื่อความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาในบรรจุภัณฑ์ passive MAP พบว่า ผู้วิจัยไม่สามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อพริกหวาน ข้อมูลการสะสมเอทานอลในเนื้อเยื่อของพริกหวานสนับสนุนความรู้ในกระบวนการถ่ายโอนมวลของไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์ active MAP โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยเอทานอลและพริกหวานเป็นหนึ่งในกระบวนการถ่ายโอนมวลที่สำคัญและนำไปสู่การควบคุมคุณภาพของพริกหวาน โดยการแพร่ของไอระเหยเอทานอลจากผิวหน้าของผลิตผลไปยังเนื้อเยื่อภายในเป็นขั้นตอนสำคัญหนึ่งของการเกิดปฏิกิริยา (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562; Utto et al., 2014) เมื่อพิจารณาตามกฎการแพร่ Fick's law ร่วมกับการเกิดปฏิกิริยา ทำให้คาดคะเนได้ว่าพริกหวานได้ดูดซับไอระเหยเอทานอลที่บริเวณผิวหน้า จากนั้นโมเลกุลของเอทานอลเกิดการแพร่ผ่านเข้าสู่เนื้อเยื่อพริกหวาน เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นเอทานอลที่ผิวหน้าและภายในเนื้อเยื่อเป็นแรงขับดันของการแพร่ ทั้งนี้ความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อมี

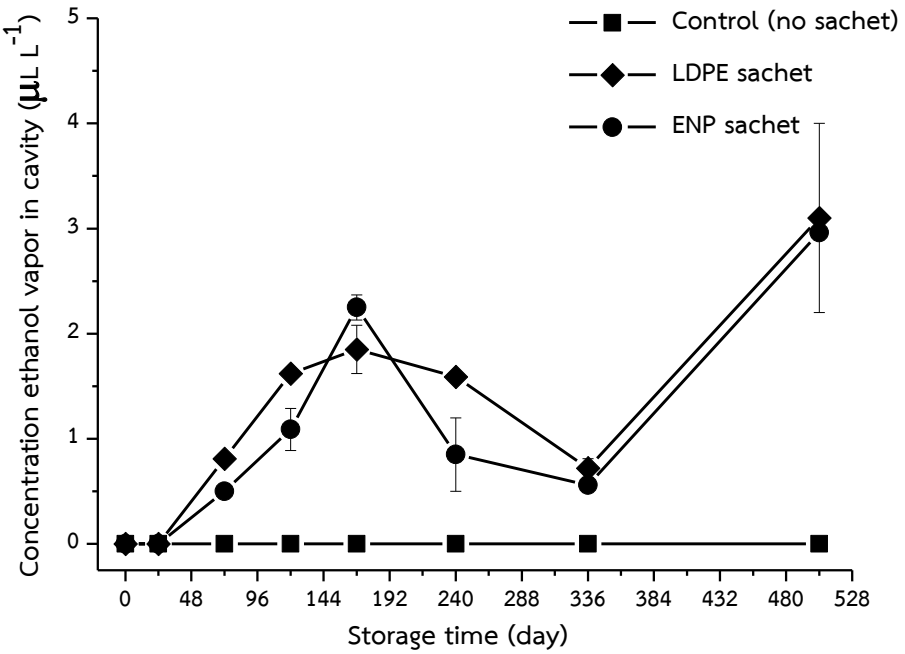
ความเข้มข้นต่ำมาก (หรือประมาณว่าเท่ากับ 0 μL L^{-1}) จึงใช้เวลาแพร่ผ่านเนื้อเยื่อในช่วงแรกภายหลัง จากนั้นจึงวัดความเข้มข้นได้



ภาพที่ 5.3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเอทานอลในเนื้อเยื่อพริกหวานเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ active MAP ที่มีซองควบคุม ฯ ENP (ENP sachet) หรือ LDPE (LDPE sachet) หรือในบรรจุภัณฑ์ passive MAP (control/no sachet) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

ภายหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 5 วัน พบว่า ความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อของพริกหวานในทุกบรรจุภัณฑ์มีค่าลดลงอาจเกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น การเกิดปฏิกิริยาของเอทานอลในเนื้อเยื่อกับเชื้อจุลินทรีย์ หรือการเปลี่ยนเอทานอลไปเป็นสารประกอบอะซีตัลดีไฮด์โดยเอนไซม์แอลกอฮอล์ดีไฮโดรจีเนส (alcohol dehydrogenase: ADH) หรือการเปลี่ยนเอทานอลไปเป็นสารกลุ่มเอสเทอร์โดยเอนไซม์ AAT (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562; Bai et al., 2011; Choosung et al., 2019) นอกจากนี้ความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อพริกหวานที่ลดลงอาจเกิดจากการแพร่ของไอระเหยเอทานอลผ่านเนื้อเยื่อพริกหวานไปยังโพรงของพริกหวาน เนื่องจากมีความแตกต่างของความเข้มข้นของเอทานอลในเนื้อเยื่อและในโพรงช่องว่าง (ภาพที่ 5.3 และ 26) ทั้งนี้ในช่วง 48 ชั่วโมงแรกของการเก็บรักษาไม่สามารถตรวจพบไอระเหยเอทานอลในโพรงช่องว่างได้ ผู้วิจัยคาดคะเนว่าเป็นผลจากการกระบวนการแพร่ของเอทานอลที่อยู่ในเนื้อเยื่อมายังโพรงช่องว่างซึ่งต้องใช้เวลาสักระยะหนึ่งอันเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ แล้วจึงเกิดการถ่ายโอนเข้าสู่โพรงช่องว่างและทำให้เกิดการ

สะสมของไอระเหยเอทานอลที่เพิ่มสูงขึ้น (ลักษณะการเพิ่มขึ้นสูงของค่าความเข้มข้นภายหลังจาก 48 ชั่วโมง)



ภาพที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไอระเหยเอทานอลในโพรงช่องว่างของพริกหวานเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ active MAP ที่มีซองควบคุม ฯ ENP (ENP sachet) หรือ LDPE (LDPE sachet) หรือในบรรจุภัณฑ์ passive MAP (control/no sachet) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

จากภาพที่ 5.4 พบว่า ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในโพรงช่องว่างของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ active MAP ทั้งสองประเภทไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งแตกต่างจากกรณีของไอระเหยเอทานอลในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์และเอทานอลในเนื้อเยื่อดังที่ได้นำเสนอข้างต้น ทั้งนี้ผู้วิจัยไม่พบไอระเหยเอทานอลในโพรงช่องว่างของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ passive MAP แม้ว่าได้พบในเนื้อเยื่อในวันที่ 21 แต่อยู่ในระดับที่ต่ำมาก ซึ่งอาจมีสาเหตุจากความแตกต่างของความเข้มข้นเอทานอลในเนื้อเยื่อและในโพรงช่องว่างจึงต่ำ ส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนเอทานอลมายังโพรงช่องว่างเกิดขึ้นได้อย่างช้ามาก ปัจจุบันยังไม่พบรายงานของการสะสมของไอระเหยเอทานอลในโพรงช่องว่างของผลิตผลอื่น ข้อมูลจากการศึกษานี้ทำให้ทราบถึงการถ่ายโอนมวลของไอระเหยเอทานอลเข้าสู่

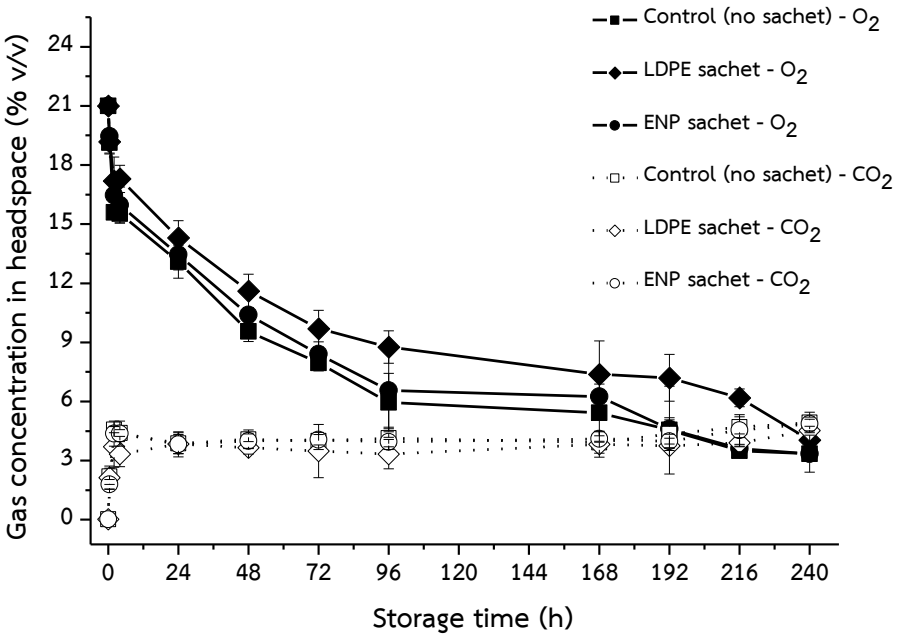
โพรงช่องว่าง ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพของส่วนประกอบภายในผลิตผล เช่น เมล็ดและการงอกเมื่อนำไปปลูก กรณีดังกล่าวนี้ควรได้มีการศึกษาต่อไป

5.2 ความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์และในโพรงช่องว่างของ

5.2.1 ความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์พริกหวานทุกประเภท[1] แสดงในภาพที่ 5.5 โดยพบว่า ความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ลดลงจากค่าเริ่มต้น 20.99% (v/v) และเข้าสู่สภาวะกึ่งคงที่ (quasi-steady state) ภายหลัง 96 ชั่วโมง โดยมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 6-9% (v/v) การลดลงของความเข้มข้นของแก๊ส O_2 เกิดจากสมดุลของกระบวนการหายใจ (ซึ่งเป็นการใช้แก๊ส O_2) และกระบวนการซึมผ่านของแก๊ส O_2 จากภายนอกสู่ภายในบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นแก๊ส O_2 (Kader et al., 1989; Waghmare and Annapure, 2013) อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ได้ลดลงประมาณ 1.5 เท่าจากค่าที่สภาวะกึ่งคงที่ภายหลังจาก 168 ชั่วโมง การลดลงดังกล่าวอาจเป็นผลจากการเกิดลดลงของช่องว่างบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ในทุกสิ่งทดลองเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 8 วัน โดยฟิล์มของบรรจุภัณฑ์แนบชิดกับพริกหวานคล้ายกับการเกิดสภาวะสุญญากาศ (ภาพที่ 5.6) แต่ความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ไม่เท่ากับ 0% (v/v) (ภาพที่ 5.5) การเปลี่ยนแปลงของบรรจุภัณฑ์ลักษณะดังกล่าว ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่าอาจเกิดจากช่องว่างในบรรจุภัณฑ์ภายหลังจากการบรรจุพริกหวานเหลือน้อย ในการศึกษาบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรสำหรับพริกหวาน Chen et al. (2000) รายงานว่า อัตราการเร็วของหายใจมีแนวโน้มที่เกิดได้สูงกว่าอัตราการซึมฟิล์มผ่านของแก๊ส O_2 (รวมถึงแก๊ส CO_2) ดังนั้นการหายไปของแก๊ส O_2 จากบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์จึงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการเข้ามาของแก๊ส O_2 จากภายนอกบรรจุภัณฑ์ ส่งผลให้ปริมาตรของช่องว่างในบรรยากาศลดลง ทั้งนี้อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลง (rate of changes) เป็นสัดส่วนที่ผกผันกับความจุของระบบ (system capacity) (Levenspiel, 1982) กล่าวคือ หากความจุของระบบมีค่าน้อยจะส่งผลให้อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้เร็ว เมื่อพิจารณาบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรในการศึกษานี้ พบว่า ความจุของระบบที่สนใจ คือ ปริมาตรของช่องว่างในบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นหากปริมาตรเกิดการลดลงอย่างชัดเจนภายหลังจากวันที่ 8 ของการเก็บรักษา ดังนั้นผู้วิจัยจึงคาดคะเนได้ว่าอัตราเร็วของอัตราการหายใจมีค่าที่สูงขึ้น และนำไปสู่การลดลงของแก๊ส O_2 โดยการลดลงของแก๊ส O_2 ดังกล่าวนั้นสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นแก๊ส CO_2 (ภาพที่ 5.5 และรายละเอียดนำเสนอในส่วนต่อไปของเนื้อหา)

[1] การศึกษาความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ดำเนินการศึกษาเป็นเวลา 10 วัน เนื่องจากใช้เครื่องวัดความเข้มข้นแก๊สทั้งสองที่ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลาสติก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จึงสามารถใช้เครื่องได้ในช่วงวันและเวลาราชการ



ภาพที่ 5.5 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และ CO_2 ในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/ no sachet) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 10 วัน (ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 3)

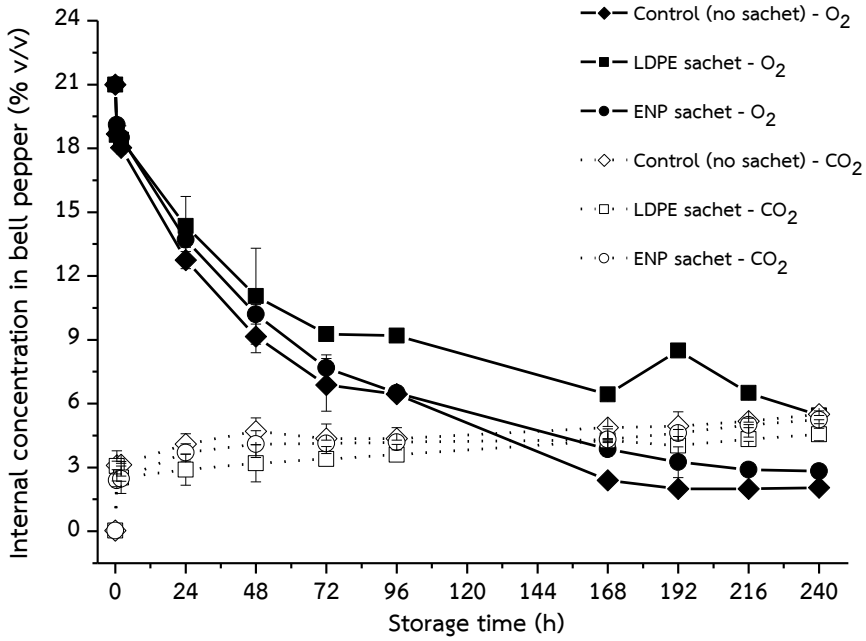
ภาพที่ 5.6 ลักษณะของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่แนบชิดกับพริกหวานคล้ายกับการเกิดสุญญากาศ

เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ระหว่างสิ่งทดลอง พบว่า ความเข้มข้นในบรรจุภัณฑ์ active MAP ที่มีซองควบคุม ฯ LDPE มีค่าสูงกว่าในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ ENP และโดยเฉพาะสิ่งทดลองควบคุมซึ่งมีค่าต่ำที่สุด (ภาพที่ 5.5) ความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ที่สูงกว่าในบรรจุภัณฑ์ active MAP ทั้งสองประเภทเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลองควบคุม แสดงให้ทราบว่าอัตราการหายใจของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ active MAP เกิดขึ้นในอัตราเร็วที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยเอทานอลกับพริกหวานที่ชะลออัตราการหายใจ ทั้งนี้ความสามารถของไอระเหยเอทานอลในการชะลอการหายใจและกระบวนการเมตาบอลิซึมของผักและผลไม้สดได้รับการรายงานดังตัวอย่าง เช่น หอมแดงสดปอกเปลือก (พัชรี มะลิลา, 2558) มะละกอสุก (วรรณวิภา ถาพร, 2559; พัชรี มะลิลา, 2562) บร็อคคอลี่ (Suzuki et al., 2004) มะม่วงน้ำดอกไม้ (เจนจิรา พกาวัลย์, 2561) และหม่อนสด (Choosung et al., 2019) จากข้อมูลในภาพที่ 5.3 - ภาพที่ 5.4 (ความเข้มข้นเอทานอลในบรรจุภัณฑ์ เนื้อเยื่อและโพรงช่องว่าง) พบว่า ซองควบคุม ฯ LDPE สามารถปล่อยไอระเหยเอทานอลได้ในอัตราเร็วที่สูงกว่าซองควบคุม ฯ ENP ส่งผลให้เกิดการสะสมของเอทานอลในทั้งบรรยากาศและในพริกหวานในระดับที่สูงกว่า จึงเป็นสาเหตุสำคัญให้เกิดการชะลอการหายใจของพริกหวานได้ดีกว่า ผลการศึกษานี้สนับสนุนประโยชน์ของไอระเหยเอทานอลที่ชะลอการหายใจของผักและผลไม้สดได้ จากข้อมูลในเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง เช่น Utto (2014) พบว่า ไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติการยอมให้แก๊ส O_2 และ CO_2 ซึมผ่านฟิล์มพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุของบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์จึงให้ผลดีในการชะลออัตราการหายใจและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพที่เกี่ยวข้อง

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ในบรรจุภัณฑ์ทุกประเภท (ภาพที่ 5.5) พบว่า มีการเพิ่มขึ้นจากค่าในวันที่ 0 ซึ่งเท่ากับ 0.03% (v/v) และเข้าสู่สภาวะกึ่งคงที่ภายหลังจาก 96 ชั่วโมง โดยมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 4-5% (v/v) และมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ทั้งในสภาวะกึ่งคงที่และการเปลี่ยนแปลงภายหลังจากวันที่ 8 ของการเก็บรักษา ทั้งนี้ความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ที่เพิ่มขึ้นในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์เป็นผลจากกระบวนการหายใจซึ่งมีผลลัพธ์สำคัญคือ แก๊ส CO_2 ไอน้ำ และพลังงาน (Kader et al., 1989) จากภาพที่ 5.5 ผู้วิจัยพบว่า ความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ในบรรจุภัณฑ์ active MAP ทั้งสองประเภทมีค่าต่ำกว่าในสิ่งทดลองควบคุม เนื่องจากการชะลอการหายใจของไอระเหยเอทานอลดังที่ได้อภิปรายข้างต้น ในขณะที่ความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ในบรรจุภัณฑ์ active MAP ที่มีซองควบคุม ฯ LDPE นั้นมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบซองควบคุม ฯ ENP ข้อมูลดังกล่าวสนับสนุนผลของไอระเหยเอทานอลต่อการชะลออัตราการหายใจของพริกหวาน

5.2.2 ความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ในโพรงช่องว่างของพริกหวาน

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 ในโพรงช่องว่างของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ active MAP และ passive MAP แสดงในภาพที่ 5.7 โดยพบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊สทั้งสองสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงภายในบรรจุภัณฑ์ (ภาพที่ 5.5) กล่าวคือความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ลดลงภายหลังจากวันที่ 0 และเข้าสู่สภาวะกึ่งคงที่ภายหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 7 วัน และเกิดการลดลงของความเข้มข้นภายหลังจากวันที่ 9 ของการเก็บรักษา ทั้งนี้ระยะเวลาของทั้งสองสภาวะนั้นแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงภายในบรรจุภัณฑ์ซึ่งเป็นผลจากการถ่ายโอนแก๊ส O_2 จากบรรจุภัณฑ์เข้าสู่เนื้อเยื่อและต่อเนื่องมายังช่องว่างของพริกหวาน ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นแก๊ส CO_2 พบว่า มีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงแก๊ส O_2 ทั้งในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์และในโพรงช่องว่างของพริกหวาน

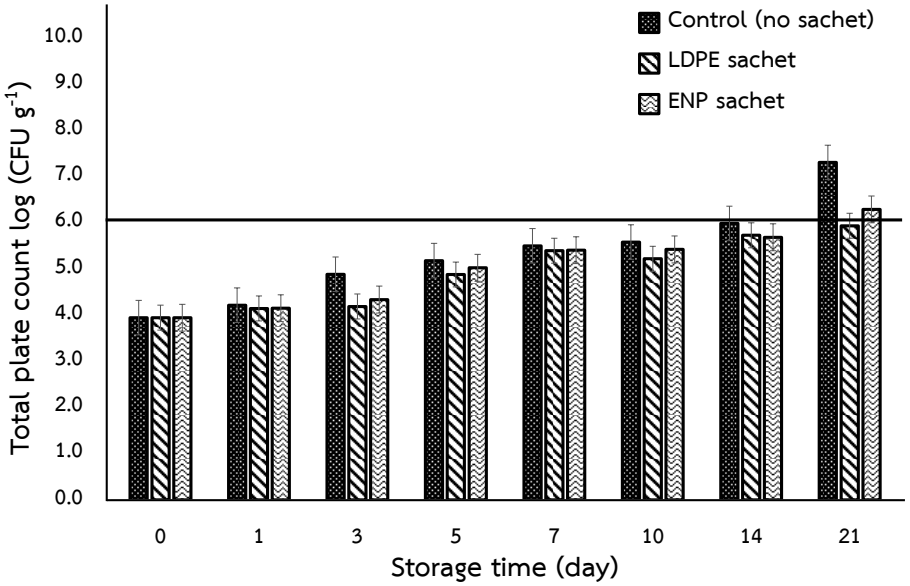


ภาพที่ 5.7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซ O_2 และ CO_2 ในโพรงช่องว่างของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/no sachet) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 10 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 3)

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของแก๊ส O_2 และแก๊ส CO_2 โพรงช่องว่างของพริกหวานในแต่ละสิ่งทดลอง พบว่า ความเข้มข้นของแก๊สทั้งสองในโพรงช่องว่างของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ active MAP ทั้งสองประเภทเกิดการเปลี่ยนแปลงช้ากว่าในบรรจุภัณฑ์ passive MAP (ภาพที่ 5.7) ความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ในโพรงช่องว่างของพริกหวาน ในบรรจุภัณฑ์ active MAP ที่มีซองควบคุม ฯ LDPE มีค่าที่สูงกว่าในสิ่งทดลองอื่น ๆ เนื่องจากซองควบคุม ฯ LDPE ปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลได้ในอัตราเร็วที่สูงกว่ากว่าซองควบคุม ฯ ENP จึงนำไปสู่การสะสมความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลภายในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ที่สูงกว่าส่งผลให้ชะลอการหายใจของพริกหวานได้ ทั้งนี้ความเข้มข้นของแก๊ส O_2 ภายในโพรงช่องว่างของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ passive MAP เกิดการลดลงเร็วมากและมีค่าต่ำกว่าสิ่งทดลองอื่น ๆ ข้อมูลนี้สนับสนุนความสามารถของไอระเหยเอทานอลต่อการชะลอการหายใจของพริกหวาน ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊ส CO_2 ในโพรงพริกหวานมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาในทุกสิ่งทดลอง สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊ส O_2 เนื่องจากพริกหวานใช้แก๊ส O_2 ในการหายใจ และผลิตแก๊ส CO_2 ออกมา ข้อมูลดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นสอดคล้องกับรายงานของนฤมล พิลาคุณ (2563) ซึ่งได้ศึกษาเก็บรักษาพริกหวาน ที่อุณหภูมิ 10°C โดยได้เพิ่มซองควบคุม ฯ ในบรรจุภัณฑ์ และรายงานว่าไอระเหยเอทานอลสามารถชะลอการหายใจของพริกหวานได้

5.3 การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในพริกหวาน

เมื่อพิจารณาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count; TPC) ของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ passive MAP และ active MAP ที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ภาพที่ 5.8 และตารางที่ ค.1) พบว่า ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา โดยเฉพาะพริกหวานในสิ่งทดลองควบคุมมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์สูงกว่าสิ่งทดลองอื่น ๆ และค่าเฉลี่ยของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของพริกหวานในสิ่งทดลองควบคุม 3.94 – 7.31 log CFU g^{-1} ภายหลังจากการเก็บรักษา 14 วัน พบว่า ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในสิ่งทดลองควบคุมมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิทยาศาสตร์กระทรวงสาธารณสุขที่กำหนดให้ผักและผลไม้มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ต่ำกว่า 6 log CFU g^{-1}



ภาพที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/ no sachet) ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10 °C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6) เส้นในแนวนอนแสดงถึงเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิทยาศาสตร์กระทรวงสาธารณสุขที่กำหนดให้ผักและผลไม้มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 6 log CFU g^{-1}

เมื่อพิจารณาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ active MAP พบว่าพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ LDPE มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดต่ำกว่าในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ ENP แม้ว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 5.8) ทั้งนี้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ LDPE มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา เนื่องจากไอระเหยเอทานอลที่สะสมภายในบรรจุภัณฑ์ซองควบคุม ฯ LDPE มีความเข้มข้นสูง จึงเกิดการดูดซับเข้าสู่เนื้อเยื่อพริกหวานในปริมาณที่สูงเช่นกัน ไอระเหยเอทานอลที่ถูกดูดซับดังกล่าวส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลง pH ในเนื้อเยื่อให้อยู่ในช่วงความเป็นกรดทำให้จุลินทรีย์เจริญได้ช้า หรือไอระเหยเอทานอลทำปฏิกิริยากับเชื้อจุลินทรีย์ส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของเซลล์เมมเบรนของเชื้อจุลินทรีย์ เช่น การแตกหรือผิดรูปของเซลล์เมมแบรนที่นำไม่สู่การเสื่อมสภาพหรือการตายของเชื้อจุลินทรีย์ได้ (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562) ในขณะที่ในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ ENP พบว่า ในวันที่ 21 มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ (ภาพที่ 5.8) อาจเป็นผลจากระดับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ ENP มีค่าที่ต่ำอยู่ในช่วง 10-50 μL L^{-1}

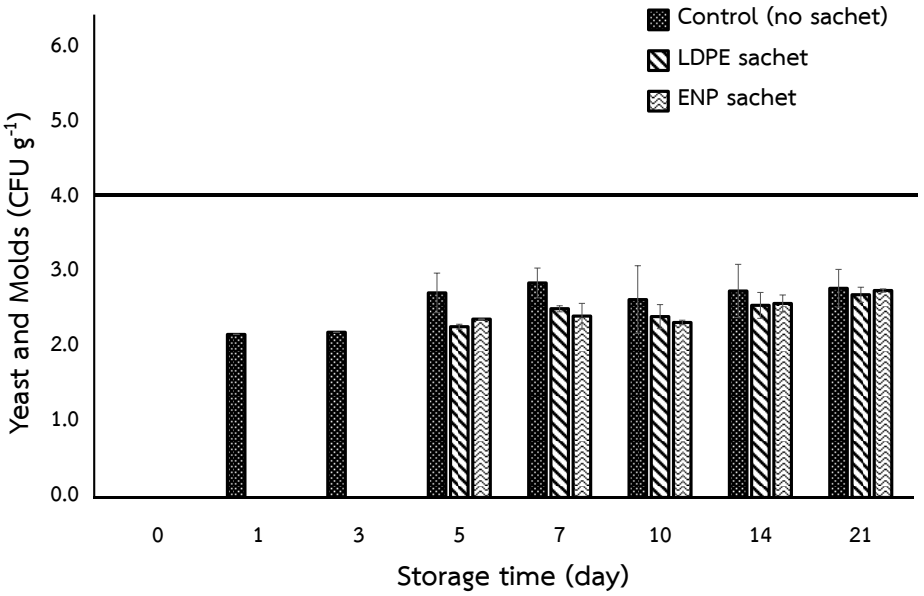
และไม่เพียงพอต่อการควบคุมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา ทั้งนี้ในวันที่ 5 ของการเก็บรักษาความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรจุภัณฑ์มีค่า ≥ 90 % RH ซึ่งเกิดการสะสมของหยดน้ำในปริมาณที่สูง เชื้อจุลินทรีย์สามารถใช้น้ำที่เกิดขึ้นนี้ในการเจริญเพิ่มจำนวนได้มากขึ้น นอกจากนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมผลของไอระเหยเอทานอลในการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตผลอื่น ๆ ได้โดยแสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งข้อมูลนี้แสดงถึงระดับความเข้มข้นที่มีศักยภาพในการชะลอเชื้อทั้งสองกลุ่ม

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างผลของไอระเหยเอทานอลในการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตผลอื่น ๆ

products	storage conditions	Packages	ethanol vapour concentrations	effects on microorganism	references
blueberries (*Vaccinium* spp., *Ericaceae*)	0±0.5℃ and 90% RH for 16 days.	commercial PET plastic boxes	250–1,000 $\mu L\ L^{-1}$	inhibition *A. alternata* and *B. cinerea* with inhibition rates 5.5-76.6%	Ji et al. (2021)
tomato (*Lycopersicon esculentum* L., cv.)	12 ℃ and 95% RH for 7 days	polystyrene containers with snap-on lids	1.2 mL L^{-1}	reduction tomato lesion/fungal colony growth (up to 50%)	Tzortzakis (2010)
bell pepper	10 ℃ for 10 day after remove to 25 ℃ for 4 day	LDPE bags	0.10-150 $\mu L\ L^{-1}$	slow down microbial growth and yeast and molds	นฤมล พิลาคุณ (2563)
shallot	10 ℃ for 10 day	polypropylene containers with LDPE film lid	130–200 $\mu L\ L^{-1}$	delay microbial growth and yeast and molds	พัชรี มะลิลา (2558)
fresh-cut persimmons	10 ℃ for up to 6 days	polyethylene film bags	120 mmol kg^{-1}	control the browning and reduced antioxidant activity	Chung et al. (2015)
cherry tomato	10 ℃ for 10 day	Active PAK™ film bags	1.70- 4.80 $\mu L\ L^{-1}$	delay microbial growth and yeast and molds	Kampawong et al. (2018)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณยีสต์และราของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ (ภาพที่ 5.9 และตารางที่ ค.2) พบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณยีสต์และราในพริกหวานของทุกสิ่งทดลองที่เหมือนกันกับเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของประกาศกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ 2553 ซึ่งเท่ากับ 4 log CFU g^{-1} ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา พริกหวานที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP ทั้งสองประเภทไม่พบปริมาณของยีสต์และราภายใน 3 วันแรกของการเก็บรักษา

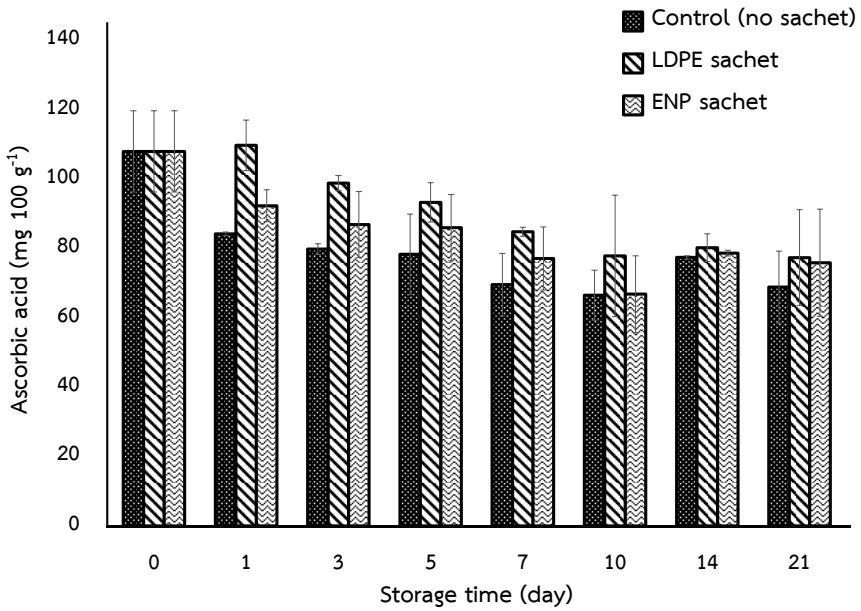
ภายหลังจากนั้นจึงมีปริมาณยีสต์และราเพิ่มขึ้น ซึ่งยังคงมีค่าต่ำกว่าสิ่งทดลองควบคุม เมื่อพิจารณาพริกหวานที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP พบว่า ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในสิ่งทดลองที่มีซองควบคุม ฯ ENP มีค่าต่ำกว่าสิ่งทดลองที่มีซองควบคุม ฯ LDPE เนื่องจากฟิล์ม ENP ที่ใช้ทำซองควบคุม ฯ มีความสามารถในการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลในอัตราเร็วที่ช้ากว่าซองควบคุม ฯ LDPE ทำให้ชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ช้ากว่าซองควบคุม ฯ LDPE จากผลการทดลองดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่มีการสะสมของไอระเหยเอทานอลได้ดีกว่าสิ่งทดลองควบคุม ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่เกิดขึ้นภายในบรรจุภัณฑ์สามารถต้านการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ จากผลการศึกษาสอดคล้องกับรายงานของนฤมล พิลาคุณ (2563) ที่ได้ศึกษาผลของไอระเหยเอทานอลปลดปล่อยจากซองควบคุม ฯ LDPE ในบรรจุภัณฑ์พริกหวานสด โดยพบว่า ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมภายในบรรจุภัณฑ์สามารถชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราได้ดีกว่าบรรจุภัณฑ์ passive MAP ดังนั้นความสามารถในการควบคุมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์สัมพันธ์กับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล (Utto, 2014)



ภาพที่ 5.9 การเปลี่ยนแปลงของยีสต์และราในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/no sachet) ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6) เส้นในแนวนอนแสดงถึงเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิทยาศาสตร์กระทรวงสาธารณสุขที่กำหนดให้ผักและผลไม้มียีสต์และราต่ำกว่า 4 log CFU g^{-1}

5.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิก

พริกหวานและพริกสดอื่น ๆ เป็นผลิตผลที่มีวิตามินซี (กรดแอสคอร์บิก) ในปริมาณที่สูง (Kumar and Tata, 2009; Martínez et al., 2005) การวิจัยนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ active MAP และ passive MAP ในระหว่างการเก็บรักษา (ตารางที่ ค.3 และภาพที่ 5.10) โดยพบว่าปริมาณกรดแอสคอร์บิกของพริกหวานในทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ active MAP ที่มีซองควบคุม ฯ LDPE มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกลดลงในอัตราเร็วที่ช้ากว่าในสิ่งทดลองอื่น ๆ ในขณะที่พริกหวานในบรรจุภัณฑ์ passive MAP มีปริมาณปริมาณกรดแอสคอร์บิกลดลงในอัตราเร็วที่สูงกว่าบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ LDPE และซองควบคุม ฯ ENP) ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของไอระเหยเอทานอลชะลอการสูญเสียวิตามินได้ โดยเป็นผลต่อเนื่องจากการชะลอการหายใจและ/หรือการชะลอการชราภาพ (senescence) ดังในกรณีของบรอคคอลี่ (Suzuki et al., 2004) จากการศึกษาเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง พบว่า ไอระเหยเอทานอลชะลอการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกของพริกหวานดังในการศึกษาของ (นฤมล พิลาคุณ, 2563) และผลิตผลอื่น ๆ เช่น มะละกอสุกหั่นชิ้น (พัชรี มะลิลา, 2562) มะเขือเทศเชอรี่ (หทัยพร กัมพวงค์, 2560) และ ถั่วงอก (Goyal et al., 2014) (ตารางที่ 5.2)



ภาพที่ 5.10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานบรรจุในในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/no sachet) เป็นเวลา 21 วัน ที่อุณหภูมิ 10°C (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างของผลของไอระเหยเอทานอลซึ่งชะลอการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกในผลิตผลพืชสวนบางประเภท

ผลิตผลสด	บรรจุภัณฑ์ Active MAP		อุณหภูมิ (°C)	ความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล ($\mu L\ L^{-1}$)	ช่วงปริมาณกรดแอสคอร์บิคที่รายงานในการศึกษา	เอกสารอ้างอิง
	ระบบแอคทีฟ	บรรจุภัณฑ์				
พริกหวาน	ซองควบคุม ฯ Active PAK™	ถุงพลาสติก LDPE	10	0.43-1.24	54.67-79.03	นฤมล พิลาคุณ (2563)
			25	6.55-149.15	53.33-75.00	
มะละกอ	ซองควบคุม ฯ silicone coated PET	ถาดพลาสติกแข็ง PP ปิดปากถาดด้วยฟิล์ม LDPE	25	16.46-1,295.62	30.78-36.62	พัชรี มะลิลา (2562)
มะเขือเทศเชอรี่	ซองควบคุม ฯ LDPE	ถาดพลาสติกแข็ง PP บรรจุในถุงพลาสติก 3 ประเภท ประกอบด้วยฟิล์มพลาสติก LDPE ActivePaK™ และ FF3	10	0.91-2.51	14.66-20.05	Kampawong et al. (2018)
			25	2.64-6.86	13.46-24.58	
ถั่วงอก	การรมและสัมผัสไอระเหยของเอทานอลในภาชนะแก้ว เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	ถ้วยพลาสติกปิดด้วยพลาสติก wrap ที่มีการเจาะรู 2 %	7±1	ไม่ได้ระบุ	27.40-36.7	Goyal et al. (2014)

จากผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกของพริกหวานที่กล่าวข้างต้นในบรรจุภัณฑ์ passive MAP และ active MAP ผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงของกรดแอสคอร์บิก โดยใช้สมการ first-order kinetic reaction equation (4) ซึ่งอยู่ในรูปของ analytical solution of ordinary differential equation มาทำนายการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ทั้ง 2 ประเภท ซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน แสดงผลการทำนายดังภาพที่ 5.11 ทั้งนี้ยังใช้หลักการของแบบจำลองการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้นตรง (nonlinear regression) เพื่อประมาณค่าของสมการที่ 2 และพิจารณาค่าที่ได้จากค่า root mean square of errors (RMSE) ซึ่งควรมีค่าต่ำกว่า 2 (นฤมล พิลาคุณ, 2563; พัชรี มะลิลา, 2562) ดังแสดงในตารางที่ 5.3

$$C_{bell}^{AA} = C_{bell,\infty}^{AA} + \left(\left(C_{bell,ini}^{AA} - C_{bell,\infty}^{AA} \right) \exp\left(-k_{bell}^{AA} \cdot t \right) \right) \quad (4)$$

โดยที่

C_{bell}^{AA} = ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกในพริกหวาน ณ เวลาหนึ่งที่สนใจ (mg $100g^{-1}$)

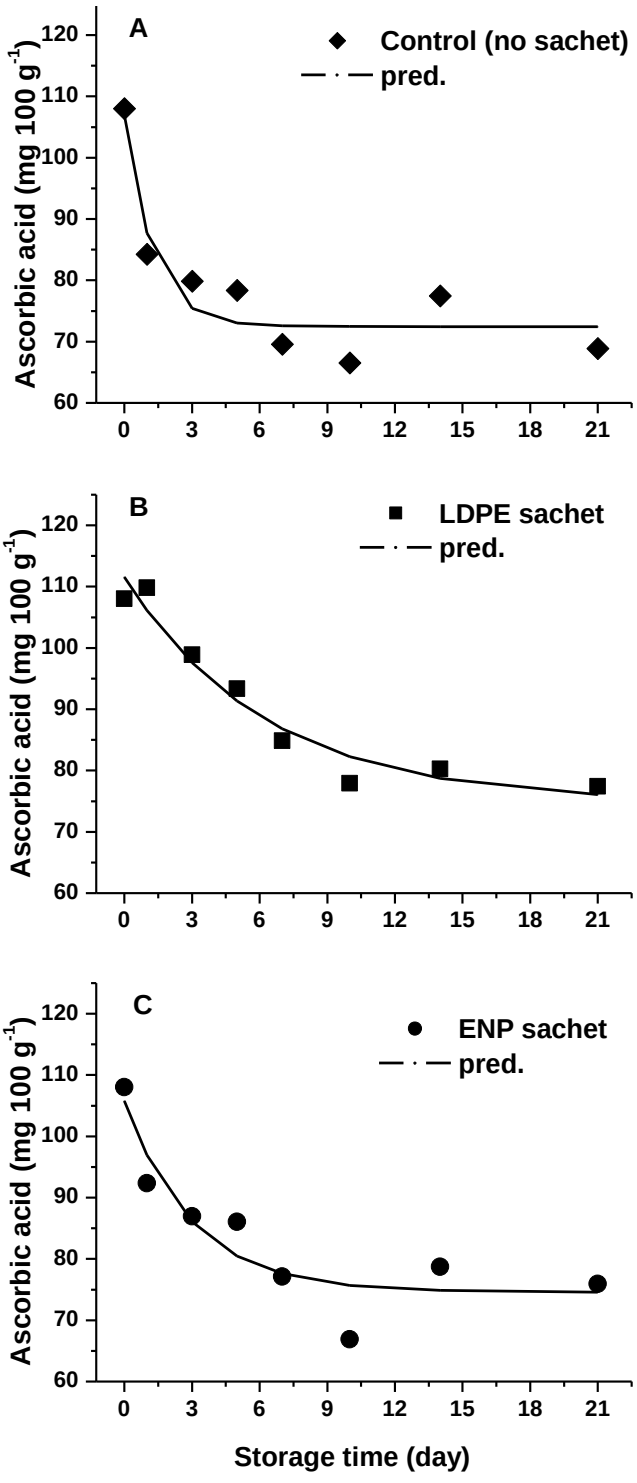
$C_{bell,ini}^{AA}$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดแอสคอร์บิกในพริกหวาน (mg $100g^{-1}$)

$C_{bell,\infty}^{AA}$ = ความเข้มข้นของกรดแอสคอร์บิกในพริกหวาน เมื่อเวลา infinite time (mg $100g^{-1}$)

k_{bell}^{AA} = ค่าสัมประสิทธิ์ของ first-order kinetic reaction (day^{-1}) สำหรับการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิคในพริกหวาน

t = เวลาการเก็บรักษา (day)

ในภาพที่ 5.11 และตารางที่ 5.3 พบว่า จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ passive MAP และ active MAP สามารถทำนายด้วยสมการ first-order kinetic reaction equation (4) ได้เป็นอย่างดี เมื่อพิจารณาในตารางที่ 5.3 พบว่า ค่า k_{bell}^{AA} ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ passive MAP (Control) มีค่าสูงกว่าพริกหวานที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP ทั้ง 2 ประเภท (ซองควบคุม ฯ LDPE และซองควบคุม ฯ ENP) ซึ่งแสดงให้ทราบว่า พริกหวานในบรรจุภัณฑ์ passive MAP มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในอัตราเร็วที่สูงกว่าในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ ในขณะที่ค่า k_{bell}^{AA} ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีซองควบคุม ฯ LDPE มีค่าต่ำสุด จากข้อมูลการทดลองนี้สนับสนุนผลของไอระเหยเอทานอลสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานได้ นอกจากนี้ทำให้ทราบได้ว่าการชะลอการเปลี่ยนแปลงกรดแอสคอร์บิกมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอล



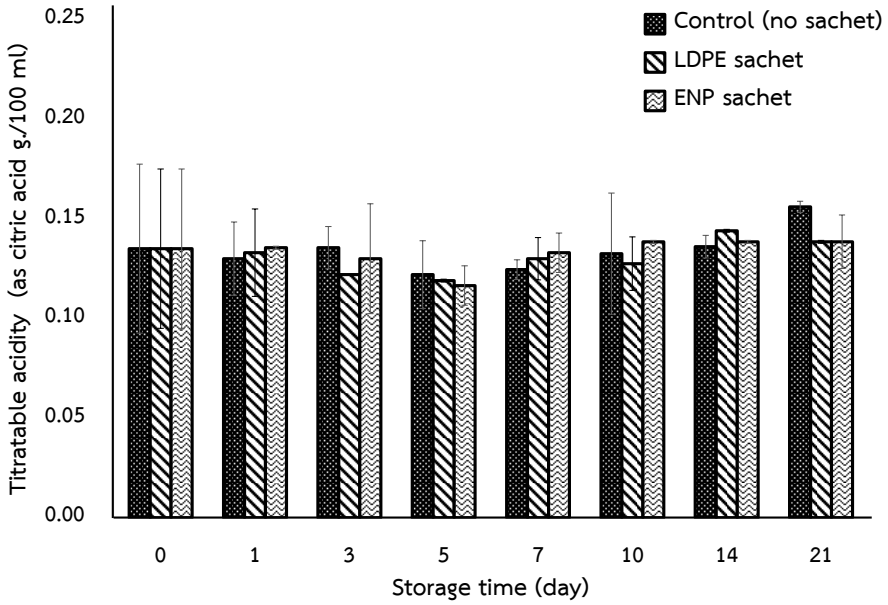
ภาพที่ 5.11 จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวาน ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน ในบรรจุภัณฑ์พริกหวานที่ไม่มีซองควบคุม ฯ (A), ซองควบคุม ฯ LDPE (B) และซองควบคุม ฯ ENP (C) (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

ตารางที่ 5.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของ Eq. (4) จากการทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/no sachet) ที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน

Packaging	k_{bell}^{AA}	RSME	R^2
Control	0.817	0.083	0.883
LDPE	0.154	0.114	0.952
Active PAK™	0.332	0.240	0.861

5.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดทั้งหมดและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

เมื่อพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงกรดทั้งหมด (titratable acidity; TA) ของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ passive MAP (สิ่งทดลองควบคุม) และ active MAP (ซองควบคุม ฯ LDPE และซองควบคุม ฯ ENP) แสดงในภาพที่ 5.12 และตารางที่ ค.4 พบว่า ปริมาณ TA ของพริกหวานในทุกสิ่งทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันตลอดระยะเวลาการศึกษา โดยค่า TA ของพริกหวานในทุกสิ่งทดลองอยู่ในช่วง 0.12 – 0.16 mg $100g^{-1}$ ผลของไอระเหยเอทานอลที่ไม่ชัดเจนต่อการเปลี่ยนเปลี่ยนแปลงของค่า TA อาจเป็นสาเหตุจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในอัตราเร็วที่ช้า (Shi et al., 2018) และ/หรือชะลออัตราการหายใจและกระบวนการเมตาบอลิซึมของพริกหวานได้ซึ่งนำไปสู่การชะลอการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี (Chaudhary et al., 2014) ที่รวมถึงปริมาณ TA ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับ จากรายงานของ Liu et al. (2019) ได้ศึกษาผลของเอทานอลที่เก็บรักษามะเขือเทศเชอรี่ที่ 25 °C พบว่าปริมาณ TA ของมะเขือเทศเชอรี่ลดลงเพียงเล็กน้อยและไม่แตกต่างจากสิ่งทดลองควบคุม โดยไอระเหยเอทานอลไม่มีผลต่อค่า TA ของมะเขือเทศเชอรี่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลตลอดจนของแข็งที่ละลายน้ำได้มีอัตราที่ต่ำ สอดคล้องกับการศึกษาของ Bai et al. (2011) ซึ่งได้ศึกษาการเก็บรักษาเชอร์รี่หวาน (sweet cherry) ในบรรจุภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 1-20°C โดยผู้วิจัยรายงานว่า ไอระเหยเอทานอลไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงค่า TA ในการเก็บรักษาที่ 1°C เนื่องจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำและเชอร์รี่มีส่วนประกอบที่เป็นของแข็งละลายน้ำในปริมาณต่ำ อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 และ 20°C ส่งผลให้ค่า TA มีค่าลดลงเร็วกว่าที่ 1°C ซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจึงเร่งกระบวนการเมตาบอลิซึมทำให้เกิดการเปลี่ยนของแข็งที่ละลายน้ำ (แป้ง) ให้เป็นน้ำตาล

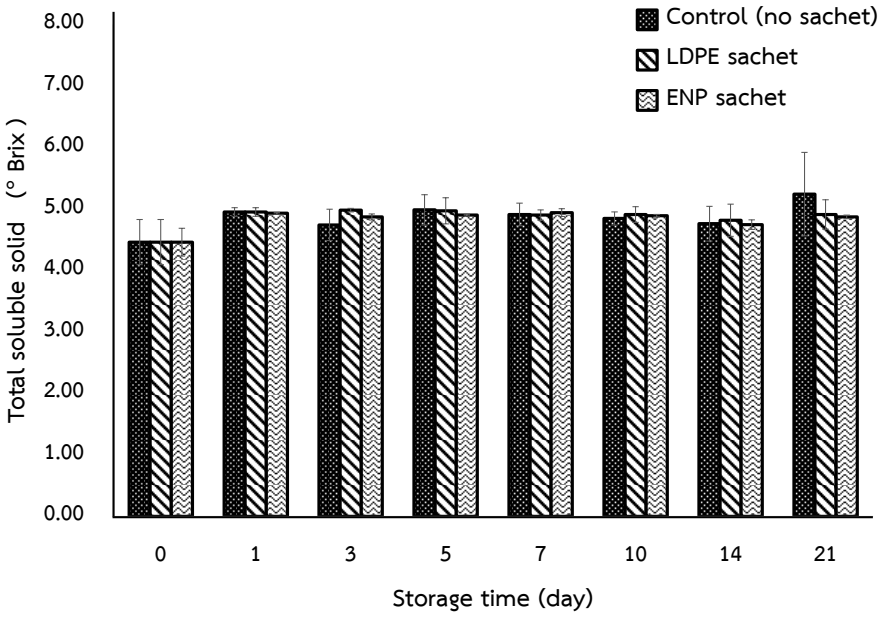


ภาพที่ 5.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดทั้งหมดในพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/ no sachet) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแข็งที่ละลายน้ำได้ (total soluble solid; TSS) (ภาพที่ 5.13 และตารางที่ ค.5) พบว่า พริกหวานในบรรจุภัณฑ์ passive MAP (สิ่งทดลองควบคุม) มีปริมาณ TSS เพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีค่าอยู่ในช่วง 4.46 – 5.24 °Brix ในขณะที่พริกหวานที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟมีค่า TSS ที่ไม่แตกต่างจากพริกหวานในวันที่ 0 (ภาพที่ 5.13) เนื่องจากไอระเหยเอทานอลสามารถชะลอการหายใจของพริกหวาน รวมถึงการเก็บรักษาพริกหวานที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้กระบวนการเมตาบอลิซึมที่เปลี่ยนแป้งไปเป็นน้ำตาลเกิดขึ้นได้ช้า และพริกหวานจัดอยู่ในกลุ่ม non-climacteric fruit เนื่องจากไม่สามารถสร้างเอทิลีนในระหว่างการสุกได้ การสุกของพริกหวานพิจารณาจากการสูญเสียความแน่นเนื้อและการละลายของเพคตินที่เพิ่มขึ้น (Paul et al., 2012; O'Donoghue et al., 2020) นอกจากนี้มีปริมาณแป้งต่ำ (O'Donoghue et al., 2020) ทำให้การเปลี่ยนแปลงของแป้งไปเป็นน้ำตาลในระหว่างการสุกมีผลเพียงเล็กน้อย

ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานของ Shao et al. (2020) ทดสอบการรมควันเอทานอลหลังการเก็บเกี่ยวมะไฟ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 8 ± 0.5°C นาน 12 วัน พบว่า ไอระเหยเอทานอลซึ่งมีความเข้มข้น 500 μL L^{-1} ชะลอการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่สามารถละลายได้ เนื่องจากเอทานอลสามารถลดอัตราการผลิตเอทิลีนซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการสุกของผลิตผล ในการศึกษาของ Suzuki et al. (2004) รายงานว่า ไอระเหยเอทานอลชะลอกิจกรรมของ 1-carboxylate oxygenase

(ACC oxidase) ซึ่งเป็นเอนไซม์สำคัญในการสร้างเอทิลีนของบรอคอลี่ ในการศึกษาการเก็บรักษาองุ่นที่อุณหภูมิ 0°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90–95% RH Candir et al. (2012) รายงานว่า ของแข็งที่ละลายน้ำได้มีค่า TSS ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากซูโครสในองุ่นถูกย่อยสลาย อย่างไรก็ตามไอระเหยเอทานอลจึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแข็งที่ละลายน้ำได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้ช้าที่อุณหภูมิการเก็บรักษาที่ต่ำ

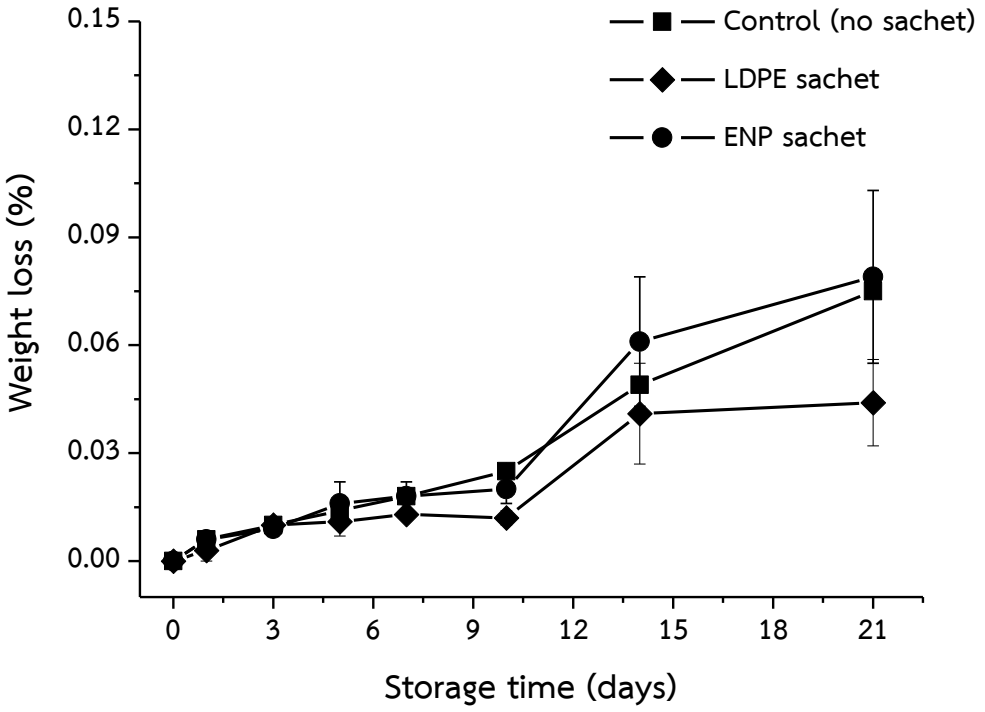


ภาพที่ 5.13 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/no sachet) ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

5.6 การสูญเสียน้ำหนักและความแน่นเนื้อของพริกหวาน

การสูญเสียน้ำหนักของผักและผลไม้ระหว่างการเก็บรักษาหรือภายหลังการเก็บเกี่ยว เกิดการคายน้ำอย่างต่อเนื่องเป็นสาเหตุอย่างหนึ่งของการเสื่อมเสียของผักและผลไม้ ส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาและการสูญเสียมูลค่าทางการตลาด (จันทร์สุดา จงสวัสดิ์, 2540) ผลการสูญเสียน้ำหนักของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ passive MAP (สิ่งทดลองควบคุม) และ active MAP (ซองควบคุม ฯ LDPE และซองควบคุม ฯ ENP) แสดงในภาพที่ 5.14 และตารางที่ ค.6 ผลการศึกษาพบว่า พริกหวานมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามการสูญเสียน้ำหนักของพริกหวานในทุกสิ่งทดลองพบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ

0.002 – 0.079 ซึ่งมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก โดยเป็นผลมาจากการเก็บรักษาในถุงพลาสติก LDPE ที่มีความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำที่สูงทำให้ไอน้ำสะสมในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ที่สูงมากจึงลดความแตกต่างระหว่างความชื้นในพริกหวานและในบรรยากาศของบรรจุภัณฑ์ (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562)

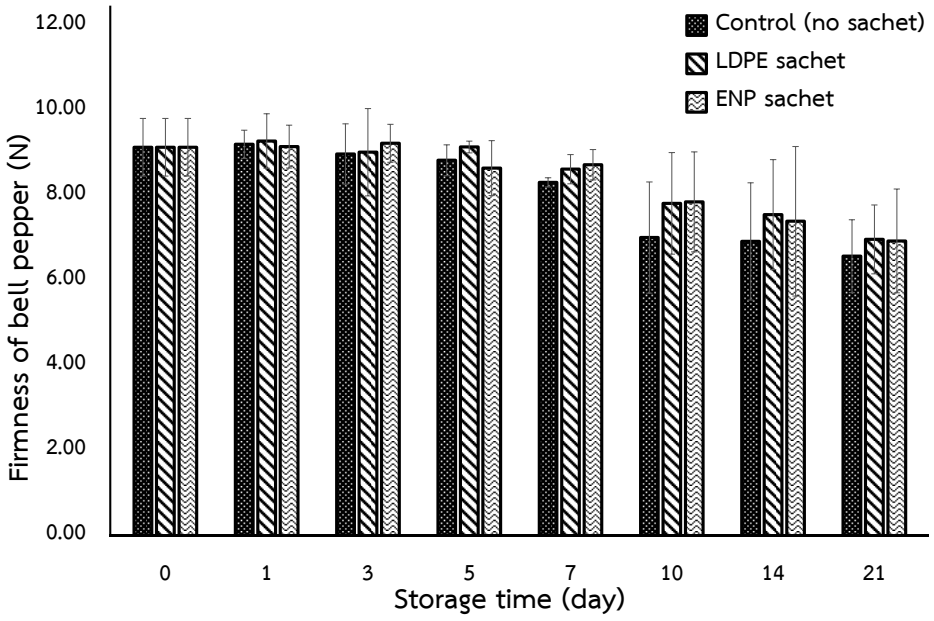


ภาพที่ 5.14 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/ no sachet) ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ active MAP และ passive MAP แสดงในภาพที่ 5.15 และตารางที่ ค.7 พบว่า ความแน่นเนื้อของพริกหวานของทุก ๆ สิ่งทดลองมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการเก็บรักษา ค่าอยู่ในช่วง 6.57 - 9.27 และไม่มีความแตกต่างกันระหว่างสิ่งทดลอง การลดลงของความแน่นเนื้อเกิดเนื่องจากความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างพริกหวานและภายในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์ทำให้เกิดการคายน้ำอย่างต่อเนื่อง (แม้ว่าเกิดขึ้นในระดับที่ไม่สูงมากดังที่อภิปรายข้างต้น) การสูญเสียความชื้นจากบรรจุภัณฑ์ทำให้ในความแน่นเนื้อลดลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อในช่วงแรกเกิดขึ้นได้ช้าในช่วง 7 วันแรกของการเก็บรักษา เนื่องจากเก็บรักษาพริกหวานที่อุณหภูมิต่ำ ตัวอย่างผลของการเก็บรักษา

ผลิตผลที่อุณหภูมิต่ำและชะลอการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส เช่น Chung et al. (2015) รายงานว่า การเก็บรักษาลูกพลับตัดสด ที่อุณหภูมิ 20°C ชะลอการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของลูกพลับตัดสดได้ดีกว่าการเก็บที่อุณหภูมิสูง ทำให้การเคลื่อนที่ของไอน้ำจากพริกหวานมายังภายในบรรยากาศบรรจุภัณฑ์เป็นไปอย่างช้า ๆ อย่างไรก็ตามภายหลังจาก 7 วัน ความแน่นเนื้อมีอัตราเร็วของการลดลงที่สูงขึ้น เป็นผลมาจากการเสื่อมสลาย/ชราภาพของผนังเซลล์ของพริกหวาน และอาจเป็นผลของเอนไซม์เพคติเนสที่ย่อยสลายเพคตินในองค์ประกอบของผนังเซลล์ (วีรเวทย์ อุทโธ, 2562)

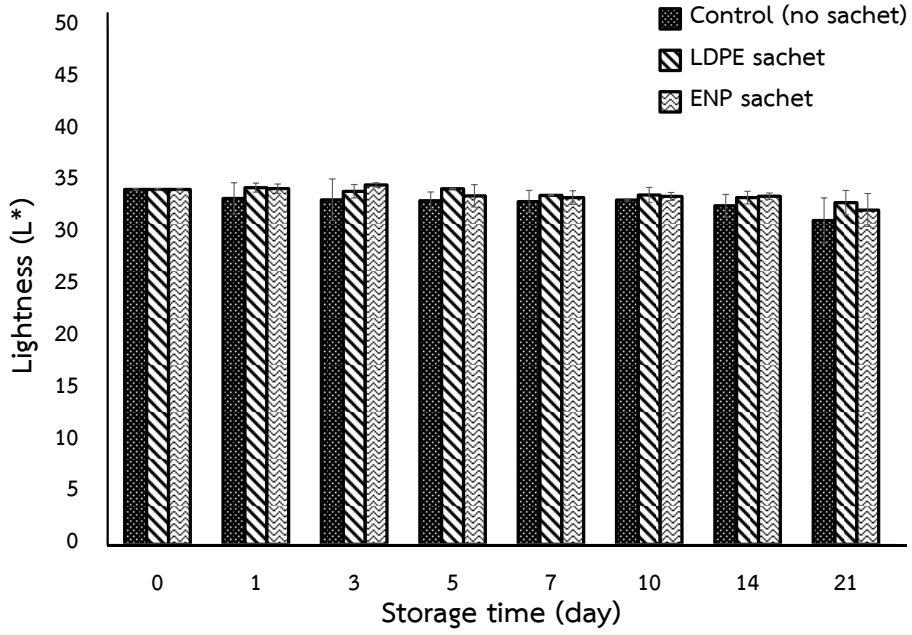
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพริกหวานที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่มีซองควบคุม ฯ LDPE และซองควบคุม ฯ ENP พบว่า ค่าความแน่นเนื้อไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แม้จะมีความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่แตกต่างกันก็ตาม ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาการเก็บรักษาแอปเปิล ที่อุณหภูมิ 5.5 °C Bai et al. (2004) รายงานว่า ไอระเหยเอทานอลไม่มีผลต่อค่าความแน่นเนื้อ เนื่องจากไอระเหยเอทานอลสามารถชะลอการหายใจของแอปเปิลสไลด์ได้ แต่ความแน่นเนื้อไม่มีความแตกต่างจากสิ่งทดลองควบคุม



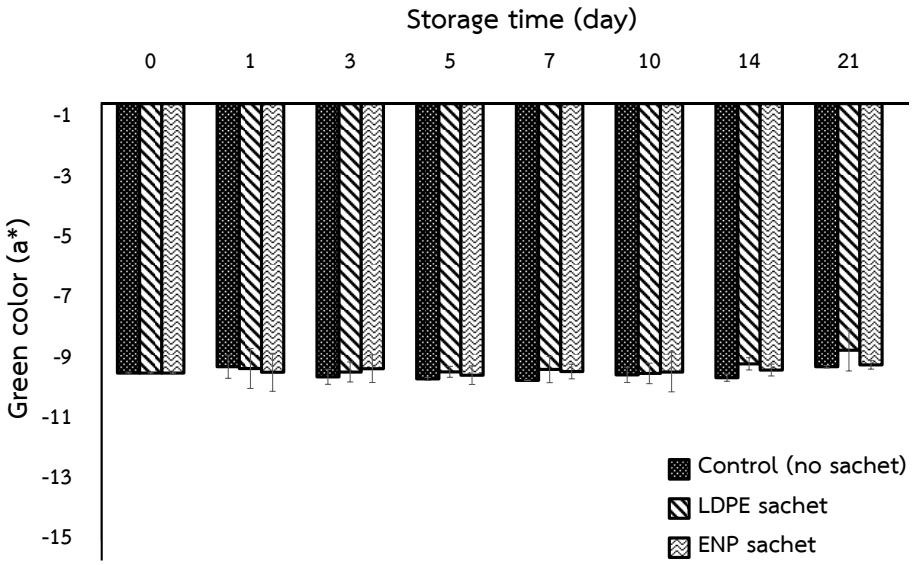
ภาพที่ 5.15 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/ no sachet) ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

5.7 การเปลี่ยนแปลงสีของพริกหวาน

การเปลี่ยนแปลงสีของผิวพริกหวานในบรรจุภัณฑ์ active MAP และบรรจุภัณฑ์ passive MAP แสดงในภาพที่ 5.16 และภาพที่ 5.17 โดยพบว่า ค่าความสว่าง (L*) (ภาพที่ 5.16 และตารางที่ ค.8) และค่า a* (ภาพที่ 5.17 และตารางที่ ค.9) ไม่มีความแตกต่างกันในทุกสิ่งทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ทั้งนี้ค่า L* มีค่าใกล้เคียงกับค่าซึ่งวัดในวันที่ 0 และอยู่ในช่วง 31.26 – 34.69 ในขณะที่ค่า a* มีค่าติดลบ แสดงให้เห็นว่าผิวของพริกหวานมีสีเขียว โดยมีค่า a* อยู่ในช่วง -9.69 ถึง -8.68 ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยนี้เนื่องจากทำการเก็บรักษาพริกหวานในสภาวะอุณหภูมิต่ำซึ่งสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสีของพริกหวานได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลักษณะปรากฏที่เห็นด้วยตาเปล่า พบว่า สีของพริกหวานเริ่มมีสีเขียวอ่อนลง ซึ่งอาจเกิดจากการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ แต่ยังไม่ถึงกับแตกต่างจากค่าวันที่ 0 ผลการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้สอดคล้องกับรายงานของ Fawole and Opara (2013) ซึ่งได้ศึกษาทับทิมที่เก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 10 และ 22°C เป็นเวลา 6 สัปดาห์ การใช้อุณหภูมิที่ต่ำไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อทับทิม โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงแอนโทไซยานิน (anthocyanin content) ที่อุณหภูมิ 10°C เกิดขึ้นในอัตราที่ต่ำจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้สีของทับทิมระหว่างสิ่งทดลองจึงไม่มีความแตกต่างกัน



ภาพที่ 5.16 การเปลี่ยนแปลงค่าสีของผิวพริกหวาน โดยมีค่าความสว่าง (L*) ในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/no sachet) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)



ภาพที่ 5.17 การเปลี่ยนแปลงค่าสีของผิวพริกหวาน โดยมีค่าสีเขียว (a*) บรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/no sachet)ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

5.8 สรุปประเด็นสำคัญ

จากผลการตรวจสอบคุณภาพพริกหวานทั้งด้านเคมี กายภาพ และด้านเชื้อจุลินทรีย์พริกหวานที่เก็บในถุงพลาสติก LDPE เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเร็วกว่าพริกหวานที่เก็บในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล ในทุกการทดสอบผลที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากการใช้ประโยชน์จากไอระเหยเอทานอลสามารถช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในด้านต่าง ๆ ได้ ในบทต่อไปได้นำเสนอสรุปการวิจัยในภาพรวมและข้อเสนอแนะสำหรับการดำเนินการวิจัยต่อไป

บทที่ 6
สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อพัฒนาฟิล์มพลาสติกประเภทชอบน้ำประกอบเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล ทั้งนี้ผู้วิจัยมีเป้าหมายในการใช้ความชื้นเป็นตัวกระตุ้นการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากซองควบคุม ฯ ซึ่งความชื้นที่สะสมในบรรจุภัณฑ์มักมีค่าที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับความชื้นในอากาศสภาวะอุณหภูมิห้องทั่วไป ดังนั้นการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลออกมาเมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ภายในบรรยากาศ จึงเป็นแนวทางในการรักษาปริมาณเอทานอลที่อยู่บนตัวพา เพื่อให้เพียงพอต่อการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผักและผลไม้ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา

การวิจัยนี้ได้พัฒนาฟิล์มพลาสติกหลายชั้น (multilayer films) ซึ่งมีชั้นฟิล์มพลาสติกที่ชอบน้ำประกอบด้วย ฟิล์มพลาสติก EVA และฟิล์มพลาสติก Nylon/PE (เรียกชื่อย่อว่าฟิล์มพลาสติก ENP) เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุของซองควบคุม ฯ โดยผู้วิจัยพบว่าซองควบคุม ฯ ENP สามารถชะลอการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลได้ 6-24 ชั่วโมงภายหลังจากการเตรียมซองควบคุม ฯ ทั้งในสภาวะความชื้นสัมพันธ์ที่อุณหภูมิห้องทั่วไป (60-75% RH) หรือในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงมาก (90-99% RH) เนื่องจากฟิล์มพลาสติก ENP มีค่า FPE ที่ต่ำ ทั้งนี้ระดับความชื้นที่สูงมากได้กระตุ้นการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลได้ดีกว่าระดับความชื้นที่ต่ำลง เนื่องจากการดูดซับความชื้นจากบรรยากาศเข้าสู่ชั้นฟิล์มและเกิดปรากฏการณ์พลาสติไซเซชันซึ่งทำให้โครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มเกิดการขยายตัวและทำให้เกิดการแพร่ผ่านของโมเลกุลเอทานอลได้ในอัตราที่เร็วขึ้น ข้อมูลจากผลการศึกษานี้ได้แสดงให้ทราบว่าฟิล์มพลาสติกหลายชั้น ENP ที่พัฒนาขึ้นนี้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์งานวิจัยซึ่งชะลอการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลภายหลังจากการเตรียมซองควบคุม ฯ และการปลดปล่อยได้รับการกระตุ้นโดยระดับความชื้นที่สูง

เมื่อทำการประยุกต์ใช้ซองควบคุม ฯ ENP ในบรรจุภัณฑ์ active MAP สำหรับพริกหวานสด ผู้วิจัยพบว่า การปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลเกิดการชะลอได้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ในขณะที่ซองควบคุม ฯ LDPE ซึ่งมีวัสดุฟิล์มพลาสติก LDPE ปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลอย่างทันทีทันใดภายหลังจากเตรียมและบรรจุเข้าในบรรจุภัณฑ์ แม้ว่าซองควบคุม ฯ ENP ปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลได้ช้าและมีอัตราเร็วของการปลดปล่อยที่ต่ำกว่า ผู้วิจัยพบว่า ระดับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรจุภัณฑ์มีศักยภาพในการชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ใกล้เคียงกับความเข้มข้นที่สูง

กว่าซึ่งปลดปล่อยจากซองควบคุม ฯ LDPE ตลอดจนไอระเหยเอทานอลที่สะสมในบรรยากาศ เนื้อเยื่อและโพรงช่องว่างของพริกหวานมีแนวโน้มชะลอการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีโดยเฉพาะการหายใจและการลดลงของปริมาณวิตามินซี ข้อมูลจากการทดลองนี้แสดงให้ทราบถึงแนวทางของการประยุกต์ใช้ซองควบคุม ฯ ENP สำหรับการบรรจุภัณฑ์พริกหวานสดหรือผลิตผลอื่น ๆ เพื่อชะลอการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอื่น ๆ ทั้งนี้ระดับความเข้มข้นของไอระเหยเอทานอลที่สะสมในระดับที่ไม่สูงมากในบรรจุภัณฑ์ active MAP ที่มีซองควบคุม ฯ ENP อาจส่งผลดีต่อการยอมรับของผู้บริโภคบางกลุ่มที่อาจพิจารณาว่ากลิ่นไอระเหยเอทานอลที่สะสมในระดับสูงนั้นเป็นสัญลักษณ์ของการหมักและการเก่าเก็บของผลิตผล

ในภาพรวมของงานวิจัยนี้ พบว่า ระเบียบวิธีวิจัยซึ่งนำมาประยุกต์ใช้และการวางแผนการศึกษามีความเหมาะสม ส่งผลให้ผลการดำเนินการวิจัยนี้บรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้ตั้งไว้ ฟิล์มพลาสติกหลายชั้นที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพชะลอการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลได้ตลอดจนการปลดปล่อย ฯ ถูกกระตุ้นได้โดยความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงดังในบรรจุภัณฑ์พลาสติกบรรจุผักและผลไม้สด ทั้งนี้ผู้วิจัยพิจารณาว่าซองควบคุม ฯ ENP สามารถนำไปใช้กับประยุกต์ใช้กับผลิตผลอื่น ๆ โดยเฉพาะกลุ่มพืชใบซึ่งมีแนวโน้มการคายน้ำที่สูง โดยอาศัยความชื้นที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลและนำไปสู่การชะลอการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษา อันเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มความสามารถทางการตลาดของผักและผลไม้ของประเทศไทยต่อไป

6.2 ข้อเสนอแนะการวิจัยต่อไป

6.2.1 ศึกษาวิธีการผลิตฟิล์มอื่น ๆ เพื่อปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์มที่พัฒนาขึ้น เพื่อตอบสนองความชื้นได้ง่ายขึ้น แต่ยังคงชะลอการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอล

6.2.2 พัฒนาซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอล พร้อมทั้งสามารถกระตุ้นการปลดปล่อยและควบคุมความชื้นได้

6.2.3 ทดสอบและประยุกต์ซองควบคุม ฯ ENP กับผลิตผลอื่น ๆ เช่นในผักผลไม้จัดอยู่ในกลุ่ม climacteric และ non - climacteric หลาย ๆ ชนิด

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

งามทิพย์ ภู่วโรดม. **การบรรจุอาหาร**. กรุงเทพมหานคร: เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์, 2549.

เจนจิรา พกาวัลย์. “การใช้ไอระเหยเอทานอลในการควบคุมดรคขั้วผลเน่า และโรคแอนแทรคโนสใน มะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์สี่ในระยะสุก”, **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**. 4(พิเศษ): 11-14; กรกฎาคม, 2561.

จันทร์สุดา จงสวัสดิ์. **คุณภาพและอายุการเก็บรักษาของผลไม้สดพร้อมบริโภค (มะละกอสุก ฝรั่ง และแคนตาลูป)**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2540.

จริงแท้ ศิริพานิช. **สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้**. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549.

ดนัย บุญเกียรติ และนิธิยา รัตนาปนนท์. **การปฏิบัติการหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้**. กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์, 2535.

ไทยเกษตรศาสตร์. (2556). “การแทงผ่านของเชื้อโรคสู่พืช”**, ไทยเกษตรศาสตร์**. https://www.thaikasetsart.com. 15 มีนาคม, 2563.

นฤมล พิลาคุณ. **การพัฒนาบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแอคทีฟประเภทซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลสำหรับพริกหวานสด.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2563.

เนตรนภิส เขียวขำ. (2562). “การเข้าทำลายของเชื้อราสาเหตุโรคหลังการเก็บเกี่ยวที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่าง”, **ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว.** https://www.phtnet.org/2019/03/1122/. 29 ธันวาคม, 2562.

นิตยา ภูงาม. **การเปลี่ยนแปลงสมบัติการยอมให้ก๊าซออกซิเจนซึมผ่านของฟิล์มพลาสติกที่สัมพันธ์กับปริมาณไขมันที่ถูกดูดซับจากข้าวกล้องงอกและข้าวฮางงอกในบรรจุภัณฑ์สุญญากาศ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2556.

นิตยา ภูงาม. **การใช้ประโยชน์จากไขที่สกัดจากใบกะหล่ำปลีคัดทิ้งสำหรับการเคลือบผิวหน้ามะนาว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2560.

ประกาศกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. (2553). “เกณฑ์คุณภาพทางจุลินทรีย์ของอาหารและภาชนะสัมผัสอาหาร”, **กระทรวงสาธารณสุข**. http://bqsf.dmsc.moph.go.th. 29 มกราคม, 2563.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

พัชรี มะลิลา. **การศึกษาสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านของฟิล์มพลาสติกที่แปรตามอุณหภูมิและความเข้มข้นเพื่อการพัฒนาซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลในการบรรจุแอคทีฟสำหรับอาหาร**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2558.

_____. **การพัฒนาฟิล์มพลาสติกที่สำหรับควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลด้วยการกระตุ้นโดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการบรรจุแอคทีฟสำหรับผักและผลไม้ตัดสด.** วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2562.

พัชรี มะลิลา, วีรเวทย์ อุทโธ และฤทธิรงค์ พฤฑฒิกุล. “ผลของสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์มพลาสติกต่อจลนศาสตร์การปล่อยไอระเหยเอทานอลจากระบบการบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ”, ใน **การประชุมวิชาการระดับชาติ นวัตกรรมและเทคโนโลยีวิชาการ 2017**. น.564-571. สุรินทร์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตสุรินทร์, 2560.

วรรณวิภา ถาพร. **การศึกษาสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์มพลาสติกที่ย่อยสลายได้สำหรับการพัฒนาเป็นซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลสำหรับผลไม้สุกตัดสด.** โครงงานวิจัย 2: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2559.

วีรเวทย์ อุทโธ**,** เอกสิทธิ์ อ่อนสะอาด และเรวัติ ชัยราช. “การพัฒนาซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลสำหรับมะละกอสุกตัดสด”, **วารสารเกษตรพระจอมเกล้า.** 30(พิเศษ): 39-49**;** พฤษภาคม-สิงหาคม, 2554.

วีรเวทย์ อุทโธ. (2555). “แนวคิดการพัฒนาระบบควบคุมการปล่อยไอระเหย ในระบบการบรรจุแบบบรรยากาศดัดแปรเชิงแอคทีฟสำหรับผักและผลไม้ตัดสด”, ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว. https://www.phtnet.org/2013/01/129/. 12 มกราคม, 2563.

วีรเวทย์ อุทโธ. **การบรรจุภัณฑ์บรรยากาศดัดแปรแอคทีฟสำหรับผักและผลไม้.** อุบลราชธานี: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2562.

สมศิริ แสงโชติ. (2554). “โรคภายหลังการเก็บเกี่ยวของผักผลไม้ และการจัดการ”, **ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว**. http://www.phtnet.org. 15 มกราคม, 2563.

หทัยพร กัมพวงค์. **การศึกษาสมบัติการยอมให้ไอระเหยเอทานอลซึมผ่านฟิล์มพลาสติกแอคทีฟสำหรับการบรรจุภัณฑ์มะเขือเทศเชอรี่.** โครงงานวิจัย 2: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2560.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

AOAC. **Official of Association of Analytical Chemists**. Washington D.C.: Association of Analytical Chemist. 1990.

AOAC. **Official Methods of Analysis of AOAC International.** 17th ed, Maryland, USA, 2000.

Al,i A., Noh, N.M. and Mustafa, M.A. "Antimicrobial activity of chitosan enriched with lemongrass oil against anthracnose of bell pepper", **Food Packaging and Shelf Life**. 3: 56–61; March, 2015.

Ayala-Zavala, J. F. et al. "High relative humidity in-package of fresh-cut fruits andvegetables: advantage or disadvantage considering microbiological problems and antimicrobial delivering systems", **Journal of Food Science**. 73; R41-R47; May, 2008.

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): 583–93; July, 2004

Bai, J. and et al. "Ethanol vapor and saprophytic yeast treatments reduce decay and maintain quality of intact and fresh-cut sweet cherries", **Postharvest Biology and Technology**. 62(2): 204–12; November, 2011.

Boyaci, D. and et al. "Development of flexible antimicrobial zein coatings with essential oils for the inhibition of critical pathogens on the surface of whole fruits: Test of coatings on inoculated melons", **Food Packaging and Shelf Life**. 20: 100316; June, 2019.

Brandelero, R. P. H., Yamashita, F. and Grossmann, M. V. E. "The effect of surfactant Tween 80 on the hydrophilicity, water vapor permeation, and the mechanical properties of cassava starch and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) blend films", **Carbohydrate Polymers**. 82(4): 1102–9; November, 2010.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

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.

Chaudhary, P.R. and et al. “Low temperature conditioning reduces chilling injury while maintaining quality and certain bioactive compounds of ‘Star Ruby’ grapefruit”, **Food Chemistry**. 153: 243–9; June, 2014.

Cheema, A. and et al. “Postharvest hexanal vapor treatment delays ripening and enhances shelf life of greenhouse grown sweet bell pepper (Capsicum annum L.)”, **Postharvest Biology and Technology**. 136: 80–89; February, 2018.

Chen, X., Hertog, M.L.A.T. and Banks, N.H. “The effect of temperature on gas relations in MA packages for capsicums (Capsicum annuum L., cv. Tasty): an integrated approach”, **Postharvest Biology and Technology**. 20(1): 71–80; August, 2000.

Chenwei, C. and et al. “Physicochemical, microstructural, antioxidant and antimicrobial properties of active packaging films based on poly(vinyl alcohol)/clay nanocomposite incorporated with tea polyphenols”, **Progress in Organic Coatings**. 123: 176–184; October, 2018.

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.

Chung, H.S. and et al. “Effect of deastringency treatment of intact persimmon fruits on the quality of fresh-cut persimmons”, **Food Chemistry**. 166:192–7; January, 2015.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Devlieghere, F., Vermeiren, L. and Debevere, J. “New preservation technologies: possibilities and limitations”, **International Dairy Journal.** 14: 273-285; April, 2004.

Devgan, K. and et al. “Active modified atmosphere packaging of yellow bell pepper for retention of physico-chemical quality attributes”, **Journal of Food Science and Technology**. 56(2): 878–88; February, 2019.

Fawole, O.A. and Opara U.L. “Effects of storage temperature and duration on physiological responses of pomegranate fruit”, **Industrial Crops and Products**. 47: 300–9; May, 2013.

Gaikwad, K. K., Singh, S. and Lee, Y. S. “Antimicrobial and improved barrier properties of natural phenolic compound-coated polymeric films for active packaging applications”, **Journal of Coatings Technology and Research**. 16(1): 147–157; July, 2019.

Goyal, A. and et al. “Effects of ultraviolet irradiation, pulsed electric field, hot water and ethanol vapours treatment on functional properties of mung bean sprouts”, **Journal of Food Science and Technology**. 51(4):708–14; April, 2014.

Hamilton-Kemp, T. R. and et al. “Metabolism of natural volatile compounds by strawberry fruit”, **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 44(9): 2802-2805; January, 1996.

Hotchkiss, J. H., Watkins, C. B. and Sanchez, D. G. “Release of 1-methylcyclopropene from heat-pressed polymer films”, **Journal of Food Science**. 72(2): E330-E334; June, 2007.

Jamróz, E. and et al. “Development of furcellaran-gelatin films with Se-AgNPs as an active packaging system for extension of mini kiwi shelf life”, **Food Packaging and Shelf Life**. 21: 100339; September, 2019.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Ji, Y. and et al. "Effect of ethanol vapor treatment on the growth of *Alternaria alternata* and *Botrytis cinerea* and defense-related enzymes of fungi-inoculated blueberry during storage", **Frontiers in Microbiology**. 12; January, 2021.

Jin, Y.Z. et al. "Ethanol vapor treatment maintains postharvest storage quality and inhibits internal ethylene biosynthesis during storage of oriental sweet melons", **Postharvest Biology and Technology**. 86: 372–380; December, 2013.

Johansson, F. and Leufven, A. "Food packaging polymer films as aroma vapor barriers at different relative humidities", **Journal of Food Science**. 59(6): 1328–1331; November, 1994.

Kader, A. A. and et al. "Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables", **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 28(1): 1–30; January, 1989.

Kampawong, H., Utto, W. and Pruthtikul, R. "Extending shelf life of fresh cherry tomatoes using ethanol vapour controlled release based active packages", In **Proceeding of the 1st Rajamangala Surin International Conference of Rajamangala University of Technology Isan, Surin Campus**. P.29-31. Surin: Rajamangala University of Technology Isan, Surin Campus, 2018.

Kanatt, S. R. and Makwana, S. H. "Development of active, water-resistant carboxymethyl cellulose-poly vinyl alcohol-Aloe vera packaging film", **Carbohydrate Polymers**. 227: 115303; January, 2020.

Khanam, U.K.S. and et al. "Phenolic acids, flavonoids and total antioxidant capacity of selected leafy vegetables", **Journal of Functional Foods**. 4(4): 979–987; October, 2012.

Kumar, O.A. and Tata, S.S. "Ascorbic acid contents in chili peppers (*Capsicum L.*)", **Notulae Scientia Biologicae**. 1(1): 50–52; December, 2009.

Kyriacou, M.C. and Rouphael, Y. "Towards a new definition of quality for fresh fruits and vegetables", **Scientia Horticulturae**. 234: 463–469; April, 2018.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Lan, W. and et al. “Effects of various antimicrobial polyvinyl alcohol/tea polyphenol composite films on the shelf life of packaged strawberries”, **LWT-Food Science and Technology**. 113: 108297; October, 2019.

Lian, H. and et al. “Effect of the added polysaccharide on the release of thyme essential oil and structure properties of chitosan based film”, **Food Packaging and Shelf Life**. 23: 100467; March, 2020.

Liu, H. and et al. “Ethanol treatment improves the sensory quality of cherry tomatoes stored at room temperature”, **Food Chemistry**. 298: 125069; November, 2019.

Levenspiel, O. **Chemical Reaction Engineering.** 2nd ed. New Delhi: Wiley Eastern Ltd Daryaganj, 1982.

Mahiques Cuesta, A. **An investigation into different post-harvest treatments (MAP) on Green Bell Peppers *(Capsicum annuum L. cv. Cupra*)**. Bachelor’s Thesis: Writtle University College, 2016.

Manolopoulou, H., Lambrinos, G. and Xanthopoulos, G. “Active modified atmosphere packaging of fresh-cut bell peppers: Effect on quality indices”, **Journal of Food Research**. 1(3): 148; July, 2012.

Martínez, S. and et al. “The effects of ripening stage and processing systems on vitamin C content in sweet peppers (*Capsicum Annuum L.*)”, **International Journal of Food Sciences and Nutrition**. 56: 45–51; March, 2005.

Mateo, E. M. and et al. “Impact of bioactive packaging systems based on EVOH films and essential oils in the control of aflatoxigenic fungi and aflatoxin production in maize”, **International Journal of Food Microbiology**. 254: 36–46; August, 2017.

Miyauchi, M., Nakanishi, Y. and Sagara, Y. “Permeation of water and volatile flavors through packaging films”, **Food Science and Technology International**. 2(4): 217–22; August, 1996.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Muriel-Galet, V. and et al. "Evaluation of EVOH-coated PP films with oregano essential oil and citral to improve the shelf-life of packaged salad", **Food Control**. 30(1): 137–143; March, 2013.

Nunes, M. C. do N. "Correlations between subjective quality and physicochemical attributes of fresh fruits and vegetables", **Postharvest Biology and Technology**. 107: 43–54; September, 2015.

Nur Hanani, Z. A. and et al. "Effect of different fruit peels on the functional properties of gelatin/polyethylene bilayer films for active packaging", **Food Packaging and Shelf Life**. 18: 201–211; December, 2018.

O'Donoghue, E.M. and et al. "Cell wall composition during expansion, ripening and postharvest water loss of red bell peppers (*Capsicum annuum L.*)", **Postharvest Biology and Technology**. 168: 111225; October, 2020.

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.

Paul, V., Pandey, R. and Srivastava, G.C. "The fading distinctions between classical patterns of ripening in climacteric and non-climacteric fruit and the ubiquity of ethylene–An overview", **Journal of Food Science and Technology**. 49(1): 1-21; February, 2012.

Robertson, G. L. **Food Packaging: Principles and Practice**. 3rd ed. New York: Taylor and Francis Group, 2013.

Rolle, R. S. (2011). **Role of Food Processing and Post-harvest Management in Improving Food and Nutrition Security in Cities Ensuring Resilient Food Systems in Asian Cities.** http://www.fao.org/fileadmin/templates/FCIT/workshops/Bangkok-2011/2-Rosa-RolleRolefoodprocessingandpostharvestmanagement.pdf. February, 2021.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Rooney, M. L. "Overview of active food packaging", In **Active food packaging**. Rooney, M.L. Editor. p.1-37. Glasgow: Blackie Academic and Professional, 1995.

Sandhya. "Modified atmosphere packaging of fresh produce: Current status and future needs", **LWT-Food Science and Technology**. 43(3): 381–92; April, 2010.

Septembre-Malaterre, A., Remize, F. and Poucheret, P. "Fruits and vegetables, as a source of nutritional compounds and phytochemicals: Changes in bioactive compounds during lactic fermentation", **Food Research International**. 104:86–99; February, 2018.

Shen, X. L. and et al. "Antimicrobial and physical properties of sweet potato starch films incorporated with potassium sorbate or chitosan**", Food Hydrocolloids**. 24(4); 285–290; June, 2010.

Shi, J. and et al. "Low-temperature conditioning enhances chilling tolerance and reduces damage in cold-stored eggplant (*Solanum melongena L*.) fruit", **Postharvest Biology and Technology**. 141: 33–38; July, 2018.

Siddiq, R. and et al. "Effect of modified atmosphere packaging (MAP) and Nature Seal® treatment on the physico-chemical, microbiological, and sensory quality of fresh-cut d'Anjou pears", **Food Packaging and Shelf Life**. 23: 100454; March, 2020.

Silva, C. F. and et al. "Orange essential oil as antimicrobial additives in poly(vinyl chloride) films", **Polímeros**. 28(4): 332–338; September, 2018.

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.

Sonia, A. and Dasan, P. K. "Celluloses microfibers (CMF)/poly (ethylene-co-vinyl acetate) (EVA) composites for food packaging applications: A study based on barrier and biodegradation behavio", **Journal of Food Engineering**. 118(1): 78–89; September, 2013.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Suzuki, Y., Uji, T. and Terai, H. "Inhibition of senescence in broccoli florets with ethanol vapor from alcohol powder", **Posthavest Biology and Technology**. 31(2): 117-182; February, 2004.

Tham, D.Q. and et al. "Preparation and properties of ethylene vinyl acetate copolymer/silica nanocomposites in presence of EVA-g-Acrylic Acid", **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**. 15(4): 2777–84; April, 2015.

Tzortzakis, N.G. "Ethanol, vinegar and origanum vulgare oil vapour suppress the development of anthracnose rot in tomato fruit", **International Journal of Food Microbiology**. 142(1): 14–8; August, 2010.

Utto, W. and et al. "Active packaging technologies for horticultural produce", **Food New Zealand**. 5: 21–32; February, 2005.

Utto, W., Mawson, A.J. and Bronlund, J.E. "Hexanal reduces infection of tomatoes by Botrytis cinerea whilst maintaining quality", **Postharvest Biology and Technology.** 47(3): 434–437; March, 2008.

Utto, W. and et al. "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; March, 2018.

Utto, W. and et al. "Concentration and Temperature Dependences of Effective Ethanol Vapor Permeance of Plastic Films Utilized in Controlled Release-Based Active Packaging for Horticultural Products", **Key Engineering Materials**. 718: 45–48; 2016.

Utto W. **Mathematical Model Based Design of Ethanol Controlled Release Active Packaging for Freshly Peeled Shallot.** Bangkok: Thailand Science Research and Innovation (TSRI), 2016.

Waghmare, R.B. and Annapure, U.S. "Combined effect of chemical treatment and/or modified atmosphere packaging (MAP) on quality of fresh-cut papaya", **Postharvest Biology and Technology**. 85: 147–53; November, 2013.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Wellinghoff, S. T. and et al. **Silicate-containing powders providing controlled, sustained gas release**. US Patent . 6,605,304, 2013.

Wongs-Aree, C. and Noichinda, S. "Glycolysis fermentative by-products and secondary metabolites involved in plant adaptation under hypoxia during pre- and postharvest", in **Hypoxia and Anoxia**. K. K. Das Editor. p. 59-72. London, UK: Intech Open, 2018.

Wu, H. and et al. "Preparation and characterization of bioactive edible packaging films based on pomelo peel flours incorporating tea polyphenol", **Food Hydrocolloids**. 90: 41–49; May, 2019.

Wyrwa, J. and Barska, A. "Innovations in the food packaging market: active packaging", **European Food Research and Technology**. 243(10): 1681–92; October, 2017.

Yang, C. C. and Chinnan, M. S. "Modeling the Effect of O_2 and CO_2 on Respiration and Quality of Stored Tomatoes", **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers Journal**. 31(3): 920–925; May, 1988.

Yu, J. and et al. "Performance and microbial characterization of two-stage caproate fermentation from fruit and vegetable waste via anaerobic microbial consortia", **Bioresource Technology**. 284: 398–405; July, 2019.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์ทางเคมี – กายภาพ

1. การหาปริมาณเอทานอล

การวัดปริมาณเอทานอลในมะเขือเทศเชอรี่ด้วยเครื่อง Gas Chromatography (พัชรี, 2559)

1.1 วัสดุและอุปกรณ์กับสารเคมี

1.1.1 ขวดขนาด 10 ml

1.1.2 เอทานอล 95%

1.1.3 ที่เปิด – ปิดขวด

1.1.4 จุ กลูกยางปิดฝาขวด

1.1.5 ค๊อบอะลูมิเนียมที่ปิดฝา

1.1.6 น้ำ DI

1.2 การทำ Calibration curve สำหรับการวิเคราะห์ไอระเหยเอทานอล

1.2.1 การเตรียมสารละลาย Stock Solution เตรียมสารละลาย Stock 200,000 ppm ปริมาตร 50 ml

1.2.1.1 เตรียมขวด 50 ml

1.2.1.2 เติมเอทานอลเหลว 10 ml

1.2.1.3 เติมน้ำกลั่น 50 ml

1.2.2 ทำการเจือจาง 5 ความเข้มข้น ปริมาตร 10 ml เติมปริมาณสารละลาย Stock Solution และน้ำกลั่น ตามปริมาณที่กำหนดไว้ในตารางที่ ก.1 แล้วนำสารละลายไปแช่ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 10°C

ตารางที่ ก.1 ระดับทำการเจือจาง 5 ความเข้มข้น ปริมาตร 10 ml

ความเข้มข้นที่ต้องการ (ppm)	ปริมาตรที่จะดึงมาจาก Stock solution 200,000ppm (ml)	ปริมาตรน้ำกลั่นที่จะเติมเข้าไปเพิ่มในขวดที่ทำการเจือจาง (ml)
400	0.02	9.98
800	0.04	9.96
5,000	0.25	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
200,000	10.0	0.0

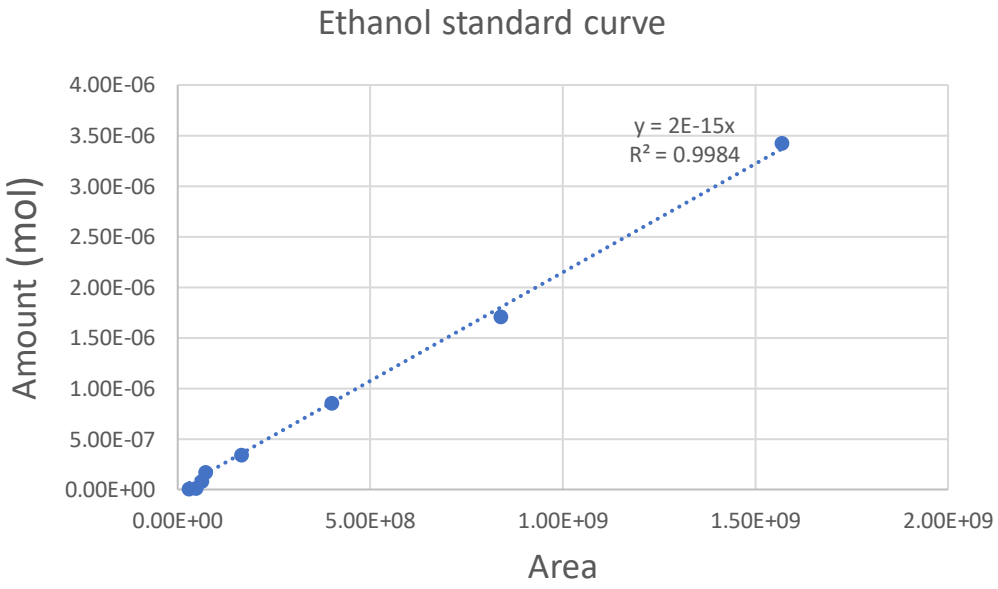
1.2.3 ทำการฉีดสารละลายในแต่ละความเข้มข้น รวมทั้ง 200,000 ppm ปริมาตร 1 ul ลงในเครื่อง GC และทำการจดบันทึกพื้นที่ใต้กราฟ ของเอทานอล (Retention time ประมาณ 7.3xx-7.7xxx) แล้วนำมาคำนวณจำนวน molแสดงในตารางที่ ก.2

1.2.4 ทำการ plot ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน mol ของเอทานอลที่อยู่ในปริมาตรสารละลายที่ฉีดเข้าไป 1 ul และ พื้นที่ใต้กราฟของแต่ละความเข้มข้น ทั้งนี้จำนวน mol ของแต่ละความเข้มข้นเท่ากับค่าในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้นกับจำนวน mol ของเอทานอลที่อยู่ใน ปริมาตรสารละลายที่ฉีดเข้าไป 1 ul

ความเข้มข้นที่เจือจาง (ppm)	จำนวน mol
400	6.85E-09
800	1.37E-08
5,000	8.56E-08
10,000	1.71E-07
20,000	3.42E-07
50,000	8.56E-07
100,000	1.71E-06
200,000	3.42E-06

1.2.5 ในการ plot กราฟนั้น กำหนดให้ ค่าพื้นที่ เป็น แกน X และจำนวน mol เป็น แกน Y ภายหลังจากการ plot ให้ทำ linear regression โดยให้ค่าผ่าน 0 ดังภาพที่ ก.1



ภาพที่ ก.1 กราฟมาตรฐานระหว่างพื้นที่ใต้กราฟและจำนวณโมลของเอทานอล

2. การวิเคราะห์หาปริมาณวิตามินซี (Vitamin C)

2.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

2.1.1 บิวเรต

2.1.2 ปิเปตขนาด 5 และ 10 มิลลิลิตร

2.1.3 ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.1.4 บิกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร

2.1.5 กระดาษกรองเบอร์ 1

2.1.6 ผ้าขาวบาง

2.1.7 2, 6-dichlorophenolindophenol sodium salt

2.1.8 Tricloroacetic acid

2.2 การเตรียมสารเคมี

2.2.1 การเตรียม indophenols standard solution

ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของ 2, 6-dichlorophenolindophenol sodium salt 250 มิลลิกรัมและsodium bicarbonate 210 มิลลิกรัม เติมน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ปรับปริมาตรด้วยยน้ำกลั่นเป็น 500 มิลลิลิตร กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 เก็บในขวดสีชาในตู้เย็น ควรเตรียมใหม่ทุกสัปดาห์

2.2.2 การเตรียม 5% trichloroacetic acid

ทำการชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของ trichloroacetic acid 25 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย 5% trichloroacetic acid เก็บสารละลายในตู้เย็น 4 องศาเซลเซียส

2.2.3 การเตรียม ascorbic acid standard solution

ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของกรดแอสคอร์บิก 200 มิลลิกรัม ละลายด้วย 5% trichloroacetic acid ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร หลังจากนั้นดูดสารละลายที่ได้มา 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร จะได้ ascorbic acid standard solution ความเข้มข้น 0.02 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร

2.2.4 Standardization of indophenols solution

2.2.4.1 ปิเปต ascorbic acid standard solution ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติม 5% trichloroacetic acid ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันทันที

แล้วทำการไตเตรททันทีกับ indophenols solution จนถึงจุดยุติ คือ เปลี่ยนเป็นสีชมพูคงตัว บันทึกปริมาตรของ indophenols solution ที่ใช้ในการไตเตรท

2.2.4.2 ไตเตรท Blank Standard โดยใช้ 5% trichchloro acid ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันทันทีแล้วไตเตรทเช่นเดียวกันกับสารละลายมาตรฐาน บันทึกปริมาตรของ indophenols solution ที่ใช้ในการไตเตรท

2.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

2.3.1 ปั่นเอาพริกหวาน แล้วโดยใช้ผ้าขาวบางกรองเอาเฉพาะส่วนที่เป็นน้ำ

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

2.3.3 ไตเตรท Blank Sample โดยใช้ 5% trichchloro acid ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้ว ไตเตรทเช่นเดียวกันกับสารละลายมาตรฐาน บันทึกปริมาตรของ indophenols solution ที่ใช้ในการไตเตรท

2.4 วิธีการคำนวณ

Mg ascorbic acid/100g sample = ((X-B) × (F×E) × 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 Standard (มิลลิลิตร)

3. การวิเคราะห์ปริมาณกรดทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณกรดทั้งหมดวิธีของ AOAC (2000) ค่าความเป็นกรดที่วิเคราะห์ได้นิยมเรียกว่า total titratable acidity ในงานวิจัยนจะรายงานปริมาณกรดทั้งหมดในรูปของกรดซิดริก ซึ่งมีวิธี การวิเคราะห์ดังนี้

3.1 อุปกรณ์

3.1.1 บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร

3.1.2 บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร

3.1.3 ขวดรูปชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร

3.1.4 ปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตร

3.1.5 กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร

3.1.6 ขวดปรับปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร

3.1.7 บิกเกอร์ขนาด 100และ 300 มิลลิลิตร

3.1.8 แท่งแก้วคนสาร

3.1.9 ช้อนตักสาร

3.2 สารเคมี

3.2.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด (NaOH)ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

3.2.2 ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) ความเข้มข้น 1%

3.2.3 เอทานอล (ethanol) ความเข้มข้น 95%

3.2.4 โพแทสเซียมพทาเลต (potassium phthalate)

3.3 การเตรียมสารเคมี

3.3.1 สารละลาย NaOH มาตรฐานเตรียมสารละลายมาตรฐาน NaOH 0.1 N (โดยประมาณ) โดยชั่ง NaOH 2 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร จากนั้นนำไป standardize ด้วยสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมพทาเลต ($KHC_8H_4O_4$)

3.3.3.1 วิธี standardize สารละลาย NaOH ทำโดย

(1) ละลาย ($KHC_8H_4O_4$) ที่ผ่านการอบแห้งที 120 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง และทำให้เย็นใน desiccator ปริมาณ 0.6000-0.7000 กรัม ในน้ำกลั่น 75 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่

(2) หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1% ในสารละลาย $KHC_8H_4O_4$ จำนวน 2 หยด

(3) นำไปไตเตรตกับสารละลาย NaOH ที่บรรจุอยู่ในบิวเรตจนกระทั่งสารละลายทำปฏิกิริยาเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีชมพูอ่อนที่คงตัว โดยทำการไตเตรต 3 ครั้ง บันทึกปริมาตรNaOH ที่ใช้ในการไตเตรต

$$\text{Normality ของ NaOH} = \frac{\text{จำนวน } KHC_8H_4O_4 \times 100}{\text{มิลลิลิตร NaOH} \times 204.229}$$

3.3.2 สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1 กรัม ละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1 กรัม ในเอธานอล 95% 100 มิลลิลิตร

3.4 วิธีการวิเคราะห์

3.4.1 คั้นน้ำพริกหวานตัวอย่าง กรองด้วยผ้าขาวบาง แล้วปิเปต 1 มิลลิลิตรใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.4.2 เติมน้ำกลั่นให้ครบ 100 มิลลิลิตร หยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 2 หยด ไตเตรตด้วยสารละลาย NaOH มาตรฐาน จนได้สีชมพูจาง ๆ คงที่ (ไตเตรตให้ได้ค่า pH ประมาณ 8.2 โดยใช้ pH meter) บันทึกปริมาตรของสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการไดเตรต

3.4.3 คำนวณหาปริมาณกรดทั้งหมด

$$\text{Titratable acidity (as citric acid g/100mL)} = \frac{\text{ความเข้มข้นของNaOH} \times \text{มล.ของNaOH} \times 0.007 \times 100}{\text{มล.ตัวอย่าง}}$$

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์

4. การตรวจวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์

4.1 การตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด

4.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

4.1.1.1 Sterile 0.1% Peptone Weter สำหรับเจือจางตัวอย่างอาหาร

4.1.1.2 เครื่อง Stomacher

4.1.1.3 จานเพาะเชื้อที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อแล้ว (Sterile Petri Plates)

4.1.1.4 Plate Count Agar (PCA), pH 7

4.1.1.5 ปิเปตขนาด 0.1 และ 1 มิลลิลิตร

4.1.1.6 ตู้บ่มเชื้อ (Incubator)

4.1.2 วิธีการ

4.1.2.1 สุ่มตัวอย่างตัดพริกหวานของทุกสิ่งทดลอง สิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ โดยชั่งน้ำหนัก 10 กรัม ใส่ถุงที่ปราศจากเชื้อ

4.1.2.2 เท Peptone Weter 90 มิลลิลิตร สำหรับเจือจางลงในถุงที่บรรจุชิ้นพริกหวาน

4.1.2.3 ตีอาหารในถุงให้เข้ากันด้วยเครื่อง Stomacher เป็นเวลา 1 นาที สารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้น 10^0 เท่า

4.1.2.4 ทำการเจือจางที่ระดับ 10^{-1}, 10^{-2} และ 10^{-3} (โดยเลือกทำที่ระดับความเจือจาง 3 ระดับ)

4.1.2.5 ใช้ปิเปตดูดตัวอย่างระดับความเจือจางละ 1 มิลลิลิตร ลงในจานเพาะเชื้อระดับความเจือจาง 3 ระดับ

4.1.2.6 เทอาหารเลี้ยงเชื้อ PCA ที่อุณหภูมิ 44 – 46 องศาเซลเซียส ลงในจานเพาะเชื้อที่กำหนดตัวอย่างแล้วประมาณ 12 – 15 มิลลิลิตร

4.1.2.7 ผสมอาหารเลี้ยงเชื้อและตัวอย่างให้เข้ากันโดยหมุนจานเพาะเชื้อไปทางเดียวกัน ระวังอย่าให้อาหารหกออกนอกจานเพาะเชื้อ จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นและแข็งตัว

4.1.2.8 บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 – 2 วัน

4.1.2.9 ตรวจนับจำนวนโคโลนีของเชื้อที่เจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อเป็น CFU/g หรือมิลลิลิตรของตัวอย่างอาหาร

4.1.3 รายงานผล

เลือกเฉพาะที่มีจำนวนโคโลนีระหว่าง 30 – 300 โคโลนี ที่ได้จากการเจือจางระดับที่มีความเจือจางมากกว่ากัน 10 เท่า เช่น 10^{-2} และ 10^{-3} คำนวณหาจำนวนจุลินทรีย์ต่ออาหาร 1 กรัมหรือมิลลิลิตร ดังนี้

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

เมื่อ $\sum C$ คือ ผลบวกของโคโลนีที่นับได้จากทุกจาน

n_1 คือ จำนวนโคโลนีที่ใช้ระดับความเจือจางแรก

n_2 คือ จำนวนโคโลนีที่ใช้ระดับความเจือจางที่ 2

d คือ ระดับความเจือจางของระดับแรก

4.2 การตรวจวิเคราะห์ยีสต์ (Yeast) และรา (Molds)

4.2.1 วัสดุและอุปกรณ์

4.2.1.1 Sterile 0.1% Peptone Weter สำหรับเจือจางตัวอย่างอาหาร

4.2.1.2 เครื่อง Stomacher

4.2.1.3 จานเพาะเชื้อที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อแล้ว (Sterile Petri Plates)

4.2.1.4 อาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar (PDA), pH 3.5

4.2.1.5 ปิเปตขนาด 0.1 และ 1 มิลลิลิตร

4.2.1.6 ตู้บ่มเชื้อ (Incubator)

4.2.1.7 Tartaric acid 10% w/v

4.2.2 วิธีการ

4.2.2.1 สุ่มตัวอย่างตัดพริกหวานของทุกสิ่งทดลอง สิ่งทดลองละ 3 ซ้ำ โดยชั่งน้ำหนัก 10 กรัม ใส่ถุงที่ปราศจากเชื้อ

4.2.2.2 เท Peptone Weter 90 มิลลิลิตร สำหรับเจือจางลงในถุงที่บรรจุชิ้นพริกหวาน

4.2.2.3 ตีอาหารในถุงให้เข้ากันด้วยเครื่อง Stomacher เป็นเวลา 1 นาที สารละลายที่ได้จะมีความเข้มข้น 10^0 เท่า

4.2.2.4 ทำการเจือจางที่ระดับ 10^{-1}, 10^{-2} และ 10^{-3} (โดยเลือกทำที่ระดับความเจือจาง 3 ระดับ)

4.2.2.5 เทอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ที่อุณหภูมิ 44 – 46 องศาเซลเซียส ลงในจานเพาะเชื้อที่กำหนดตัวอย่างแล้วประมาณ 12 – 15 มิลลิลิตร

4.2.2.6 ใช้ปิเปตดูดตัวอย่างระดับความเจือจางละ 0.1 มิลลิลิตร ลงในจานเพาะเชื้อระดับความเจือจาง 3 ระดับ แล้วทำการ Spead plate

4.2.2.7 บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 – 2 วัน

4.2.2.8 ตรวจนับจำนวนโคโลนีของเชื้อที่เจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อเป็น CFU/g. หรือมิลลิลิตรของตัวอย่างอาหาร

ภาคผนวก ค
ตารางผลของการประยุกต์ใช้ซองควบคุมการปล่อยไอระเหยเอทานอลที่กระตุ้นด้วยความชื้นต่อคุณภาพของพริกหวานในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ

ตารางที่ ค.1 การเปลี่ยนแปลงเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/ no sachet) เป็นเวลา 21 วัน ที่อุณหภูมิ 10°C (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

Storages (day)	Packaging treatments		
	Control (no sachet)	LDPE sachet	ENP sachet
0	$3.94\pm0.26^{a,C}$	$3.94\pm0.26^{a,B}$	$3.94\pm0.26^{a,B}$
1	$4.21\pm0.32^{a,C}$	$4.14\pm0.23^{a,AB}$	$4.15\pm0.38^{a,B}$
3	$4.88\pm0.09^{a,BC}$	$4.19\pm0.27^{a,AB}$	$4.34\pm0.69^{a,B}$
5	$5.18\pm1.03^{a,BC}$	$4.88\pm1.25^{a,AB}$	$5.02\pm1.24^{a,AB}$
7	$5.50\pm0.77^{a,BC}$	$5.39\pm0.58^{a,AB}$	$5.41\pm0.69^{a,AB}$
10	$5.58\pm1.19^{a,BC}$	$5.22\pm0.77^{a,AB}$	$5.42\pm0.75^{a,AB}$
14	$5.99\pm0.48^{a,AB}$	$5.73\pm0.79^{a,AB}$	$5.69\pm0.75^{a,AB}$
21	$7.31\pm0.25^{a,A}$	$5.93\pm1.11^{a,A}$	$6.29\pm0.88^{a,A}$

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=6) และตัวอักษรตัวเล็กและตัวใหญ่แสดง การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแถวและคอลัมน์เดียวกันตามลำดับ อักษรที่เหมือนกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Control (no sachet)) = สิ่งทดลองควบคุมที่ไม่มีซองควบคุม ฯ LDPE sachet และ ENP sachet = การบรรจุภัณฑ์ active MAP ที่มีซองควบคุม ฯ LDPE และ ENP ตามลำดับ

ตารางที่ ค.2 การเปลี่ยนแปลงยีสต์และราในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/ no sachet) เป็นเวลา 21 วัน ที่อุณหภูมิ 10°C (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

Storages (day)	Packaging treatments		
	Control (no sachet)	LDPE sachet	ENP sachet
0	0.00 ± 0.00^{C}	0.00 ± 0.00^{D}	0.00 ± 0.00^{D}
1	$2.18\pm0.00^{a,B}$	$0.00\pm0.00^{b,D}$	$0.00\pm0.00^{b,D}$
3	$2.20\pm0.00^{a,B}$	$0.00\pm0.00^{b,D}$	$0.00\pm0.00^{b,D}$
5	$2.73\pm0.26^{a,AB}$	$2.28\pm0.03^{c,C}$	$2.38\pm0.00^{b,C}$
7	$2.86\pm0.20^{a,A}$	$2.52\pm0.04^{b,AB}$	$2.42\pm0.17^{c,C}$
10	$2.64\pm0.45^{a,AB}$	$2.41\pm0.16^{a,BC}$	$2.34\pm0.03^{a,C}$
14	$2.76\pm0.35^{a,A}$	$2.56\pm0.17^{a,AB}$	$2.59\pm0.11^{a,B}$
21	$2.79\pm0.25^{a,A}$	$2.71\pm0.10^{a,A}$	$2.76\pm0.02^{a,A}$

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=6) และตัวอักษรตัวเล็กและตัวใหญ่แสดง การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแถวและคอลัมน์เดียวกันตามลำดับ อักษรที่เหมือนกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Control (no sachet)) = สิ่งทดลองควบคุมที่ไม่มีซองควบคุม ฯ, LDPE sachet และ ENP sachet = การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีซองควบคุม ฯ ทำจากฟิล์ม LDPE และ ENP ตามลำดับ

ตารางที่ ค.3 การเปรียบเทียบทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดแอสคอร์บิกในพริกหวานบรรจุในในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/no sachet) เป็นเวลา 21 วัน ที่อุณหภูมิ 10°C (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

Storages (day)	Packaging treatments		
	Control (no sachet)	LDPE sachet	ENP sachet
0	$108.03\pm11.72^{a,A}$	$108.03\pm11.72^{a,A}$	$108.03\pm11.72^{a,A}$
1	$84.27\pm0.52^{c,B}$	$109.80\pm7.30^{a,A}$	$92.37\pm4.60^{b,AB}$
3	$79.88\pm1.52^{b,BC}$	$98.88\pm2.19^{a,A}$	$86.95\pm9.52^{ab,AB}$
5	$78.36\pm11.63^{a,BC}$	$93.33\pm5.66^{a,A}$	$86.04\pm9.56^{a,AB}$
7	$69.60\pm9.03^{a,BC}$	$84.88\pm1.30^{a,A}$	$77.15\pm9.09^{a,B}$
10	$66.56\pm7.24^{a,C}$	$77.91\pm17.54^{a,A}$	$66.88\pm11.07^{a,B}$
14	$77.47\pm0.47^{c,BC}$	$80.27\pm4.01^{a,A}$	$78.70\pm0.80^{b,BC}$
21	$68.89\pm10.40^{a,BC}$	$77.41\pm13.82^{a,A}$	$75.93\pm15.44^{a,B}$

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=6) และตัวอักษรตัวเล็กและตัวใหญ่แสดง การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแถวและคอลัมน์เดียวกันตามลำดับ อักษรที่เหมือนกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Control (no sachet)) = สิ่งทดลองควบคุมที่ไม่มีซองควบคุม ฯ, LDPE sachet และ ENP sachet = การบรรจุภัณฑ์ active MAP ซึ่งมีซองควบคุม ฯ LDPE และ ENP ตามลำดับ

ตารางที่ ค.4 การวิเคราะห์สถิติสำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดทั้งหมดของพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/no sachet) เป็นเวลา 21 วัน ที่อุณหภูมิ 10°C (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

Storages (day)	Packaging treatments		
	Control (no sachet)	LDPE sachet	ENP sachet
0	$0.14\pm0.04^{a,A}$	$0.14\pm0.04^{a,A}$	$0.14\pm0.04^{a,A}$
1	$0.13\pm0.02^{a,A}$	$0.13\pm0.02^{a,A}$	$0.14\pm0.00^{a,A}$
3	$0.14\pm0.01^{a,A}$	$0.12\pm0.00^{b,A}$	$0.13\pm0.03^{ab,A}$
5	$0.12\pm0.02^{a,A}$	$0.12\pm0.00^{a,A}$	$0.12\pm0.01^{a,A}$
7	$0.12\pm0.00^{a,A}$	$0.13\pm0.01^{a,A}$	$0.13\pm0.01^{a,A}$
10	$0.13\pm0.03^{a,A}$	$0.13\pm0.01^{a,A}$	$0.14\pm0.00^{a,A}$
14	$0.14\pm0.01^{a,A}$	$0.14\pm0.00^{a,A}$	$0.14\pm0.00^{a,A}$
21	$0.16\pm0.00^{a,A}$	$0.14\pm0.00^{a,A}$	$0.14\pm0.01^{a,A}$

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=6) และตัวอักษรตัวเล็กและตัวใหญ่แสดง การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแถวและคอลัมน์เดียวกันตามลำดับ อักษรที่เหมือนกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Control (no sachet)) = สิ่งทดลองควบคุมที่ไม่มีซองควบคุม ฯ, LDPE sachet และ ENP sachet = การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีซองควบคุม ฯ ทำจากฟิล์ม LDPE และ ENP ตามลำดับ

ตารางที่ ค.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/ no sachet) ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

Storages (day)	Packaging treatments		
	Control (no sachet)	LDPE sachet	ENP sachet
0	$4.46\pm0.37^{a,A}$	$4.46\pm0.37^{a,B}$	$4.46\pm0.23^{a,B}$
1	$4.95\pm0.07^{a,A}$	$4.95\pm0.07^{a,AB}$	$4.93\pm0.01^{a,A}$
3	$4.74\pm0.25^{a,A}$	$4.98\pm0.03^{a,A}$	$4.87\pm0.05^{a,AB}$
5	$4.99\pm0.25^{a,A}$	$4.97\pm0.21^{a,AB}$	$4.90\pm0.01^{a,AB}$
7	$4.91\pm0.18^{a,A}$	$4.90\pm0.08^{a,AB}$	$4.94\pm0.06^{a,A}$
10	$4.85\pm0.11^{a,A}$	$4.91\pm0.13^{a,AB}$	$4.89\pm0.02^{a,AB}$
14	$4.76\pm0.28^{a,A}$	$4.82\pm0.26^{a,AB}$	$4.75\pm0.08^{a,AB}$
21	$5.24\pm0.68^{a,A}$	$4.91\pm0.24^{a,AB}$	$4.87\pm0.03^{a,AB}$

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=6) และตัวอักษรตัวเล็กและตัวใหญ่แสดง การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแถวและคอลัมน์เดียวกันตามลำดับ อักษรที่เหมือนกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Control (no sachet)) = สิ่งทดลองควบคุมที่ไม่มีซองควบคุม ฯ, LDPE sachet และ ENP sachet = การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีซองควบคุม ฯ ทำจากฟิล์ม LDPE และ ENP ตามลำดับ

ตารางที่ ค.6 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/ no sachet) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

Storages (day)	Packaging treatments		
	Control (no sachet)	LDPE sachet	ENP sachet
0	0.000 ± 0.000^{H}	0.000 ± 0.000^{B}	0.000 ± 0.000^{B}
1	$0.006\pm0.002^{a,G}$	$0.003\pm0.000^{a,B}$	$0.006\pm0.002^{a,B}$
3	$0.010\pm0.002^{a,F}$	$0.010\pm0.002^{a,B}$	$0.009\pm0.006^{a,B}$
5	$0.014\pm0.002^{a,E}$	$0.011\pm0.004^{a,B}$	$0.016\pm0.006^{a,B}$
7	$0.018\pm0.001^{a,D}$	$0.013\pm0.001^{a,B}$	$0.018\pm0.004^{a,B}$
10	$0.025\pm0.001^{a,C}$	$0.014\pm0.002^{a,B}$	$0.020\pm0.004^{a,B}$
14	$0.049\pm0.000^{a,B}$	$0.041\pm0.014^{a,A}$	$0.061\pm0.018^{a,A}$
21	$0.075\pm0.002^{a,A}$	$0.044\pm0.012^{a,A}$	$0.079\pm0.024^{a,A}$

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=6) และตัวอักษรตัวเล็กและตัวใหญ่แสดง การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแถวและคอลัมน์เดียวกันตามลำดับ อักษรที่เหมือนกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Control (no sachet)) = สิ่งทดลองควบคุมที่ไม่มีซองควบคุม ฯ, LDPE sachet และ ENP sachet = การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีซองควบคุม ฯ ทำจากฟิล์ม LDPE และ ENP ตามลำดับ

ตารางที่ ค.7 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของพริกหวานบรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/ no sachet) ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

Storages (day)	Packaging treatments		
	Control (no sachet)	LDPE sachet	ENP sachet
0	9.13±0.68^{a,A}	9.13±0.68^{a,A}	9.13±0.68^{a,A}
1	9.20±0.33^{a,A}	9.27±0.64^{a,A}	9.14±0.50^{a,A}
3	8.97±0.71^{a,AB}	9.01±1.03^{a,AB}	9.22±0.45^{a,A}
5	8.82±0.36^{a,AB}	9.13±0.14^{a,A}	8.63±0.65^{a,A}
7	8.30±0.11^{a,ABC}	8.61±0.34^{a,AB}	8.72±0.36^{a,A}
10	7.01±1.31^{a,BC}	7.81±1.19^{a,AB}	7.84±1.17^{a,A}
14	6.91±1.38^{a,BC}	7.54±1.29^{a,AB}	7.39±1.76^{a,A}
21	6.57±0.86^{a,C}	6.96±0.81^{a,B}	6.92±1.22^{a,A}

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=6) และตัวอักษรตัวเล็กและตัวใหญ่แสดง การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแถวและคอลัมน์เดียวกันตามลำดับ อักษรที่เหมือนกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Control (no sachet)) = สิ่งทดลองควบคุมที่ไม่มีซองควบคุม ฯ, LDPE sachet และ ENP sachet = การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีซองควบคุม ฯ ทำจากฟิล์ม LDPE และ ENP ตามลำดับ

ตารางที่ ค.8 การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง (L*) ของผิวพริกหวาน บรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/no sachet) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดง คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

Storages (day)	Packaging treatments		
	Control (no sachet)	LDPE sachet	ENP sachet
0	34.25±0.09^{a,A}	34.25±0.09^{a,A}	34.25±0.09^{a,A}
1	33.38±1.50^{a,A}	34.42±0.44^{a,A}	34.33±0.45^{a,A}
3	33.24±2.01^{a,A}	34.07±0.65^{a,A}	34.69±0.21^{a,A}
5	33.15±0.85^{a,A}	34.32±0.04^{a,A}	33.63±1.08^{a,AB}
7	33.08±1.07^{a,A}	33.68±0.05^{a,A}	33.57±0.39^{a,AB}
10	33.23±0.10^{a,A}	33.71±0.72^{a,A}	33.46±0.66^{a,AB}
14	32.67±1.10^{a,A}	33.46±0.62^{a,A}	33.59±0.30^{a,AB}
21	31.26±2.18^{a,A}	32.98±1.18^{a,A}	32.26±1.59^{a,B}

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=6) และตัวอักษรตัวเล็กและตัวใหญ่แสดง การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแถวและคอลัมน์เดียวกันตามลำดับ อักษรที่เหมือนกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Control (no sachet)) = สิ่งทดลองควบคุมที่ไม่มีซองควบคุม ฯ, LDPE sachet และ ENP sachet = การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีซองควบคุม ฯ ทำจากฟิล์ม LDPE และ ENP ตามลำดับ

ตารางที่ ค.9 การเปลี่ยนแปลงค่าสีเขียว (a*) ของผิวพริกหวาน บรรจุในบรรจุภัณฑ์ active MAP (ซองควบคุม ฯ ทำจากวัสดุ ENP และ LDPE) และ passive MAP (control/no sachet) ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 10°C เป็นเวลา 21 วัน (ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 6)

Storages (day)	Packaging treatments		
	Control (no sachet)	LDPE sachet	ENP sachet
0	-9.44±0.03^{a,A}	-9.44±0.03^{a,A}	-9.44±0.03^{a,A}
1	-9.23±0.38^{a,A}	-9.29±0.66^{a,A}	-9.42±0.63^{a,A}
3	-9.57±0.25^{a,A}	-9.41±0.33^{a,A}	-9.30±0.46^{a,A}
5	-9.64±0.05^{a,A}	-9.40±0.18^{a,A}	-9.51±0.31^{a,A}
7	-9.69±0.01^{a,A}	-9.32±0.44^{a,A}	-9.39±0.24^{a,A}
10	-9.50±0.25^{a,A}	-9.45±0.34^{a,A}	-9.41±0.66^{a,A}
14	-9.60±0.12^{a,A}	-9.14±0.21^{a,A}	-9.34±0.20^{a,A}
21	-9.23±0.04^{a,A}	-8.68±0.69^{a,A}	-9.17±0.14^{a,A}

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=6) และตัวอักษรตัวเล็กและตัวใหญ่แสดง การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแถวและคอลัมน์เดียวกันตามลำดับ อักษรที่เหมือนกันแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (Control (no sachet)) = สิ่งทดลองควบคุมที่ไม่มีซองควบคุม ฯ, LDPE sachet และ ENP sachet = การบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่มีซองควบคุม ฯ ทำจากฟิล์ม LDPE และ ENP ตามลำดับ

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาวหทัยพร กัมพวงค์

ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2557 - 2561 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร (เกียรตินิยมอันดับ 2) มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ประวัติการวิจัย โครงการการสร้างปัญญาวิทย์ ผลิตนักเทคโน (Young Scientist and Technologist Program: YSTP) ประจำปีการศึกษา 2560 จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (Thailand Graduate Institute of Science and Technology: TGIST) ประจำปีการศึกษา 2562 จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

ผลงานตีพิมพ์ Kampawong, H., Utto, W., and Pruthtikul, R. 2018. “Extending shelf life of fresh cherry tomatoes using ethanol vapour controlled release based active packages” In Proceeding of the 1st Rajamangala Surin International Conference of Rajamangala University of Technology Isan, Surin Campus. p.20-27. Surin: Rajamangala University of Technology Isan, Surin Campus, 2018.
หทัยพร กัมพวงค์ วีรเวทย์ อุทโธ และฤทธิรงค์ พฤฑฒิกุล. ลักษณะของการปลดปล่อยไอระเหยเอทานอลจากระบบแอคทีฟทำจากฟิล์มประเภทชอบน้ำ. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ “มอบ.วิจัย ครั้งที่ 14” หน้า 1-8. อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2563.