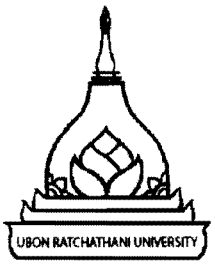
การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2-Acetyl-1-pyrroline และคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่สัมพันธ์กับความล่าช้าในการทำแห้งข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษา

สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ห้องหอกลาง

สุพรรณิการ์ ปักเคธาติ

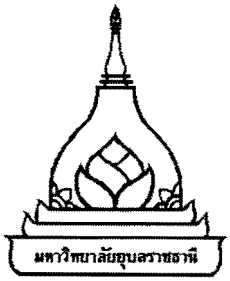
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



CHANGES OF 2-ACETYL-1-PYRROLINE CONTENTS AND QUALITIES OF KHOA DAWK MALI 105 IN RELATIONS TO DELAYED PADDY RICE DRYING AFTER HARVESTING, STORAGE TEMPERATURE AND PERIOD

SUPANNIKAR PAKKETHATI

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 2019
COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์

เรื่อง การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2-Acetyl-1-pyrroline และคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่สัมพันธ์กับความล่าช้าในการทำแห้งข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษา

ผู้วิจัย นางสาวสุพรรณิการ์ ปักเคธาติ

คณะกรรมการสอบ

ดร.รัตนวรรณ จันทร์ศศิธร	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรเวทย์ อุทโธ	กรรมการ
ดร.กฤตยา อุทโธ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรวัติ ชัยราช	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรเวทย์ อุทโธ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร.กฤตยา อุทโธ)

....

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

คณบดีคณะเกษตรศาสตร์ รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2562

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรเวทย์ อุทโธ ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ รวมทั้งการเป็นแบบอย่างที่ดีแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ และขอบพระคุณ ดร.รัตนวรรณ จันทร์ศศิธร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรวัติ ชัยราช และ ดร.กฤตยา อุทโธ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบคุณนางกฤษณา สุดทะสาร และนายพัชรพงษ์ ช่างสนิท ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยเสมอมา ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการหลังการเก็บเกี่ยว ศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี และห้องปฏิบัติการหลังการเก็บเกี่ยว คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการเก็บรักษา จัดเตรียมและวิเคราะห์ตัวอย่างข้าว ตลอดจนผู้บังคับบัญชาและผู้ร่วมงานทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการศึกษาจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ เพื่อน ๆ นักศึกษาที่คอยให้กำลังใจ และขอขอบพระคุณสถาบันการศึกษาแห่งนี้ ที่ได้ให้ความรู้ และประสบการณ์อันมีค่าในการศึกษา

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้กำลังใจ ส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการศึกษาที่ดี คุณค่าและประโยชน์ที่เกิดจากการศึกษาครั้งนี้ ขอมอบแด่ผู้ที่อยู่เบื้องหลังในการส่งเสริมความสำเร็จ ทั้งที่ได้กล่าวนามถึงและมิได้กล่าวนามถึงทุกท่าน และขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

สุพรรณิการ์ ปักเคธาติ
ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง	:	การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2-Acetyl-1-pyrroline และคุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่สัมพันธ์กับความล่าช้าในการทำแห้งข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษา
ผู้วิจัย	:	สุพรรณิการ์ ปักเคธาติ
ชื่อปริญญา	:	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	:	เทคโนโลยีการอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษา	:	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรเวทย์ อุทโธ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	:	ดร.กฤตยา อุทโธ
คำสำคัญ	:	ขาวดอกมะลิ 105, ความล่าช้าในการลดความชื้น, คุณภาพข้าวสารขัดขาว, สาร 2-Acetyl-1- pyrroline (2AP), ปฏิกิริยาอันดับ 1

ข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวอาจไม่ได้รับการทำแห้งทันที เนื่องจากเกษตรกรเร่งจำหน่ายข้าวให้โรงสีเพื่อลดความเสี่ยงในการจัดเก็บหรือจากสภาวะอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการตากแดดซึ่งเป็นวิธีการทำแห้งทั่วไปของเกษตรกร ข้อจำกัดในการลดความชื้นดังกล่าวได้รับความสนใจจากผู้มีส่วนได้เสีย เนื่องจากอาจเป็นสาเหตุของการสูญเสียความหอมและคุณภาพของข้าวเปลือก งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการชะลอการลดความชื้นข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ในฤดูปลูกปี 2559 และ 2560) ภายหลังการเก็บเกี่ยวและสภาวะการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) ซึ่งเป็นสารสำคัญที่ให้กลิ่นหอมหลักในข้าวรวมถึงคุณภาพทางกายภาพบางประการของข้าวขัดขาว โดยชะลอการลดความชื้นข้าวเปลือก เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และตากแห้งข้าวเปลือกจนได้ความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 14 (ฐานเปียก) บรรจุลงในถุงกระสอบ ๆ ละ 20 กิโลกรัม เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27 °C เป็นระยะเวลา 12 เดือน ดำเนินการตรวจวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP และคุณภาพทางกายภาพของข้าวเปลือกในช่วงเวลาต่าง ๆ พร้อมเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกซึ่งทำการลดความชื้นทันทีภายหลังการเก็บเกี่ยว

ผลการวิจัยทราบว่า ปริมาณสาร 2AP เริ่มต้นในข้าวเปลือกที่ชะลอการลดความชื้นมีปริมาณต่ำกว่าข้าวเปลือกที่ลดความชื้นทันทีประมาณร้อยละ 16.72 ในระหว่างการเก็บรักษา ปริมาณสาร 2AP ในข้าวเปลือกลดลงจากค่าเริ่มต้น ประมาณ 1-1.5 เท่าภายในเดือนที่ 1-2 และมีค่าอยู่ในระดับดังกล่าวเป็นเวลานาน 7-8 เดือน หลังจากนั้นปริมาณสาร 2AP จะลดลงอย่างรวดเร็วโดยปริมาณสาร 2AP ในเดือนที่ 12 อยู่ในช่วง 0.03-0.1 ppm การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในข้าวเปลือกทั้ง 2 ประเภท พบว่า มีลักษณะคล้ายกับการเกิดของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ทั้งนี้อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 10 °C เป็น 24 °C แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 27 °C ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนนัก จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาร 2AP ในข้าวเปลือกที่ลดความชื้นทันทีและลดความชื้นล่าช้าทำนายได้ดีด้วยสมการประเภท first-order fractional conversion model มีค่า RMSE และ R^2 อยู่ในช่วง 0.16-0.29 และ 0.88-0.94 ตามลำดับ

การศึกษาผลของการชะลอการลดความชื้นต่อคุณภาพของข้าวสาร พบว่า ความขาวและเปอร์เซ็นต์การขัดสีของข้าวสารมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างข้าวสารจากข้าวเปลือกที่ได้จากการลดความชื้นทั้งสองวิธี อย่างไรก็ตามความขุ่นใสของข้าวสารที่ได้จากข้าวเปลือกซึ่งลดความชื้นทันที มีค่ามากกว่าข้าวสารที่ได้จากข้าวเปลือกที่ลดความชื้นล่าช้าในช่วงการเก็บรักษา 6 เดือนแรก ($p<0.05$) ทั้งนี้อุณหภูมิในการเก็บรักษาไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงความขุ่นใส นอกจากนี้ค่าความแข็งของข้าวสารหุงสุกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ค่าความเหนียวของข้าวหุงสุก มีค่าลดลงแต่ไม่พบความแตกต่างระหว่างประเภทของข้าวที่ชะลอความชื้นล่าช้าและอุณหภูมิการเก็บรักษา

ข้อมูลและความรู้ที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นแนวทางสำคัญสำหรับการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวของข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยเฉพาะจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ของข้าวเปลือกสามารถนำไปใช้ในการสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดเก็บข้าวเปลือกและแผนการตลาดของผู้ประกอบการหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

ABSTRACT

TITLE : CHANGES OF 2-ACETYL-1-PYRROLINE CONTENTS AND QUALITIES OF KHOA DAWK MALI 105 IN RELATIONS TO DELAYED PADDY RICE DRYING AFTER HARVESTING, STORAGE TEMPERATURE AND PERIOD

AUTHOR : SUPANNIKAR PAKKETHATI

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : FOOD TECHNOLOGY

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

CO-ADVISOR : GRITTAYA UTTO, Ph.D.

KEYWORDS : KHOA DAWK MALI 105, DELAYING MOISTURE REDUCTION, 2-ACETYL-1- PYRROLINE (2AP), FIRST-ORDER KINETIC REACTION, MILLED RICE QUALITIES

Paddy rice may not be dried immediately after harvesting because farmers wanted to quickly sold the rice to rice mills to minimize risks from storage or improper weather condition that could cause delaying in sun-drying, a traditional rice drying method of the farmers. Limitations of moisture reduction have drawn attention from stakeholders because these could be the main causes leading to losses in fragrant aroma and qualities of paddy rice. This research was conducted to study the effects of delayed drying of Khao Dawk Mali 105 (harvested in 2016 and 2017 seasons) as well as storage conditions on kinetic changes of 2-Acetyl-1-pyrroline (2AP) contents, a key substance attributing to rice fragrant aroma, and some physical qualities of milled rice. Moisture reduction of the paddy rice was delayed for 48 h before was sun-dried until its moisture content was 14% (w.b). The rice (denoted DEL-paddy rice) was filled in a 20 kg sack, and later kept at 10, 24 and 27°C for 12 months. Changes in 2AP contents and the qualities were determined periodically and compared to paddy rice of which its moisture was immediately reduced after harvesting (IMM-paddy rice).

The results showed that initial 2AP content of the DEL-paddy rice was 16.72% lower than that of the IMM-paddy rice. The 2AP contents of all types of paddy rice decreased approximately 1-1.5-fold from their initial values during 1-2 months of storage and the 2AP contents remained relatively unchanged for 7-8 months. However, the 2AP contents decreased with faster rates thereafter. The contents measured in the 12^{th} month were in a range of 0.03-0.1 ppm. The changes of 2AP

contents showed similar characteristics of first order reaction between both treated paddy rice samples. Rate of the changes were elevated when the storage temperature increased from 10 °C to 24 °C. However, there were no apparent changes in the rates when the temperature was further increased to 27 °C. The kinetics of the 2AP reductions could be reasonably predicted by the first-order fractional conversion model of which root mean square of error (RMSE) and R^2 values were in a range of 0.16-0.29 and 0.88-0.94, respectively.

The results of the physical qualities showed that whiteness and milling degree values of milled rice gradually decreased over the storage time but there were no significant differences between the moisture reduction methods. Transparency values of milled rice from the IMM-paddy rice were significantly higher than those from DEL-paddy rice during 6 months of storage ($p<0.05$). However, there were no apparent effects of the drying conditions and temperatures on changes in the transparency values. In addition, hardness values of cooked milled rice slightly increased, while stickiness values decreased during storage.

Information and knowledge obtained from this study will be important approaches for KDML105 rice postharvest management. In particular the kinetic changes of 2AP contents of paddy rice could be utilized in supporting further decision-making on paddy rice storage and marketing plans of entrepreneurs and relevant organizations.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	**ก**
บทคัดย่อภาษาไทย	**ข**
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	**ง**
สารบัญ	**ฉ**
สารบัญตาราง	**ซ**
สารบัญภาพ	**ฌ**
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ข้าวหอมมะลิ	5
2.2 การเก็บรักษาข้าวเปลือก (Paddy rice storage)	5
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือกกับคุณภาพของข้าวสาร	6
2.4 ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของข้าวเปลือก	7
2.5 สารให้ความหอมในข้าว	9
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพความหอม	10
2.7 จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงของสาร 2AP ในระหว่างการเก็บรักษา	13
2.8 สรุปประเด็นที่สำคัญ	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วัตถุดิบ	16
3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างข้าว	16
3.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร 2AP ในระหว่างการเก็บรักษา	17
3.4 การวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP	18
3.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวสารจากการเก็บรักษาข้าวเปลือก	21
3.6 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์สถิติ	22
3.7 สรุปประเด็นที่สำคัญ	22

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมี และคุณค่าทางโภชนาการ ของเมล็ดข้าวสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในแหล่งปลูกที่ต่างกัน	6
2.2	การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณสาร 2AP (หน่วย ppm) ในข้าวหอมมะลิที่ปลูกด้วยการทำการเกษตรแบบต่าง ๆ	12
2.3	พลังงานกระตุ้น (E_a) ต่อปฏิกิริยาที่สำคัญของการเสื่อมเสียในอาหาร	15
3.1	สภาวะการทำงานของเครื่อง GC ยี่ห้อ Bruker's รุ่น 450-GC สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP	20
3.2	สภาวะการทำงานของเครื่อง Headspace autosampler ยี่ห้อ Perkin elmer รุ่น Terbomatrix 16 สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP	21
4.1	ตัวอย่างของปริมาณสาร 2AP ของข้าวสารสายพันธุ์ต่าง ๆ ที่วิเคราะห์และรายงานจากเอกสารอ้างอิงต่าง ๆ	25
4.2	ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (สมการ 2.3) สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในระยะเวลา 3 เดือน (12 สัปดาห์) ของข้าวสารซึ่งได้จากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งเพื่อลดความชื้นแบบทันทีหรือแบบที่มีการชะลอการทำแห้ง พร้อมด้วยค่า RMSE และค่า R^2	28
4.3	ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (สมการ 2.3) สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในระยะเวลา 12 เดือน ของข้าวสารซึ่งได้จากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งเพื่อลดความชื้นแบบทันทีหรือแบบที่มีการชะลอการทำแห้ง พร้อมด้วยค่า RMSE และค่า R^2	32
4.4	ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (สมการ 2.3) สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP เฉพาะในช่วงเวลา 7-12 เดือน ของข้าวสารซึ่งได้จากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งเพื่อลดความชื้นแบบทันทีหรือแบบที่มีการชะลอการทำแห้ง พร้อมด้วยค่า RMSE และค่า R^2	34
5.1	มาตรฐานตาม US Patent Number 5,208,063 เรื่อง กระบวนการขัดสีข้าวเพื่อควบคุมลักษณะการหุงต้นของข้าว ซึ่งสัมพันธ์กับมาตรฐานของเครื่องวัดความขาวของข้าว ด้วยเครื่อง SATAKE	42
5.2	ตัวอย่างของระดับความขาว ความใส และร้อยละการขัดสีของข้าวที่รายงานในเอกสารอ้างอิง	43

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลของการชะละการลดความชื้นของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ สาร 2AP ของข้าวเปลือกในระหว่างการเก็บรักษา

4.1 ผลของการชะลอการลดความชื้นของข้าวเปลือกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในช่วงเวลา 3 เดือน 23

4.2 ผลของการชะลอการลดความชื้นของข้าวเปลือกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในช่วงเวลา 12 เดือน 30

4.3 สรุปประเด็นที่สำคัญ 36

บทที่ 5 ผลของการชะลอการลดความชื้นในข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ต่อคุณภาพข้าวขัดขาวในระหว่างการเก็บรักษา

5.1 ความชื้น 37

5.2 ความขาว การขัดสีข้าว และความใส 39

5.3 เนื้อสัมผัสของข้าวสารหุงสุก 44

5.4 สรุปประเด็นที่สำคัญ 45

บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะการวิจัย

6.1 สรุปผลการศึกษา 46

6.2 ข้อเสนอแนะการวิจัย 47

เอกสารอ้างอิง **48**

ภาคผนวก **57**

ประวัติผู้วิจัย **66**

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	ข้อมูลของตลาดข้าวโลก ในช่วงปี ค.ศ. 2019/2020	2
2.1	โครงสร้างของสาร 2-acetyl-1-pyrroline (2AP)	9
2.2	การสังเคราะห์สาร 2AP (2AP biosynthesis pathway)	10
3.1	การเก็บเกี่ยวข้าวในแปลงนาโดยใช้รถเกี่ยว การบรรจุข้าวที่เก็บเกี่ยวเสร็จแล้วลงกระสอบสาน และการจัดวางกระสอบข้าวเพื่อรอการขนถ่ายไปยังโรงเรือน	16
3.2	ลักษณะการเก็บข้าวเปลือกบรรจุในถุงกระสอบสานโดยวางบนแท่นวางสินค้าภายในสภาวะอุณหภูมิต่าง ๆ	17
3.3	การสุ่มตัวอย่างข้าวด้วยหลาวสแตนเลส เครื่องกะเทาะเปลือกข้าวและขัดขาว และเครื่องบดข้าว	19
3.4	เครื่องแก๊สโครมาโตแกรม (gas chromatogram หรือ GC) ยี่ห้อ Bruker's รุ่น 450-GC (Netherlands) และเครื่อง Headspace sampler ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Terbomatrix 16 (Singapore)	20
3.5	เครื่องวัดความชื้น SB 900 (Steinlite moisture meter, USA) และเครื่อง rice moisture tester (PM-410, Kett, Japan) ณ ศูนย์วิจัยข้าวจังหวัดอุบลราชธานี	21
3.6	เครื่องวัดความขาวข้าว (MM1D Rice Milling Meter, Satake, Japan และเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (TA.XT plus Texture Analyzer, Stable Micro Systems Texture analyzer, England)	22
4.1	แบบจำลองแนวคิดการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ lipase และ LOX กับไขมันซึ่งมีสาร 2AP ละลายอยู่ในไขมัน ทั้งที่อยู่ในรูปอิสระ (free form) หรือ ยึดติดกับแป้ง (starch bound form) ในข้าวหอมมะลิ	24
4.2	การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ที่วัดได้จากการทดลอง (สัญลักษณ์ จุดต่อเส้น) และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ (สมการ 2.3) ภาพย่อย ก-ค แสดงข้อมูลจากการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ทำแห้งทันที (IMM) ส่วนภาพย่อย ง-ฉ แสดงข้อมูลจากการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่มีการชะลอการทำแห้ง (DEL) ที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C ตามลำดับ	27
4.3	แบบจำลองแนวคิดการปลดปล่อยสาร 2AP จากไขมันกลุ่ม A (lipid group A) ซึ่งเป็นผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเอนไซม์กับไขมัน แล้วสาร 2AP ที่ถูกปลดปล่อยเหล่านี้ได้เกิดการถ่ายโอนและดูดซับเข้าสู่ไขมันกลุ่ม B (lipid group B) ปรากฏการณ์นี้ได้ถูกตั้งสมมติฐานในข้าวที่มีการชะลอการลดความชื้นหลังการเก็บเกี่ยว (DEL)	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.4	การทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในข้าวขาวดอกมะลิ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และ 30°C เป็นเวลา 10 สัปดาห์ ผลการทดลองเป็นข้อมูลที่รายงานโดย Yoshihashi et al. (2005)	30
4.5	การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ที่วัดได้จากการทดลอง (สัญลักษณ์ วงกลม) และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ (สมการ 2.3) ในระหว่างการเก็บรักษา 12 เดือน สัญลักษณ์ IMM หมายถึง การเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ทำแห้งทันที (IMM) ในขณะที่ DEL หมายถึง การเก็บรักษาข้าวเปลือกที่มีการชะลอการทำแห้ง ที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C	32
4.6	การเปรียบเทียบโครงสร้างของเมล็ดข้าวสารและกระดาษกรองที่สังเกตภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM)	33
4.7	การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ที่วัดได้จากการทดลอง (สัญลักษณ์ วงกลม) และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ (สมการ 2.3) โดยทำนายเฉพาะช่วงการเก็บรักษา 7-12 เดือน สัญลักษณ์ IMM หมายถึง การเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ทำแห้งทันที (IMM) ในขณะที่ DEL หมายถึง การเก็บรักษาข้าวเปลือกที่มีการชะลอการทำแห้ง ที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C	34
4.8	แบบจำลองแนวคิดการถ่ายโอนของสาร 2AP จากภายในเม็ดข้าวที่สมมาตรสู่บรรยากาศภายนอกตามช่วงระยะเวลาการเก็บรักษา ลูกศรแสดงทิศทางของการถ่ายโอนโดยกำหนดให้เป็นทิศทางเดียว	36
5.1	การเปลี่ยนแปลงความชื้น (moisture content; % wet basis (w.b.)) ของข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งข้าวเปลือกอย่างทันทีหลังการเก็บเกี่ยว (ตัวย่อ IMM) และการชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ตัวย่อ DEL) ข้าวเปลือกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C เป็นเวลา 12 เดือน	38
5.2	การเปลี่ยนแปลงความขาว (whiteness) ของข้าวสารจากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งข้าวเปลือกอย่างทันทีหลังการเก็บเกี่ยว (ตัวย่อ IMM) และการชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ตัวย่อ DEL) ข้าวเปลือกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C เป็นเวลา 12 เดือน	40
5.3	การเปลี่ยนแปลงความใส (transparency) ของข้าวสารจากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งข้าวเปลือกอย่างทันทีหลังการเก็บเกี่ยว (ตัวย่อ IMM) และการชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ตัวย่อ DEL) ข้าวเปลือกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C เป็นเวลา 12 เดือน	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

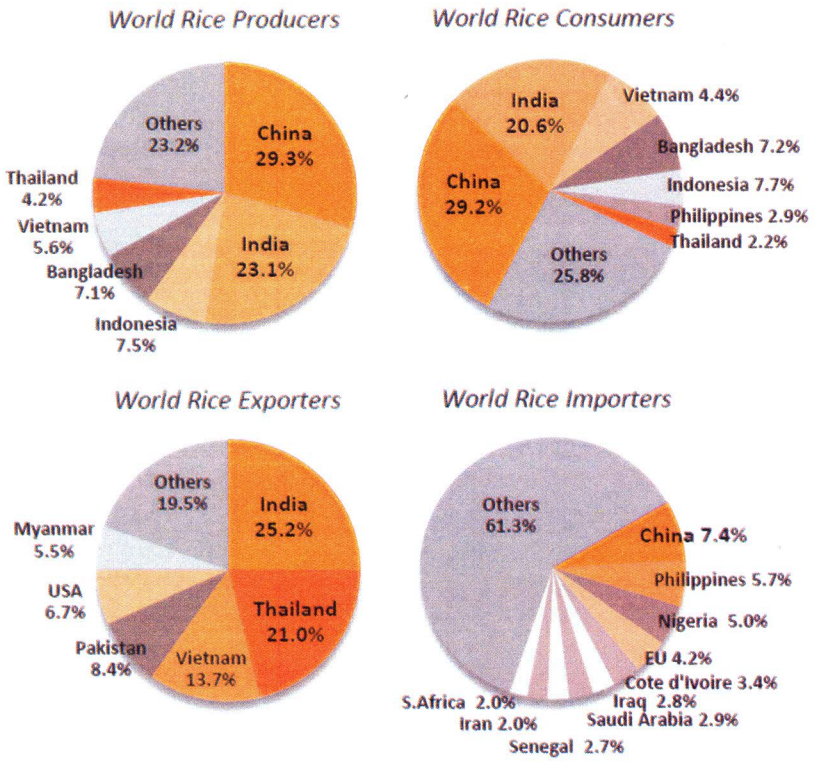
ภาพที่		หน้า
5.4	การเปลี่ยนแปลงระดับการขัดสีข้าว (milling degree) ของข้าวสารจากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งข้าวเปลือกอย่างทันทีหลังการเก็บเกี่ยว (ตัวย่อ IMM) และการชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ตัวย่อ DEL) ข้าวเปลือกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C เป็นเวลา 12 เดือน	41
5.5	การเปลี่ยนแปลงความแข็ง (hardness) และความเหนียว (stickiness) ของข้าวสารหุงสุกจากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งข้าวเปลือกอย่างทันทีหลังการเก็บเกี่ยว (ตัวย่อ IMM) และการชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ตัวย่อ DEL) ข้าวเปลือกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C เป็นเวลา 12 เดือน	45

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

ข้าว มีความสำคัญต่อชีวิตความเป็นอยู่ของคนไทย เนื่องจากเป็นอาหารที่มีการบริโภคในชีวิตประจำวัน (staple food) ในเอเชียและบางส่วนในแทบแปซิฟิก และมากกว่าร้อยละ 90 ของข้าวผลิตและบริโภคในเอเชียแปซิฟิก (Papademetriou, 2000) ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของไทยทั้งในด้านการบริโภค การเป็นสินค้าเกษตรส่งออกเป็นอันดับหนึ่งของประเทศ และครอบคลุมพื้นที่เพาะปลูกมากที่สุด จากข้อมูลในปี พ.ศ. 2562 พบว่า ประเทศไทยมีผลผลิตข้าวเป็นอันดับ 6 ของโลก (ภาพที่ 1.1) ในขณะที่ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกข้าวหอมมะลิรายใหญ่ของโลก (เป็นอันดับ 2 ของโลก) นอกเหนือจากประเทศอินเดีย (อันดับ 1) และเวียดนาม (อันดับ 3) ประเทศนำเข้าข้าวหอมมะลิของประเทศไทยหลักประกอบด้วย สหรัฐอเมริกา จีน และฮ่องกง (ชัยวัช โชวเจริญสุข, 2562) ในปี 2562 ปริมาณและมูลค่าประมาณการสำหรับข้าวส่งออก เท่ากับ 9.5 ล้านตัน และ 155,000 ล้านบาท ตามลำดับ (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2561) และปัจจุบันประเทศไทยต้องเผชิญการแข่งขันด้านการผลิตข้าวที่รุนแรงขึ้นเป็นลำดับจากประเทศคู่แข่งที่พัฒนาสายพันธุ์ข้าวที่คุณภาพใกล้เคียงกับข้าวหอมมะลิไทย เช่น ข้าวบาสมาติของอินเดีย ข้าวกลิ่นหอมของสหรัฐอเมริกา (American Jasmine) ข้าวผกาลำดวนของกัมพูชา และข้าวหอมพันธุ์ ST21 ของเวียดนาม อันเป็นสาเหตุให้ผู้ประกอบการข้าวให้ความสำคัญกับคุณภาพข้าวหอมมะลิเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะด้านความหอม เพื่อรักษาตลาดส่งออกข้าวหอมมะลิรายของประเทศไทยในเวทีตลาดโลกต่อไป

คุณภาพของข้าวหอมมะลิที่ดีเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค จะได้มาจากข้าวเปลือกที่มีคุณภาพดีซึ่งส่งผลมาจากการจัดการข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวที่ดี ปัญหาการจัดการข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญ คือ การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวเปลือกที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงขึ้น (Juliano, 1985; Chrastil, 1990; Widjaja et al., 1996; Tananuwong and Lertsiri, 2010) จากข้อมูลที่ได้รวบรวมโดยกรมการข้าว (ข้อมูลประเภทรายงานภาคสนามและข้อมูลที่ไม่ได้รวบรวมเป็นทางการ หรือ anecdotal data) พบว่าข้าวภายหลังจากการเก็บเกี่ยวมีการจัดการความชื้น 2 รูปแบบ ประกอบด้วย (1) ลดความชื้นทันทีโดยเกษตรกรนำข้าวที่ได้มาทำการตากแห้ง (โดยใช้แสงแดด) และบรรจุกระสอบเพื่อเก็บไว้ยุ้งฉางหรือส่งขายยังโรงสี และ (2) ทำการเก็บรักษาข้าวในที่ร่มเป็นเวลาประมาณ 48 ชั่วโมง ก่อนการนำมาทำแห้ง การจัดการความชื้นแบบที่ 2 นี้เป็นการดำเนินการเมื่อแสงแดดไม่พอเพียงซึ่งมักเกิดจากฝนที่ตกในระหว่างการเก็บเกี่ยวข้าว



ภาพที่ 1.1 ข้อมูลของตลาดข้าวโลก ในช่วงปี ค.ศ. 2019/2020
ที่มา: ชัยวัช โชวเจริญสุข (2562)

กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ โดยกลุ่มงานวิทยาการเทคโนโลยีการผลิตข้าว กองวิจัยและพัฒนาข้าวมีความสนใจที่ศึกษาผลของการจัดการความชื้นของข้าวเปลือกในทั้งสองรูปแบบต่อคุณภาพของข้าวสารในระหว่างการเก็บรักษา จากการศึกษาเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องพบว่า การศึกษาในประเด็นดังกล่าวยังมีอยู่น้อยมาก ทั้งนี้การวิจัยโดยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาของข้าวเปลือกซึ่งได้รับการทำแห้งทันทีภายหลังการเก็บเกี่ยวต่อคุณภาพของข้าวสาร หรือผลของแมลงหรือศัตรูของข้าวเปลือก เช่น มอด และหนูต่อคุณภาพของข้าวสาร Chrastil (1990) รายงานว่า การเก็บข้าวเปลือกในระยะเวลานาน 10 เดือน ที่อุณหภูมิห้อง (37°C) ซึ่งจัดว่าเป็นการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้เมล็ดข้าวสาร (kernel) มีค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Juliano (1985) ซึ่งรายงานว่าเมล็ดข้าวสารที่ผลิตจากข้าวเปลือกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35°C มีสีเหลืองเข้มมาก และมีการสูญเสียสาร 2AP ซึ่งเป็นสารที่ให้กลิ่นหอมของข้าวมากกว่าข้าวสารที่ผลิตจากข้าวเปลือกที่เก็บรักษาที่ 2 และ 20°C นอกจากนี้ เวียงโชง วันสะหว่างและคณะ (2559)ได้รายงานว่า การเก็บรักษาข้าวเปลือกที่อุณหภูมิที่สูงส่งผลให้คุณภาพของข้าว ฮางงอก ซึ่งผลิตจากการนำข้าวเปลือกไปเพาะงอก นึ่งและตากแห้ง มีคุณภาพที่ต่ำโดยเฉพาะปริมาณสาร gamma amino butyric acid (GABA) มีปริมาณลดลงต่ำกว่าข้าวฮางงอกที่ผลิตจากข้าวเปลือกที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า

ในการลงพื้นที่สำรวจการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกของเกษตรกร ผู้วิจัยได้รับข้อมูลจากเกษตรกรว่า การเก็บข้าวสารไว้ประมาณ 48 ชั่วโมงก่อนการทำแห้งเป็นเรื่องที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้

เนื่องจากมีฝนตก โดยเมื่อทำการเก็บข้าวที่ทำแห้งแล้วและนำมาสีพบว่าข้าวมีกลิ่นหอมน้อยกว่าข้าวสารที่ได้จากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งทันที ในปัจจุบันยังไม่พบข้อมูลทางการวิจัยที่สนับสนุนข้อมูลดังกล่าวที่ได้จากเกษตรกร ทั้งนี้ระดับความชื้นที่สูงของข้าวเปลือก (เช่น ร้อยละ 20-22) ส่งผลให้ข้าวเสื่อมคุณภาพได้เร็ว เช่น เมล็ดเกิดรอยร้าวภายในก่อนสี การเกิดกลิ่นเหม็นหืน (rancidity) เมล็ดมีสีเหลืองคล้ำ แมลงที่ติดมากับเมล็ดเจริญเติบโตและขยายพันธุ์รวดเร็ว เมล็ดมีอัตราการหายใจสูงส่งผลให้เกิดความร้อนและเร่งการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพดังกล่าวข้างต้น (งามชื่น คงเสรี, 2546) อย่างไรก็ตามข้อมูลดังกล่าวเป็นผลจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกในระหว่างการเก็บรักษา แต่ผลการเก็บรักษาของข้าวเปลือกซึ่งมีความชื้นที่สูงก่อนการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวเปลือกและข้าวสารในระหว่างการเก็บรักษายังไม่ได้มีการศึกษา

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้วางแผนการดำเนินการเพื่อศึกษาผลของ (1) การจัดการความชื้นของข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยว และ (2) สภาวะการเก็บรักษาภายหลังจากการลดความชื้นต่อคุณภาพข้าวสารในระหว่างการเก็บรักษา ทั้งนี้คุณภาพที่จะได้ทำการศึกษาประกอบด้วย ปริมาณสาร 2AP ซึ่งเป็นสารหอมระเหยสำคัญที่ให้กลิ่นหอมของข้าวสาร สีของเมล็ดข้าวสาร และคุณภาพการหุงของข้าวสาร การศึกษานี้ได้วางแผนการศึกษาเป็นระยะเวลา 1 ปี ระยะเวลาดังกล่าวเป็นอายุของเมล็ดพันธุ์ข้าวที่เก็บเกี่ยวในฤดูนาปี (8-12 เดือน) (พรทิพย์ ถาวงศ์, สุรพล ยศเทียม และชาลี ฐิตะฐาน, 2554) รวมทั้งเป็นระยะเวลาที่โรงสีจะเก็บข้าวหอมมะลิในแต่ละฤดูกาลไว้ หากเกินระยะเวลาดังกล่าวจะมีการจัดจำหน่ายเป็นข้าวเปลือกเก่า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี เช่น กลิ่นหอมลดลง ร่วนและแข็งกว่าข้าวใหม่ (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2559)

การศึกษานี้ ประกอบด้วย 2 การศึกษาหลัก คือ (1) ผลของการจัดการความชื้นและสภาวะการเก็บรักษาข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวต่อคุณภาพของข้าวสาร และ (2) ผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อคุณภาพข้าวสารขัดข้าวในบรรจุภัณฑ์สำหรับการขายส่ง

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 จุดมุ่งหมาย

เพื่อหาแนวทางการจัดการข้าวเปลือกในกรณีที่ต้องมีความล่าช้าในการทำแห้งภายหลังการเก็บเกี่ยว และเก็บรักษาข้าวเปลือกในสภาวะอุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ

1.2.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของความล่าช้าในการทำแห้งข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว อุณหภูมิและระยะเวลาเก็บรักษาต่อความหอมและคุณภาพของหอมมะลิขัดขาว

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ระยะเวลาความล่าช้าก่อนการทำแห้งข้าวสารหลังการเก็บเกี่ยว ที่ 48 ชั่วโมง

1.3.2 การวัดความหอมของข้าวสารจากการวิเคราะห์ปริมาณ 2AP

1.3.3 คุณภาพของข้าวสารที่จะทำการศึกษา ประกอบด้วย สี ความชื้น เนื้อสัมผัส และความหอม

1.3.4 ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวเปลือก เท่ากับ 1 ปี

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความหอมและคุณภาพของข้าวสารหอมมะลิขัดขาว ที่เป็นผลจากความล่าช้าในการทำแห้งข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยว และเก็บรักษาที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่าง ๆ

1.4.2 ความสัมพันธ์แบบจลนพลศาสตร์ระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวเปลือกกับปริมาณ 2AP

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าวหอมมะลิ

มาตรฐานสินค้าข้าวหอมมะลิไทยที่ได้รับการอ้างอิงจากกระทรวงพาณิชย์ ได้กำหนดนิยามว่า "ข้าวหอมมะลิไทย" (THAI HOM MALI RICE) หมายถึง ข้าวกล้อง และข้าวขาวที่แปรรูป มาจากข้าวเปลือกเจ้าพันธุ์ข้าวหอมที่ไวต่อช่วงแสง ซึ่งผลิตในประเทศไทยในฤดูนาปี กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ประกาศรับรองว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์ กข15 ซึ่งมีกลิ่นหอมตามธรรมชาติขึ้นกับว่า เป็นข้าวใหม่หรือข้าวเก่า เมื่อหุงเป็นข้าวสวยแล้ว เมล็ดข้าวสวยจะอ่อนนุ่ม" (ราชกิจจานุเบกษา, 2559) ลักษณะประจำพันธุ์ที่สำคัญของข้าวหอมมะลิ คือ เมล็ดข้าวเปลือกมีสีฟางยาวเรียว และมีกลิ่นหอมตามธรรมชาติ มีปริมาณอะมิโลสร้อยละ 12-17 ลักษณะต้นจะมีความสูงเฉลี่ย 140 เซนติเมตร ลำต้นและใบสีเขียวอ่อน ใบธงทำมุมกับคอรวง รวงอยู่เหนือใบ ใบยาว ค่อนข้างแคบ ทนแล้งได้ดีพอสมควร ผลผลิตต่อไร่ ประมาณ 363 – 560 กิโลกรัมต่อไร่ โดยข้าวพันธุ์ กข15 ได้รับการปรับปรุงพันธุ์ จากการนำเมล็ดข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ไปฉายรังสีแกมมาปริมาณ 15 krad เพื่อชักนำให้เกิดการกลายพันธุ์ ทำให้ปริมาณผลผลิตเพิ่มมากกว่าเดิมร้อยละ 4-6 ในขณะที่คุณลักษณะอื่น ๆ โดยเฉพาะความหอมไม่เปลี่ยนแปลง (Rice Department, 2010)

2.2 การเก็บรักษาข้าวเปลือก (Paddy rice storage)

ในแถบประเทศเอเชีย การผลิตข้าวสามารถทำได้ 1-3 ครั้งต่อปี การเก็บรักษาข้าวจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยทั่วไปข้าวถูกเก็บรักษาไว้ก่อนบริโภคในรูปแบบข้าวเปลือก ข้าวกล้องหรือข้าวขัดขาว ทั้งนี้คุณสมบัติทางประสาทสัมผัสโดยเฉพาะด้านกลิ่นหอม และรสชาติของข้าวเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค (Champagne, 2008) ข้าวมีองค์ประกอบทางเคมีหรือสารอาหารที่สำคัญ เช่น โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ เถ้า คาร์โบไฮเดรต นอกจาก วิตามิน แร่ธาตุ และปริมาณกรดอะมิโนที่มีในโปรตีนของข้าวที่ให้คุณค่าทางโภชนาการแก่ร่างกาย (อรอนงศ์ นัยวิกุล, 2538) (ตารางที่ 2.1) Swamy et al. (1978) รายงานว่าการเก็บรักษาข้าวเปลือกในสภาวะที่อุณหภูมิ และความชื้นสูงจะทำให้สีของเมล็ดข้าวสารเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของเอนโดสเปิร์มเป็นสีเหลือง-ปนน้ำตาล การเปลี่ยนแปลงสีดังกล่าวเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Millard reaction) ระหว่างกรดอะมิโนอิสระกับแป้งภายในเมล็ดข้าวในระหว่างการเก็บรักษา ทั้งนี้คุณภาพของข้าวเปลือกจะส่งผลต่อคุณภาพของข้าวสารดังนั้นสภาวะการเก็บรักษาข้าวเปลือกจึงมีความสำคัญ (Keawpeng and Venkatachalam, 2015) รายละเอียดโดยสรุปของผลการเก็บรักษาข้าวเปลือกต่อคุณภาพข้าวสารจะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมี และคุณค่าทางโภชนาการ ของเมล็ดข้าวสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในแหล่งปลูกที่ต่างกัน

ประเภทข้าว	แหล่งปลูก	Energy (Kcal)	Moisture	Protein	Fat	Carbo-hydrate	Starch	Total dietary fiber	Ash	Crude fiber
ข้าวกล้อง (g/100g)	ปทุมธานี	334.91	14.00	7.20	2.65	70.57	64.23	4.23	1.35	0.74
	แพร่	337.98	14.00	6.72	2.40	72.37	64.13	3.35	1.16	0.98
	สุรินทร์	338.51	14.00	6.52	2.41	72.70	66.73	3.09	1.29	0.76
	อุบลราชธานี	335.86	14.00	5.93	2.30	72.87	65.89	3.73	1.18	0.69
	พัทลุง	330.01	14.00	8.07	2.20	69.48	61.70	4.96	1.29	0.89
	พิษณุโลก	335.20	14.00	8.00	2.25	70.73	61.75	3.78	1.24	0.62
ข้าวสาร (g/100g)	ปทุมธานี	341.92	14.00	6.89	0.37	77.76	70.53	0.62	0.36	0.06
	แพร่	339.51	14.00	5.57	0.31	78.62	70.45	1.14	0.37	0.09
	สุรินทร์	339.94	14.00	5.92	0.30	78.39	75.28	1.04	0.35	0.15
	อุบลราชธานี	338.90	14.00	4.98	0.23	79.22	72.04	1.17	0.40	0.17
	พัทลุง	337.51	14.00	7.62	0.17	76.37	66.02	1.47	0.37	0.17
	พิษณุโลก	339.43	14.00	6.84	0.20	77.56	70.71	1.02	0.38	0.20

ที่มา: ดัดแปลงจาก สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว (2552)

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเก็บรักษาข้าวเปลือกกับคุณภาพของข้าวสาร

คุณภาพของข้าวเปลือกเป็นปัจจัยหลักซึ่งส่งผลต่อผลผลิตของข้าวสาร ข้าวเปลือกคุณภาพต่ำ เช่น ความชื้นสูง การติดเชื้อราของข้าวเปลือก ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวหรือคุณค่าสารอาหารอื่น ๆ เช่น โปรตีนและไขมัน นอกจากนี้การเก็บรักษาข้าวเปลือกในสภาวะความชื้นสูงสามารถเร่งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (Marshall and Wadsworth, 1994) ข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวซึ่งไม่ได้ลดความชื้นทันทีและเก็บในขณะที่ข้าวมีความชื้นสูง (เช่น สูงกว่าร้อยละ 20 ฐานเปียก) ส่งผลให้ข้าวสารมีสีเหลืองมากกว่าข้าวที่เก็บรักษาที่ความชื้นที่ต่ำกว่า (Phillips et al., 1989) การเก็บรักษาข้าวเปลือกในสภาวะซึ่งมีการระบายความร้อนที่ไม่ดี ส่งผลให้เกิดความร้อนที่สะสมภายในกองข้าวเปลือกและนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของสีเหลืองและกลิ่นเหม็นอับของเมล็ดข้าว และ/หรือส่งผลให้เมล็ดพันธุ์ข้าวมีระดับความงอกต่ำกว่ามาตรฐาน (Trigo-Stockli and Pedersen, 1994) นอกจากนี้ Champagne (2008) รายงานว่า ข้าวซึ่งมีความชื้นสูงตั้งแต่ร้อยละ 16-26 มีการเจริญของจุลินทรีย์ใน

ระดับที่สูง และสามารถตรวจพบผลผลิตของจุลินทรีย์ (metabolite) ที่เป็นสารระเหย เช่น สาร 3-methyl-butanol สาร 2-methyl-butanol สาร acetic acid สาร 2,3-butanediol และ สาร ethyl hexadecanoate การสะสมสารเหล่านี้ส่งผลให้คุณภาพด้านรสชาติ และกลิ่นหอมลดลง ข้าวเปลือกที่ได้ทำแห้งทันทีภายหลังการเก็บเกี่ยวมีการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และปริมาณสารระเหยดังกล่าวในระดับที่ต่ำกว่าข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งทีมีการรอทำแห้ง

2.4 ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของข้าวเปลือก

2.4.1 ความชื้น (moisture content)

ข้าวเปลือกที่ได้รับการเก็บเกี่ยวใหม่ ๆ นั้นมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 18-26 ระดับความชื้นระดับดังกล่าวสามารถเร่งให้ข้าวเสื่อมเสียโดยเฉพาะจากการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี (เช่น การหายใจ) ภายในเมล็ดข้าว ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ทำให้เกิดความร้อนและนำไปสู่การลดลงของคุณภาพข้าวเปลือกและข้าวสาร ระดับความชื้นของข้าวเปลือกที่เหมาะสมในการเก็บรักษาและความชื้นก่อนนำไปสีข้าวควรอยู่ในช่วงร้อยละ 12-14 (ฐานเปียก) (Phillips et al., 1989) ทั้งนี้หากข้าวเปลือกที่มีความชื้นร้อยละ 20 สามารถเก็บรักษาได้ 15 วัน ถ้าข้าวเปลือกมีความชื้นร้อยละ 24 สามารถเก็บรักษาได้เพียง 6-7 วัน ส่วนข้าวเปลือกมีความชื้นร้อยละ 29 เก็บได้เพียง 4-6 วัน (San and Thanh, 1984) ข้าวเปลือกอาจมีความเสียหายที่เกิดจากเชื้อราเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะ *Aspergillus* Spp. และ *Penicillium* Spp. เชื้อรากลุ่มนี้มีการผลิตสารพิษ (mycotoxin) ส่งผลให้คุณภาพของเมล็ดลดลง Barber (1972) รายงานว่าข้าวเปลือกที่มีความชื้นร้อยละ 14 เกิดการเสื่อมเสียจากเชื้อราน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกที่มีความชื้นเท่ากับร้อยละ 18

Trigo-Stockli and Pedersen (1994) ได้ศึกษาอัตราการงอกของข้าวเปลือกที่มีความชื้นที่แตกต่างกัน (ร้อยละ 14 18 22 และ 26) และเก็บรักษาในห้องเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 25°C พบว่าข้าวมีความชื้นที่ร้อยละ 14 มีอัตราการงอกของข้าวเปลือกที่สูง แต่ข้าวที่มีความชื้นร้อยละ 18 และ 22 มีการงอกลดลงและมีการเพิ่มจำนวนของเชื้อราในระหว่างการเก็บรักษา นอกจากนี้ไม่พบการงอกในข้าวที่มีความชื้นเท่ากับร้อยละ 26 ในการศึกษาของ Baldacci and Corbetta (1964) ได้รายงานว่าการเจริญของเชื้อรา แบคทีเรีย เช่น *Fusarium helminthosporium* และ *Pyricularia sp* ได้ส่งผลให้เมล็ดพันธุ์มีการเปลี่ยนแปลงสีเปลือก Mettananda et al. (2000) ได้ศึกษาเปอร์เซ็นต์การงอกจากข้าวเปลือกเก็บรักษาในถุง polypropylene (PP) ในระยะ 3 เดือน และระดับการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกจากเชื้อราที่แตกต่างกัน (ระดับการเปลี่ยนแปลงสีเปลือก คือร้อยละ 0-5, 20-25, 45-50 และ 70-75) ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (29/23°C กลางวัน/คืน) พบว่าข้าวเปลือกที่มีระดับการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกในช่วงร้อยละ 20-25 มีเปอร์เซ็นต์การงอกของข้าวเปลือกในระดับที่มีความปลอดภัยที่สุดหลังจากเก็บเกี่ยวได้ 2 เดือน และสามารถเก็บรักษาได้เพียง 3 เดือน ในขณะที่ระดับการเปลี่ยนแปลงสีเปลือก เท่ากับร้อยละ 45-50 และร้อยละ 70-75 ไม่สามารถงอกได้ และสามารถเก็บรักษาได้เพียง 2 เดือน และ 1 เดือน ตามลำดับ ผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนให้ทราบถึงผลของการเจริญของเชื้อราต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก ในขณะที่ Misra et al. (1990) และ Ou (1985) ได้รายงานว่าการงอกของเมล็ดข้าวเปลือกมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการติดเชื้อจากเชื้อราและแบคทีเรีย ทั้งนี้ Querijero et al. (1993) ได้รายงานว่าการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์

ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดข้าวเปลือกลดลงประมาณร้อยละ 39 เนื่องจากการย่อยสลายของสารอาหารจากกิจกรรมของเชื้อราในระหว่างการเก็บรักษาซึ่งผลผลิตจากกิจกรรมดังกล่าวเป็นสารพิษปนเปื้อนส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีเมล็ดข้าว

การลดความชื้นล่าช้า เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ ปัจจุบัน เกษตรกรส่วนใหญ่จะเก็บเกี่ยวผลผลิตและจำหน่ายโดยตรงให้กับโรงสี โดยไม่ได้ลดความชื้นก่อนจำหน่าย ซึ่งส่งผลให้การลดความชื้นของข้าวเปลือกล่าช้า ในการศึกษาของ Allameh and Alizadeh (2013) ได้ศึกษาการลดความชื้นล่าช้า ต่อคุณภาพข้าวในข้าวสองสายพันธุ์ (สายพันธุ์ Hashemi และ Khazar) พบว่า สายพันธุ์ของข้าวและวันที่ลดความชื้นส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวอย่างมีนัยสำคัญ โดยในสายพันธุ์ Hashemi เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวลดลงเมื่อลดความชื้นล่าช้าขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับข้าว Khazar อย่างไรก็ตาม Allameh and Alizadeh (2013) ไม่ได้รายงานผลของการล่าช้าในการลดความชื้นต่อคุณภาพความหอมของข้าว

2.4.2 อุณหภูมิ (Temperature)

การเก็บรักษาข้าวเปลือกที่อุณหภูมิสูงอาจส่งผลต่อการเสื่อมเสียทางกายภาพ และเคมีได้ Juliano (1985) ได้ศึกษาการเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นระยะเวลานาน 1 ปี พบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 2 และ 20°C ส่งผลให้สีของข้าวสารมีการเปลี่ยนแปลงน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35°C ซึ่งข้าวสารมีสีเหลืองมาก สอดคล้องกับ Villareal et al. (1976) พบว่าข้าวเปลือกที่เก็บรักษา 6 เดือนที่อุณหภูมิ 29°C มีค่าความขาว (whiteness) ต่ำกว่าข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 2°C ในการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 10 และ 15°C และอุณหภูมิห้อง (28°C) ในถังเก็บ โดยไม่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็นเวลา 6 เดือน พัสกร เจียตระกูล (2546) รายงานว่าค่าสีเหลือง (ค่า b*) ของข้าวสารเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 28 °C มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ Chrastil (1990) ได้รายงานว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของข้าว โดยที่ข้าวมีค่าสีเหลือง (ค่า b*) เริ่มต้นเท่ากับ 2.1 แต่เมื่อเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นเวลา 10 เดือน ที่อุณหภูมิ 4 25 และ 37°C พบว่าข้าวสารมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเป็น 8.6 9.7 และ 11.3 ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิสูงสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลประเภท Maillard reaction ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโปรตีนกับน้ำตาลในเมล็ดข้าวสารและส่งผลทำให้ความขาวของข้าวลดลงกลายเป็นสีเหลือง (Primo et al., 1970)

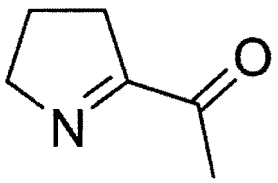
2.4.3 ระยะเวลาการเก็บรักษา (Storage time)

พัสกร เจียตระกูล (2546) รายงานว่าเมื่อระยะการเก็บรักษาข้าวเปลือกมากกว่า 5 เดือน คุณภาพของข้าวสาร โดยเฉพาะด้านกลิ่นมีการลดลงอย่างรวดเร็ว Mahatheeranont et al. (2001) รายงานว่า ระดับความหอมของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ลดลงประมาณร้อยละ 34 แม้ว่ามีการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 12 เดือน จากการศึกษาของ ประสูติ สิทธิสรวง, ไพฑูรย์ อุไรรงค์ และ กิติยา กิจควรดี (2526; 2528) พบว่า ร้อยละ 5 ของเมล็ดพันธุ์ข้าวที่เก็บรักษาไว้ในโรงเก็บทั่วไปเป็นระยะเวลานาน 8 เดือน มีความสูญเสียซึ่งเกิดขึ้นจากแมลงศัตรูเข้าทำลาย โดยปัญหาความเสียหายของข้าวในขั้นตอนการเก็บรักษาเป็นปัญหาที่สำคัญจำเป็นต้องมีการป้องกันแก้ไขที่เหมาะสมเพื่อลดการสูญเสียในขณะการเก็บรักษา ทั้งนี้ สุภัทร หนูสวัสดิ์พิมลและคณะ (2537) ได้ศึกษาการเก็บรักษาข้าวเปลือกในไซโลเหล็กนาน 7 เดือน พบว่า มีการเจริญของตัวอ่อนของแมลง

จำพวกด้วงข้าวเปลือกและผีเสื้อข้าวเปลือกเพิ่มจำนวนสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเมื่อเก็บรักษามากกว่า 5 เดือน

2.5 สารให้ความหอมในข้าว

ในข้าวหอมพบสารหอมระเหยได้มากกว่า 100 ชนิด ประกอบด้วยสารประเภทต่าง ๆ โดย Yajima et al. (1978) รายงานว่า สารระเหยในข้าวหุงสุกประกอบด้วยสารประเภทไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) จำนวน 13 ชนิด ประเภทอัลกอฮอล์ (alcohol) จำนวน 13 ชนิด ประเภทอัลดีไฮด์ (aldehydes) จำนวน 16 ชนิด ประเภทคีโตน (ketone) จำนวน 14 ชนิด ประเภทกรด (acid) 14 ชนิด ประเภทฟีนอล (phenol) 5 ชนิด ประเภทไพริดีน (pyridine) จำนวน 3 ชนิด ประเภทไพราซีน (pyrazine) จำนวน 6 ชนิด และสารอื่น ๆ อีก 8 ชนิด สำหรับในข้าวหอมพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 Mahatheeranont et al. (2001) พบว่า สารระเหยที่พบมีมากกว่า 140 ชนิด สามารถจำแนกและระบุชนิดสารได้เพียง 70 ชนิด โดยสาร 2AP เป็นสารสำคัญที่มีบทบาทในการให้กลิ่นของข้าวหอม สาร 2AP มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี เป็นสารประกอบในกลุ่ม pyrrole ที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน 5 เหลี่ยมโดยมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (ภาพที่ 2.1) จึงแสดงสมบัติเป็นสภาพที่ไม่มีขั้ว (non polar) เป็นเบสเล็กน้อย ระเหยง่ายที่อุณหภูมิปกติและไม่เสถียรเมื่ออยู่ในรูปสารบริสุทธิ์ เมื่อเก็บไว้นานจะเปลี่ยนเป็นสีแดงหรือน้ำตาลเข้ม ดังนั้นจึงต้องเก็บรักษาในรูปของสารละลายเจือจางหรือในรูปของเกลือ สาร 2AP มีสูตรโมเลกุล คือ C_6H_9NO มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 111.14 g/mol โดยชาวตะวันตกบอกว่าสาร 2AP มีกลิ่นคล้ายกลิ่นข้าวโพดคั่ว ในขณะที่ชาวเอเชียบอกว่ามีกลิ่นคล้ายใบเตย (Buttery et al., 1983)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของสาร 2-acetyl-1-pyrroline (2AP)
ที่มา: Bradbury et al. (2008)

ข้อมูลกลิ่นหอมจากรายงานของ Buttery et al. (1986) พบว่า ปริมาณสาร 2AP ในข้าวหอมกล้อง และข้าวหอมขัดขาวเท่ากับ 0.1-0.2 ppm และ 0.04-0.09 ppm ตามลำดับ ส่วนในข้าวไม่หอมขัดขาวจะมีปริมาณสารดังกล่าวเพียง 0.006-0.008 ppm นอกจากพบสาร 2AP ในข้าวหอมมะลิแล้ว ยังสามารถพบสารดังกล่าวในพืชตระกูลใบเตย มะพร้าว ดอกชมมะนาด และในผลจาปาดะ (Wongpornchai et al., 2003) สาร 2AP จะมีปริมาณสูงขึ้นเมื่ออยู่สภาวะเครียด โดยสารนี้จะถูกเก็บสะสมในเกือบทุกส่วนของข้าว ยกเว้นบริเวณราก จากการศึกษาของ Yoshihashi et al. (2002) โดยนำยอดข้าวและแคลลัสมาแช่ในสารละลายที่มีกรดอะมิโนต่าง ๆ แล้วสกัดสาร 2AP ออกมา เพื่อศึกษาสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารหอมในข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า กรดอะมิโน proline ทำให้ชิ้นส่วนเหล่านั้นมีการสร้างสาร 2AP ได้มากที่สุด นอกจากนี้ยังมีการใช้สาร stable isotope ติดฉลาก

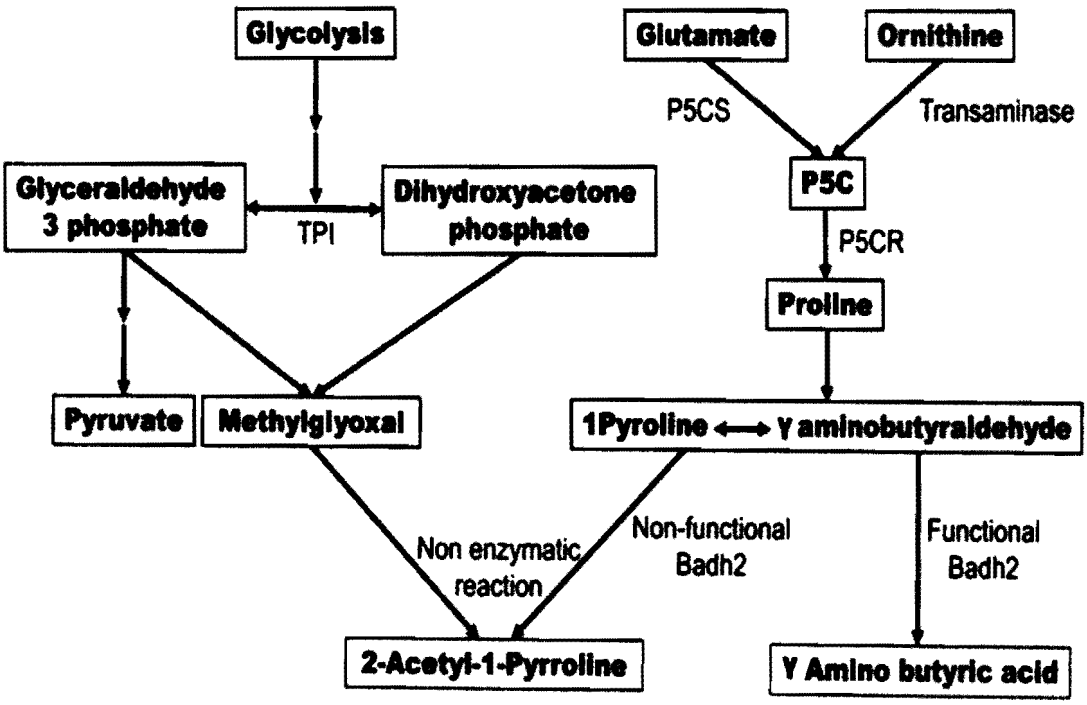
เพื่อดูชนิดของ proline ซึ่งพบว่า 15N-L-proline มี peak ตรงกับสาร 2AP ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า L-proline เป็นสารตั้งต้นของไนโตรเจนอะตอมในวงแหวนของ 1-pyrroline ซึ่งสอดคล้องกับปัจจัยสภาพแวดล้อมที่ส่งเสริมให้พืชสร้าง proline สูงขึ้นเมื่อพืชอยู่ในสภาวะเครียด เช่น การขาดน้ำ ความเค็ม และความเย็น

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพความหอม

ข้าวหอมมะลิที่ปลูกในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทยจะมีความหอมที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อความหอม ซึ่งแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ (บริบูรณ์ สัมฤทธิ์และคณะ, 2540) ทั้งนี้สาร 2AP จะถูกสร้างขึ้นในขณะที่พืชมีสภาวะเครียดและเป็นสารที่ระเหยได้ง่าย โดยแปรปรวนไปตามสภาพแวดล้อม พันธุกรรม และการจัดการ (การเก็บรักษา การขัดสี ขัดขาว วิธีการแปรรูป และการหุงต้ม) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณความหอมของข้าวสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

2.6.1 ปัจจัยด้านพันธุกรรม

ความหอมของข้าวเป็นลักษณะที่สามารถถ่ายทอดทางพันธุกรรม สาร 2AP ถูกสังเคราะห์ผ่านวิถี polyamine (Arikit et al., 2007) ดังที่กล่าวข้างต้นว่าสาร 2AP มีกรดอะมิโน proline เป็นสารตั้งต้น และถูกควบคุมด้วยยีนด้อย *badh2* (ภาพที่ 2.2) ซึ่งมีตำแหน่งอยู่บนโครโมโซมคู่ที่ 8 ในสภาวะปกติ ยีน *badh2* เปลี่ยน gamma-aminobutyraldehyde (GABald) เป็น gamma-aminobutyric acid (GABA) แต่ถ้ายีนดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลง ข้าวจะเปลี่ยนสาร GABald เป็นสาร 2AP แทนจึงทำข้าวมีกลิ่นหอม (Bradbury et al., 2005)



ภาพที่ 2.2 การสังเคราะห์สาร 2AP (2AP biosynthesis pathway)
ที่มา: Wakte et al. (2016)

2.6.2 ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม

2.6.2.1 การจัดการก่อนการเก็บเกี่ยว

ปัจจัยต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการปลูก เช่น วิธีปลูก การจัดการปุ๋ยภายในแปลงปลูก สภาพแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของข้าว ทั้งทางกายภาพและเคมี รวมทั้งคุณภาพด้านความหอมของข้าว ซึ่งยังไม่มีการยืนยันถึงสาเหตุที่ชัดเจนว่าปัจจัยใดเป็นตัวกำหนดคุณภาพความหอม ในการจัดการแปลงปลูก จักรพงษ์ สมหนองหว้า (2551) พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในเขตทุ่งกุลาร้องไห้ โดยวิธีการปลูกแบบหว่านมีปริมาณสารหอมสูงกว่าการปลูกแบบปักดำ และการใช้สารโพแทสเซียมไอโอไดด์ในการชักนำให้ข้าวเกิดความเครียดไม่มีผลต่อปริมาณสารหอม แต่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงขึ้นกว่าไม่ใช่สารโพแทสเซียมไอโอไดด์ แต่การศึกษาของ Goufo et al. (2010) พบว่า ข้าวหอมสองสายพันธุ์ของประเทศจีน เมื่อปลูกในสภาพความหนาแน่นสูงจะมีปริมาณสาร 2AP ลดลง ในขณะที่การเก็บเกี่ยวข้าวที่ 10 วันหลังดอกข้าวบานมีปริมาณสารหอมสูงที่สุด แต่ได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวต่ำ ในขณะที่การศึกษาของ รณชัย ช่างศรีและคณะ (2559) ในการจัดการน้ำในแปลงปลูกพบว่า การขาดน้ำหลังข้าวออกดอก 7 วัน ส่งผลให้ปริมาณสาร 2AP ในเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 และกข 15 สูงสุด และสภาพดินร่วนปนทรายทำให้สภาพการขาดน้ำเกิดขึ้นเร็วกว่าดินเหนียว และมีปริมาณสาร 2AP ที่พบสูงกว่า อย่างไรก็ตามในการศึกษาของข้าวพันธุ์ M-202 ของ Champagne et al. (2005) พบว่า ระยะเวลาการระบายน้ำออกจากแปลงปลูกและระยะเวลาการเก็บเกี่ยวไม่มีผลต่อกลิ่นและรสชาติ

จากการศึกษาของ ศักดิ์ดา จงแก้ววัฒนาและคณะ (2547) พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในเขตพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ จังหวัดสุรินทร์ ผลของการจัดการสภาวะเครียดในช่วงการเจริญเติบโตทางต้นและใบ เช่น สภาวะขาดแคลนน้ำ และ/หรือดินเค็ม ส่งผลให้เกิดการสร้างสาร proline แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสาร 2AP ในเมล็ดข้าว และการสร้างสภาวะเครียดที่มากเกินไป ยังส่งผลให้เปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบสูงขึ้นอีกด้วย สภาวะความเค็มยังส่งผลต่อปริมาณ 2AP ในข้าวหอมชนิดจาโปนิกา (Japonica) 3 สายพันธุ์ของประเทศฝรั่งเศส ซึ่ง Gay et al. (2010) พบว่า สาร 2AP เพิ่มสูงขึ้นในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ที่ปลูกในสภาพดินเค็มมาก แต่ผลผลิตลดลงถึงร้อยละ 40 ในสายพันธุ์ที่ไม่ทนต่อความเค็ม ในขณะที่ผลผลิตไม่เปลี่ยนแปลงในกลุ่มสายพันธุ์ที่ทนเค็ม

นอกจากนี้การจัดการปุ๋ยเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อระดับความหอมของข้าว จากการศึกษาของ Yoshihashi et al. (2004) พบว่า การไม่ให้ปุ๋ยไนโตรเจนจะส่งผลให้ระดับความหอมมีค่าลดลง เช่นเดียวกับการศึกษาของ Yang et al. (2012) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับปริมาณของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินที่ปลูกข้าวหอมในประเทศจีน พบว่า ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินที่มีค่าสูงส่งผลต่อปริมาณ L-proline ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสร้างสาร 2AP สูงขึ้นด้วย การศึกษาของรณชัย ช่างศรีและคณะ (2559) พบว่า การทดลองปลูกข้าวในดินชุดต่าง ๆ ซึ่งมีธาตุอาหารแตกต่างกัน ทำให้เมล็ดข้าวมีปริมาณสาร 2AP แตกต่างกัน และพบว่าการเพิ่มธาตุอาหารแมงกานีส ซัลเฟอร์ แมกนีเซียม และแคลเซียม มีผลทำให้เมล็ดข้าวมีปริมาณสาร 2AP เพิ่มขึ้น นอกเหนือจากปัจจัยการผลิตแล้ว อัญชลี ประเสริฐศักดิ์ และคณะ (2559) รายงานว่ากระบวนการปลูกข้าว เช่น การทำการเกษตรอินทรีย์ เคมีแปลงใหญ่ หรือเคมีทั่วไปมีผลต่อปริมาณสาร 2AP ในข้าวหอมมะลิ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณสาร 2AP (หน่วย ppm) ในข้าวหอมมะลิที่ปลูกด้วยการทำการเกษตรแบบต่าง ๆ

การเกษตร	เชียงราย	เชียงใหม่	ยโสธร	ร้อยเอ็ด	สุรินทร์
เคมีทั่วไป	2.30	2.38	1.65	1.74	1.55
เคมีแปลงใหญ่	2.63	2.43	1.68	1.82	1.66
อินทรีย์ทั่วไป	4.90	5.10	1.72	1.95	1.72
อินทรีย์ส่งออก	2.39	N/A	1.45	2.07	N/A

หมายเหตุ: N/A คือ ไม่ได้รายงาน
ที่มา: อัญชลี ประเสริฐศักดิ์ และคณะ (2559)

2.6.2.2 การจัดการหลังการเก็บเกี่ยว

กระบวนการเก็บเกี่ยวข้าวและหลังการเก็บเกี่ยว มีผลต่อความแปรปรวนของกลิ่นหอมในข้าวในปริมาณที่แตกต่างกันไป Champagne et al. (2005) พบว่า การเก็บเกี่ยวข้าวจากแปลงในขณะที่มีความชื้นมากกว่าร้อยละ 24 ส่งผลต่อกลิ่นของข้าว โดยทำให้ปริมาณ 3-methyl-butanol, 2-methyl-butanol, acetic acid และ ethyl hexadecanoate เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่กระบวนการลดความชื้นของข้าวก็มีผลต่อความหอมด้วย Wongpornchai et al. (2004) พบว่าการลดความชื้นด้วยวิธีการอบที่อุณหภูมิ 30-40°C ช่วยรักษาปริมาณสารหอมไว้ได้ดีกว่าการอบที่อุณหภูมิสูง รวมทั้งได้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงด้วย ในขณะที่การศึกษาของ Park et al. (2001) พบว่าการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยอุณหภูมิสูง (54°C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 21.9) ไม่มีผลต่อความหอมของข้าวเมื่อเปรียบเทียบกับการลดความชื้นด้วยอุณหภูมิต่ำ (33°C และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 67.8) และการศึกษาของรณชัย ช่างศรีและคณะ (2559) ในการเก็บเกี่ยวข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า การเก็บเกี่ยวที่ 35 วันหลังออกดอก และลดความชื้นโดยการตากแดดให้ปริมาณสาร 2AP สูงสุด ปัจจุบันยังไม่พบรายงานที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของข้าวเปลือกก่อนการทำแห้งและปริมาณสาร 2AP ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญของการวิจัยนี้

ในการเก็บรักษาข้าวสารในสภาพบรรยากาศปกติ อาจส่งผลให้กลิ่นหอมของข้าวสารลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ความชื้นในบรรยากาศทำให้ข้าวเกิดกลิ่นเหม็นหืนขึ้น การเก็บรักษาข้าวหอมจึงควรเก็บในสภาพที่มีความชื้นและอุณหภูมิต่ำ จากข้อมูลในเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องพบว่า การเก็บข้าวหอมในสภาพข้าวเปลือกและข้าวสารในห้องเย็น 15°C ช่วยรักษาคุณภาพข้าวได้นาน 10 เดือน การเก็บข้าวสารในสภาพเปิดหรือในถุงพลาสติกที่อากาศผ่านได้ ไม่ควรเก็บนานเกิน 4 เดือน เพราะอาจทำให้เกิดกลิ่นเหม็นสาบและส่งผลให้ระดับความหอมของข้าวลดลง (งามชื่น คงเสรี, 2547) ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ Widjaja et al. (1996) ซึ่งรายงานว่า ปริมาณสารหอมในข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาวที่เก็บรักษานาน 3 เดือน ภายใต้สภาพอากาศปกติและสภาพกึ่งสุญญากาศมีปริมาณลดลงร้อยละ 40-50 การวิจัยของ Kongkiattikajorn (2008) ดำเนินการศึกษาการเก็บรักษาข้าวกล้องและข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในถุงพลาสติก polypropylene (PP) พบว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C ทำให้ปริมาณสาร 2AP ลดลงน้อยกว่า

การเก็บที่อุณหภูมิ 37°C ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Tulyathan and Leeharatanaluk (2007) ที่ได้ดำเนินการเก็บรักษาข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 ในถุงพลาสติก PP และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30-35°C พบว่า สาร 2AP ได้ลดอย่างรวดเร็วใน 2 เดือนแรกของการเก็บรักษา และลดลงเหลือเพียงร้อยละ 7 ในเดือนที่ 8 ของการเก็บรักษา นอกจากนี้การเลือกบรรจุภัณฑ์ที่ดีมีส่วนช่วยรักษาสารหอมในข้าวไว้ได้นานยิ่งขึ้น ในการศึกษาบรรจุภัณฑ์ชนิด oriented polypropylene/Aluminium/linear low-density polyethylene (OPP/Al/LLDPE) สำหรับการบรรจุภัณฑ์ข้าวสาร Tananuwong and Lertsiri (2010) รายงานว่า บรรจุภัณฑ์พลาสติกดังกล่าวช่วยป้องกันการเกิดกลิ่นหืนเนื่องจากการสะสมของสาร hexanal และช่วยรักษาปริมาณสาร 2AP ได้เมื่อเก็บรักษานาน 12 เดือน เนื่องจากถุงดังกล่าวมีความหนาและมีสมบัติต้านการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำได้ดี (หรือมีสมบัติเป็น high moisture and gas barriers) ในขณะที่ถุงพลาสติก Nylon/LLDPE ซึ่งเป็นถุงที่นิยมใช้กับการบรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ ให้ผลของการชะลอการเสื่อมเสียคุณภาพได้น้อยกว่าถุงพลาสติก OPP/Al/LLDPE เนื่องจากมีสมบัติดังกล่าวต่ำกว่า

2.7 จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงของสาร 2AP ในระหว่างการเก็บรักษา

จากที่ได้นำเสนอข้อมูลข้างต้น ทำให้ทราบได้ว่าสาร 2AP ของข้าวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องภายหลังจากการเก็บเกี่ยว ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในจลนพลศาสตร์ (kinetics) ของการเปลี่ยนแปลงของสาร 2AP ทั้งนี้จลนพลศาสตร์เป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารหรือประเด็นที่สนใจช่วงเวลาต่าง ๆ ความรู้ที่ได้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ทำให้นักวิจัยสามารถเข้าใจถึงอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงและอาจนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนการจัดการในระหว่างการเก็บรักษาเพื่อชะลอการเปลี่ยนแปลงและรักษาคุณภาพ ปัจจุบันยังไม่พบรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเด็นดังกล่าวนี้

ในทางทฤษฎีอัตราการเปลี่ยนแปลงหรือการเกิดปฏิกิริยา (นั่นคือ ความเร็วของการเปลี่ยนแปลงต่อเวลา) มีความสัมพันธ์กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ และปริมาณสารตั้งต้นของปฏิกิริยา ในทางทฤษฎีเมื่ออุณหภูมิคงที่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือสารสำคัญในผลิตภัณฑ์สามารถแสดงได้ในรูปแบบของสมการดิฟเฟอเรนเชียล (differential equation) ดังแสดงในสมการ 2.1

$$\frac{dC_{2AP}}{dt} = -k\left(C_{2AP} - C_{2AP,\infty}\right)^n \qquad (2.1)$$

โดยที่

C_{2AP} = ปริมาณหรือความเข้มข้นของสาร 2AP (ppm)

$C_{2AP,\infty}$ = ปริมาณหรือความเข้มข้นของสาร 2AP ณ เวลา infinity (ppm)

t = เวลา (s)

k_{2AP} = ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาหรือการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร *2AP* (หน่วยขึ้นกับความเข้มข้นและอันดับของปฏิกิริยา)

n = อันดับของปฏิกิริยา (เช่น n = 0, 1)

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารส่วนใหญ่ในระหว่างการเก็บรักษานั้นมีค่า n ของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 0 และ 1 (Robertson, 2013) ในขณะที่ปฏิกิริยาอันดับ 2 ได้มีรายงานกับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพอาหาร แต่ไม่พบอย่างกว้างขวางเท่ากับปฏิกิริยาอันดับ 0 และ 1 ทั้งนี้รูปแบบของสมการซึ่งเป็นผลเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) จากการอินทิเกรต (integration) ด้วยค่าตั้งต้น (initial value) ที่เหมาะสมของปฏิกิริยาอันดับ 0 และ 1 แสดงใน สมการ 2.2 และ สมการ 2.3 ตามลำดับ

$$C_{2AP} = C_{2AP,0} - k_{2AP,Z}t \tag{2.2}$$

$$\frac{C_{2AP} - C_{2AP,\infty}}{C_{2AP,0} - C_{2AP,\infty}} = \exp\left(-k_{2AP,F}t\right) \tag{2.3}$$

โดยที่

$C_{2AP,0}$ = ปริมาณหรือความเข้มข้นของสาร 2AP เริ่มต้น (t =0) (ppm)

$k_{2AP,Z}$ = ค่าคงที่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ซึ่งเป็นปฏิกิริยาอันดับ 0 ที่ประมาณจาก สมการ 2.2 (ppm·time^{-1})

$k_{2AP,F}$ = ค่าคงที่ของอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ซึ่งเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 ที่ประมาณจาก สมการ 2.3 (time^{-1}) ทั้งนี้ time ในหน่วยของค่าคงที่นั้นในการศึกษานี้ คือ week และ month สำหรับการศึกษาการเก็บรักษา 3 เดือน และ 12 เดือน ตามลำดับ

ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอาหาร อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงสามารถแสดงได้ตามความสัมพันธ์ Arrhenius (Arrhenius relationship) (สมการ 2.4) จากแบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถอธิบายได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเพิ่มขึ้นแบบ exponential เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมาก ทั้งนี้ E_a เป็นตัวชี้วัดความไวของการเกิดปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ตารางที่ 2.3 ได้นำเสนอค่า E_a ของปฏิกิริยาสำคัญในกระบวนแปรรูปและเก็บรักษาอาหาร ปัจจุบันยังไม่มีการรายงานค่า E_a ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังนั้น งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและวิจัย ผลของค่า E_a ที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปใช้ร่วมกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ สมการ 2.4 เพื่อทำนายค่าคงที่หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาร 2AP ในที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของการจำลองสถานการณ์ (simulations) เพื่อการวิเคราะห์และวางแผนในสถานการณ์ของการเก็บรักษาข้าวเปลือกต่าง ๆ (what-if scenario analysis)

$$k_{2AP} = k_{2AP,ref}\exp\left(-\frac{Ea}{R}\left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{\theta_{ref}}\right)\right) \tag{2.4}$$

สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

โดยที่

$k_{2AP,ref}$ = ค่าคงที่ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ณ อุณหภูมิอ้างอิง θ_{ref} (หน่วยขึ้นกับความเข้มข้นและอันดับของปฏิกิริยา)

Ea = พลังงานกระตุ้น (energy of activation) ของปฏิกิริยา (J mol^{-1})

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant มีค่าเท่ากับ 8.314 J mol^{-1} K^{-1})

θ = อุณหภูมิที่ทำการศึกษา (K)

θ_{ref} = อุณหภูมิอ้างอิง (K)

ตารางที่ 2.3 พลังงานกระตุ้น (E_a) ต่อปฏิกิริยาที่สำคัญของการเสื่อมเสียในอาหาร

Reactions	Energy of activation (E_a; kJ $mole^{-1}$)
Diffusion-controlled reaction	0-34
Lipid oxidation	42-105
Flavor degradation in dry vegetables	42-105
Enzymic reaction	42-126
Vitamin degradation	84-126
Color degradation in dry vegetable	67-147
Nonenzymic browning	105-210

ที่มา: Robertson (2013)

2.8 สรุปประเด็นที่สำคัญ

การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกและข้าวสารมีความสำคัญต่อคุณภาพของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา ทั้งนี้การเสื่อมเสียสามารถเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ความชื้นในบรรยากาศและชนิดของบรรจุภัณฑ์ ความหอมของข้าวซึ่งเป็นดัชนีคุณภาพที่สำคัญเกิดจากสารเคมีหลายชนิดในโครงสร้างโมเลกุลของข้าว โดยมีสาร 2AP เป็นสารสำคัญที่ให้ความหอม สภาวะการเก็บรักษามีผลต่อปริมาณของสาร 2AP แต่จากการตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้องพบว่ายังไม่พบรายงานผลของการชะลอการทำแห้งก่อนการเก็บรักษาต่อคุณภาพของข้าวเปลือก ซึ่งเป็นประเด็นที่จะทำการศึกษาต่อในการวิจัยนี้ ในบทต่อไปได้กล่าวถึงระเบียบวิธีวิจัย (ทั้งวัตถุดิบและวิธีการ) ที่ใช้ในการศึกษา

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบ

ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในฤดูนาปี พ.ศ. 2559 จากจังหวัดอุบลราชธานี ข้าวเปลือกที่ใช้ในการศึกษานี้ทำการเก็บเกี่ยวในวันและแปลงนาเดียวกัน จากนั้นนำข้าวที่ได้จากการเก็บเกี่ยวบรรจุใส่ในถุงพลาสติกสานเพื่อรอการขนถ่ายไปยังโรงเรือนที่ทำแห้งและการเก็บรักษาต่อไป (ภาพที่ 3.1)

(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 3.1 การเก็บเกี่ยวข้าวในแปลงนาโดยใช้รถเกี่ยว (ก) การบรรจุข้าวที่เก็บเกี่ยวเสร็จลงกระสอบสาน (ข) การจัดวางกระสอบข้าวเพื่อรอการขนถ่ายไปยังโรงเรือน (ค)

3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างข้าว

ขั้นตอนของการเตรียมตัวอย่างข้าวสามารถสรุปได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 แบ่งข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวออกเป็น 2 ส่วนที่เท่ากัน นำส่วนที่ 1 มาลดความชื้นทันที โดยวิธีการตากแดด จนเหลือความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 14 (ฐานเปียก) ก่อนที่จะนำมาเก็บในถุงพลาสติกสาน (50x75 เซนติเมตร) จำนวน 12 ถุง ๆ ละ 20 กิโลกรัม ขั้นตอนนี้เป็นการจำลองสภาวะการทำแห้งทันทีภายหลังจากการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือก สิ่งทดลองนี้มีตัวย่อ คือ IMM

ขั้นตอนที่ 2 นำข้าวเปลือกส่วนที่ 2 มาเก็บในถุงพาสติกสาน (50x75 เซนติเมตร) ภายในร่ม เป็นเวลา 2 วัน ก่อนนำมาลดความชื้นด้วยวิธีการตากแดด จนเหลือกความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 14 (ฐานเปียก) และจากนั้นเก็บในถุงพลาสติกสาน (50x75 เซนติเมตร) จำนวน 12 ถุง ๆ ละ 20 กิโลกรัม ขั้นตอนนี้เป็นการจำลองสภาวะการชะลอการอบแห้งซึ่งอาจเกิดจากฝนตกในระหว่างการเก็บเกี่ยวหรือพาหนะที่ใช้ในการขนข้าวไปทำแห้งที่โรงอบมีไม่เพียงพอ สิ่งทดลองนี้มีตัวย่อ คือ DEL

ภายหลังจากการเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือกตามขั้นตอนที่ได้แสดงข้างต้นแล้ว ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างข้าวมาเก็บรักษาในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 10 และ 25°C และอุณหภูมิห้อง (27°C โดยเฉลี่ย) โดยมี

ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเก็บรักษาที่ร้อยละ 55.93 70.86 และ 61.04 ตามลำดับ (ภาพที่ 3.2) เพื่อดำเนินการวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP และคุณภาพด้านต่าง ๆ ต่อไป

ภาพที่ 3.2 ลักษณะการเก็บข้าวเปลือกบรรจุในถุงกระสอบสานโดยวางบนแท่นวางสินค้าภายในสภาวะอุณหภูมิต่าง ๆ

3.3 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร 2AP ในระหว่างการเก็บรักษา

การศึกษาส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร 2AP ของข้าวหอมมะลิในระหว่างการเก็บรักษา โดยได้แบ่งออกเป็น 2 การทดลองย่อย ตามระยะเวลาของการเก็บรักษา กล่าวคือ (1) จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงในช่วง 12 สัปดาห์แรก (3 เดือน) ของการเก็บรักษา โดยได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร 2AP ทุก ๆ สัปดาห์ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานว่าในช่วงระยะเวลาดังกล่าวการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร 2AP อาจเกิดขึ้นได้ในอัตราที่เร็วเนื่องจากข้าวยังคงมีปริมาณสาร 2AP ในปริมาณที่สูงกว่า (เมื่อทำการเก็บรักษาเป็นระยะเวลานาน) (2) จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงในช่วง 12 เดือน (หรือ 1 ปี) ซึ่งเป็นระยะเวลาการเก็บรักษาทั่วไปของข้าวเปลือกและข้าวสารขัดขาว โดยได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสาร 2AP ทุก ๆ เดือน

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์นี้ ผู้วิจัยได้นำแบบจำลองคณิตศาสตร์ สมการ 2.2 และสมการ 2.3 เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ดังที่ได้รายงานข้างต้นว่าปัจจุบันยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ของข้าวเปลือกและข้าวสารในระหว่างการเก็บรักษา ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ทั้งสองมาทำการทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ด้วยการใช้วิธี linear และ non-linear regression สำหรับแบบจำลองคณิตศาสตร์ สมการ 2.2 และสมการ 2.3 ตามลำดับ โดยการทำ regression นั้นได้ดำเนินการในโปรแกรม Microsoft Excel version 2010 ความเหมาะสม/แม่นยำของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงได้

พิจารณาจากความสมรูป (goodness of fit) ของข้อมูลที่ได้จากการทำนาย (predicted data) และข้อมูลจากการทดลอง (experimental data) ทั้งจากลักษณะปรากฏ (visual) และใช้ค่าทางสถิติประกอบด้วย (1) ค่า root mean square error (RMSE) (สมการ 3.1) ตามวิธีที่ได้รายงานใน Yang and Chinnan (1988) ค่า RMSE เป็นดัชนีเพื่อบอกความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง หากค่า RMSE มีค่าต่ำกว่า 2 แสดงให้ทราบว่าค่าที่ได้จากการประมาณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความน่าเชื่อถือ และ (2) ค่า R^2 เป็นค่าที่แสดงให้ทราบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้นำมาใช้นั้นสามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูล ค่า R^2 มีค่าระหว่างร้อยละ 0-100 หากมีค่าเข้าใกล้ร้อยละ 100 แสดงว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์นั้นสามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้เป็นอย่างดี หรือเป็นตัวแทนที่ดีของข้อมูลที่ศึกษาได้ ทั้งนี้ค่า R^2 คำนวณจากสูตรและฟังก์ชั่นใน Microsoft Excel version 2010

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[(exp.)-(pred.)]^2} \qquad (3.1)$$

โดยที่

$RMSE$	=	root mean square error
n	=	จำนวนข้อมูล
$exp.$	=	ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
$pred.$	=	ข้อมูลที่ได้จากการทำนายโดยสมการ 2.3

ภายหลังจากการทำ regression แล้วในแต่ละแบบจำลองคณิตศาสตร์จะได้ค่าคงที่ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ฯ และอุณหภูมิด้วยการทำนายโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ Arrhenius (สมการ 2.4) ความเหมาะสมและแม่นยำของการทำนายโดยใช้แบบจำลองได้ใช้แนวทางเดียวกันกับรายเอียดที่แสดงในการศึกษา regression ของแบบจำลองคณิตศาสตร์ สมการ 2.2 และ สมการ 2.3

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP

การวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP ของข้าวเปลือกเก็บรักษาไว้ในสิ่งทดลองต่าง ๆ ดำเนินการด้วยวิธี headspace gas chromatography (HS-GC) โดยการประยุกต์วิธีของ Sriseadka et al. (2006) ในการวิเคราะห์ได้สุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกมาทำการวิเคราะห์โดยใช้หลาวสแตนเลส (ภาพที่ 3.3 ก) ข้าวที่สุ่มมานั้นได้นำกะเทาะเปลือกและขัดขาว (ภาพที่ 3.3 ข) แล้วมาบดด้วยเครื่องบดตัวอย่าง (CyclotecTM 1093, Foss, Sweden) จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 μm (ภาพที่ 3.3 ค)

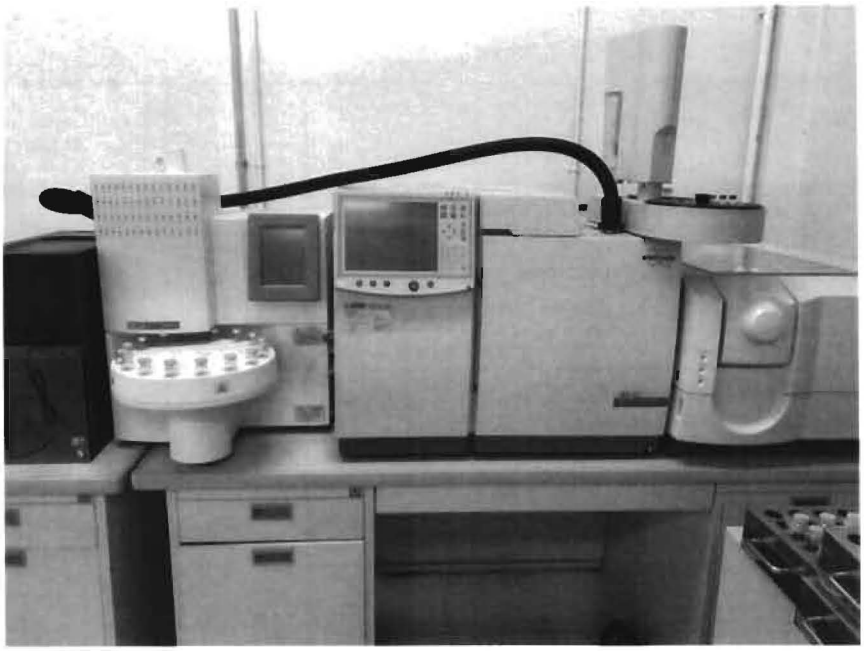
(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 3.3 การสุ่มตัวอย่างข้าวด้วยหลาวสแตนเลส (ก) เครื่องกะเทาะเปลือกข้าวและขัดขาว (ข) และเครื่องบดข้าว (ค)

ภายหลังจากการบดข้าว ทำการชั่งตัวอย่างข้าวให้ได้น้ำหนัก 1 g นำมาใส่ในขวดเฮดสเปช (headspace vial) ขนาด 20 มิลลิลิตร แล้วเติมสาร 2, 4-dimethylpyridine ความเข้มข้น 1000 ppm เป็น internal standard (โดยใช้ toluene เป็นตัวทำละลาย) ปิดฝาอะลูมิเนียม (aluminum cap) ทันที ด้วยการใช้เครื่องปิดฝาอะลูมิเนียม (aluminium cap sealing machine) การปิดฝาทันทีนั้นเพื่อป้องกันการระเหยของกลิ่นออกจากตัวอย่างข้าวภายในขวดเฮดสเปช จากนั้นนำตัวอย่างในเฮดสเปช ทั้งหมดใส่เข้าไปในเครื่องแก๊สโครมาโตแกรม (gas chromatogram หรือ GC) ยี่ห้อ Bruker's รุ่น 450-GC (Netherlands) และเครื่อง Headspace sampler ยี่ห้อPerkin Elmer รุ่น Terbomatrix 16 (Singapore) (ภาพที่ 3.4) โดยมีสภาวะของเครื่อง GC ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 คอลัมน์ (column) ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบแคปิลลารี (capillary column) ยี่ห้อ Agilent liquid phase HP-5 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ คือ 5% diphenyl และ 95% dimenthylpolysiloxane คอลัมน์มีความยาว เท่ากับ 30 m เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (internal diameter) เท่ากับ 0.53 mm และความหนาของ liquid phase เท่ากับ 1.50 μm ใช้ตัวตรวจวัด (detector) ของเครื่อง GC เป็นชนิด nitrogen phosphorous detector (NPD)



ภาพที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโตแกรม (gas chromatogram หรือ GC) ยี่ห้อ Bruker's รุ่น 450-GC (Netherlands) และเครื่อง Headspace sampler ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Terbomatrix 16 (Singapore)

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทำงานของเครื่อง GC ยี่ห้อ Bruker's รุ่น 450-GC สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP

องค์ประกอบ	สภาวะการทำงาน
แก๊สพา (carrier gas)	He
อัตราการไหลของแก๊สพา	7.0 ml min^{-1}
อุณหภูมิส่วนฉีดสาร (injector)	230 °C
อุณหภูมิตู้อบ (oven)	เริ่มต้น 50 °C จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นด้วยอัตรา 20 °C min^{-1} จนอุณหภูมิถึง 80 °C จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นด้วยอัตรา 15 °C min^{-1} จนอุณหภูมิถึง 160 °C แล้วทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นด้วยอัตรา 35 °C min^{-1} จนถึงอุณหภูมิ 230 °C คงที่อยู่ 0.19 นาที
อุณหภูมิตัวตรวจวัด (detector)	285 °C

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทำงานของเครื่อง Headspace autosampler ยี่ห้อ Perkin elmer รุ่น Terbomatrix 16 สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสาร 2AP

องค์ประกอบ	สภาวะการทำงาน
อุณหภูมิตู้อบ	120 °C
อุณหภูมิเข็ม	125 °C
อุณหภูมิ transfer line	130 °C
เวลาเข้าสู่สมดุลของขวดตัวอย่าง	10 นาที
เวลาในการเพิ่มความดัน	1 นาที
เวลาในการฉีดสาร	0.4 นาที

3.5 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวสารจากการเก็บรักษาข้าวเปลือก

นำตัวอย่างข้าวเปลือกและตัวอย่างข้าวสารจากทุกสิ่งทดลองมาวัดความชื้น โดยใช้เครื่อง SB 900 (Steinlite moisture meter, USA) สำหรับข้าวเปลือก (ภาพที่ 3.5 ก) และเครื่อง rice moisture tester (PM-410, Kett, Japan) สำหรับข้าวสาร (ภาพที่ 3.5 ข)

จากนั้นนำตัวอย่างข้าวเปลือกมากะเทาะเปลือกและขัดสีเป็นข้าวสาร นำตัวอย่างข้าวสารของทุกสิ่งทดลองมาวัดความขาว (whiteness) ความใส (transparency) และเปอร์เซ็นต์การขัดสี (degree of milling) โดยเครื่องวัดความขาวของข้าว รุ่น MM1D Rice Milling Meter, Satake, Japan (ภาพที่ 3.6 ก)

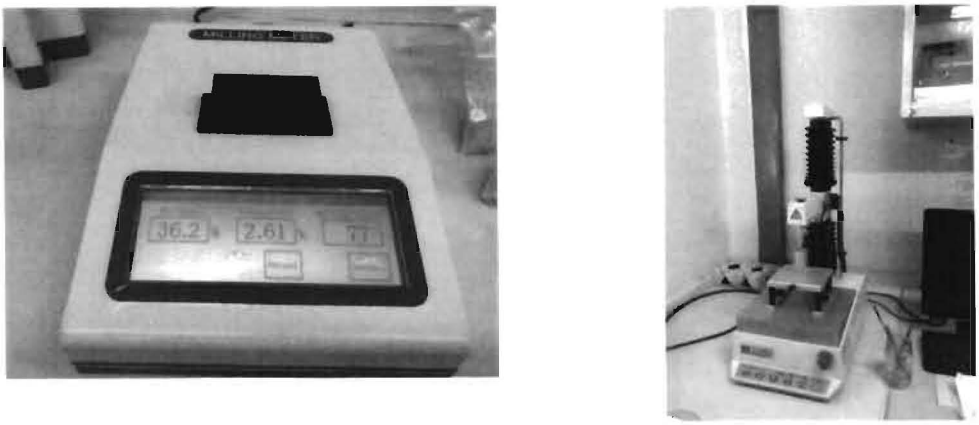
(ก)

(ข)

ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดความชื้น SB 900 (Steinlite moisture meter, USA) (ก) และ เครื่อง rice moisture tester (PM-410, Kett, Japan) (ข) ณ ศูนย์วิจัยข้าวจังหวัดอุบลราชธานี

ข้าวสารส่วนหนึ่งได้นำมาทำการทดสอบความแข็งและความเหนียวหนืด (ทำการศึกษาที่ศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์) นำตัวอย่างข้าวสาร จำนวน 50g นำมาหุงโดยวิธีนึ่ง ในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ (1 : 1.5) ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 20 นาที นำข้าวที่หุงแล้วมา

ทดสอบโดยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (TA.XT plus Texture Analyzer, Stable Micro Systems Texture analyzer, England) (ภาพที่ 3.6 ข) โดยนำตัวอย่างข้าวที่หุงสุกมาเรียงกัน จำนวน 7 เมล็ด โดยใช้หัวกดชนิด cylinder probe ที่ความเร็วหัวกด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที และ contact force 5 g



(ก) (ข)

ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดความขาวข้าว (MM1D Rice Milling Meter, Satake, Japan (ก) และ เครื่องวัด เนื้อสัมผัส (TA.XT plus Texture Analyzer, Stable Micro Systems Texture analyzer, England) (ข)

3.6 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์สถิติ

การศึกษาผลของการลดความชื้นของข้าวเปลือกต่อปริมาณสาร 2AP และคุณภาพของข้าวสาร วางแผนการทดลองแบบ split-split plot (ปัจจัย คือ สภาวะการทำแห้งข้าวเปลือก อุณหภูมิการเก็บรักษา และระยะเวลาการเก็บรักษา) จำนวน 4 ซ้ำ (replicates) ผลการศึกษานำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลองโดยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ณ $p<0.05$ โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ SAS ทั้งนี้การศึกษาวิจัยได้ดำเนินการที่ศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ และห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ในระหว่างปี พ.ศ. 2559-2561

3.7 สรุปประเด็นที่สำคัญ

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอระเบียบวิจัยสำหรับการศึกษาและวิจัยผลของการชะลอการลดความชื้นของข้าวเปลือกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP และคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยวของข้าวสารจากการเก็บข้าวเปลือกในแบบต่าง ๆ ในบทต่อไปนำเสนอผลการศึกษาและการอภิปรายของผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา

บทที่ 4
ผลของการชะลอการลดความชื้นของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ของข้าวเปลือกในระหว่างการเก็บรักษา

การศึกษาในบทนี้นำเสนอผลและการอภิปรายในประเด็นผลของการลดความชื้นของข้าวเปลือกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ซึ่งเป็นสารสำคัญที่ให้กลิ่นหอมหลักในข้าวหอมมะลิ การนำเสนอแยกเป็นสองส่วน ประกอบด้วย (1) การเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ (2) การเก็บรักษาในระยะเวลา 12 เดือน ทั้งนี้การศึกษาส่วนนี้เป็นการศึกษาจลนพลศาสตร์ด้วยการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ (ดังแสดงในบทที่ 2) รายละเอียดของผลและการอภิปรายได้นำเสนอดังต่อไปนี้

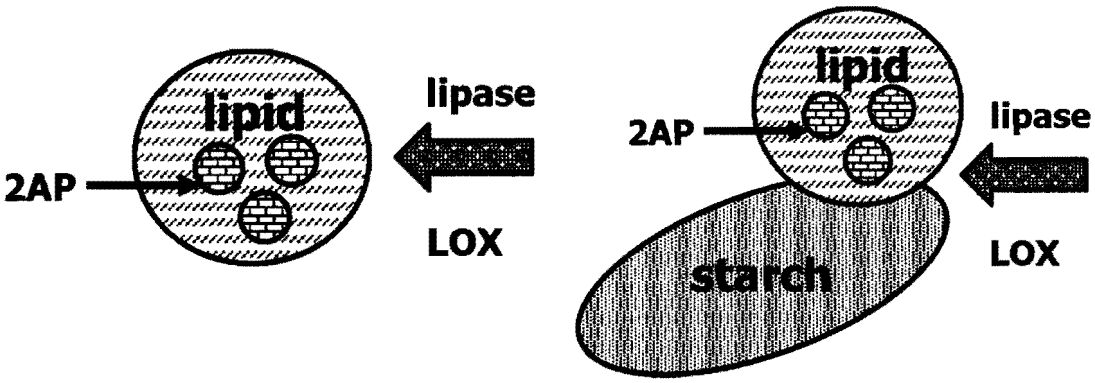
4.1 ผลของการชะลอการลดความชื้นของข้าวเปลือกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในช่วงเวลา 3 เดือน[1]

ปริมาณสาร 2AP เริ่มต้นของข้าวเปลือก IMM-paddy rice มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.31 ppm ในขณะที่ปริมาณสาร 2AP เริ่มต้นของข้าวเปลือก DEL-paddy rice มีค่าต่ำกว่าประมาณ 0.78 เท่า (หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.59 ppm) (ตารางที่ 4.1) ปริมาณสาร 2AP เริ่มต้นของข้าวเปลือก DEL-paddy rice ที่ต่ำกว่าของข้าวเปลือก IMM-paddy rice แสดงให้ว่าในเห็นระหว่าง 48 ชั่วโมงที่ข้าวเปลือกซึ่งอยู่ในระหว่างการรอเพื่อลดความชื้นภายหลังการเก็บเกี่ยว (ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 25 ฐานเปียก) มีปริมาณสาร 2AP ลดลงค่อนข้างชัดเจน โดยงามชื่น คงเสรี (2546) รายงานว่าข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงจะเกิดการเสื่อมคุณภาพได้เร็ว เนื่องจากเมล็ดยังมีอัตราการหายใจสูง ส่งผลให้เกิดความร้อนและเร่งการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี นำไปสู่การเร่งการเสื่อมคุณภาพ การลดลงของปริมาณสาร 2AP เป็นผลจากหลายกลไก เช่น การระเหยของสาร 2AP ซึ่งเป็นสารระเหยได้ง่าย หรือการสูญเสียจากการทำงานของเอนไซม์ (Widjaja et al., 1996; Yoshihashi et al., 2005) Yoshihashi et al. (2005) รายงานว่าสาร 2AP มีคุณสมบัติเป็นลิโพฟีลิก (lipophilic) ที่ไม่มีขั้วและสามารถละลายได้ในไขมัน จึงสามารถละลายในส่วนประกอบไขมันของข้าวซึ่งอยู่ในรูปอิสระ (free form) และยึดติดกับแป้ง (starch bound form) ทั้งนี้กระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (หรือ lipid oxidation ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สออกซิเจนกับส่วนประกอบไขมัน) เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและให้ผลลัพธ์เป็นกรดไขมัน (free fatty acid) และสารประกอบคาร์บอนิล (carbonyl compounds) ที่ให้กลิ่นไม่พึงประสงค์และเป็นดัชนีของการเสื่อมคุณภาพของข้าว การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกี่ยวข้องกับเอนไซม์ที่สำคัญ เช่น ไลเพส (lipase) และ ไลพ็อกซีจีเนส (lipoxygenase; LOX) ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเร่งกิจกรรมของเอนไซม์เหล่านี้ เช่น อุณหภูมิที่สูง (Yasumatsu et al., 1964) จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมสลายของสาร 2AP จากข้าว เนื่องจากกิจกรรมของเอนไซม์อาจปลดปล่อยสาร 2AP

---

[1] เนื้อหาส่วนนี้ได้นำเสนอภาคบรรยายในการประชุมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 17 จัดที่โรงแรม เดอะรีเจนท์ ชะอำบีชรีสอร์ท อ. ชะอำ จ. เพชรบุรี และตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์เกษตร (ดังแสดงในภาคผนวก ก.1)

ที่เป็นละลายในไขมันทั้งในรูปของอิสระและยึดติดกับแป้ง (ภาพที่ 4.1) ทั้งนี้สาร 2AP เป็นสารที่ระเหยได้ง่าย และมีระดับการรับรู้ของกลิ่นในอากาศ (odor threshold in air) ที่ต่ำซึ่งมีค่าเพียง 0.00002 mg/L (ppm) (Schieberle, 1991) ดังนั้นจึงสามารถรับรู้โดยการดมกลิ่นได้ง่าย ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์กับอุณหภูมิสามารถอธิบายได้ดีด้วยความสัมพันธ์อาร์รีเนียส (หัวข้อ 0 และตารางที่ 2.3) กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราเร็วของกิจกรรมเอนไซม์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียล ดังนั้นการเก็บรักษาข้าวเปลือกหรือข้าวสารในอุณหภูมิที่สูงจึงทำให้เกิดการสูญเสียกลิ่นหอมได้ง่าย และหากเก็บข้าวเปลือกหรือข้าวสารไว้ในสภาวะความชื้นสูงจะมีส่วนเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้เช่นกัน



(ก) (ข)

ภาพที่ 4.1 แบบจำลองแนวคิดการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ lipase และ LOX กับไขมันซึ่งมีสาร 2AP ละลายอยู่ในไขมัน ทั้งที่อยู่ในรูปอิสระ (free form) (ก) หรือ ยึดติดกับแป้ง (starch bound form) ในข้าวหอมมะลิ (ข)
ที่มา: ดัดแปลงจาก Yoshihashi et al. (2005)

ปริมาณสาร 2AP เริ่มต้นของข้าวที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าของปริมาณสาร 2AP ของข้าวหอมมะลิที่แสดงในตารางที่ 2.2 อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของปริมาณสาร 2AP ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 (ปลูกในศูนย์วิจัยข้าว จังหวัดปทุมธานี) ที่รายงานโดย Kongkiattikajorn (2008) มีค่าอยู่ในช่วง 0.41-0.56 ppm ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปริมาณสาร 2AP ของข้าวที่ใช้ในการศึกษานี้มีประมาณ 5-6 เท่า ความแปรปรวนของปริมาณสาร 2AP ของข้าวสายพันธุ์เดียวกันอาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น สิ่งแวดล้อม (อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน เป็นต้น) หรือ การเขตกรรมเพื่อทำการเพาะปลูกข้าว (รณชัย ช่างศรีและคณะ, 2559) ตารางที่ 4.1 ได้รวบรวมตัวอย่างของปริมาณสาร 2AP ของข้าวสายพันธุ์ต่าง ๆ จากข้อมูลทำให้ทราบได้ว่าแม้ว่าเป็นข้าวสายพันธุ์เดียวกันแต่ปริมาณสาร 2AP มีความแตกต่างกันได้

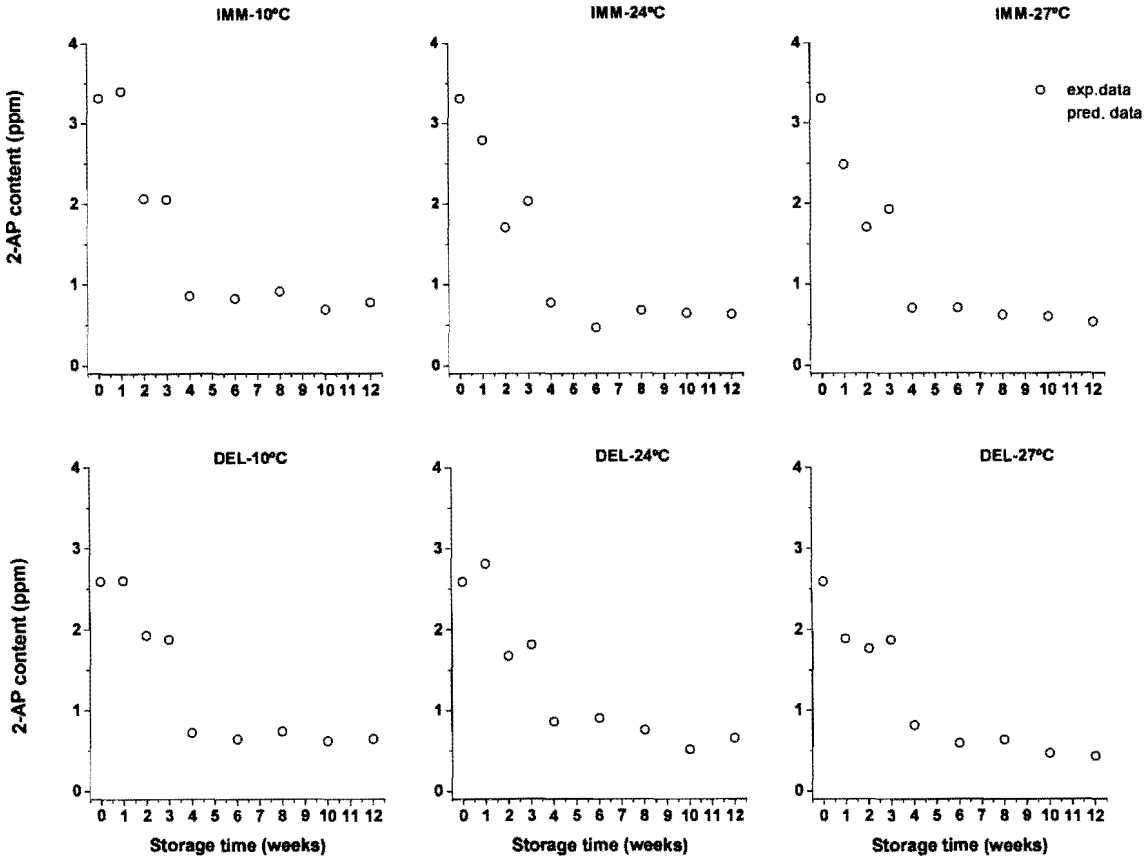
ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างของปริมาณสาร 2AP ของข้าวสารสายพันธุ์ต่าง ๆ ที่วิเคราะห์และรายงานจากเอกสารอ้างอิงต่าง ๆ

สายพันธุ์ข้าว	ปริมาณสาร 2AP (ppm)	อ้างอิง
ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (ทำแห้งทันที)	3.31	การศึกษานี้
ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (ชะลอการทำแห้ง)	2.59	การศึกษานี้
ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ปลูกแบบนาเคมีทั่วไป	1.55-2.63	อัญชลี ประเสริฐศักดิ์ และคณะ (2559)
ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ปลูกแบบนาอินทรีย์	1.72-4.90	อัญชลี ประเสริฐศักดิ์ และคณะ (2559)
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	0.41-0.56	Kongkiattikajorn (2008)
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	0.30-0.35	Yoshihashi et al. (2005)
Basmati	0.06	Buttery et al. (1983)
Malagkit Sungsong	0.09	Buttery et al. (1983)
Milagross	0.07	Buttery et al. (1983)
Seratus Malam	0.06	Buttery et al. (1983)
Azucena	0.04	Buttery et al. (1983)
Hieri	0.04	Buttery et al. (1983)
Ir841-76-1	0.07	Buttery et al. (1983)
Jasmine	0.156	Tanchotikul and Hsieh (1991)
Della	0.076	Tanchotikul and Hsieh (1991)
YRF9	0.67	Widjaja et al. (1996)
B5-3	2.746	Tava and Bocchi (1999)
Aromatic (Fowler Gourmet)	0.999	Bergman et al. (2000)
Jasmati (Rice Tec)	0.526	Bergman et al. (2000)
Kasmati (Rice Tec)	0.496	Bergman et al. (2000)
Texmatic (Rice Tec)	0.266	Bergman et al. (2000)
Aychade*	0.575-0.638	Maraval et al. (2010)
Fidji*	0.045-0.475	Maraval et al. (2010)
Giano*	0.028-0.336	Maraval et al. (2010)
Kala Bhat	0.920	Mathure et al. (2014)
Kali Kumud	0.732	Mathure et al. (2014)
Amritbhog	0.787	Mathure et al. (2014)

หมายเหตุ: ข้าวที่ทำการทดสอบปริมาณสาร 2AP มีความชื้นในช่วงร้อยละ 12-14 และวิเคราะห์ในตัวอย่างข้าวสารโดยใช้เครื่อง Gas Chormatography (* วิเคราะห์ในตัวอย่างข้าวเปลือก)

ในระหว่างการเก็บรักษา 3 เดือน พบว่า ปริมาณสาร 2AP ในข้าวสารจากข้าวเปลือกทั้ง 2 ประเภท มีค่าลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ75-80 จากค่าเริ่มต้น) การลดลงเกิดขึ้นในอัตราเร็วที่สูงในช่วง 4 สัปดาห์แรกของการเก็บรักษา จากนั้นปริมาณสาร 2AP มีแนวโน้มคงที่ในระหว่างการเก็บรักษา (ภาพที่ 4.2) เมื่อพิจารณาลักษณะของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ดังกล่าวพบว่า อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือปริมาณของสาร 2AP ในข้าว การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นลักษณะของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับ 1 กล่าวคือ อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกมักเกิดในอัตราที่สูงเนื่องจากยังมีความเข้มข้นหรือปริมาณตั้งต้นของสารที่ทำการศึกษาอยู่มาก แต่เมื่อปริมาณหรือความเข้มข้นลดลงส่งผลให้อัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นช้าลงด้วย (Labuza, 1982) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของปฏิกิริยาอันดับ 0 มีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงในอัตราเร็วที่คงที่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นหรือปริมาณของสารตั้งต้น (Labuza, 1982) ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาร 2AP ในข้าวขาวดอกมะลิ Wongpornchai et al. (2004) รายงานการลดลงของปริมาณสาร 2AP ในระหว่างการเก็บรักษา 10 เดือน โดยปริมาณสาร 2AP เหลืออยู่เพียงร้อยละ 25 ของปริมาณสารตั้งต้น การลดลงของปริมาณสาร 2AP เกิดขึ้นในอัตราที่สูงในช่วงแรก (1-3 เดือน) ของการเก็บรักษา จากข้อมูลดังกล่าวนี้สนับสนุนว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP นั้นเป็นลักษณะของปฏิกิริยาอันดับ 1 จากการศึกษาที่ผ่านมาพบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของวิตามินซีในผลิตภัณฑ์ เช่น มะเขือเทศเชอรี่อบแห้ง (สุภาวินี กะการดี วีรเวทย์ อุทโธ และวิริยา พรมกอง, 2555) ได้รายงานว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของปฏิกิริยาอันดับ 1 ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวฮาง งอกในระหว่างการเก็บรักษา เวียงโชง หวันสะหว่าง (2559) รายงานว่า การเปลี่ยนแปลงความเป็นสีแดง (ค่า a*) ของข้าวฮางงอกสามารถทำนายได้ดีด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับ 1 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงแบบปฏิกิริยาอันดับ 1 มักพบโดยทั่วไปกระบวนการผลิตหรือการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร (Earle and Earle, 2003) ปัจจุบันยังไม่มีรายงานอันดับของปฏิกิริยาของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในข้าว

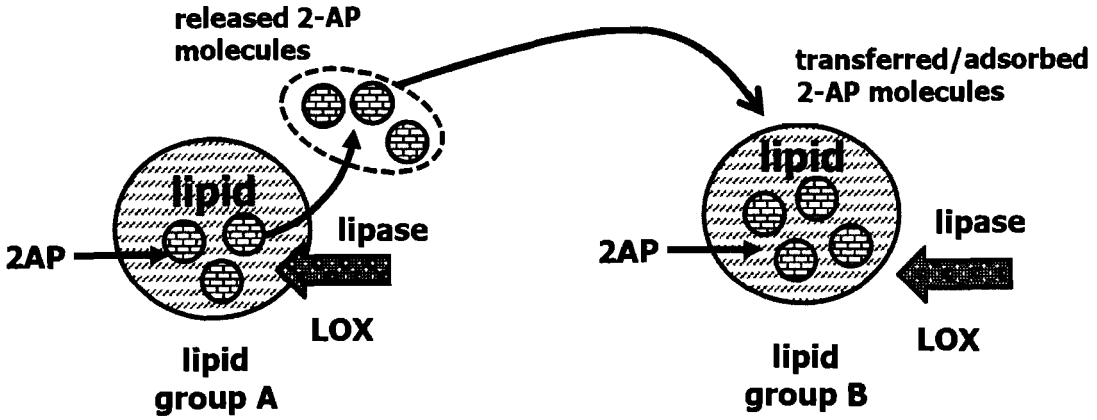
เมื่อศึกษาการทำนายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาร 2AP ในสภาวะการเก็บรักษาอุณหภูมิต่างๆ ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ สมการ 2.3 พบว่า สามารถทำนายแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี (ภาพที่ 4.2) โดยมีค่า RMSE และ R^2 อยู่ในช่วง 0.16-0.29 และ 0.88-0.94 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณ 2AP ของข้าวเปลือกที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงกว่าเมื่อพิจารณาภายหลังสิ้นสุดระยะเวลาเก็บรักษา (โดยเฉพาะระหว่างอุณหภูมิ 10°C เป็น 24°C) ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ($k_{2AP,F}$) ของข้าวเปลือกที่ลดความชื้นทันที (IMM) ซึ่งได้จากการทำนายด้วย สมการ 2.3 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 10°C เป็น 24°C แต่ค่าดังกล่าวไม่แตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิ 24 และ 27°C ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยของห้องที่เก็บรักษาตัวอย่างข้าวในสภาวะอุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 27°C แม้ว่าจะมีอุณหภูมิบางช่วงขึ้นสูงถึง 38°C หรือลดลงถึง 20°C (แสดงในภาคผนวก ก.1)



ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ที่วัดได้จากการทดลอง (สัญลักษณ์ จุดต่อเส้น) และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ (สมการ 2.3) ภาพย่อย ก-ค แสดงข้อมูลจากการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ทำแห้งทันที (IMM) ส่วนภาพย่อย ง-ฉ แสดงข้อมูลจากการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่มีการชะลอการทำแห้ง (DEL) ที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C ตามลำดับ

ในกรณีของข้าวเปลือกซึ่งมีการชะลอการลดความชื้น (DEL) พบว่าค่า $k_{2AP,F}$ ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม 10°C เป็น 24°C หรือ 27°C อาจเป็นผลจากการลดลงของปริมาณสาร 2AP ที่เกิดจากหลายกลไก (Widjaja et al., 1996) ในการศึกษานี้ผู้วิจัยตั้งสมมติฐานโดยมีแนวคิดแสดงในภาพที่ 4.3 ไว้ดังนี้ กิจกรรมเอนไซม์ lipase หรือ LOX เกิดขึ้นได้ในอัตราที่สูงเมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สาร 2AP ถูกปลดปล่อยจากไขมัน (เช่น กลุ่มไขมัน A ในภาพที่ 4.3) แต่สาร 2AP ที่ถูกปลดปล่อยเหล่านี้ อาจไปละลายหรือดูดซับลงบนกลุ่มไขมัน B (แสดงในในภาพที่ 4.3) ส่งผลให้เกิดการชะลอการสูญเสียปริมาณสาร 2AP จากข้าว (ภาพที่ 4.3) จึงส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิที่สูงไม่แตกต่างจากที่เกิดขึ้นในอุณหภูมิที่ต่ำ ทั้งนี้กระบวนการละลายหรือดูดซับดังกล่าวอาจเป็นกลไกหรือขั้นตอนที่กำหนดอัตราเร็ว (rate-limiting step) ของกระบวนการทั้งหมด (ในที่นี้คือการสูญเสีย 2AP) การละลาย (dissolution) เป็นขั้นตอนสำคัญและเป็น rate-limiting step ของการถ่ายโอนมวลใน

หลายกระบวนการ เช่น การนำส่งสารสำคัญในยา (drug delivery) เข้าสู่เซลล์ของร่างกาย (Kumar, 2012) ปัจจุบันยังไม่มีรายงานของการศึกษาในประเด็นนี้ ผู้วิจัยได้เห็นว่าเป็นประเด็นที่มีความสนใจเพื่อการศึกษาและทดสอบสมมติฐานเบื้องต้นดังกล่าวต่อไป จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 ที่แสดงให้ทราบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงหรือสูญเสียสาร 2AP จากข้าวไม่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยเฉพาะระหว่าง 24-27°C ดังนั้นผู้วิจัยจึงไม่ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงหรือสูญเสียสาร 2AP และอุณหภูมิโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์อาร์รีเนียส (สมการ 2.4) ในการศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคต ผู้วิจัยจะได้ทำการควบคุมอุณหภูมิและเลือกอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกันมากกว่าที่ได้ดำเนินการในการศึกษานี้



ภาพที่ 4.3 แบบจำลองแนวคิดการปลดปล่อยสาร 2AP จากไขมันกลุ่ม A (lipid group A) ซึ่งเป็นผลจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเอนไซม์กับไขมัน แล้วสาร 2AP ที่ถูกปลดปล่อยเหล่านี้ได้เกิดการถ่ายโอนและดูดซับเข้าสู่ไขมันกลุ่ม B (lipid group B) ปรากฏการณ์นี้ได้ถูกตั้งสมมติฐานในข้าวที่มีการชะลอการลดความชื้นหลังการเก็บเกี่ยว (DEL)

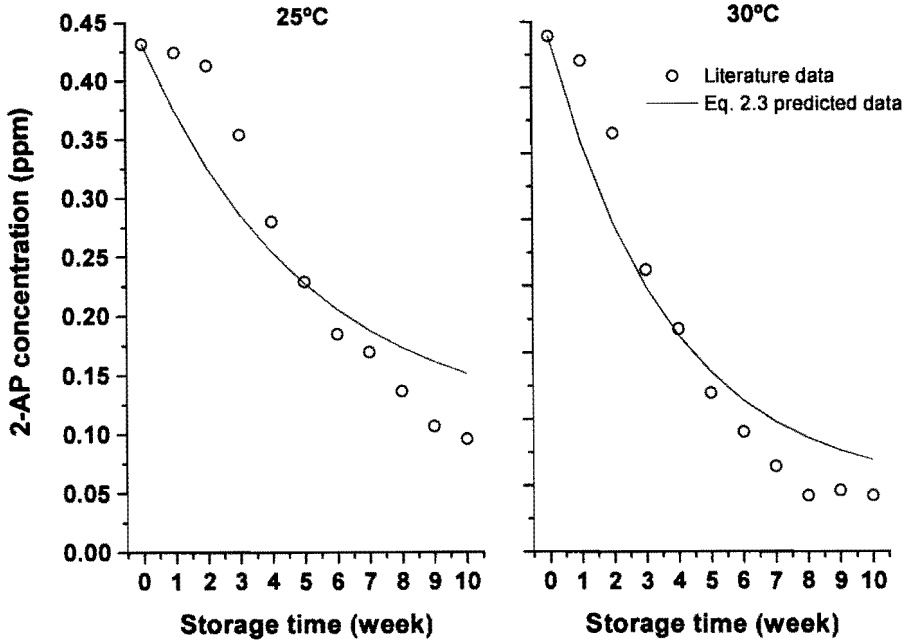
ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (สมการ 2.3) สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในระยะเวลา 3 เดือน (12 สัปดาห์) ของข้าวสารซึ่งได้จากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งเพื่อลดความชื้นแบบทันทีหรือแบบที่มีการชะลอการทำแห้ง พร้อมด้วยค่า RMSE และค่า R^2

อุณหภูมิ (°C)	$k_{2AP,F}$ (month^{-1})		RMSE		R^2	
	IMM	DEL	IMM	DEL	IMM	DEL
10°C	0.34	0.29	0.26	0.22	0.89	0.88
24°C	0.39	0.29	0.21	0.22	0.92	0.89
27°C	0.39	0.29	0.16	0.16	0.94	0.91

เมื่อพิจารณาข้อมูลจากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ (ภาพที่ 4.2) พบว่า ในช่วง 4 สัปดาห์แรก พบการเบี่ยงเบนที่ชัดเจนของปริมาณสาร 2AP ที่ได้จากการทำนายด้วย

สมการ 2.3 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ การเพิ่มขึ้นของสาร 2AP ในช่วง 1-3 สัปดาห์ อาจเกิดจากสภาวะของความเครียด (Yoshihashi et al., 2002) ที่เกิดจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้อุณหภูมิต่ำเป็นความเครียดจากสิ่งไม่มีชีวิต (abiotic stress) ที่สามารถเหนี่ยวนำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการเมตาบอลิซึมและการสะสมของสารเมตาโบไลต์ต่าง ๆ ได้ (Toivonen and Hodges, 2011) โดยความเครียดดังกล่าวอาจทำให้เกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างเอนไซม์และซับสเตรทส่งผลให้เกิดการสังเคราะห์สารให้กลิ่นรสที่ระเหยได้ง่าย (volatiles) (Hodges and Toivonen, 2008) ซึ่งสาร 2AP จัดเป็นสารที่ระเหยได้ง่ายและให้กลิ่นรสในข้าว จึงอาจคาดคะเนได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณสาร 2AP ในช่วงแรกของการเก็บรักษาอาจมีสาเหตุส่วนหนึ่งจากความเครียด การลดลงของปริมาณสาร 2AP และสามารถทำนายได้ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์อาจเป็นผลจากระดับความเครียดลดลง

เมื่อพิจารณาในช่วงท้ายของการเก็บรักษา พบว่า การลดลงของปริมาณสาร 2AP ในข้าวเกิดขึ้นในอัตราที่เร็วกว่าอัตราที่ทำนายอาจเป็นผลจากการระเหยของสาร 2AP ที่ได้รับการปลดปล่อยจากไขมันหลังจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไขมันและเอนไซม์ ทั้งนี้การสูญเสียสาร 2AP จากกลไกการระเหยมีแนวโน้มเกิดขึ้นได้อัตราที่สูง (Yoshihashi et al., 2005) ผู้วิจัยได้ทำการทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 เก็บรักษาเป็นเวลา 10 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 25°C และ 30°C ซึ่งเป็นข้อมูลที่รายงานโดย Yoshihashi et al. (2005) ผลการทำนายแสดงในภาพที่ 4.4 และพบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงอันดับที่ 1 นั้นสามารถทำนายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงได้ระดับหนึ่งโดยเฉพาะภายหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 3 สัปดาห์ การเบี่ยงเบนระหว่างผลการทดลองและผลการทำนายในช่วงเริ่มและท้ายของการเก็บรักษามีความคล้ายคลึงกับผลที่ได้จากการศึกษานี้ ค่า $k_{2AP,F}$ ที่ได้จากการประมาณโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ที่อุณหภูมิ 25°C และ 30°C เท่ากับ 0.18 และ 0.26 $week^{-1}$ ค่านี้แสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการลดลงของปริมาณสาร 2AP นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่า $k_{2AP,F}$ ดังกล่าวกับค่าที่แสดงในตารางที่ 4.2 (พิจารณาที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน) พบว่าค่าที่แสดงใน ตารางที่ 4.2 มีค่าสูงกว่า ข้อมูลดังกล่าวสนับสนุนความรู้ด้านอัตราเร็วของการสูญเสียปริมาณสาร 2AP ขึ้นกับระดับของความเข้มข้นของสาร 2AP



ภาพที่ 4.4 การทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในข้าวขาวดอกมะลิ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C และ 30°C เป็นเวลา 10 สัปดาห์ ผลการทดลองเป็นข้อมูลที่รายงานโดย Yoshihashi et al. (2005)

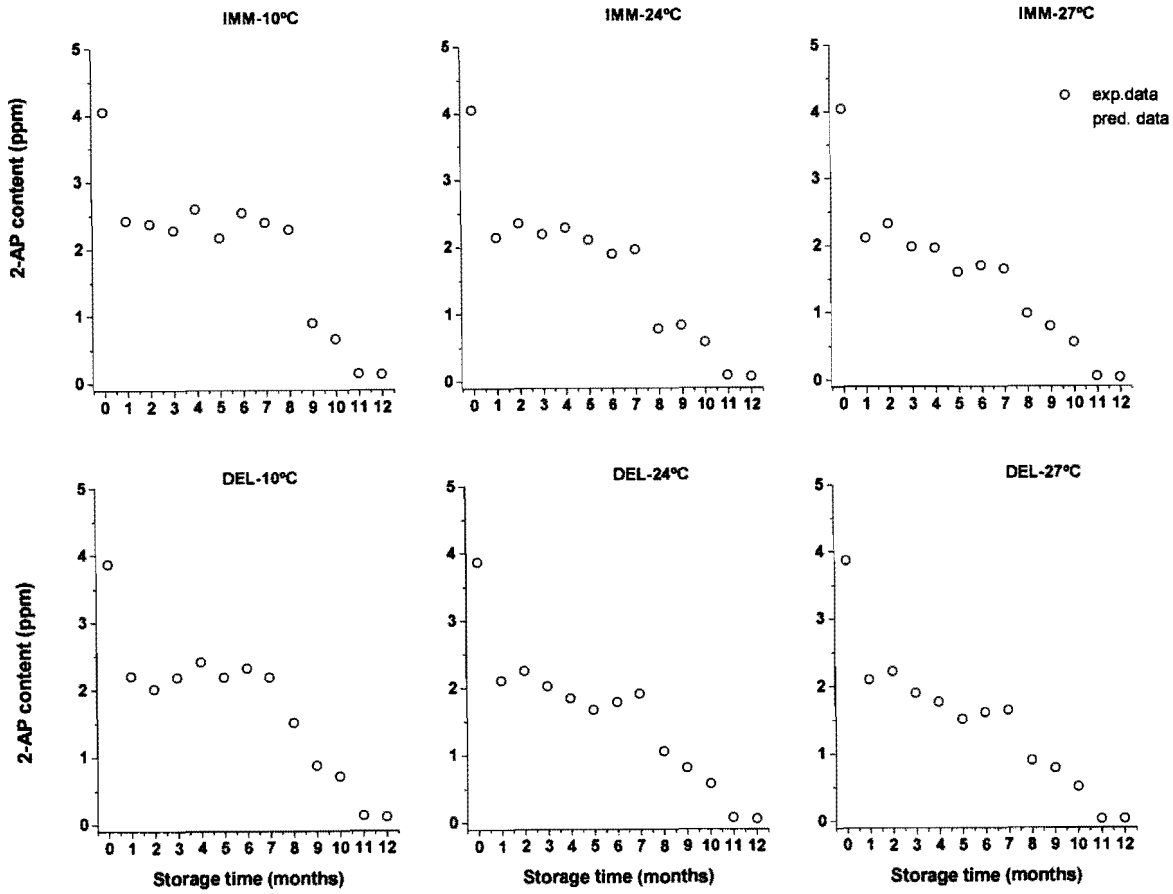
4.2 ผลของการชะลอการลดความชื้นของข้าวเปลือกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในช่วงเวลา 12 เดือน

ในหัวข้อ 0 ได้นำเสนอผลของการชะลอความชื้นของข้าวเปลือกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในช่วงเวลา 3 เดือน ผลการศึกษาโดยรวมได้แสดงให้เห็นว่าการชะลอการทำแห้งทำให้ปริมาณสาร 2AP เริ่มต้นของข้าวเปลือกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกที่ได้รับการทำแห้งทันที เมื่อพิจารณาการเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นเวลา 12 เดือน พบว่า ค่าเริ่มต้นของปริมาณสาร 2AP ที่วิเคราะห์ได้จากข้าวเปลือกที่มีการชะลอการทำแห้งมีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จากข้าวเปลือกที่ทำแห้งทันทีเพียงเล็กน้อย (ภาพที่ 4.5) ผลการศึกษาดังกล่าวสนับสนุนผลของการชะลอการทำแห้งต่อปริมาณสาร 2AP ที่ได้รายงานในหัวข้อ 4.1 ซึ่งความร้อนและความชื้นที่สะสมในข้าวเปลือกที่รอการทำแห้งเป็นเวลา 48 ชั่วโมงกระตุ้นให้เกิดการสูญเสียปริมาณสาร 2AP ความร้อนที่สะสมในข้าวเป็นปัจจัยเร่งการทำปฏิกิริยาระหว่างเอนไซม์และไขมันนำไปสู่การปลดปล่อยสาร 2AP จากไขมันและเกิดการการระเหยจากข้าว

รูปแบบของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในระหว่าง 12 เดือนมีความคล้ายคลึงกันในทุกสิ่งทดลอง กล่าวคือ ปริมาณสาร 2AP ลดลงประมาณร้อยละ 40-48 จากค่าเริ่มต้นในช่วง 1 เดือนแรก จากนั้นปริมาณสาร 2AP มีแนวโน้มคงที่และอยู่ในระดับที่ลดลงมาในเดือนที่ 1 จนถึงเดือนที่ 7 ของการเก็บรักษา (ภาพที่ 4.5) จากนั้นปริมาณสาร 2AP ลดลงด้วยอัตราเร็วที่สูง (สังเกตได้จากความชันของการลดลง) และต่อเนื่องจนถึงเดือนที่ 12 โดยปริมาณสาร 2AP ที่เหลือมีค่าอยู่ประมาณ 0.03-0.1

ppm และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสิ่งทดลอง เมื่อพิจารณาการลดลงในช่วง 1 เดือนแรก พบว่า ข้าวเปลือกซึ่งเก็บที่อุณหภูมิอุณหภูมิ 24-27°C มีปริมาณสาร 2AP ที่ต่ำกว่าข้าวเปลือกซึ่งเก็บที่อุณหภูมิ 10°C ผลการศึกษาดังกล่าวสนับสนุนความรู้ในประเด็นที่ว่าอุณหภูมิการเก็บรักษามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการลดลงของปริมาณสาร 2AP เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเดียวกันและต่างอุณหภูมิ พบว่า การชะลอการลดความชื้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการลดลงของปริมาณสาร 2AP ผลการศึกษาดังกล่าวสนับสนุนการอภิปรายที่นำเสนอในหัวข้อ 4.1 ว่าการลดลงของปริมาณสาร 2AP เป็นผลจากกระบวนการซึ่งเกี่ยวข้องเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์และการระเหยของสาร 2AP จากข้าว กระบวนการดังกล่าวนั้นมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเก็บรักษา

การทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ สมการ 2.3 พบว่าสามารถทำนายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในช่วง 1-7 เดือนได้ดี (ภาพที่ 4.5 และตารางที่ 4.3) แต่ไม่สามารถทำนายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงภายหลังจาก 7 เดือนได้ ค่า R^2 ที่วิเคราะห์มีค่าต่ำซึ่งอยู่ในช่วง 0.32-0.61 (ตารางที่ 4.3) แสดงให้ทราบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถอธิบายความผันแปรของปริมาณสาร 2AP ซึ่งเป็นผลจากการทดลองได้เพียงร้อยละ 32-ร้อยละ 61 เท่านั้น หรือกล่าวได้ว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์นั้นควรมีการปรับปรุงเพื่อให้มีความสมรูป (goodness-of-fit) กับผลการทดลอง เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP พบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาที่สูงขึ้นในข้าวเปลือกทุกประเภท นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ของข้าวเปลือกประเภท DEL ที่อุณหภูมิ 10°C และ 27°C มีค่าที่สูงกว่าค่าของข้าวเปลือกประเภท IMM ผลการศึกษาที่ไม่เป็นแนวโน้มที่ชัดเจนดังกล่าวอาจเกิดจากความแปรปรวนของปริมาณสาร 2AP ที่วัดในแต่ละเดือนที่ทำการเก็บรักษา และ/หรือเกิดจากกลไกที่ทำให้เกิดการลดลงของสาร 2AP ดังที่ได้อภิปรายไว้ข้างต้น



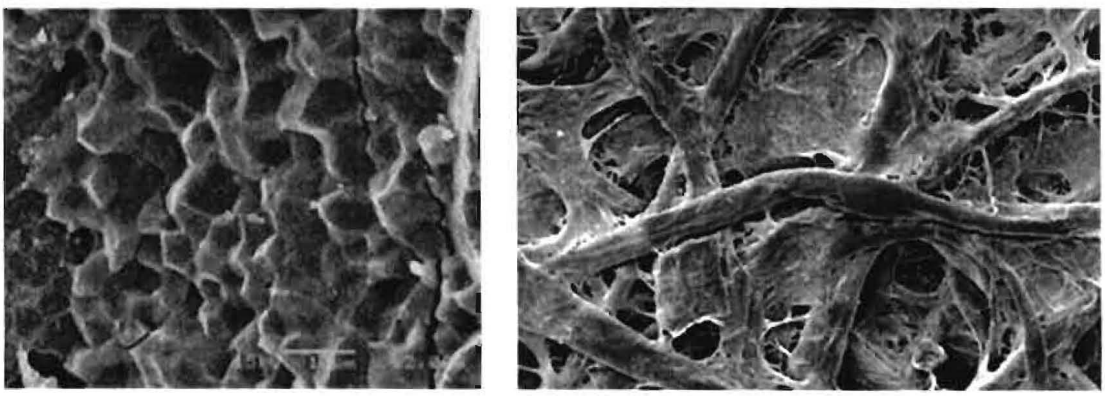
ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ที่วัดได้จากการทดลอง (สัญลักษณ์ วงกลม) และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ (สมการ 2.3) ในระหว่างการเก็บรักษา 12 เดือน สัญลักษณ์ IMM หมายถึง การเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ทำแห้งทันที (IMM) ในขณะที่ DEL หมายถึง การเก็บรักษาข้าวเปลือกที่มีการชะลอการทำแห้ง ที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (สมการ 2.3) สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในระยะเวลา 12 เดือน ของข้าวสารซึ่งได้จากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งเพื่อลดความชื้นแบบทันทีหรือแบบที่มีการชะลอการทำแห้ง พร้อมด้วยค่า RMSE และค่า R^2

อุณหภูมิ (°C)	$k_{2AP,F}$ (month^{-1})		RMSE		R^2	
	IMM	DEL	IMM	DEL	IMM	DEL
10°C	4.28	6.44	0.07	0.06	0.32	0.37
24°C	2.22	2.09	0.11	0.09	0.44	0.49
27°C	1.04	1.21	0.13	0.10	0.61	0.60

การลดลงของปริมาณสาร 2AP ด้วยอัตราที่สูงภายหลังจากการเก็บรักษา 8 เดือน มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับการสูญเสียสาร 2AP ในรูปของเหลวที่ถูกดูดซับไว้บนกระดาษกรองซึ่งรายงานในการศึกษาของ Yoshihashi et al. (2005) การสูญเสียสาร 2AP จากกระดาษกรองเกิดจากการระเหย (evaporation) ของสาร 2AP เนื่องจากแรงขับดัน (driving force) ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความดันไอของสาร 2AP ระหว่างกระดาษกรองและสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ กระดาษกรอง ทั้งนี้กระดาษกรองซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนสามารถเก็บรักษาสาร 2AP ในปริมาณสูง หากทำการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของเม็ดข้าวสารกับกระดาษกรอง พบว่า ในภาพรวมมีความเป็นรูพรุนเหมือนกัน ดังนั้นการระเหยของสาร 2AP ที่สะสมอยู่ภายในโครงสร้างของข้าวออกมายังสิ่งแวดล้อมจึงอาจเกิดในลักษณะที่คล้ายกันกับการระเหยจากกระดาษกรอง จากความรู้ทั่วไปของการถ่ายโอนมวลพบว่า การเคลือบผิวหน้าสามารถชะลอการระเหยได้ เช่น การเคลือบส้มด้วยไขรำข้าวเพื่อลดการคายน้ำ (วาริช ศรีละออง ณัฐชัย พงษ์ประเสริฐ และกรณ์กนก อายุสุข, 2556) หรือเคลือบแป้งมันสำปะหลังบนผิวหน้าของกระดาษ เมื่อพิจารณาข้อมูลดังกล่าวกับเม็ดข้าวสารจึงสนับสนุนความรู้ที่ว่าการเก็บข้าวสารในรูปข้าวเปลือกซึ่งมีชั้นของรำข้าวและเปลือกข้าว ทำให้สามารถเก็บความหอมของข้าวได้นานกว่าการเก็บในรูปแบบข้าวขัดขาว

เมื่อทำการทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ภายหลังจากการเก็บรักษา 8 เดือนจนสิ้นสุดระยะเวลาการเก็บรักษา พบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ สมการ 2.3 สามารถทำนายได้ดี (ภาพที่ 4.7 และตารางที่ 4.4) ผลการศึกษาแสดงให้ทราบถึงศักยภาพของแบบจำลองคณิตศาสตร์ การทำนายต้องแบ่งเป็นสองช่วงตามระยะเวลาการเก็บรักษา ซึ่งสอดคล้องกับการเก็บรักษาข้าวเปลือกโดยทั่วไปของผู้ประกอบการซึ่งจะพยายามจำหน่ายข้าวภายใน 6 เดือนเนื่องจากหลังจากนั้นคุณภาพซึ่งรวมถึงความหอมของข้าวมีการลดลง

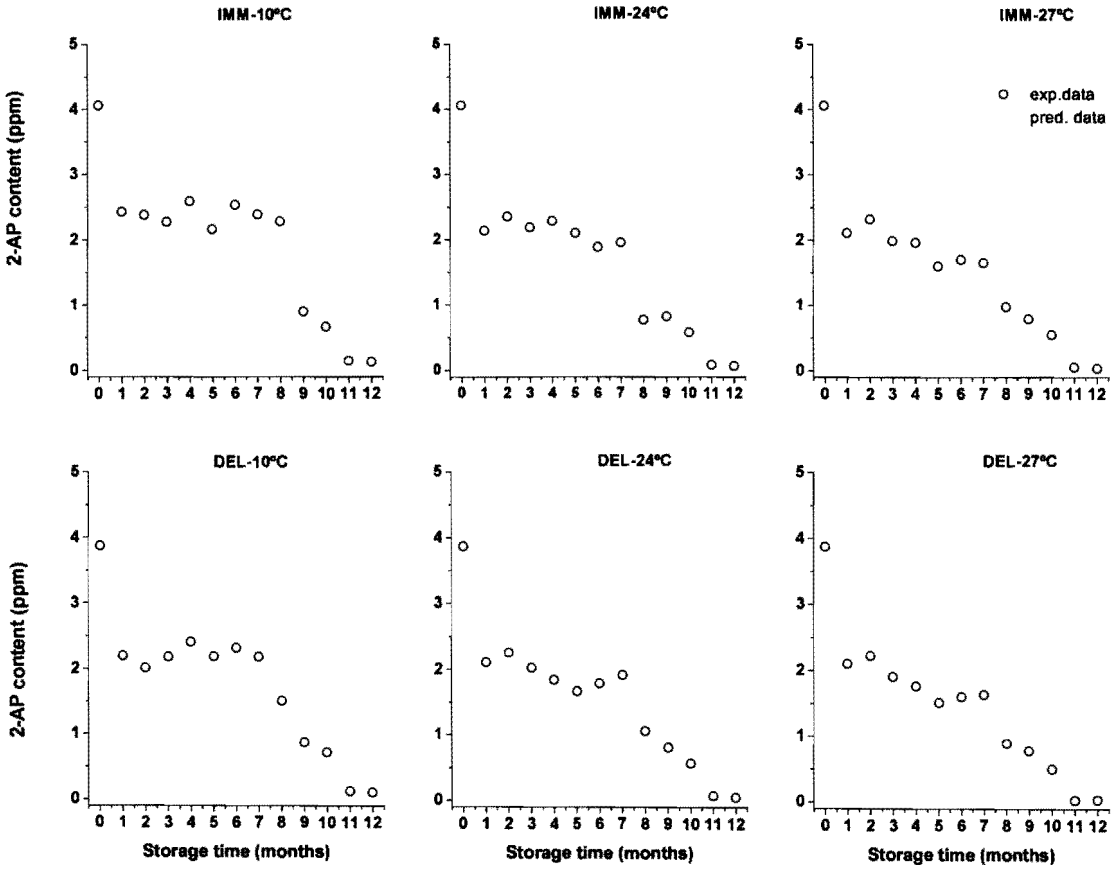


(ก) (ข)

ภาพที่ 4.6 การเปรียบเทียบโครงสร้างของเมล็ดข้าวสาร (ก) และกระดาษกรอง (ข) ที่สังเกตภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM)
ที่มา: ก Espinosa-Mendoza et al. (2012) ข Funazukuri and Ozawa (2019)

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองคณิตศาสตร์จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (สมการ 2.3) สำหรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP เฉพาะในช่วงเวลา 7-12 เดือน ของข้าวสารซึ่งได้จากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งเพื่อลดความชื้นแบบทันที หรือแบบที่มีการชะลอการทำแห้ง พร้อมด้วยค่า RMSE และค่า R^2

อุณหภูมิ (°C)	$k_{2AP,F}$ (month^{-1})		RMSE		R^2	
	IMM	DEL	IMM	DEL	IMM	DEL
10°C	0.43	0.45	0.23	0.09	0.90	0.97
24°C	0.57	0.48	0.13	0.09	0.91	0.97
27°C	0.47	0.49	0.09	0.09	0.95	0.94



ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ที่วัดได้จากการทดลอง (สัญลักษณ์ วงกลม) และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ (สมการ 2.3) โดยทำนายเฉพาะช่วงการเก็บรักษา 7-12 เดือน สัญลักษณ์ IMM หมายถึง การเก็บรักษาข้าวเปลือกที่ทำแห้งทันที (IMM) ในขณะที่ DEL หมายถึง การเก็บรักษาข้าวเปลือกที่มีการชะลอการทำแห้ง ที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C

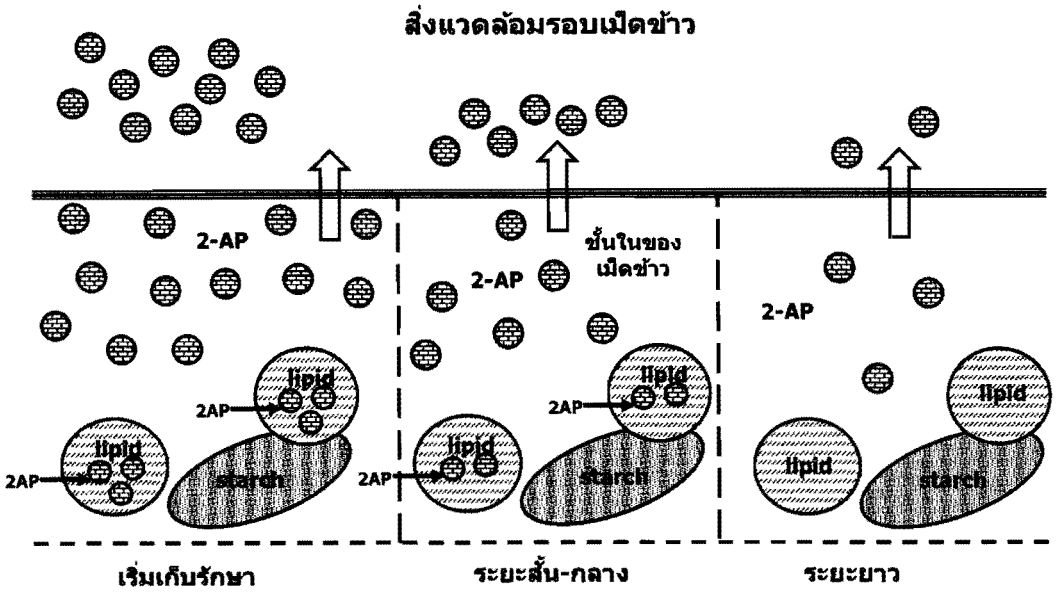
ผลการทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ทำให้ทราบถึงข้อจำกัดของแบบจำลองคณิตศาสตร์และสนับสนุนความรู้ในประเด็นที่ว่าการสูญเสียสาร 2AP เกิดขึ้นได้จากหลายกลไก จากข้อจำกัดทางข้อมูลในเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องด้านการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาร 2AP ในระหว่างการเก็บรักษา ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลองแนวคิด (conceptual model) ของการสูญเสียสาร 2AP จากเม็ดข้าวในระหว่างการเก็บรักษาเพื่อประกอบการอธิบายลักษณะหรือกลไกการสูญเสียสาร 2AP จากข้าวสาร ดังแสดงในภาพที่ 4.8 ในการพัฒนาแบบจำลองแนวคิดนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งข้าวตามแนวยาวให้สมมาตร (symmetry) และกำหนดให้การถ่ายโอนของสาร 2AP จากข้าวเป็นแบบทิศทางเดียว (one-dimensional transfer) ตามความหนาของเม็ด ทั้งนี้เมื่อกำหนดระบบที่ศึกษาให้เป็นแบบสมมาตรทั้งสองส่วนของเม็ดข้าว ดังนั้นลักษณะของการถ่ายโอนดังกล่าวเกิดขึ้นแบบเดียวกันเมื่อพิจารณา ภาพที่ 4.8 กระบวนการถ่ายโอนสาร 2AP จากแบบจำลองแนวคิดที่พัฒนาขึ้นสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

(1) ในช่วงเริ่มต้นของการเก็บรักษาหรือภายหลังจากการเก็บเกี่ยว/ทำแห้ง เม็ดข้าวมีสาร 2AP ในรูปแบบอิสระค่อนข้างมาก สอดคล้องกับการรับรู้ถึงความหอมใหม่ของข้าวในช่วงเวลาดังกล่าวได้อย่างชัดเจน การระเหยของสาร 2AP จากข้าวทำให้ปริมาณสาร 2AP ลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณสาร 2AP อย่างมากในช่วงแรกของการเก็บรักษา (พิจารณาผลของการลดลงของสาร 2AP แสดงในภาพที่ 4.2 และ ภาพที่ 4.5)

(2) การเก็บรักษาช่วงสั้น-กลาง มีส่วนผสมระหว่างสาร 2AP ทั้งที่อยู่ในรูปของอิสระและละลายในไขมัน (ทั้งในรูปของไขมันอิสระและไขมัน-สตาร์ช) โดยสาร 2AP ในรูปอิสระเกิดการระเหยออกไปอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่มีสาร 2AP จำนวนหนึ่งถูกปลดปล่อยออกมาจากไขมัน ทำให้ปริมาณสาร 2AP ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักภายหลังจากลดลงในเดือนที่ 1-7

(3) เมื่อเก็บรักษาข้าวเปลือกหรือข้าวสารในระยะเวลานานทำให้เกิดการสะสมของสาร 2AP ส่วนใหญ่อยู่ในรูปอิสระจึงง่ายต่อการระเหยออกจากข้าว ส่งผลให้กลิ่นหอมของข้าวลดลงเป็นอย่างมาก ทำให้คุณภาพของข้าวหอมที่เก็บรักษาไว้ในระยะเวลานานมีกลิ่นที่หอมน้อยลงมาก (ซึ่งผู้บริโภคมักกล่าวว่ามีกลิ่นเก่าเก็บ)

แบบจำลองแนวคิดการถ่ายโอนของสาร 2AP ดังแสดงในภาพที่ 4.8 สามารถนำไปเป็นพื้นฐานของการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่คลอบคลุมกับกลไกสำคัญของการสูญเสียปริมาณสาร 2AP ประกอบด้วย (1) การปลดปล่อยของสาร 2AP จากไขมัน (2) การแพร่ของสาร 2AP ในโครงสร้างภายในของเม็ดข้าว และ (3) การระเหยหรือซึมผ่านของสาร 2AP จากข้าวไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอก ทั้งนี้เมื่อแบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถคลอบคลุมกลไกสำคัญของกระบวนการถ่ายโอนมวลได้ การทำนายผลของการเปลี่ยนแปลงก็สามารถคาดคะเนได้ว่าจะมีความสมรูป (goodness-of-fit) ที่ดีมากขึ้นและนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนการจัดการเก็บรักษาข้าวเปลือกและข้าวสารต่อไป



ภาพที่ 4.8 แบบจำลองแนวคิดการถ่ายโอนของสาร 2AP จากภายในเม็ดข้าวที่สมมาตรสู่บรรยากาศภายนอกตามช่วงระยะเวลาการเก็บรักษา ลูกศรแสดงทิศทางของการถ่ายโอนโดยกำหนดให้เป็นทิศทางเดียว

4.3 สรุปประเด็นที่สำคัญ

การวิจัยนี้แสดงให้สาร 2AP ซึ่งเป็นสารให้ความหอมที่สำคัญของข้าวหอมมะลิมีการลดลงในระหว่างการเก็บรักษา การชะลอการทำแห้งหรือลดความชื้นของข้าวเปลือกทำให้ปริมาณสาร 2AP ของมีค่าเริ่มต้นต่ำกว่าข้าวเปลือกที่ทำแห้งทันที การลดลงของปริมาณสาร 2AP เกิดขึ้นได้ในอัตราเร็วที่สูงในช่วงแรกและช่วงภายหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 เดือน แบบจำลองคณิตศาสตร์ประเภทจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ซึ่งได้ประยุกต์ใช้ในการศึกษานี้สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในข้าวได้เป็นอย่างดี โดยผลการทำนายสนับสนุนความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิ และกลไกสำคัญของการสูญเสียสาร 2AP ในบทต่อไปผู้วิจัยได้นำเสนอผลของการศึกษาการชะลอการลดความชื้นต่อเปลี่ยนแปลงคุณภาพการเก็บรักษาของข้าว

บทที่ 5
ผลของการชะลอการลดความชื้นในข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ต่อคุณภาพข้าวขัดขาวในระหว่างการเก็บรักษา

การวิจัยในบทนี้ได้ดำเนินการศึกษาผลของการชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกต่อคุณภาพของข้าวสาร (ประเภทขัดขาว) ในระหว่างการเก็บรักษา คุณภาพของข้าวสาร เช่น ความขาวของข้าวสาร หรือเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกเป็นเกณฑ์สำคัญหนึ่งที่ผู้บริโภคใช้ประกอบการตัดสินใจซื้อหรือบริโภคข้าวนอกเหนือจากกลิ่นของข้าวสาร แม้ว่าปัจจุบันมีการศึกษาผลของการเก็บรักษาข้าวเปลือกต่อคุณภาพของข้าวสารแต่ยังไม่พบการศึกษาความสัมพันธ์กับการชะลอการทำแห้ง รายละเอียดของผลการศึกษาและการอภิปรายได้นำเสนอในส่วนต่อไป[2]

5.1 ความชื้น

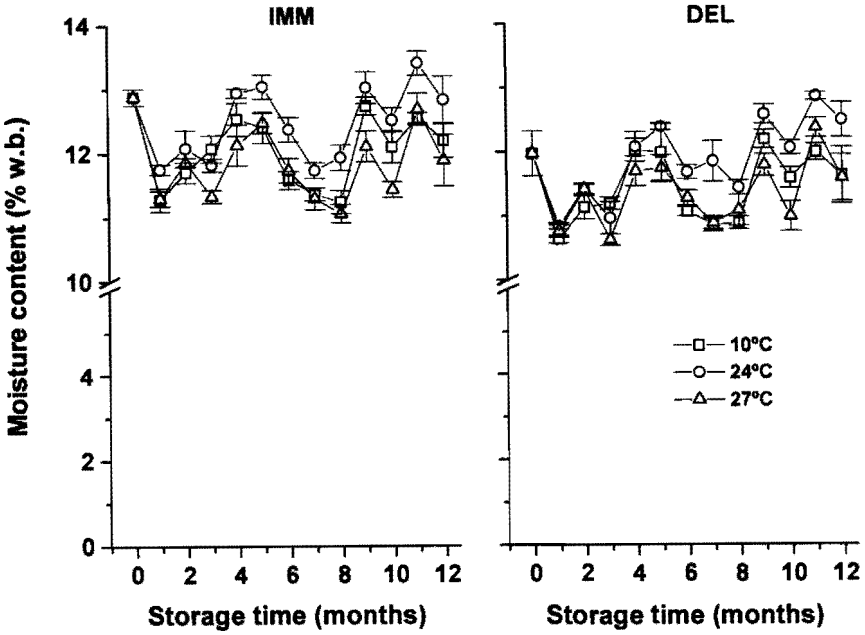
ผลของการชะลอความชื้นของข้าวเปลือกต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวสารซึ่งเกิดจากการเก็บที่เก็บรักษาในรูปข้าวเปลือก แสดงในภาพที่ 5.1 ผลการศึกษาแสดงให้ทราบว่า ความชื้นเริ่มต้นของข้าวสารกลุ่ม DEL นั้นต่ำกว่าข้าวสารกลุ่ม IMM เพียงเล็กน้อย โดยข้าวสารทั้งสองประเภทมีความชื้นในช่วงร้อยละ 12-13 ซึ่งเป็นระดับความชื้นโดยทั่วไปของข้าวเปลือกที่มีการลดความชื้นภายหลังการเก็บเกี่ยว ความชื้นที่ต่ำกว่าเล็กน้อยของข้าวสารในกลุ่ม DEL มีสาเหตุจากการทำแห้งข้าวเปลือกเนื่องจากผู้วิจัยพิจารณาว่าข้าวเปลือกมีความชื้นสูง จากเก็บในถุงกระสอบเป็นเวลานาน 48 ชั่วโมง ทำให้ข้าวมีความชื้นมากกว่าข้าวที่เพิ่งเก็บเกี่ยวและทำแห้งทันที จึงทำแห้งข้าวกลุ่ม DEL นานกว่าข้าวกลุ่ม IMM ส่งผลให้ข้าวกลุ่ม DEL มีความชื้นต่ำกว่าข้าวกลุ่ม IMM เล็กน้อย

เมื่อถึงพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกในระหว่างการเก็บรักษา พบว่า มีการเปลี่ยนแปลง (ทั้งเพิ่มและลด) น้อยกว่า 1.5 เท่าตลอดอายุการเก็บรักษา และมีแนวโน้มเดียวกันทั้งข้าวเปลือกในกลุ่ม IMM และ DEL ตลอดอายุการเก็บรักษา ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าว การเปลี่ยนแปลงความชื้นดังกล่าวเป็นผลจากการดูดซับหรือคายความชื้นซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลของความชื้นระหว่างบรรยากาศรอบ ๆ กระสอบข้าวและข้าวเปลือก บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นกระสอบพลาสติกสานซึ่งทำหน้าที่เพียงบรรจุและห่อหุ้มข้าวเปลือก แต่ไม่สามารถป้องกันการซึมผ่านของความชื้นหรืออากาศได้ (Robertson, 2013) เนื่องจากผิวของบรรจุภัณฑ์มีความเป็นรูพรุนสูง ถุงกระสอบสานได้ช่วยให้เกิดการถ่ายเทของมวลอากาศผ่านเข้าออกได้ง่าย ในขณะที่หากใช้ถุงพลาสติกใส เช่น ถุงพลาสติก low density polyethylene (LDPE) หรือรู้จักในชื่อถุงเย็น อาจทำให้เกิดการสะสมของไอน้ำในถุงพลาสติกได้เมื่อการเก็บรักษาในสภาพที่มีอุณหภูมิไม่คงที่

---

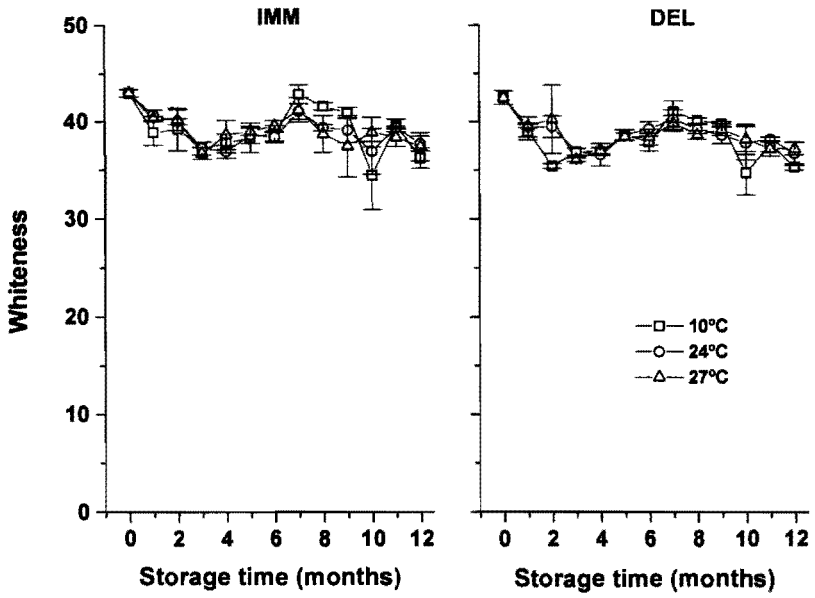
[2] เนื้อหาส่วนนี้ได้นำเสนอภาคบรรยายในการประชุมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 16 จัดที่โรงแรมแชนด์ดูนส์ เจ้าหลาว บีช รีสอร์ท จ. จันทบุรี และตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์เกษตร (ดังแสดงในภาคผนวก ก.2)

เนื่องจากถุง LDPE สามารถกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี แต่ไม่กันการซึมผ่านของอากาศได้ (Robertson, 2013)

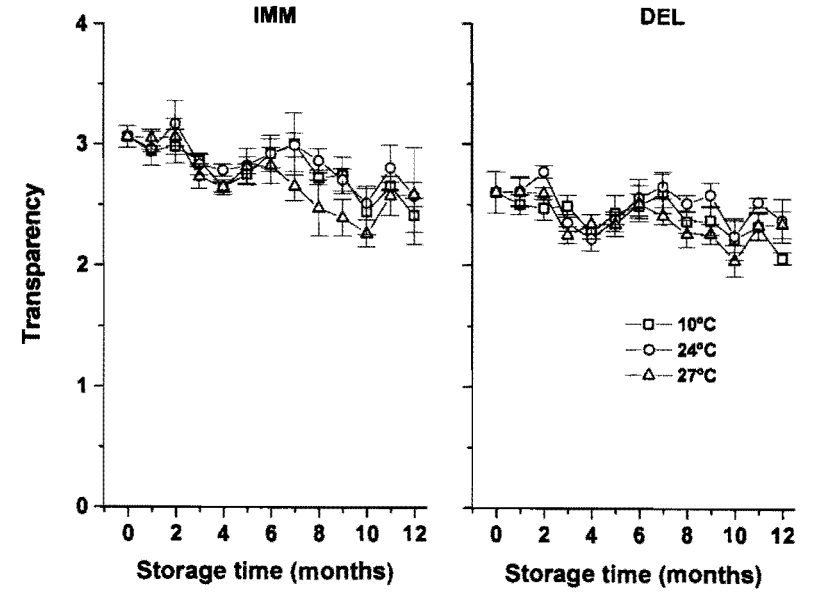


ภาพที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้น (moisture content; % wet basis (w.b.)) ของข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งข้าวเปลือกอย่างทันทีหลังการเก็บเกี่ยว (ตัวย่อ IMM) และการชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ตัวย่อ DEL) ข้าวเปลือกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C เป็นเวลา 12 เดือน (ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n= 12)

ในการศึกษาการเก็บรักษาข้าวเปลือกในถุงกระสอบสานเป็นเวลา 180 วัน ที่อุณหภูมิระหว่าง 25-45°C เวียงโชง หวันสะหว่าง (2559) รายงานว่า ระดับความชื้นของข้าวมีแนวโน้มที่คงที่ตลอดอายุการเก็บรักษา ความชื้นของข้าวสาร (จากการเก็บข้าวเปลือก) ที่อุณหภูมิ 25 และ 35°C มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 10.55-15.03 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้าวเปลือกที่ศึกษาในการศึกษานี้ อย่างไรก็ตาม ข้าวสารที่ได้จากการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 45°C มีความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 5.20-6.18 ระดับความชื้นที่ต่ำในข้าวตัวอย่างดังกล่าวมีสาเหตุมาจากการสูญเสียความชื้นจากข้าวเปลือกภายใต้อุณหภูมิที่สูง ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของอุณหภูมิต่อระดับความชื้นของข้าวสารและข้าวเปลือก ซึ่งอุณหภูมิที่สูงนั้นอาจเกิดขึ้นในช่วงฤดูร้อน เมื่อพิจารณาจากระดับของอุณหภูมิที่ทำการบันทึกตลอดการเก็บรักษาในการศึกษานี้พบว่าช่วงเดือนเมษายน มีอุณหภูมิห้องที่สูงกว่า 30°C จึงอาจเป็นสาเหตุให้ความชื้นของข้าวลดลง ในขณะที่ช่วงเดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม มีอุณหภูมิห้องที่ต่ำกว่า 25°C ในบางช่วงเวลา ทำให้ความดันของไอน้ำในบรรยากาศลดลง (ลดลงจากประมาณ 3,600 Pa ที่อุณหภูมิ 30°C เหลือประมาณ 2,500 Pa ที่อุณหภูมิ 24°C อ้างถึงการคำนวณความดันไอน้ำในบรรยากาศ โดย Phungam et al., 2018) จึงส่งผลให้ความชื้นของข้าวสารลดลงเนื่องจากการสูญเสียความชื้นของข้าวเปลือก

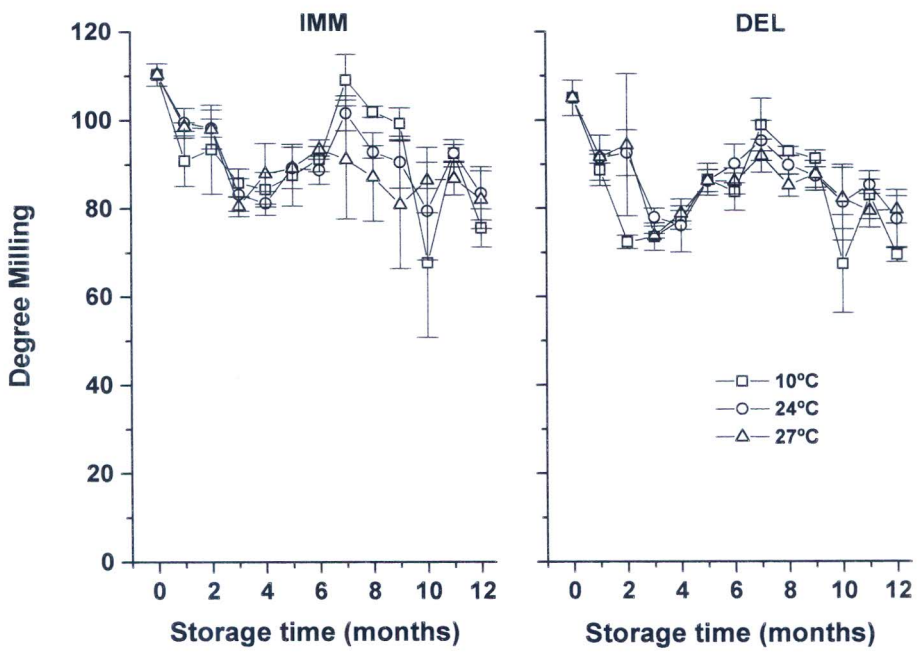


ภาพที่ 5.2 การเปลี่ยนแปลงความขาว (whiteness) ของข้าวสารจากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งข้าวเปลือกอย่างทันทีหลังการเก็บเกี่ยว (ตัวย่อ IMM) และการชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ตัวย่อ DEL) ข้าวเปลือกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C เป็นเวลา 12 เดือน (ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n= 12)



ภาพที่ 5.3 การเปลี่ยนแปลงความใส (transparency) ของข้าวสารจากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งข้าวเปลือกอย่างทันทีหลังการเก็บเกี่ยว (ตัวย่อ IMM) และการชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ตัวย่อ DEL) ข้าวเปลือกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C เป็นเวลา 12 เดือน (ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n= 12)

เมื่อวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การขัดสีหรือระดับการสี (milling degree) ของข้าวสาร พบว่า ไม่พบความแตกต่างระหว่างข้าวสารจากตัวอย่างข้าวเปลือกที่ลดความชื้นทันที (ภาพที่ 5.4-IMM) และชะลอการลดความชื้น (ภาพที่ 5.4-DEL) ในการศึกษานี้ใช้เครื่อง SATAKE ในการวัดค่าความขาว ความใส และระดับการขัดสี (หรือร้อยละการขัดสี) ทั้งนี้หากค่าร้อยละการขัดสี มีค่าเท่ากับ 0 แสดงถึงว่า ข้าวยังไม่ได้รับการขัดสีส่วนที่เป็นชั้นรำออกไป ในขณะที่ค่าร้อยละการขัดสีมีค่าเพิ่มขึ้นตามการขัดสี แสดงให้ทราบว่ามีการขัดสีชั้นรำข้าวออกไป ในกรณีค่าร้อยละการขัดสีเท่ากับ 100 แสดงให้ทราบว่ามีการขัดชั้นรำออกไปหมด แต่หากค่าร้อยละการขัดสีมากกว่า 100 แสดงให้ทราบว่าได้มีการขัดสีชั้นของข้าวออกไปเป็นรำ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียเนื้อขาวของข้าว เมื่อพิจารณาภาพที่ 5.4 พบว่า ค่า milling degree มีค่าสูงกว่า 100 แสดงให้ทราบว่า ข้าวที่ใช้ในการศึกษานี้มีการขัดเอาเนื้อข้าวออกไปเป็นรำร่วมกับชั้นรำข้าว



ภาพที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงระดับการขัดสีข้าว (milling degree) ของข้าวสารจากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งข้าวเปลือกอย่างทันทีหลังการเก็บเกี่ยว (ตัวย่อ IMM) และการชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ตัวย่อ DEL) ข้าวเปลือกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C เป็นเวลา 12 เดือน (ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n= 12)

ข้อมูลจากการจดสิทธิบัตรของสหรัฐอเมริกา US Patent Number 5,208,063 (Andrew, 1993) เรื่องกระบวนการขัดสีข้าวเพื่อควบคุมลักษณะการหุงต้มของข้าว (milling process for controlling rice cooking characteristics) ได้มีแนวปฏิบัติเกี่ยวกับการสีข้าวโดยใช้มาตรฐานของเครื่องวัดความขาวข้าว ยี่ห้อ SATAKE มีรายละเอียดแสดงในตาราง 5.1 ในการศึกษาของ Andrew (1993) พบว่า จากการสุ่มตัวอย่างข้าวที่ขายในตลาดประเทศสหรัฐอเมริกา จำนวน 14 ชนิด เพื่อ

ตรวจค่าความขาว ความใส และร้อยละการขัดสี พบว่า ข้าวหอมมะลิของไทย มีความขาว เท่ากับ 45 ความใส เท่ากับ 3.3 และร้อยละการขัดสี เท่ากับ 120 ซึ่งมีค่าทุกค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวอื่น ๆ ในขณะที่ข้าวบาสมาติ ซึ่งเป็นข้าวที่เป็นคู่แข่งสำคัญของข้าวหอมมะลิของประเทศไทย มีความขาวอยู่ในช่วง 32-37 ค่าความใส ระหว่าง 1.2-2.0 และร้อยละ 50-57 จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นได้ว่าข้าวมะลิของไทยมีการขัดสีออกมาก ทำให้มีการสูญเสียเนื้อข้าวออกไปพร้อมรำข้าวถึงร้อยละ 20 ทั้งนี้ตัวอย่างของระดับความขาว ความใส และร้อยละการขัดสีของข้าวที่รายงานในเอกสารอ้างอิงได้สรุปในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 มาตรฐานตาม US Patent Number 5,208,063 เรื่อง กระบวนการขัดสีข้าวเพื่อควบคุมลักษณะการหุงต้นของข้าว ซึ่งสัมพันธ์กับมาตรฐานของเครื่องวัดความขาวของข้าว ด้วยเครื่อง SATAKE

มาตรฐาน	ชนิดของข้าว	ความขาว	ความใส	ร้อยละการขัดสี
US. No. 1, No. 2	ข้าวเมล็ดยาว	38.2	1.78	82
	ข้าวเมล็ดปานกลาง	35.3	1.75	69
	ข้าวเมล็ดสั้น	36.9	1.74	76
	ค่าเฉลี่ย	36.8	1.76	76
US. No. 3, No. 4	ข้าวเมล็ดยาว	23.9	1.51	58
	ข้าวเมล็ดปานกลาง	31.9	1.31	54
	ข้าวเมล็ดสั้น	29.8	1.20	44
	ค่าเฉลี่ย	31.5	1.34	52
US. No. 5, No. 6	ข้าวเมล็ดยาว	30.6	1.34	48
	ข้าวเมล็ดปานกลาง	29.3	1.11	0
	ข้าวเมล็ดสั้น	28.3	0.88	37
	ค่าเฉลี่ย	29.4	1.16	28

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างของระดับความขาว ความใส และร้อยละการขัดสีของข้าวที่รายงานในเอกสารอ้างอิง

สายพันธุ์ข้าว	สภาวะการเก็บ				ระดับความขาว (%)	ความใส (%)	การขัดสี (%)	อ้างอิง
	อุณหภูมิ (°C)	RH (%)	เวลา (เดือน)	ลักษณะการเก็บรักษา				
ชัยนาท 1	-	-	-	ข้าวเปลือก	23.97	1.61	16.77	ใจทิพย์ วานิชชัง, ผดุงศักดิ์ วานิชชัง และ เพียงขวัญ วานิชชัง. (2556)
					27.76	1.87	34.60	
					30.79	2.18	49.63	
					34.93	2.53	70.60	
					37.90	2.65	84.80	
					41.03	2.90	100.53	
					42.73	3.02	109.17	
					44.23	3.12	116.53	
					45.53	3.26	123.10	
					46.80	3.27	129.30	
					47.70	3.24	133.00	
					47.24	3.48	132.70	
KDML105	-	-	-	ข้าวเปลือก	27.18	1.84	32.00	
					31.87	2.53	56.50	
					33.76	2.53	65.50	
					39.17	3.06	93.40	
					40.45	3.08	99.20	
					44.53	3.33	119.30	
					45.50	3.57	125.50	
					44.89	3.45	124.90	
					46.48	3.45	129.00	
					49.25	3.55	142.10	
					49.50	3.55	143.30	
					50.99	3.57	150.20	
KDML105 (1)	-	-	-	ข้าวเปลือก	30.63	2.09	45.73	ใจทิพย์ วานิชชัง, ผดุงศักดิ์ วานิชชัง และ เพียงขวัญ วานิชชัง. (2556)
KDML105 (2)	-	-	-	ข้าวเปลือก	35.09	1.99	58.71	
ปทุมธานี 1	-	-	-	ข้าวเปลือก	33.74	1.61	56.12	
กข31	-	-	-	ข้าวเปลือก	33.84	1.90	58.39	

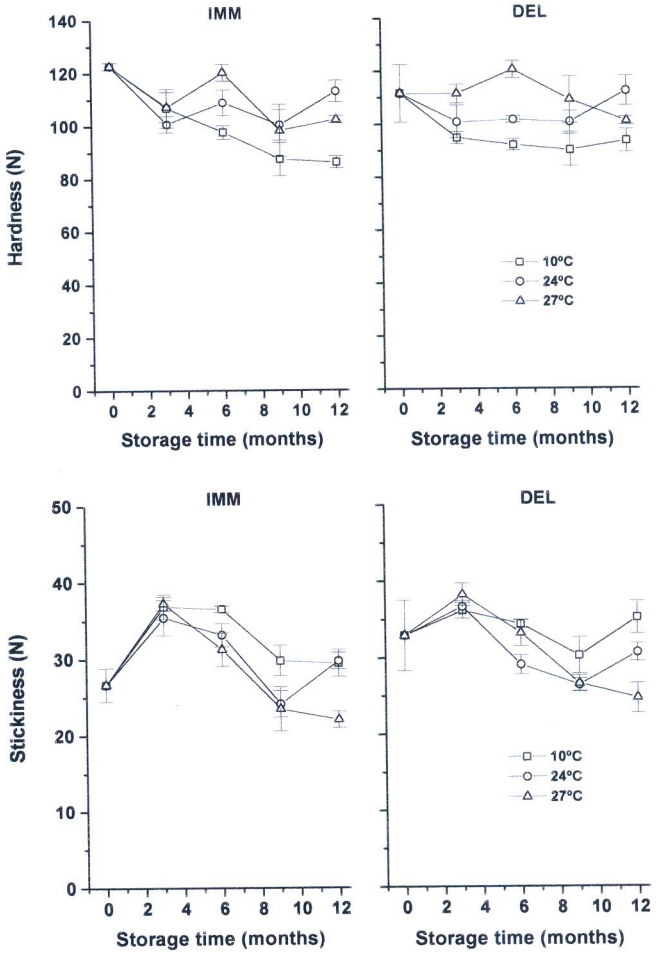
ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างของระดับความขาว ความใส และร้อยละการขัดสีของข้าวที่รายงานในเอกสารอ้างอิง (ต่อ)

สายพันธุ์ข้าว	สภาวะการเก็บ				ระดับความขาว (%)	ความใส (%)	การขัดสี (%)	อ้างอิง
	อุณหภูมิ (°C)	RH (%)	เวลา (เดือน)	ลักษณะการเก็บรักษา				
สังข์หยด	-	-	-	ข้าวสาร	28.67-38.03	0.47-0.63	-	นันทิยา พนมจันทร์ และคณะ (2559)
Whole-Grain Milled Rice	-	12-15	-	ข้าวสาร	32.30 – 52.00	2.41-4.69	60.00 – 157.00	Windham et al. (1997)

5.3 เนื้อสัมผัสของข้าวสารหุงสุก

ผลของการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความแข็ง (hardness) สามารถสังเกตในภาพรวมได้ว่าข้าวสารที่ได้จากข้าวเปลือกที่เก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่ามีความแข็งน้อยกว่าเก็บที่อุณหภูมิสูง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวเปลือกที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10°C และกลุ่มข้าวเปลือกที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 24-27 °C พบว่า ความแข็งของข้าวสารหุงสุกมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตั้งแต่เดือนที่ 6 ของการเก็บรักษา ทั้งในข้าวเปลือกที่ได้รับการลดความชื้นทันทีและลดความชื้นล่าช้า ทั้งนี้ความแข็งของข้าวสารหุงสุกในทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาการเก็บรักษา (ภาพที่ 5.5) พัสกร เจียตระกูล (2546) พบว่า ความแข็ง (hardness) ของข้าวสุก จะเพิ่มขึ้นตามอายุการเก็บรักษา โดยข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิต่ำจะมีความแข็งน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง แต่มีความเหนียวของข้าวสุก (stickiness) มากกว่า

การเปลี่ยนแปลงของความเหนียวหนืด (stickiness) ของข้าวสารหุงสุก ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเกาะติดกันของเมล็ดข้าว ในการทดลอง พบว่า ไม่พบความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลองในระหว่างการเก็บรักษาข้าว 8 เดือน และในการเก็บรักษาที่เดือน 12 พบความแตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญของข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 27°C โดยมีความเหนียวนุ่มต่ำกว่ากลุ่มข้าวที่เก็บรักษาที่ 10 และ 24 °C การเพิ่มขึ้นของความเหนียวของข้าวหุงสุกภายหลังจากเก็บรักษาข้าวเปลือก 1-2 เดือนที่แสดงในภาพที่ 5.5 สอดคล้องกับผลการศึกษาของอารีรัตน์ อิ่มศิลป์ และกิตติศักดิ์ วสันติวงศ์ (2556) ที่รายงานว่าค่าความเหนียวของข้าวใหม่อายุไม่เกิน 1 เดือน มีค่าความเหนียวสูงสุด และข้าวเก่า (เก็บเป็นระยะเวลาที่นาน) มีความเหนียวลดลง การลดลงของความเหนียวเป็นลักษณะสำคัญประการหนึ่งของการเก่าของข้าว ทั้งนี้ข้าวสารจากข้าวเปลือกทุกประเภทในการศึกษาที่อุณหภูมิสูงมีค่าความเหนียวหนืดต่ำกว่าเก็บในอุณหภูมิต่ำและมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา (ภาพที่ 5.5)



ภาพที่ 5.5 การเปลี่ยนแปลงความแข็ง (hardness) และความเหนียว (stickiness) ของข้าวสารหุงสุกจากข้าวเปลือกที่มีการทำแห้งข้าวเปลือกอย่างทันทีหลังการเก็บเกี่ยว (ตัวย่อ IMM) และการชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ตัวย่อ DEL) ข้าวเปลือกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 24 และ 27°C เป็นเวลา 12 เดือน (ค่าที่แสดงคือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน n= 12)

5.4 สรุปประเด็นที่สำคัญ

ในบทนี้ได้รายงานผลของการชะลอการลดความชื้นของข้าวเปลือกต่อคุณภาพของข้าวสารในระหว่างการเก็บรักษา ผลการทดลองแสดงให้ทราบว่าการชะลอความชื้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความใสขุ่นของข้าวในระหว่างการเก็บรักษาช่วงเดือน 0 ถึง 6 โดยข้าวที่มีการชะลอความชื้นมีความใสลดลง ในขณะที่การชะลอการลดความชื้นไม่มีผลต่อคุณภาพด้านอื่น ๆ ในบทต่อไปได้นำเสนอการสรุปทั่วไปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะการวิจัย

6.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์สำคัญ เพื่อศึกษาผลของความล่าช้าในการทำแห้งข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษาต่อความหอมและคุณภาพของข้าวสารขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นประโยชน์ในการหาแนวทางการจัดการข้าวเปลือกในกรณีที่ไม่สามารถลดความชื้นได้ทันที และการรักษาคุณภาพด้านความหอมของข้าวขาวดอกมะลิ ในภาพรวมผลของการศึกษาสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษา โดยพบว่า การชะลอการทำแห้งหรือลดความชื้นของข้าวเปลือกทำให้ปริมาณสาร 2AP ซึ่งเป็นสารสำคัญที่ให้ความหอมหลักของข้าวมีค่าเริ่มต้นต่ำกว่าข้าวเปลือกที่ทำแห้งทันที นอกจากนี้ปริมาณสาร 2AP ในข้าวเปลือกมีการลดลงจากค่าเริ่มต้นในระหว่างการเก็บรักษาและปริมาณสาร 2AP ของข้าวเปลือกเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงกว่า ทั้งนี้ปริมาณสาร 2AP ลดลงในอัตราเร็วที่สูงในช่วงแรกมีแนวโน้มคงที่และอยู่ในระดับที่ลดลงมาในเดือนที่ 1 จนถึงเดือนที่ 7 และลดลงในอัตราเร็วที่สูงภายหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 เดือน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในช่วงเดือนแรกและหลังการเก็บรักษา 8 เดือนสามารถทำนายได้ดีจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ประเภทจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และจัดเป็นความรู้ใหม่ที่ยังไม่มีการรายงานในประเด็นดังกล่าวนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอแนวคิดการสูญเสียสาร 2AP จากข้าวสารซึ่งเป็นผลจากกระบวนการหลายประการทั้งการระเหยของสาร 2AP ที่อยู่ในรูปของสารอิสระ (free form) จากข้าวสาร และ/หรือผลของเอนไซม์ที่ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยสาร 2AP จากไขมันในเมล็ดข้าว แนวคิดที่ได้นำเสนอดังกล่าวจะเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปเพื่อเข้าใจถึงกลไกเชิงลึกเพื่อชะลอการสูญเสียสาร 2AP ของข้าวเปลือกและข้าวสารต่อไป

การศึกษานี้ได้ศึกษาผลของการทำแห้งข้าวเปลือกต่อคุณภาพบางประการของข้าวสาร พบว่าผลของการทำแห้งไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความชื้น ความขาว เปอร์เซ็นต์การขัดสีหรือระดับการสีและคุณภาพเนื้อสัมผัส (ทั้งความแข็งและความเหนียว) แต่การชะลอการทำแห้งของข้าวเปลือกส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความขุ่นใสโดยทำให้ข้าวสารมีความขุ่นใสลดลงโดยเฉพาะในระหว่างการเก็บรักษา 6 เดือนแรก ผลการศึกษาดังกล่าวสนับสนุนความสำคัญของการลดความชื้นภายหลังการเก็บเกี่ยวเนื่องจากลักษณะความขุ่นใสของข้าวสารเป็นคุณภาพสำคัญหนึ่งของข้าวที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าและเป็นลักษณะคุณภาพ (quality attribute) ที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อข้าวของผู้บริโภค

จากผลการวิจัยทั้งหมดในการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกมีผลต่อปริมาณเริ่มต้นของปริมาณสาร 2AP และการทำแห้งล่าช้ายังส่งผลต่อความขุ่นใสของข้าวสาร ข้อมูลและความรู้ที่ได้จากการศึกษานี้จะสามารถช่วยสนับสนุนการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวข้องข้าวหอมมะลิต่อไป

6.2 ข้อเสนอแนะการวิจัย

6.2.1 ศึกษาการเปลี่ยนเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ในข้าวสารขัดขาวในระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากผู้ประกอบการบางรายเลือกเก็บรักษาข้าวขาวเพื่อการจำหน่าย โดยเก็บรักษาในปริมาณ 50 กิโลกรัมในถุงกระสอบพลาสติกสาน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ของข้าวขัดขาวในระหว่างการเก็บรักษาจึงควรมีการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการจัดการ

6.2.2 สืบเนื่องจากการเก็บข้าวสารขัดขาว ผู้ประกอบการบางรายได้นำข้าวมาขัดขาวก่อนการจัดจำหน่าย ดังนั้นผลของการขัดขาวต่อปริมาณสาร 2AP จึงควรได้รับการศึกษา อันจะเป็นแนวทางในการหาระดับของการขัดสีที่เหมาะสม (optimized milling degree) เพื่อรักษาปริมาณสาร 2AP ในข้าวขัดขาว

6.2.3 จากผลการศึกษาการทำนายปริมาณสาร 2AP ในข้าวเปลือกด้วยสมการจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับ 1 ซึ่งพบว่าสมการนี้สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2AP ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นควรมีการพัฒนาต่อเนื่องให้เป็นแอพพลิเคชันของโทรศัพท์เคลื่อนที่ (applications for mobile phone) เพื่อความสะดวกในการติดตามปริมาณสาร 2AP ในระหว่างการเก็บรักษา ข้อมูลจากแอพพลิเคชันจะช่วยในการวางแผนการจำหน่ายและระบายข้าวต่อไป

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. (2559). **การพัฒนาการผลิตข้าวใหม่ให้เป็นข้าวเก่า.** https://www.dip.go.th/files/Cluster/.6pdf. 1 พฤษภาคม, 2560

งามชื่น คงเสรี. **ข้าวและผลิตภัณฑ์ข้าว.** กรมวิชาการเกษตร: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2546.

_____. **คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย.** กรมวิชาการเกษตร: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2547.

จักรพงษ์ สมหนองหว้า. **ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพแวดล้อมและการจัดการที่มีผลต่อความหอมและคุณภาพการสีของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551.

ใจทิพย์ วานิชชัง, ผดุงศักดิ์ วานิชชัง และเพียงขวัญ วานิชชัง. "ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการขัดสีต่อคุณภาพการสีของข้าว", ใน **วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ฉบับพิเศษ การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5**. น.392-398. กรุงเทพฯ: ศูนย์ประชุมบางกอกคอนเวนชั่นเซ็นเตอร์ เซ็นทรัลเวิลด์ ปทุมวัน. 2556.

ชัยวัช โชวเจริญสุข. "อุตสาหกรรมข้าว", ใน **แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2562-64.** กรุงเทพฯ: วิจัยกรุงศรี, 2562.

นันทิยา พนมจันทร์ และคณะ. "ความแปรปรวนของลักษณะสัณฐานวิทยาในเมล็ดข้าวพันธุ์สังข์หยดจากภาคใต้ของประเทศไทย", **วารสารแก่นเกษตร**. 44(1): 83-94; มกราคม-มีนาคม, 2559

บริบูรณ์ สมฤทธิ์ และคณะ. **ขาวดอกมะลิ 105 สหสัมพันธ์ระหว่างความหอมกับอัตราปุ๋ย.** กรมวิชาการเกษตร: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2540.

ประกาศกระทรวงพาณิชย์. **ราชกิจจานุเบกษา.** เล่ม 133 ตอนพิเศษ 243 ง. น.5, 21 ตุลาคม, 2559.

ประสูติ สิทธิสรวง, ไพฑูรย์ อุไรรงค์ และ กิติยา กิจควรดี. "ความสูญเสียของข้าวภายหลังการผลิตในสถานีทดลองข้าว", ใน **การประชุมสมัชชาวิชาการสังคมศาสตร์เพื่อการวิจัยประจำปี 2526.** น.255-265. สถาบันวิจัยสังคม: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.

_____. "ความสูญเสียของเมล็ดพันธุ์ในระหว่างการเก็บรักษาในโรงเก็บสถานีทดลองข้าว", ใน **รายงานผลการวิจัยประจำปี 2528.** น.238. กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร, 2528.

พรทิพย์ ถาวงศ์, สุรพล ยศเทียม และชาลี ฐิตะฐาน. "ผลของการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์แบบปิดสนิทใน Super Bag ต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์", ใน **รายงานการประชุมวิชาการข้าวและธัญพืชเมืองหนาว เนื่องในโอกาสวันข้าวและชาวนาแห่งชาติ ครั้งที่ 2**. น.199-208. กรุงเทพฯ: กรมการข้าว, 2554.

พัสกร เจียตระกูล. **ถังเก็บอุณหภูมิต่ำสำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546.

รณชัย ช่างศรี และคณะ. "ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพข้าวหอมมะลิ", **วารสารวิชาการข้าว กรมการข้าว**. 7(1): 20-44; มกราคม-มิถุนายน, 2559.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

วาริช ศรีละออง, ณัฐชัย พงษ์ประเสริฐ และกรณ์กนก อายุสุข. "การประยุกต์ใช้ไขรำข้าวในการเคลือบผิวส้มเขียวหวาน", **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**. 44(2)(พิเศษ): 341-34; พฤษภาคม-สิงหาคม, 2556.

เวียงโขง วันสะหว่าง และคณะ. "ผลของการเก็บรักษาข้าวเปลือกในบรรจุภัณฑ์ อุณหภูมิ และระยะเวลาต่อคุณภาพของข้าวฮางงอก", **วารสารเกษตรพระจอมเกล้า**. 34(3): 73-85; กันยายน-ธันวาคม, 2559.

สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. (2561). "Rice export quantity and value: 2005", **สถิติที่สำคัญ.** http://www.thairiceexporters.or.th/statistic_.2015html. 25 พฤษภาคม, 2561.

สุภัทร หนูสวัสดิ์พิมล และคณะ. "วิจัยและพัฒนายุ้งโลหะเก็บรักษาข้าวเปลือก", ใน **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเกษตร.** น.155-170. นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2537.

สุภาวินี กะการดี, วีรเวทย์ อุทโธ และวิริยา พรมกอง. "การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับออกซิเจนของวัตถุดูดซับออกซิเจน และการ เปลี่ยนแปลงความสามารถต้านอนุมูลอิสระในผลิตภัณฑ์มะเขือเทศเชอรีอบแห้งใน บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ", ใน **การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13**. น.472-480. เชียงใหม่: โรงแรมอิมพีเรียลแม่ปิง, 2555

สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว. **ข้าวโภชนาการ**. กรุงเทพฯ: กรมการข้าว, 2552.

ศักดิ์ดา จงแก้ววัฒนา และคณะ. **โครงการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยสภาพแวดล้อมและกลยุทธการจัดการที่มีต่อคุณภาพข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้แนวทางการวิจัยเชิงระบบ RDG 4520008**. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2547.

อรอนงค์ นัยวิกุล. **เคมีทางธัญญาหาร.** กรุงเทพฯ: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2538.

อัญชลี ประเสริฐศักดิ์ และคณะ. **รายงานวิจัยการจัดการเพื่อรักษาคุณภาพ และความหอมของข้าวหอมมะลิในห่วงโซ่การผลิต (ปีที่1).** กรุงเทพฯ: กรมการข้าว, 2559.

Allameh, Alireza and Mohammad R. Alizadeh. "Evaluating rice losses in delayed rough rice drying", **International Journal of Agronomy and Plant Production**. 4(4): 799-804; February, 2013.

Arikit S., T. Yoshihashi and A. Vanavichit "Os2AP, the aromatic gene controlling the biosynthetic switch of 2-acetyl-1-pyrroline and gamma aminobutyric acid (gaba) in rice", In **BioAsia 2007.** p.162. Thailand: BIOTEC, 2007.

Barber, S. "Milled rice and changes during aging", In **Rice: Chemistry and Technology.** D. F. Houston Editor. p.215-256. St. Paul Minnesota: American Association Cereal Chemists Inc., 1972.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Baldacci, E. and G. Corbetta. "Ricerche sulla microflora delle cariossidi di riso dopo conservazione in magazzino e in condizioni sperimentali", **Il Riso**. 13: 79-88; January, 1964.

Bergman, C. J. and et al. "Rapid gas chromatographic 800 technique for quantifying 2-acetyl-1-pyrroline and hexanal in rice (*Oryza sativa*, L.)", **Cereal Chemistry**. 77(4): 454-458; July, 2000.

Bradbury, L. M. and et al. "The gene for fragrance in rice", **Plant Biotechnology Journal**. 3(3): 363-370; April, 2005.

Bradbury, L. M. and et al. "Inactivation of an aminoaldehyde dehydrogenase is responsible for fragrance in rice", **Plant Molecular Biology**. 68(4-5): 439-449; August, 2008.

Buttery, R.G. and et al. "Cooked rice aroma and 2-acetyl-1-pyrroline", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 31(4): 823-826; July, 1983.

Buttery R.G., L.C. Ling and T.R. Mon "Quantitative analysis of 2-acetyl-1-pyrroline in rice", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 34(1): 112-114; January, 1986.

Champagne, E. T. and et al. "Effects of drain and harvest dates on rice sensory and physicochemical properties", **Cereal Chemistry**. 82(4): 369-374; June, 2005.

Champagne, E.T. "Rice aroma and flavor: A literature review", **Cereal Chemistry**. 85(4): 445-454; July, 2008.

Chrastil, J. "Chemical and physicochemical changes of rice during storage at different temperatures", **Journal of Cereal Science.** 11(1): 71-85; January, 1990.

Earle, R. and M. Earle. **Fundamentals of Food Reaction Technology**. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2003.

Espinosa-Mendoza, R. E. and et al. "Morphostructural characterization of rice grain (*Oryza sativa* L.) variety Morelos A-98 during filling stages", **The Scientific World Journal**. 2012: 1-9; May, 2012.

Funazukuri, T. and S. Ozawa. "Effects of Pretreatment with Ionic Liquids on Cellulose Hydrolysis under Hydrothermal Conditions", **Molecules**. 24(19): 3572; October, 2019.

Gay, F and et al. "Effect of salinity on yield and 2-acetyl-1-pyrroline content in the grains of three fragrant rice cultivars (*Oryza sativa* L.) in Camargue (France)", **Field Crops Research**. 117(1): 154-160; May, 2010.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Goufo, P and et al. "Some factors affecting the concentration of the aroma compound 2-acetyl-1-pyrroline in two fragrant rice cultivars grown in South China", **Frontiers of Agriculture in China**. 4(1): 1-9; January, 2010.

Hodges, D. Mark and Peter MA Toivonen. "Quality of fresh-cut fruit and vegetables as affected by exposure to abiotic stress", **Postharvest Biology and Technology**. 48(2): 155-162; May, 2008.

Juliano, B.O. **Rice: Chemistry and Technology.** Minnesota: American Association Cereal Chemists Inc., 1985.

Keawpeng, I. and K. Venkatachalam. "Effect of aging on changes in rice physical qualities", **International Food Research Journal**. 22(6): 210-2187; April, 2015.

Kongkiattikajorn, J. "Effect of Storage Time and Temperature on Volatile Aroma Compounds and Physicochemical Properties of Rice", **Kasetsart Journal: Natural Science**. 42(5)(Supplement): 111-117, 2008.

Kumar S., S.K. Gupta and P.K. Sharma. "Self-emulsifying drug delivery systems (SEDDS) for oral delivery of lipid based formulations-A review", **African Journal of Basic & Applied Science**. 4(1): 7-11; January, 2012.

Labuza, T.P. **Shelf-Life Dating of Foods**. Minnesota: Food & Nutrition Press, Inc., 1982.

Mahatheeranont S., S. Keawsa-ard and K. Dumri. "Quantification of the rice aroma compound, 2-acetyl-1-pyrroline, in uncooked Khao Dawk Mali 105 brown rice", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 49(2): 773-779; December, 2001.

Maraval, I and et al. "Quantification of 2-acetyl-1-pyrroline in rice by stable isotope dilution assay through headspace solid-phase microextraction coupled to gas chromatography-tandem mass spectrometry", **Analytica Chimica Acta**. 675(2):148-155; 24 August, 2010.

Marshall, W.E. and J.I. Wadsworth. **Rice Science and Technology.** New York: Marcel Dekker, Inc., 1994.

Mathure, S.V. and et al. "Comparative quantitative analysis of headspace volatiles and their association with BADH2 marker in non-basmati scented, basmati and non-scented rice (*Oryza sativa* L.) cultivars of India. **Food Chemistry**. 142: 383-391; 1 January, 2014.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Mettananda K.A., S.L. Weerasena and K.H.T.M. Perera. "Effects of pre-harvest grain discolouration on seed quality of rice (*Oryza sativa* L.)", In **Proceedings of the Annual Symposium of the Department of Agriculture**. p.155-165. Peradeniya Sri Lanka: Sri Lanka Department of Agriculture, 2000.

Misra J.K., E.B. Jergon and T.W. Mew. "Organisms causing rice seed discolouration and possible effect on germinability", **Rice Seed Health Newsletter IRRI**. 2(1): 9, 1990.

Ou, S.H. **Rice diseases**. Great Britain: The Cambrian News (Aberystwyth) Ltd., 1985.

Papademetriou, M.K. "Rice production in the Asia-pacific region issues and perspectives", In **Bridging the Rice Yield Gap in the Asia-Pacific Region**. p.4-25. Bangkok: FAO RAP Publication, 2000.

Park J.K., S.S. Kim and W.O. Kim. "Effect of milling ratio on sensory properties of cooked rice and on physicochemical properties of milled and cooked rice", **Cereal Chemistry**. 78(2): 151-156; 9 March, 2001.

Park, C.E. and et al. "Changes in physicochemical characteristics of rice during storage at different temperatures", **Journal of Stored Products Research**. 48: 25-29; January, 2012.

Phillips S., R. Mitfa and A. Wallbridge. "Rice yellowing during drying delays", **Journal of Stored Products Research**. 25(3): 155-164; July, 1989.

Primo E., C. Benedito de Berber and S. Barber. "The chemistry of rice aging", In **Proceeding 5th World Cereal and Bread Congress**. p.231-245. Lancaster: Dresden Publishing Company Inc., 1970.

Querijero M.M., E.G. Sison and E.P. Sevilla. "Preliminary study of fungi associated with discoloured rice seed (*Oryza sativa* L.) and its effect on germination", In **24th Annual Scientific Meeting of the Pest Management council of the Philippines**. p.63-65. Laguna: College Inc, 1993.

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

Rice Department. **Khao Dawk Mali 105.** Bangkok: Bureau of Rice Research and Development, 2010.

San, N and B, Thanh. "Some results of research work on drying of paddy by the aeration method in Vietnam", In **FAO/UNDP Regional Workshop on Rice Post-Harvest Technology**. p.82-88. Manila: FAO Publication, 1984.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Schieberle, P. "Quantitation of Important Roast-Smelling Odorants in Popcorn by Stable Isotope Dilution Assays and Model Studies on Flavor Formation during Popping", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 43(9): 2442-2448; 1 September, 1995.

Sriseadka, T., S. Wongpornchai and P. Kitsawatpaiboon. "Rapid method for quantitative analysis of the aroma impact compound, 2-acetyl-1-pyrroline, in fragrant rice using automated headspace gas chromatography", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 54(21): 8183-8189; 22 September, 2006.

Swamy, Y.M.I., C.M. Sowbhagya and K.R. Bhattacharya. "Changes in the physicochemical properties of rice with aging", **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 29(7): 627-639; July, 1978.

Tananuwong, K. and S. Lertsiri. "Changes in volatile aroma compounds of organic fragrant rice during storage under different conditions", **Journal of the Science of Food and Agricultural**. 90(10): 1596-1590; 18 June, 2010.

Tanchotikul, U. and Hsieh, T.C.Y. "An improved method for quantification of 2-acetyl-1-pyrroline a popcorn-like aroma, in aromatic rice by high-resolution gas chromatography/massspectrometry/selected ion monitoring", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 39(5): 944-947; 1 May, 1991.

Tava, A., and Bocchi, S. "Aroma of cooked rice (*Oryza sativa*): Comparison between commercial Basmati and Italina Line B5-3", **Cereal Chemistry**. 76(4): 526-529; 15 July, 1999.

Trigo-Stockli, D.M. and J.R. Pedersen. "Effect of rice storage conditions on the quality of milled rice", In **Proceedings of the 6th International Working Conference on Stored-Product Protection**. p.711-706, Canberra: Wallingford CAB International, 1994.

Toivonen, P.M. and D.M. Hodges. "Abiotic stress in harvested fruits and vegetables", In. **Abiotic Stress in Plants-Mechanisms and Adaptations**. Shanker, A.K. and Venkateswarlu, B. Editors. p.39-58. Croatia: InTech, 2011.

Tulyathan, V. and B. Leeharatanaluk. "Changes in quality of rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105 during storage", **Journal of Food Biochemistry**. 31(3): 415-425; 6 June, 2007.

Villareal R.M. and et al. "Changes in physicochemical properties of rice during storage", **Starch-Stärke**. 28(3): 88-94; May, 1976.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Wakte, K and et al. "Thirty-three years of 2-acetyl-1-pyrroline, a principal basmati aroma compound in scented rice (*Oryza sativa* L.): a status review", **Journal of the Science of Food and Agriculture.** 97(2): 384-395; July, 2016.

Widjaja R., J. Craske and M. Wootton. "Changes in volatile components of paddy, brown and white fragrant rice during storage", **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 71(2): 218-224; June, 1996.

Windham, W.R. and et al. "Prediction of Cooked Rice Texture Quality Using Near-Infrared Reflectance Analysis of Whole-Grain Milled Samples", **Cereal Chemistry.** 74(5): 626-632; 15 September, 1997.

Wongpornchai S., T. Sriseadka and S. Choonvisase. "Identification and quantitation of the rice aroma compound, 2-acetyl-1-pyrroline, in bread flowers (*Vallaris glabra* Ktze)", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 51(2): 457-462; 11 December, 2003.

Wongpornchai, S and et al. "Effects of drying methods and storage time on the aroma and milling quality of rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105", **Food Chemistry**. 87(3): 407-414; September, 2004.

Yajima, I and et al. "Volatile flavor components of cooked rice", **Agricultural and Biological Chemistry.** 42(6): 1229-1233; January, 1978.

Yang, S and et al. "Role of soil total nitrogen in aroma synthesis of traditional regional aromatic rice in china", **Field Crops Research**. 125: 151-160; January, 2012.

Yang, C.C. and M.S. Chinnan. "Modeling the effect of O_2 and CO_2 on respiration and quality of stored tomatoes" **Transactions of the ASAE**. 31(3): 920–925; May, 1988.

Yasumatsu K., Moritaka, S. and Kakinuma, T. "Effect of the Change During Storage in Lipid Composition of Rice on its Amylogram", **Agricultural and Biological Chemistry**. 28(5): 265-272; August, 1964.

Yoshihashi T., N.T.T. Huong and H. Inatomi. "Precursors of 2-acetyl-1-pyrroline, a potent flavor compound of an aromatic rice variety", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 50(7): 2001-2004; February, 2002

Yoshihashi T., T.T.H. Nguyen and N. Kabaki. "Area dependency of 2 acetyl-1-pyrroline content in an aromatic rice (*Oryza sativa* L.) variety Khao Dawk Mali 105", **JARQ (Japan)**. 38(2): 105-109; April, 2004

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Yoshihashi, T and et al. "Effect of storage conditions on 2-acetyl-1-pyrroline in aromatic rice variety, Khao Dawk Mali 105", **Journal of Food Science**. 70(1): 34-37; May, 2005.

ภาคผนวก

Agricultural Sci. J. 50 : 3 (Suppl.) : 195-198 (2019) ว. วิทย. กษ. 50 : 3 (พิเศษ) : 195-198 (2562)

จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2-Acetyl-1-Pyrroline (2-AP) ในข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งมีการชะลอการลดความชื้นหลังการเก็บเกี่ยว

Kinetic Changes of 2-Acetyl-1-Pyrroline (2-AP) Contents of Khao Dawk Mali 105 Affected by Delayed Moisture Reduction after Harvested

สุพรรณิการ์ ปักเคธาติ[1] วีรเวทย์ อุทโธ[2] กฤตยา อุทโธ[3] กฤษณา สุดทะสาร[4] และนิตยา ภูงาม[5]
Supannikar Pakkethati[1], Weerawate Utto[2], Grittaya Utto[3] Grissana Sudtasarn[4] and Nittaya Phungam[5]

Abstract

This research was conducted to study kinetic changes of 2-Acetyl-1-Pyrroline (2-AP) contents of Khao Dawk Mali 105 paddy rice, of which removing of moisture content were delayed after harvested (DEL-paddy rice). Such delay was considered typical among Thai farmers who had to queue up and to wait for selling their paddy rice at rice mills. In the study, Khao Dawk Mali 105 paddy rice, harvested in 2017, was delayed its moisture removing for 48 h thereafter was sun-drying until it was 14% (w/w dried basis). The rice was filled 20 kg a sack, and later kept at 10, 24 and 27 °C for 3 months. The 2-AP contents of the DEL-paddy rice were determined periodically and were compared to those of paddy rice of which was immediately removed after harvesting (IMM-paddy rice). The results showed that 2-AP content of the DEL-paddy rice averagely was 0.78-fold lower than that of the IMM-paddy rice and all types of paddy rice decreased. The reductions characteristically were first-order reactions. Extents of the 2-AP reductions increased as the storage temperatures were elevated. The kinetics of the 2-AP reductions were reasonably predicated by the first-order fractional conversion model of which root mean square of error (RMSE) and R^2 values was in a range of 0.16-0.29 and 0.88-0.94, respectively.

Keywords: 2-Acetyl-1-Pyrroline (2-AP), Khao Dawk Mali 105, first-order kinetic reaction

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ศึกษาจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาร 2-AP ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ที่ล่าช้าในการลดความชื้นภายหลังการเก็บเกี่ยว (DEL-paddy rice) ความล่าช้าดังกล่าวเป็นเรื่องทั่วไปของชาวนาไทยที่ต้องเข้าคิวเพื่อรอการจำหน่ายข้าวเปลือกที่โรงสี การศึกษานี้ใช้ข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ฤดูปลูกปี 2560 โดยชะลอการลดความชื้นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นตากให้เมล็ดมีความชื้นเท่ากับ 14% (w/w dried basis) และบรรจุลงในกระสอบ ๆ ละ 20 กิโลกรัม เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10, 24 และ 27 °C เป็นเวลา 3 เดือน ทำการวิเคราะห์ปริมาณสาร 2-AP ของข้าวเปลือกในช่วงเวลาต่างๆ พร้อมกับเปรียบเทียบกับปริมาณสาร 2-AP ของข้าวเปลือกที่ลดความชื้นทันทีภายหลังการเก็บเกี่ยว (IMM-paddy rice) ผลการศึกษาพบว่าปริมาณสาร 2-AP เริ่มต้นของข้าวเปลือก DEL-paddy rice ต่ำกว่าของข้าวเปลือก IMM-paddy rice เท่ากับ 0.78 เท่า ปริมาณสาร 2-AP ในข้าวเปลือกลดลงจากค่าเริ่มต้น และมีลักษณะของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และเกิดขึ้นได้มากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาร 2-AP ทำนายได้ดีด้วยสมการประเภท first-order fractional conversion model มีค่า RMSE และ R^2 อยู่ในช่วง 0.16-0.29 และ 0.88-0.94 ตามลำดับ

คำสำคัญ: สาร 2-Acetyl-1-Pyrroline (2-AP) ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ปฏิกิริยาอันดับ 1

---

[1] กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900
[1] Division of Rice Research and Development, Rice Department, Chatuchak, Bangkok 10900
[2] คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190
[2] Faculty of Agriculture, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani 34190
[3] คณะบริหารศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190
[3] Faculty of Management Science, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani 34190
[4] ศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี อำเภอเมือง อุบลราชธานี 34000
[4] Ubon Rachathani Rice Research Center, Mueang, Ubon Ratchathani 34000
[5] สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์
[5] Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus, Surin

คำนำ

ข้าวหอมมะลิไทย เป็นที่นิยมทั้งในประเทศและต่างประเทศ ประเทศไทยส่งออกข้าวหอมมะลิสู่ตลาดโลก โดยเฉลี่ยปีละ 25 ล้านตันข้าวเปลือก (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2561) ข้าวหอมมะลิมีคุณสมบัติโดดเด่นด้าน เนื้อสัมผัสที่เหนียวนุ่ม เมล็ดยาว และมีกลิ่นหอม ฤดูการเก็บเกี่ยวข้าวหอมมะลิจะเริ่มขึ้นในช่วงปลายเดือนตุลาคมถึงต้นเดือนธันวาคม ด้วยวิธีการเก็บเกี่ยวที่รวดเร็วโดยใช้เครื่องเกี่ยวนวด จึงทำให้ปริมาณข้าวหอมมะลิออกสู่ตลาดเป็นปริมาณมากในช่วงต้นฤดูเก็บเกี่ยว ปัจจุบัน เกษตรกรนิยมขายข้าวเปลือกสดให้กับโรงสีหรือท่าข้าว ทำให้ภาระการลดความชื้นข้าวเปลือกตกอยู่กับผู้ประกอบการโรงสี หากผู้ประกอบการมีเครื่องอบลดความชื้นข้าวเปลือกจะได้รับการลดความชื้นในระยะเวลาอันเหมาะสม แต่ปัญหาการลดความชื้นล่าช้าสามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ข้าวมีจำนวนมาก จำเป็นต้องกองข้าวและต่อคิวเข้าเครื่องอบ ผู้ประกอบการได้ตั้งข้อสังเกตว่าการชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกอาจส่งผลต่อคุณภาพของข้าวสาร ปัญหาการจัดการข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญ คือ การจัดการความชื้นของข้าวเปลือก อุณหภูมิ และระยะเวลาการเก็บรักษา โดยปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อคุณภาพของข้าวสาร (Chrastil, 1990; Juliano, 1985) คุณสมบัติทางประสาทสัมผัสโดยเฉพาะด้านกลิ่นหอม และรสชาติของข้าวเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค (Champagne, 2008) สำหรับในข้าวขาวดอกมะลิ 105 Mahatheeranont *et al.* (2001) พบว่า สารระเหย 2-Acetyl-1-Pyrroline (2-AP) เป็นสารสำคัญที่มีบทบาทในการให้กลิ่นของข้าวหอม การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาร 2-AP ของข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ที่ล่าช้าในการลดความชื้นภายหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อประโยชน์ในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การจัดการข้าวเปลือกและการเก็บรักษา ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในฤดูนาปี พ.ศ. 2560 จากจังหวัดอุบลราชธานี ดำเนินการเก็บเกี่ยวในวันและแปลงนาเดียวกัน (เดือนพฤศจิกายน 2560) โดยแบ่งข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวออกเป็น 2 ส่วนที่เท่ากัน ข้าวเปลือกส่วนที่ 1 นำมาลดความชื้นข้าวเปลือกทันที โดยวิธีตากแดด (Immediately moisture reduced paddy rice, IMM-paddy rice) กระทั่งมีความชื้นต่ำกว่า 14 เปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก) และนำมาเก็บในถุงพลาสติกสาน (50x75 เซนติเมตร) จำนวน 12 ถุงๆ ละ 20 กิโลกรัม ข้าวเปลือกส่วนที่ 2 นำมาเก็บในถุงพลาสติกสาน (50x75 เซนติเมตร) วางในที่ร่ม เป็นเวลา 2 วัน (Delayed moisture reduced paddy rice, DEL-paddy rice) ก่อนนำมาลดความชื้นข้าวเปลือกกระทั่งมีความชื้นต่ำกว่า 14 เปอร์เซนต์ และเก็บในถุงพลาสติกสาน (50x75 เซนติเมตร) จำนวน 12 ถุงๆ ละ 20 กิโลกรัม ภายหลังจากการบรรจุข้าวเปลือกในกระสอบได้นำมาเก็บรักษาในห้องควบคุมอุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 10 24 และ 27°C (อุณหภูมิละ 4 กระสอบ) เก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน **การวิเคราะห์ปริมาณสาร2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) ของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา** สุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกจากทุกสิ่งทดลองระหว่างการเก็บรักษาในสัปดาห์ที่ 0 1 2 3 4 5 8 10 และ 12 นำตัวอย่างข้าวเปลือกมากะเทาะ ขัดสี และบด เพื่อวิเคราะห์สาร 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) ด้วยวิธี Headspace-gas chromatography ตามวิธีของ Sriseadka *et al.* (2006) **การวิเคราะห์ผลทดลอง** การวิจัยนี้ได้วางแผนการทดลองแบบ split-split plot (ปัจจัย คือ สภาวะการทำแห้งข้าวเปลือก ระยะเวลาการเก็บรักษา และ อุณหภูมิการเก็บรักษา) จำนวน 4 ซ้ำ (replicates) ผลจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาร 2-AP ในระหว่างการเก็บรักษาได้นำมาศึกษาจลนพลศาสตร์ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ kinetic model ประเภท first-order fractional conversion model (Eq. 1) ความแม่นยำของการทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของสมการจะใช้การประเมินจากค่า root mean square of error (RMSE) ซึ่งควรมีค่าที่ต่ำกว่า 2 (Yang and Chinnan, 1998) และค่า R^2 ซึ่งควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ในการศึกษาเบื้องต้นได้ทำการพิจารณาความเหมาะสมของลำดับปฏิกิริยาเคมีของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2-AP พบว่ามีลักษณะของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 (ไม่แสดงข้อมูล) ทั้งนี้ปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เป็นลักษณะทั่วไปของปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพและกระบวนการทางชีวเคมีทั่วไปในผลผลิตเกษตรและผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูป (Robertson, 2013)

$$\frac{C_{2AP,t}-C_{2AP,inf}}{C_{2AP,0}-C_{2AP,inf}} = \exp(-k_{2AP}t) \qquad \text{(Eq. 1)}$$

โดยที่ $C_{2AP,t}$ คือ ปริมาณของสาร 2-AP ที่เวลาใดๆ (mg/kg)

$C_{2AP,0}$ คือ ปริมาณของสาร 2-AP เริ่มต้น (mg/kg)

$C_{2AP,inf}$ คือ ปริมาณของสาร 2-AP ที่เวลา infinite ในที่นี้กำหนดเป็นเวลาสิ้นสุดของการเก็บรักษา (mg/kg)

k_{2AP}คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2-AP (ต่อสัปดาห์)

t คือ เวลาการเก็บรักษา (สัปดาห์)

ผล

ปริมาณสาร 2-AP เริ่มต้นของข้าวเปลือก IMM-paddy rice มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.31 mg/kg ในขณะที่ปริมาณสาร 2-AP เริ่มต้นของข้าวเปลือก DEL-paddy rice มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.59 mg/kg ซึ่งต่ำกว่าประมาณ 0.78 เท่า ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน พบว่า ปริมาณสาร 2-AP ของข้าวเปลือกทั้ง 2 ประเภท มีค่าลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น (75-80% จากค่าเริ่มต้น) การลดลงเกิดขึ้นในอัตราเร็วในช่วง 4 สัปดาห์แรกของการเก็บรักษา จากนั้นปริมาณสาร 2-AP มีแนวโน้มคงที่ในระหว่างการเก็บรักษา เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ปริมาณ 2-AP ของข้าวเปลือกที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าข้าวเปลือกซึ่งเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงภายหลังจากการสิ้นสุดระยะเวลาเก็บรักษา (Figure 1) อย่างไรก็ตาม ปริมาณสาร 2-AP ของข้าวเปลือกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 24 และ 27°C ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อทำการทำนายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาร 2-AP ในสภาวะการเก็บรักษาอุณหภูมิต่างๆ ด้วยสมการ Eq. 1 พบว่า สามารถทำนายแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี โดยมีค่า RMSE และ R^2 อยู่ในช่วง 0.16-0.29 และ 0.88-0.94 ตามลำดับ (Table 1) ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2-AP (k_{2AP}) ของข้าวเปลือก IMM-paddy rice ซึ่งได้จากการทำนายด้วย Eq. 1 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 10°C เป็น 24°C แต่ค่าดังกล่าวไม่แตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิ 24 และ 27°C ในกรณีของข้าวเปลือก DEL-paddy rice พบว่าค่า k_{2AP} ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ในช่วง 4 สัปดาห์แรก พบการเบี่ยงเบนที่ชัดเจนของปริมาณสาร 2-AP ที่ได้จากการทำนายด้วย Eq. 1 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์

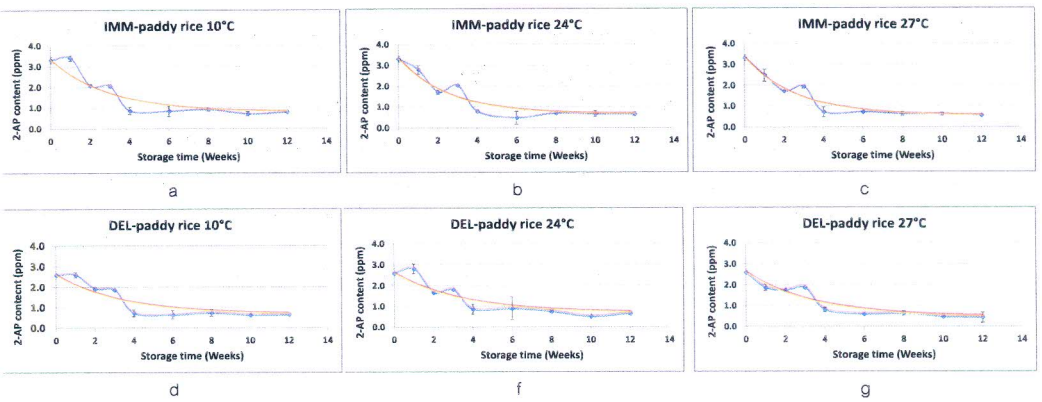


Figure 1 Changes of 2-AP contents empirically measured (dot-and-line symbol) and those predicted by the first-order fractional conversion model (Eq. 1). Figure 1a-c represent 2-AP contents of IMM-paddy rice and figure 1d-f represent 2-AP contents of DEL-paddy rice. The storage temperatures were 10, 24 and 27°C in respect to the alphabet order (i.e. a-c as well as d-f).

Table 1 Coefficients of Eq. (1) utilized to predict 2-AP contents as well as values of RMSE and R^2

Temperatures	k_{2AP}		RMSE		R^2	
	IMM-paddy rice	DEL-paddy rice	IMM-paddy rice	DEL-paddy rice	IMM-paddy rice	DEL-paddy rice
10°C	0.34	0.29	0.26	0.22	0.89	0.88
24°C	0.39	0.29	0.29	0.22	0.92	0.89
27°C	0.39	0.29	0.29	0.16	0.94	0.91

วิจารณ์ผลการทดลอง

ปริมาณสาร 2-AP เริ่มต้นของข้าวเปลือก DEL-paddy rice ต่ำกว่าของข้าวเปลือก IMM-paddy rice อธิบายได้ว่าในระหว่าง 48 ชั่วโมงที่ข้าวเปลือกสดภายหลังการเก็บเกี่ยว (ความชื้นเริ่มต้น 25% w.b.) ซึ่งอยู่ในระหว่างการรอเพื่อลดความชื้น มีการลดลงของปริมาณสาร 2-AP งามชื่น (2546) รายงานว่าข้าวเปลือกที่มีความชื้นที่สูงเกิดการเสื่อมคุณภาพได้เร็ว เนื่องจากเมล็ดมีอัตราการหายใจสูง ส่งผลให้เกิดความร้อนและเร่งการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี นำไปสู่การเร่งการเสื่อมคุณภาพ การลดลงของปริมาณสาร 2-AP เป็นผลจากหลายกลไก เช่น การสูญเสียโครงสร้างของ 2-AP (structural degradation) การระเหยของสาร 2-AP ซึ่งเป็นสารระเหยได้ง่าย (Widjaja *et al.*, 1996) หรือการสูญเสียจากการทำงานของเอนไซม์ (Yoshihashi

et al., 2005) เมื่อพิจารณาการลดลงของปริมาณสาร 2-AP ซึ่งอาจเป็นผลจากกลไกต่างๆ พบว่า เกิดขึ้นด้วยอัตราที่สูงในช่วง 4 สัปดาห์แรกของการเก็บรักษาส่งผลให้เกิดการลดลงของปริมาณสาร 2-AP เกิดขึ้นอย่างมาก ภายหลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในอัตราที่ต่ำทำให้ปริมาณสาร 2-AP เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือมีแนวโน้มที่คงที่ อัตราของการเปลี่ยนแปลงในสองช่วงที่ต่างกันนั้นเกี่ยวข้องกับปริมาณสาร 2-AP ที่หลงเหลือจากการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ปริมาณสาร 2-AP ในช่วงแรกของการเก็บรักษามีปริมาณที่สูงส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้ในอัตราที่สูง แต่เมื่อปริมาณ 2-AP เหลือในระดับที่ต่ำส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในอัตราที่ต่ำ ทั้งนี้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับปริมาณสารที่หลงเหลือดังกล่าวเป็นลักษณะโดยทั่วไปของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีอันดับที่ 1 (Robertson, 2013) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาร 2-AP จึงทำนายได้ดีด้วยสมการ first-order fractional conversion (Eq. 1)

ค่า k_{2AP} ซึ่งเป็นค่าที่แสดงอัตราการลดลงของปริมาณ 2-AP พบว่า ข้าวเปลือก IMM-paddy rice มีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการเก็บรักษา สอดคล้องกับ Juliano (1985) ที่รายงานว่าเมล็ดข้าวสารที่ผลิตจากข้าวเปลือกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35°C มีการสูญเสียสาร 2-AP มากกว่าข้าวสารที่ผลิตจากข้าวเปลือกเก็บรักษาที่ 2 และ 20°C อย่างไรก็ตามค่า k_{2AP} ที่อุณหภูมิ 24 และ 27°C ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิน้อย ทั้งนี้อุณหภูมิ 27°C เป็นผลของการวางแผนเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องแต่อุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงเดือน ธันวาคม-กุมภาพันธ์นั้นต่ำกว่า 35°C ผู้วิจัยจะได้ทำการศึกษาต่อไปที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะที่ค่า k_{2AP} ของข้าวเปลือก DEL-paddy rice ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และอาจเป็นผลจากปริมาณเริ่มต้นของสาร 2-AP ที่มีอยู่ในปริมาณที่ต่ำ ดังนั้นอัตราการลดลงจึงเกิดขึ้นได้น้อย ผลการศึกษาดังกล่าวสนับสนุนลักษณะของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 แต่ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนไม่ชัดเจน

สรุปผลการทดลอง

ปริมาณสาร 2-AP เริ่มต้นของข้าวเปลือกที่ลดความชื้นล่าช้าต่ำกว่าของข้าวเปลือกที่ลดความชื้นทันที ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาร 2-AP ในข้าวทั้งสองประเภทแสดงให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงกับปริมาณสาร 2-AP ในข้าวเปลือกซึ่งสามารถทำนายได้ด้วยสมการ first-order fractional conversion model ในขณะที่ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเก็บรักษาชัดเจนในกลุ่มข้าวเปลือกลดความชื้นทันที

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว และห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนในเรื่องของสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ทำการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

งามชื่น คงเสรี. 2546. ข้าวและผลิตภัณฑ์ข้าว. กรมวิชาการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 167 หน้า.

พัสกร เจียตระกูล, เมธินี เห่วซึ่งเจริญ และศุภศักดิ์ ลิมปิติ. 2546. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 34 (4-6): 149-152.

สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. 2561. ผลผลิตข้าว: เนื้อที่เพาะปลูก ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ของข้าวนาปี และนาปรัง ปี 2556-2561. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.thairiceexporters.or.th/production.htm. (20 พฤษภาคม 2561).

Champagne, E.T. 2008. Rice aroma and flavor: A literature review. Cereal Chemistry Journal 85: 445-454.

Chrastil, J. 1990. Chemical and physicochemical changes of rice during storage at different temperatures. Journal of Cereal Science 11: 71-85.

Juliano, B.O. 1985. Rice: Chemistry and technology. American Association Cereal Chemists Inc., St. Paul, Minnesota. 480p.

Mahatheeranont, S., S. Keawsa-ard and K. Dumri. 2001. Quantification of the rice aroma compound, 2-acetyl-1-pyrroline, in uncooked khao dawk mali 105 brown rice. Journal of agricultural and food chemistry 49: 773-779.

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

Sriseadka, T., S. Wongpornchai and P. Kitsawatpaiboon. 2006. Rapid method for quantitative analysis of the aroma impact compound, 2-acetyl-1-pyrroline, in fragrant rice using automated headspace gas chromatography. Journal of agricultural and food chemistry 54: 8183-8189.

Widjaja, R., J. Craske and M. Wootton. 1996. Changes in volatile components of paddy, brown and white fragrant rice during storage. Journal of the science of food and agriculture 71: 218-224.

Yang, C.C. and M.S. Chinnan. 1988. Modeling the effect of O_2 and CO_2 on respiration and quality of stored tomatoes. Trans. ASAE 31: 920–925.

Yoshihashi, T., T.T. Nguyen, W.Surojanametakul, P. Tungtrakul and W. Varanyanond. 2005. Effect of storage conditions on 2-acetyl-1-pyrroline in aromatic rice variety, Khao Dawk Mali 105.Journal of Food Science 70(1):34-37.

Agricultural Sci. J. 49 : 4 (Suppl.) : 267-270 (2018) ว. วิทย. กษ. 49 : 4 (พิเศษ) : 267-270 (2561)

ผลของการชะลอการลดความชื้นในข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ต่อคุณภาพข้าวขัดขาว ในระหว่างการเก็บรักษา

Effects of Delaying Moisture Reductions of KDML105 Paddy Rice on Milled Rice Qualities During Storage

สุพรรณิการ์ ปักเคธาติ[1] วีรเวทย์ อุทโธ[2] กฤตยา อุทโธ[3] และกฤษณา สุดทะสาร[4]
Supannikar Pakkethati[1], Weerawate Utto[2], Grittaya Utto[3] and Grissana Sudtasarn[4]

Abstract

During rice harvesting seasons, subsequently delays in moisture reduction because the paddy rice was packaged in woven plastic sacks for transportation while waiting in queues to sell at the mills, this was main reason causing such delays. This research was conducted to study effects of delaying moisture reductions of harvested paddy rice and storage conditions on milled rice qualities. Khoa Dawk Mali 105 paddy rice, harvested in 2016 season, was delayed its moisture reduction for 48 h thereafter was sun-dried until its moisture content was 14% (w.b). The rice was filled 20 kg a sack, and later kept at 10, 25 and 30°C for 12 months. Physical qualities of the paddy rice were monthly investigated and were compared to those which its moisture content was immediately reduced (control). Experimental results showed that moisture contents of the paddy rice from all treatments were slightly changed and no differences among them during storage. Whiteness and milling degree values of milled rice continuously decreased but there were no significances between the moisture reduction methods. Transparency values of milled rice from the control were significantly higher than those from delaying moisture reduced milled rice during 6 months ($p<0.05$). However, there were no apparent effects of the temperatures on changes in the transparency values. Hardness values of cooked milled rice slightly increased, whilst stickiness values decreased during storage. However, there were no significant differences among treatments for those qualities of the cooked rice.

Keywords: Khoa Dawk Mali 105, delaying moisture reduction, milled rice qualities

บทคัดย่อ

ในฤดูการเก็บเกี่ยวเกษตรกรนิยมนำข้าวเปลือกสดไปขายให้โรงสี ทำให้ข้าวเปลือกไม่ได้รับการลดความชื้นทันที เนื่องจากข้าวเปลือกบรรจุในถุงกระสอบพลาสติกสานเพื่อการขนส่งและรอขายข้าวให้โรงสี จึงเป็นสาเหตุชะลอการลดความชื้นของข้าวเปลือก งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการชะลอการลดความชื้นข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวและสภาวะการเก็บรักษาต่อคุณภาพข้าวขัดขาว โดยทำการชะลอการลดความชื้นข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 เก็บเกี่ยวในฤดูปลูกปี 2559 เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และตากแห้งข้าวเปลือกจนได้ความชื้นเท่ากับ 14 เปอร์เซนต์ (ฐานเปียก) บรรจุลงในถุงกระสอบละ 20 กิโลกรัม เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 25 และ 30°C เป็นระยะเวลา 12 เดือน ดำเนินการตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพทุกเดือนพร้อมกับเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกซึ่งทำการลดความชื้นทันทีภายหลังการเก็บเกี่ยว ผลการศึกษาแสดงให้ทราบว่า ความชื้นข้าวเปลือกในทุกสิ่งทดลองมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยระหว่างการเก็บรักษา ความขาวและเปอร์เซนต์การขัดสีของข้าวสารมีค่าลดลงเมื่อเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างข้าวสารที่ได้จากวิธีลดความชื้นทั้งสองแบบ ความขุ่นใสของข้าวสารที่ได้จากข้าวเปลือกซึ่งลดความชื้นทันที มีค่ามากกว่าข้าวสารที่ได้จากข้าวเปลือกที่ลดความชื้นล่าช้าในช่วงการเก็บรักษา 6 เดือนแรก ($p<0.05$) ทั้งนี้อุณหภูมิไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงความขุ่นใส ค่าความแข็งของข้าวสารหุงสุกที่ได้จากข้าวเปลือกทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ค่าความเหนียวของข้าวหุงสุกมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามพบว่าไม่มีความแตกต่างกันระหว่างสิ่งทดลองต่อสำหรับการทดสอบข้าวหุงสุก

คำสำคัญ: ขาวดอกมะลิ 105, ความล่าช้าในการลดความชื้น, คุณภาพข้าวสารขัดขาว

---

[1] กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900
[1] Division of Rice Research and Development, Rice Department, Chatuchak, Bangkok 10900
[2] คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190
[2] Faculty of Agriculture, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani 34190
[3] คณะบริหารศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190
[3] Faculty of Management Science, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani 34190
[4] ศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี อำเภอเมือง อุบลราชธานี 34000
[4] Ubon Rachathani Rice Research Center, Mueang, Ubon Ratchathani 34000

คำนำ

ประเทศไทยส่งออกข้าวหอมมะลิสู่ตลาดโลก โดยเฉลี่ยปีละ 25 ล้านตันข้าวเปลือก (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2561) ข้าวของประเทศไทยมีคุณสมบัติโดดเด่นด้าน เนื้อสัมผัสที่เหนียวนุ่ม เมล็ดยาว และมีกลิ่นหอม อย่างไรก็ตามจากข้อมูลที่ดำเนินการเก็บรวบรวมโดยกองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว (ข้อมูลเชิงสำรวจ แบบ anecdotal-based และยังไม่ได้เผยแพร่) พบว่า เจ้าของโรงสีและผู้บริโภคได้ให้ข้อมูลว่าคุณภาพโดยรวมของข้าวหอมมะลิในปัจจุบันค่อนข้างต่ำกว่าคุณภาพข้าวในช่วงประมาณ 20 ปีที่ผ่านมา ซึ่งอาจมีผลจากปัจจัยสำคัญต่างๆ สภาพแวดล้อมการจัดการการผลิต การเก็บเกี่ยวและการเก็บรักษาที่มีเปลี่ยนแปลงไป (อรวรรณ, 2557) อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวเปลือกเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพข้าวเปลือก (Juliano, 1985) จากข้อมูลการสำรวจของกรมการข้าว พบว่า ปัจจุบันเกษตรกรได้ใช้เครื่องเกี่ยวข้าวกันอย่างแพร่หลายส่งผลมีข้าวเปลือกในมือของเกษตรในปริมาณมากและเร็วมากขึ้น นอกจากนี้การแปรปรวนของสภาวะอากาศทำให้มีฝนตกช่วงเก็บเกี่ยวข้าว เกษตรกรจึงพยายามขายข้าวเปลือกให้กับโรงสีให้เร็วที่สุด จึงส่งผลให้เกษตรกรไม่ได้ทำการตากแห้งข้าวเปลือกทันทีหลังการเกี่ยวก่อนจำหน่าย การขนส่งข้าวเปลือกที่ยังไม่ได้ตากแห้งไปยังโรงสีใช้การบรรจุใส่กระสอบพลาสติกสาน ซึ่งในฤดูการเก็บเกี่ยว ข้าวเปลือกสดจะออกสู่ตลาดในปริมาณมาก ทำให้การซื้อขายเป็นไปด้วยความล้าช้า กว่าที่ข้าวเปลือกสดจะเข้าสู่กระบวนการลดความชื้นจึงล้าช้าออกไปประมาณ 48 ชั่วโมง ผู้รับซื้อได้ตั้งข้อสังเกตว่าการชะลอการทำแห้งข้าวเปลือกอาจส่งผลต่อคุณภาพของข้าวสาร การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการชะลอการลดความชื้นในข้าวเปลือกต่อคุณภาพข้าวขัดขาวในระหว่างการเก็บรักษา เพื่อประโยชน์ในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

การจัดการข้าวเปลือกและการเก็บรักษา ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในฤดูนาปี พ.ศ. 2559 จากจังหวัดอุบลราชธานี ดำเนินการเก็บเกี่ยวในวันและแปลงนาเดียวกัน (เดือนพฤศจิกายน 2559) โดยแบ่งข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวออกเป็น 2 ส่วนที่เท่ากัน ข้าวเปลือกส่วนที่ 1 นำมาลดความชื้นข้าวเปลือกทันที โดยวิธีตากแดด จนเหลือความชื้นต่ำกว่า 14 เปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก) และนำมาเก็บในถุงพลาสติกสาน (50x75 เซนติเมตร) จำนวน 12 ถุงๆ ละ 20 กิโลกรัม ข้าวเปลือกส่วนที่ 2 นำมาเก็บในถุงพาสติกสาน (50x75 เซนติเมตร) ภายในร่ม เป็นเวลา 2 วัน ก่อนนำมาลดความชื้นข้าวเปลือก จนเหลือความชื้นต่ำกว่า 14 เปอร์เซนต์ และเก็บในถุงพลาสติกสาน (50x75 เซนติเมตร) จำนวน 12 ถุงๆ ละ 20 กิโลกรัม ภายหลังจากการบรรจุข้าวเปลือกในกระสอบได้นำมา เก็บรักษาในห้องควบคุมอุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 10 25 และ 30°C (อุณหภูมิละ 4 กระสอบ) เก็บรักษาเป็นเวลา 12 เดือน **การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวเปลือกและข้าวสารในระหว่างการเก็บรักษา** ในแต่ละเดือนระหว่างการเก็บรักษา ผู้วิจัยสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกจากทุกสิ่งทดลอง เพื่อวัดความชื้น (เครื่อง SB 900, Steinlite moisture meter, USA) จากนั้นทำการกะเทาะเปลือกและขัดสีเป็นข้าวสาร นำตัวอย่างข้าวสารมาวัดความขาว (Whiteness) ความใส (Transparency) และเปอร์เซนต์การขัดสี (Degree of Milling) โดยเครื่องวัดความขาวข้าว รุ่น MM1D Rice Milling Meter, Satake, Japan พร้อมกับทำการทดสอบความแข็ง (Hardness) และความเหนียวหนืด (Stickiness) โดยวิธีของศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี นำตัวอย่างข้าวสาร จำนวน 50 กรัม มาหุงสุกโดยวิธีการนึ่ง ในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ คือ 1 : 1.5 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 20 นาที และทดสอบโดยเครื่องวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (TA.XT plus Texture Analyzer, Stable Micro Systems Texture analyzer, England) **การวางแผนการทดลอง** การวิจัยนี้ได้วางแผนการทดลองแบบ split-split plot (ปัจจัย คือ สภาวะการทำแห้งข้าวเปลือก ระยะเวลาการเก็บรักษา และ อุณหภูมิการเก็บรักษา) จำนวน 4 ซ้ำ (replicates) ผลการศึกษานำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลองโดยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ณ $p<0.05$ โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ SAS

ผล

1. ความชื้นของข้าวเปลือก

ตัวอย่างข้าวเปลือกที่ได้รับการลดความชื้นทันที (Method 1) มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย เท่ากับ 12.71 เปอร์เซนต์ (ฐานเปียก) ในระหว่างการเก็บรักษา 12 เดือน พบว่า ความชื้นของข้าวเปลือกในทุกสิ่งทดลองมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยอยู่ระหว่าง 11.06-13.40 เปอร์เซนต์ (ฐานเปียก) (Figure 1a) สำหรับข้าวเปลือกที่ได้รับการชะลอการลดความชื้น (Method 2) มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 11.86 เปอร์เซนต์ (ฐานเปียก) และมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย มีค่าอยู่ระหว่าง 10.62-12.85 เปอร์เซนต์ (ฐานเปียก) (Figure 1a) ทั้งนี้ในระหว่างการเก็บรักษา ไม่พบความแตกต่างของความชื้นของข้าวเปลือกซึ่งได้รับการลดความชื้นทันที หรือชะลอการลดความชื้นภายหลังการเก็บเกี่ยว

2. ความขาว ความใส และเปอร์เซนต์การขัดสีของข้าวสาร

เมื่อนำตัวอย่างข้าวเปลือกมากะเทาะและขัดสีเป็นข้าวสาร และนำมาวิเคราะห์พบว่า ความขาว (Whiteness) ของข้าวสารของตัวอย่างข้าวเปลือกที่ลดความชื้นทันทีหรือชะลอการลดความชื้น และเก็บรักษาในอุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ค่าความขาวมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยในระหว่างการเก็บรักษาเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้น (เดือนที่ 0) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 42.97 เปอร์เซนต์ และเป็นค่าที่สูงสุด ส่วนค่าต่ำสุด เท่ากับ 34.68 เปอร์เซ็นต์พบในทุกสิ่งทดลอง (Figure 1b) จากการวิเคราะห์ความใส (Transparency) พบว่า ในเดือนที่ 0 ข้าวสารของตัวอย่างข้าวเปลือกที่ลดความชื้นทันที (ข้าวเปลือกส่วนที่ 1) มีค่าความใสสูงกว่าข้าวสารของตัวอย่างข้าวเปลือกที่ได้ชะลอการลดความชื้น (ข้าวเปลือกส่วนที่ 2) โดยมีค่าเริ่มต้นเฉลี่ยที่ 3.06% และ 2.60% ตามลำดับ นอกจากนี้ระหว่างการเก็บรักษาช่วงเดือน 0 ถึง 6 พบ ค่าความใสของข้าวสารในทุกสิ่งทดลองที่ได้จากข้าวเปลือกส่วนที่ 1 มีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความใสของข้าวสารในทุกสิ่งทดลองที่ได้จากข้าวเปลือกส่วนที่ 2 อย่างไรก็ตามภายหลังจากการเก็บรักษา 6 เดือนไม่พบความแตกต่างของความขุ่นใสของข้าวสารระหว่างสิ่งทดลอง (Figure 1c) เมื่อวิเคราะห์เปอร์เซนต์การขัดสีหรือระดับการสี (Milling degree) ของข้าวสาร พบว่า ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างสิ่งทดลอง ทั้งนี้เปอร์เซนต์การขัดสีมีแนวโน้มที่ลดลงในระหว่างการเก็บรักษา (Figure 1d)

3. เนื้อสัมผัสของข้าวสารหุงสุก

ผลของการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความแข็ง (Hardness) พบว่า ความแข็งของข้าวสารในทุกสิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดลองสามารถสังเกตในภาพรวมได้ว่าข้าวสารที่ได้จากข้าวเปลือกที่เก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่ามีความแข็งน้อยกว่าเก็บที่อุณหภูมิสูงแต่ไม่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ทั้งนี้ความแข็งของข้าวสารในทุกสิ่งทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาการเก็บรักษา (Figure 1e) การเปลี่ยนแปลงของความเหนียวหนืด (Stickiness) ของข้าวสารหุงสุก ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเกาะติดกันของเมล็ดข้าว ไม่พบความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลอง ทั้งนี้ข้าวสารของข้าวเปลือกทุกประเภทที่อุณหภูมิสูงมีค่าความเหนียดหนืดต่ำกว่าเก็บในอุณหภูมิต่ำและมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา (Figure 1f)

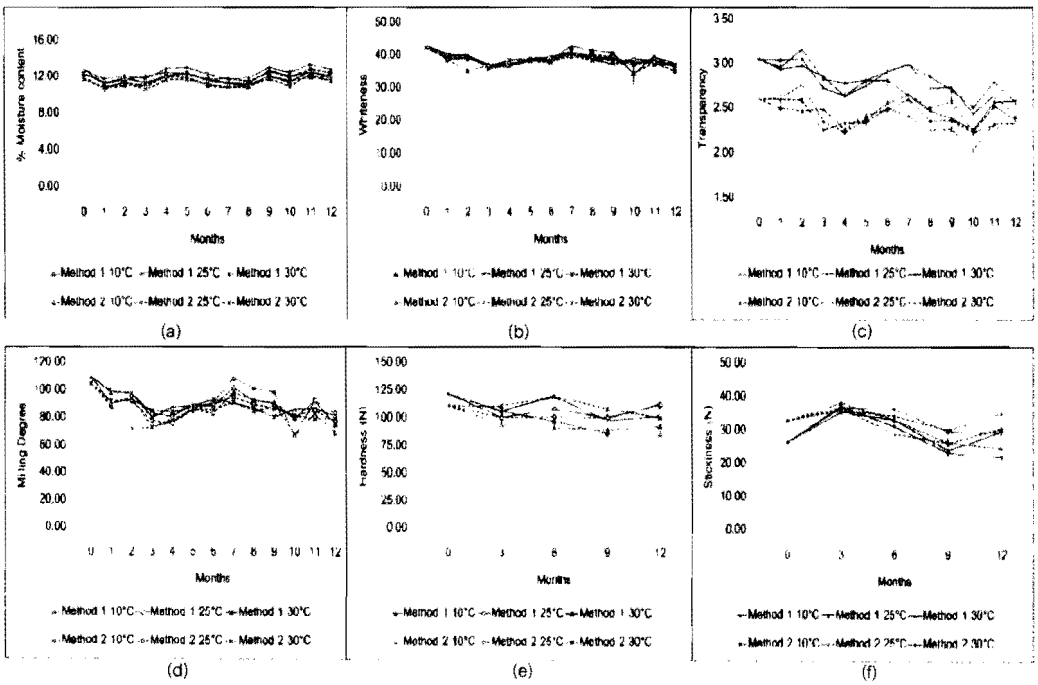


Figure 1 Changes in moisture contents of paddy rice (a) as well as in whiteness (b) transparency (c), milling degree (d), hardness (d), and stickiness (e) of milled rice. Paddy rice was referred to those of which moisture contents were either immediately reduced (Method 1) or delayed (Method 2). The paddy rice were kept at 10, 25 and 30°C for 12 months.

วิจารณ์ผลการทดลอง

ความชื้นข้าวเปลือกระหว่างเก็บรักษาที่ไม่แตกต่างกัน (Figure 1a) แสดงให้ทราบว่าแม้ว่ามีการชะลอการลดความชื้นภายหลังการเก็บเกี่ยวไม่ส่งผลต่อระดับความชื้นของข้าวเปลือก ข้าวเปลือกที่เก็บรักษามีความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่า 14% ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บข้าวเปลือกและข้าวสาร ส่งผลให้เกิดการชะลอเปลี่ยนแปลงคุณภาพ (วิบูลย์, 2561) ความขาวและเปอร์เซนต์การขัดสีของข้าวสารของข้าวเปลือกจากทั้งสองวิธี ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างสิ่งทดลอง และมีแนวโน้มลดลงจากค่าเริ่มต้น (เดือนที่ 0) ในทุกสิ่งทดลอง (Figure 1b-c) บุญมี และคณะ (2561) รายงานว่าดรรชนีของความขาวของข้าวสารลดลงเมื่อเก็บรักษาข้าวเปลือกนานขึ้น ทั้งนี้วิธีการทำแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีตากแดดหรือเครื่องลดความชื้นชนิดลมแห้งและลมร้อน พบว่าไม่มีผลต่อความขาวของข้าวสาร ปัจจุบันยังไม่มีรายงานในประเด็นผลของการชะลอการลดความชื้นของข้าวเปลือกต่อความขาวและเปอร์เซนต์การขัดสี เมื่อพิจารณาความใสของเมล็ดข้าวสาร พบ วิธีการลดความชื้นของข้าวเปลือกมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ในช่วง 6 เดือนแรกของการเก็บรักษา วิธีลดความชื้นทันที (Method 1) ทำให้ข้าวสารมีค่าความใสมีค่าสูงกว่าวิธีชะลอการลดความชื้น (Method 2) อาจมีเหตุผลสำคัญจากความชื้นสูงระหว่างรอลดความชื้น (48 ชั่วโมง) ทั้งนี้การเก็บรักษาข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูงส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยและสะสมความร้อนในบรรจุภัณฑ์ของข้าว นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏเมล็ดข้าวสารในระหว่างรอการทำแห้ง (IRRI, 2018) นอกจากนี้ความชื้นที่สูงและระดับความร้อนดังกล่าวสามารถเร่งอายุของข้าว (aging of rice) ที่สามารถทำให้เกิดความใสของข้าวลดลง ดังที่ Bhattacharya (2011) กล่าวไว้ในกรณีของการเก็บข้าวสารในสภาวะความชื้นสูง การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก ความแข็งและความเหนียวหนืดของข้าวสารในทุกสิ่งทดลองไม่พบว่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเก็บรักษานานขึ้น ความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและความเหนียวหนืดมีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ พัสกร และคณะ (2546) ที่รายงานว่า ความแข็งของข้าวสุกจะเพิ่มขึ้นตามอายุการเก็บรักษา ข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิต่ำมีความแข็งน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูงแต่มีความเหนียวของข้าวสุกมากกว่า

สรุปผลการทดลอง

การชะลอการลดความชื้น (เป็นเวลา 48 ชั่วโมง) ของข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวส่งผลให้ความใสของเมล็ดข้าวสารลดลงอย่างมีนัยสำคัญในระหว่างการเก็บรักษา ในช่วง 6 เดือนแรก เมื่อเปรียบข้าวสารที่ข้าวเปลือกมีการลดความชื้นทันที ในขณะที่การชะลอการลดความชื้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านอื่นๆ ของข้าวสาร นอกจากนี้อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพของข้าวสารที่ผลิตจากข้าวเปลือกซึ่งมีการลดความชื้นก่อนการเก็บรักษาทั้งสองประเภท การศึกษาวิจัยต่อไปได้ดำเนินการศึกษาผลของการชะลอการลดความชื้นข้าวเปลือกต่อสารให้ความหอมสำคัญได้แก่ 2-acetyl-1-pyrolline (2-AP) ของข้าวสารในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยข้าวอุบลราชธานี กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว และห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนในเรื่องของสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ทำการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

บุญมี ศิริ, สุกัญญา วงศ์พรชัย, ศักดิ์ดา จงแก้ววัฒนา และศิริพร ศรีล้อม. 2561. ผลการลดความชื้น และระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณภาพการขัดสีของข้าวหอมมะลิ 105. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://home.kku.ac.th/seedtechpp/Research_paper/spp07.pdf. (20 พฤษภาคม 2561).

พัสกร เจียตระกูล, เมธินี เห่วชิ่งเจริญ และคุภศักดิ์ ลิมปิติ. 2546. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 34 (4-6): 149-152.

วิบูลย์ เทเพนทร์. 2561. เครื่องลดความชื้นเมล็ดพืชที่ผลิตในประเทศ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา www.doa.go.th/aeri/files/KM/moisture%201.pdf. (15 พฤษภาคม 2561).

สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. 2561. ผลผลิตข้าว: เนื้อที่เพาะปลูก ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ของข้าวนาปี และนาปรัง ปี 2556-2561. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.thainceexporters.or.th/production.htm. (20 พฤษภาคม 2561).

อรวรรณ ศรีโสมพันธ์. 2557. โครงสร้างการผลิตและการตลาดข้าวหอมมะลิไทย. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. กองทุนสนับสนุนการวิจัย. 154 น.

Bhattacharya, K. R. 2011. Ageing of rice. p 116-163. *In* K.R. Bhattacharya (ed.). Rice Quality a Guide to Rice Properties and Analysis. Woodhead Publishing Limited, Cambridge UK. 608p.

IRRI. 2018. Grain moisture content and grain quality. [Online]. Available source: http://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/postharvest/drying/drying-basics/grain-moisture-content-and-grain-quality?tmpl=component&print=1 (20 May 2018).

Juliano, B.O. 1985. Rice: Chemistry and technology. American Association Cereal Chemists Inc., St. Paul, Minnesota. 480p.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวสุพรรณิการ์ ปักเคธาติ
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550 Bachelor of Technology (Food Technology) Massey University พ.ศ. 2558 Postgraduate Diploma of Technology (Food Technology) Massey University
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2555 - 2556 นักวิชาการเกษตรปฏิบัติการ ศูนย์วิจัยข้าวคลองหลวง กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว พ.ศ. 2556 – ปัจจุบัน นักวิชาการเกษตรปฏิบัติการ กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
ตำแหน่ง	นักวิชาการเกษตรปฏิบัติการ
ผลงานตีพิมพ์	สุพรรณิการ์ ปักเคธาติ และคณะ. ผลของการชะลอการลดความชื้นในข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ต่อคุณภาพข้าวขัดขาวในระหว่างการเก็บรักษา. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**. 49(2)(พิเศษ): 267-270., 2561. สุพรรณิการ์ ปักเคธาติ และคณะ. จลนพลศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ในข้าวเปลือกขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งมีการชะลอการลดความชื้นหลังการเก็บเกี่ยว. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**. 50(3)(พิเศษ): 195-198., 2562.

ห้องสมุด สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี