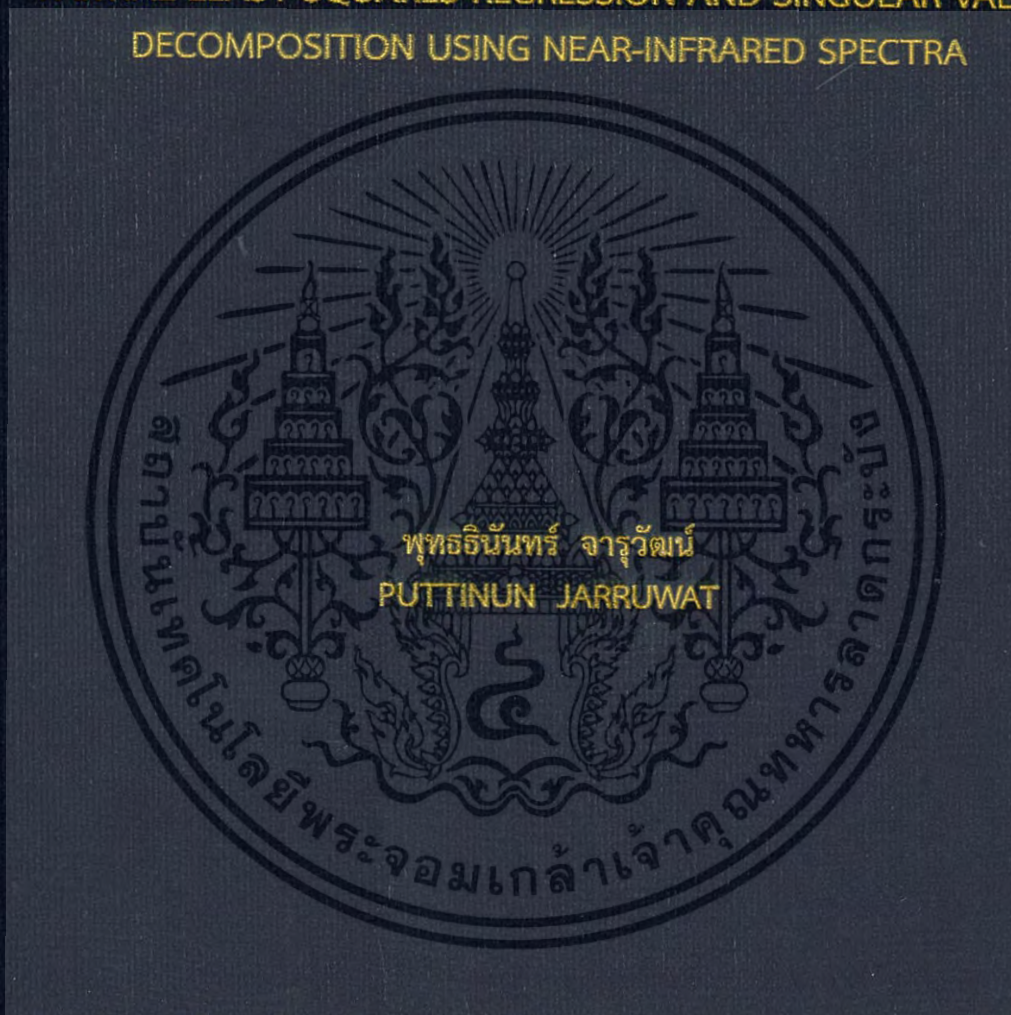


การทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิด้วยวิธี PARTIAL LEAST
SQUARES REGRESSION และวิธี SINGULAR VALUE DECOMPOSITION
จากสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด

PREDICTION OF RICE WEEVIL CONTENT IN THAI HOM MALI RICE BY
PARTIAL LEAST SQUARES REGRESSION AND SINGULAR VALUE
DECOMPOSITION USING NEAR-INFRARED SPECTRA



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษิตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-D-108-010

การทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิด้วยวิธี PARTIAL LEAST
SQUARES REGRESSION และวิธี SINGULAR VALUE DECOMPOSITION
จากสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด

PREDICTION OF RICE WEEVIL CONTENT IN THAI HOM MALI RICE BY
PARTIAL LEAST SQUARES REGRESSION AND SINGULAR VALUE
DECOMPOSITION USING NEAR-IR SPECTRA



T148700

พุทธินันท์ จารุวัฒน์

PUTTINUN JARRUWAT

เลขที่.....
ลงทะเบียน..... 148700
วันเดือนปี..... 14 พ.ย. 2560

b..... 00267483
l.....

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-D-108-010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREDICTION OF RICE WEEVIL CONTENT IN THAI HOM MALI RICE BY
PARTIAL LEAST SQUARES REGRESSION AND SINGULAR VALUE
DECOMPOSITION USING NEAR-INFRARED SPECTRA



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-D-108-010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิด้วยวิธี Partial Least Squares Regression และวิธี Singular Value Decomposition จากสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด

Thesis Title Prediction of Rice Weevil Content in Thai Hom Mali rice by Partial Least Squares Regression and Singular Value Decomposition using Near-infrared Spectra

นักศึกษา นายพุทธิพันธ์ จารุวัฒน์

รหัสประจำตัว 55610501

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ประสันท์ ชุ่มใจหาญ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-D-108-010

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อนุพันธ์	เทอดวงศ์วรกุล	
รศ.ดร.ปานมนัส	ศิริสมบุรณ์	
ดร.จิราพร	ศรียัญญ์ณวิชัย จงยิ่งเจริญ	
ดร.วสุ	อุดมเพทายกุล	
ผศ.ดร.ประสันท์	ชุ่มใจหาญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องคืนฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มีการนำไปใช้

วันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิด้วยวิธี Partial Least Squares Regression และวิธี Singular Value Decomposition จากสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด
นักศึกษา	นายพุทธิพันธ์ จารุวัฒน์
รหัสประจำตัว	55610501
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ประสันท์ ชุ่มใจหาญ

บทคัดย่อ

ข้าวหอมมะลิเป็นสินค้าเกษตรส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย ปัญหาหลักของสินค้าข้าวคือ การเข้าทำลายของแมลงศัตรู โดยแมลงศัตรูหลักของข้าวคือ มอดข้าวสาร ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้วิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD) ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสารที่ปนในข้าวและในผลิตภัณฑ์ข้าว และประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบและรับรองคุณภาพสินค้าข้าวได้อีกแนวทางหนึ่ง

ผลการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาโดยวิธี SVD พบว่าให้ประสิทธิภาพการทำนายที่แม่นยำกว่าวิธี PLS Regression ทั้งชนิดข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิ โดยแบบจำลองทำนายของข้าวขาวหอมมะลิมีค่าทางสถิติ r^2 เท่ากับ 0.97, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.012 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 5.71 และค่า Bias เท่ากับ -0.003 g-weevils/100g-rice ในขณะที่แบบจำลองทำนายของข้าวกล้องหอมมะลิ ให้ผลการทดสอบที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าเล็กน้อย โดยมีค่าทางสถิติ r^2 เท่ากับ 0.96, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.013 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 5.39 และค่า Bias เท่ากับ -0.002 g-weevils/100g-rice ผลการทดสอบแบบจำลองการทำนายของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลินิตบบรรจุถุงพลาสติก Polyethylene ให้ค่าทางสถิติของผลการทำนายลดลงจากตัวอย่างทดสอบแบบไม่มีบรรจุภัณฑ์เล็กน้อย โดยที่ทั้ง 2 แบบจำลองให้ค่าทางสถิติใกล้เคียงกัน สำหรับผลการทดสอบแบบจำลองการทำนายของ ผลิตภัณฑ์ข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิบรรจุถุงพลาสติกสาน Polypropylene พบว่าค่าการทำนายทางสถิติมีค่าลดลงจากตัวอย่างข้าวในบรรจุภัณฑ์แบบ Polyethylene และตัวอย่างการพัฒนาแบบจำลองโดยวิธี PLS Regression ให้ค่าการทำนายที่ดีกว่า

Thesis	Prediction of rice weevil content in Thai Hom Mali rice by Partial Least Squares Regression and Singular Value Decomposition using near-infrared spectra
Student	Mr. Puttinun Jarruwat
Student ID.	55610501
Degree	Doctor of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Prasan Choomjaihan

ABSTRACT

Hom Mali rice played majority role with export economic of Thailand. The challenging of rice goods is protecting the infestation of insect; particularly, rice weevil (*Sitophilus Oryzae* L.). Therefore the objective of this research was to apply a Partial Least Squares (PLS) Regression and Singular Value Decomposition (SVD) method to detect and forecast the quantity of rice weevil in both rice stock and rice in package, in order to inspect and to insure the rice products pest free.

The testing results showed that the prediction models of SVD method were more accurate than the prediction models of PLS Regression method both milled Hom Mali rice (MHR) and brown Hom Mali rice (BHR). The statistical result tests of SVD prediction model of MHR were showed r^2 , RMSEP, RPD and Bias of 0.97, 0.012 g-weevils/100g-rice, 5.71 and -0.003 g-weevils/100g-rice respectively. While the statistical result tests of SVD prediction model of BHR were little lower than of MHR and were showed r^2 , RMSEP, RPD and Bias of 0.96, 0.013 g-weevils/100g-rice, 5.39 and -0.002 g-weevils/100g-rice respectively. The statistical data of prediction models of rice products (MHR and BHR) in package of polyethylene were slightly reduced compare with non-package and both products gave similar results. For the prediction models of rice products (MHR and BHR) in package of polypropylene, the statistical data were not better than using package of polyethylene and the developed model using PLS Regression method gave better results.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร. ประสงค์ ชุ่มใจหาญ ที่รับเป็นที่ปรึกษาและเสียสละเวลาที่มีค่าในการให้คำปรึกษาเกี่ยวกับแนวคิดในการทำวิทยานิพนธ์ ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และคำแนะนำทางวิชาการที่ดีเสมอมา ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ที่สนับสนุนทุนการศึกษา ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนทุนการส่งผลงานทางวิชาการเพื่อเผยแพร่ในวารสารทางวิชาการต่างประเทศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเกษตรทุกท่าน ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาและให้คำชี้แนะกับผู้เขียน ขอขอบคุณเพื่อนพี่น้องน้องพี่ วิศวกรรมเกษตรทุกคนที่ให้ความอบอุ่น สนุกสนาน และเสียสละเวลาช่วยเหลือการปฏิบัติงานให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบุพการีและครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจและช่วยส่งเสริมในทุกด้าน เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

พุทธธินันท์ จารุวัฒน์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	5
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	6
1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการศึกษา.....	6
1.5 ขอบเขตของการศึกษา.....	8
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	9
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 ข้าว.....	11
2.1.1 องค์ประกอบของเมล็ดข้าว.....	11
2.1.1.1 องค์ประกอบทางกายภาพ.....	11
2.1.1.2 องค์ประกอบทางเคมี.....	12
2.1.2 คุณภาพของเมล็ดข้าวและมาตรฐานสินค้าข้าวไทย.....	14
2.1.3 ข้าวหอมมะลิ.....	16
2.1.4 ผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิ.....	19
2.2 แมลงศัตรูข้าวและการตรวจสอบ.....	30
2.2.1 แมลงศัตรูข้าว.....	30
2.2.2 การตรวจสอบแมลงศัตรูข้าว.....	35
2.2.3 การตรวจสอบแมลงศัตรูและสิ่งเจือปนในผลิตผลทางการเกษตรอื่นๆ.....	42
2.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	44
2.3.1 หลักการพื้นฐานของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	45
2.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	49
2.3.3 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับผลิตผลทางการเกษตร และอาหาร.....	53
2.3.4 วิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการและวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัม เนียร์อินฟราเรด.....	55
2.3.4.1 การแปลงหรือการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัม.....	55
2.3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลและสร้างแบบจำลองทำนายจาก สเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด.....	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4.2.1 เทคนิคเนียร์อินพราเรตสเปกโทรสโกปี.....	64
2.3.4.2.2 เทคนิค Singular Value Decomposition (SVD)....	70
2.3.4.3 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างแบบจำลองทำนาย.....	73
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	77
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	77
3.2 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินพราเรต.....	78
3.2.1 การเก็บข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินพราเรต.....	78
3.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินพราเรตและสร้างแบบจำลองทำนาย...78	
3.2.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินพราเรตและสร้างแบบจำลองทำนายด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLS Regression)	79
3.2.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินพราเรตและสร้างแบบจำลองทำนายด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD).....	80
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	82
3.3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร และการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ.....	82
3.3.1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร.....	82
3.3.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร.....	83
3.3.1.3 การศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าว.....	83
3.3.2 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD).....	83
3.3.3 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD).....	84
3.3.4 การทวนสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์และที่มีบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD)	85

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	86
4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิ และมอดข้าวสาร และการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอด ข้าวสารในข้าวหอมมะลิ.....	86
4.1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร.....	86
4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร.....	88
4.1.3 การศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสาร ในข้าวหอมมะลิ.....	98
4.2 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่ไม่มี บรรจุภัณฑ์ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD).....	109
4.2.1 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ ที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression.....	109
4.2.2 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ ที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD).....	118
4.3 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิ ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD).....	120
4.3.1 การศึกษาอิทธิพลของวัสดุบรรจุภัณฑ์ข้าวต่อการส่องผ่านของคลื่นแสง ย่านเนียร์อินฟราเรด.....	120
4.3.2 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าว หอมมะลิ.....	122
4.3.2.1 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารใน ผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression.....	122
4.3.2.2 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารใน ผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD).....	140
4.4 การทวนสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ ของข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์และที่มีบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD).....	146
4.4.1 ผลการทวนสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารใน ตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression.....	146

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.2 ผลการทวนสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD).....	148
4.4.3 ผลการทวนสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่มีบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression.....	150
4.4.4 ผลการทวนสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่มีบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD).....	153
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	156
5.1 ความเป็นไปได้ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ.....	156
5.2 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์.....	157
5.3 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิ.....	158
5.4 การทวนสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิ.....	162
5.5 ข้อเสนอแนะ.....	164
เอกสารอ้างอิง.....	165
ภาคผนวก.....	177
ภาคผนวก ก ขนาดและน้ำหนักของเมล็ดข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวขาวหอมมะลิ และมอดข้าวสาร.....	178
ภาคผนวก ข แบบจำลองทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์และในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิ.....	189
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	204
ประวัติผู้เขียน.....	235

สารบัญตาราง

ตารางที่.....	หน้า
2.1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวรูปแบบต่างๆ และส่วนที่ได้จากการขัดสีที่ความชื้น 14%.....	14
2.2 การใช้ประโยชน์เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในประเทศไทย.....	53
2.3 การแปลความหมายของค่า R และ R ²	74
2.4 การอธิบายผลของค่า RPD.....	75
4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวและมอดข้าวสาร.....	88
4.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิ ที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	90
4.3 การวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างมอดข้าวสารที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	92
4.4 การวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับที่สองแบบ Savitzky-Golay ของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิ ที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	94
4.5 การวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับที่สองแบบ Savitzky-Golay ของตัวอย่างข้าวขาวหอมมะลิ ที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	95
4.6 การวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับที่สองแบบ Savitzky-Golay ของตัวอย่างมอดข้าวสาร ที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	97
4.7 ค่าทางสถิติของการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิ และข้าวกล้องหอมมะลิ โดยวิธี Partial Least Squares Regression.....	104
4.8 ค่าทางสถิติของการสร้างแบบจำลองทำนายสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Partial Least Square Regression.....	110
4.9 การดูดัชับคลี่ที่มีค่า Regression coefficient สูง และ X-loading weight สูง ใน Regression coefficient plot และ X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบข้าวขาวหอมมะลิ.....	116
4.10 การดูดัชับคลี่ที่มีค่า Regression coefficient สูง และ X-loading weight สูง ใน Regression coefficient plot และ X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบข้าวกล้องหอมมะลิ.....	117

VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่.....	หน้า
4.11 ค่าทางสถิติของการสร้างแบบจำลองทำนายสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Singular Value Decomposition.....	119
4.12 ค่าทางสถิติของการสร้างแบบจำลองทำนายสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ โดยวิธี Partial Least Square Regression.....	127
4.13 การดูตลับคลื่นที่มีค่า Regression coefficient สูง และ X-loading weight สูง ใน Regression coefficient plot และ X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่งทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE.....	137
4.14 การดูตลับคลื่นที่มีค่า Regression coefficient สูง และ X-loading weight สูง ใน Regression coefficient plot และ X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่งทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP.....	138
4.15 การดูตลับคลื่นที่มีค่า Regression coefficient สูง และ X-loading weight สูง ใน Regression coefficient plot และ X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่งทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE.....	139
4.16 ค่าทางสถิติของการสร้างแบบจำลองทำนายสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ โดยวิธี Singular Value Decomposition.....	142
4.17 ค่าทางสถิติของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ ของข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Partial Least Squares Regression.....	147
4.18 ค่าทางสถิติของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ ของข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Singular Value Decomposition.....	149
4.19 ค่าทางสถิติของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ ของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ โดยวิธี Partial Least Squares Regression.....	151

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่.....	หน้า
4.20 ค่าทางสถิติของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ ของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ โดยวิธี Singular Value Decomposition.....	154
ก.1 ขนาดของเมทริกซ์ข้าวกล้องหอมมะลิ.....	179
ก.2 ขนาดของเมทริกซ์ข้าวขาวหอมมะลิ.....	182
ก.3 ขนาดของมอดข้าวสาร.....	185
ก.4 น้ำหนักของเมทริกซ์ข้าวกล้องหอมมะลิ.....	188
ก.5 น้ำหนักของเมทริกซ์ข้าวขาวหอมมะลิ.....	188
ก.6 น้ำหนักของมอดข้าวสาร.....	188
ข 1 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิ โดยวิธี Partial Least Squares Regression ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบ ทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ (ระดับปริมาณการปนตั้งแต่ 0-200 ตัว).....	190
ข 2 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวกล้องหอมมะลิ โดยวิธี Partial Least Squares Regression ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบ ทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ (ระดับปริมาณการปนตั้งแต่ 0-200 ตัว).....	191
ข 3 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสาร ในข้าวขาวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Partial Least Squares Regression (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %).....	192
ข 4 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสาร ในข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Partial Least Squares Regression (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %).....	193
ข 5 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสาร ในข้าวขาวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Singular Value Decomposition (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %).....	194
ข 6 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสาร ในข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Singular Value Decomposition (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %).....	195
ข 7 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสาร ในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิ ชนิดถุงพลาสติก PE โดยวิธี Partial Least Squares Regression (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %).....	196

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่.....	หน้า
ข 8 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสาร ในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิ ชนิดถุงพลาสติก PE โดยวิธี Partial Least Squares Regression (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)	197
ข 9 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสาร ในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิ ชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี Partial Least Squares Regression (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)	198
ข 10 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนัก ของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิ ชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี Partial Least Squares Regression (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)	199
ข 11 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนัก ของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิ ชนิดถุงพลาสติก PE โดยวิธี Singular Value Decomposition (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)	200
ข 12 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนัก ของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิ ชนิดถุงพลาสติก PE โดยวิธี Singular Value Decomposition (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)	201
ข 13 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนัก ของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิ ชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี Singular Value Decomposition (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)	202
ข 14 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนัก ของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิ ชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี Singular Value Decomposition (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)	203

สารบัญภาพ

ภาพที่.....	หน้า
1.1 วัฏจักรการเจริญเติบโตของมอดข้าวสาร (ก) ระยะไข่ (ข) ระยะตัวอ่อน (ค) ระยะดักแด้ (ง) ระยะตัวเต็มวัย.....	2
1.2 การเข้าอาศัยของมอดข้าวสารในข้าวที่เก็บรักษา.....	2
1.3 ชนิดของบรรจุภัณฑ์ข้าว.....	3
2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของเมล็ดข้าว.....	12
2.2 ส่วนข้าวหัก.....	16
2.3 ส่วนข้าวหัก.....	16
2.4 มอดข้าวสาร.....	33
2.5 The chemical structure of chitin.....	33
2.6 การกระทำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารต่างๆ.....	45
2.7 ช่วงสเปกตรัมของคลื่นแสงอินฟราเรด.....	45
2.8 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานการสั่น.....	46
2.9 รูปแบบการเกิดอันตรกิริยาของรังสีอินฟราเรดย่านใกล้กับสาร.....	47
2.10 NIR สเปกตรัม แสดงในรูปค่าการดูดกลืน (absorbance) กับความยาวคลื่น (wavelength)...	48
2.11 รูปแบบที่วัดเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับแสง NIR (a) transmittance (b) reflectance, (c) transreflectance และ (d) interactance.....	50
2.12 การออกแบบเครื่องมือแบบพื้นฐาน A = light source, B = wavelength selection System, C = detector, D = computer และ S = sample.....	51
2.13 ความแตกต่างของ path length ระหว่างเครื่องมือแบบ Transmittance และแบบ Reflectance.....	51
2.14 จำนวนจุดทั้งสองด้าน (m = 2, n = 5) ของการเฉลี่ย.....	56
2.15 Segment size และ Gap size ที่กำหนดในสเปกตรัมเพื่อคำนวณ Derivative.....	58
2.16 สเปกตรัม และ Second derivative ของสเปกตรัม.....	60
2.17 First Derivative และ Second Derivative เปรียบเทียบกับสเปกตรัมเดิม.....	60
2.18 การปรับแต่งสเปกตรัมโดยใช้ MSC (a คือ raw spectral data หลังจากการเพิ่มโดยสุ่ม ขนาดตัวอย่างที่มี pathlengths แตกต่างกัน, b คือ original spectra, c คือสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งหลังการทำ MSC).....	62
2.19 การทำแบบจำลองแคลิเบรชันด้วยวิธี MLR, PCR และ PLS regression.....	69
2.20 ชุดตัวอย่างในการ full cross validation.....	69
2.21 ชุดตัวอย่างในการ Prediction testing.....	70
3.1 เครื่อง FT-NIR Spectrometer (Bruker Corporation, Germany).....	77

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.2 ภาพขณะใส่ตัวอย่างทดสอบ.....	78
3.3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารในตัวอย่างทดสอบ ข้าวหอมมะลิด้วยวิธี Partial Least Squares Regression.....	80
3.4 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารในตัวอย่าง ทดสอบข้าวหอมมะลิด้วยเทคนิค Singular Value Decomposition.....	82
3.5 กระสอบป่าน.....	84
3.6 กระสอบพลาสติก PP.....	84
3.7 ถุงพลาสติก PE.....	84
4.1 ข้าวกล้อง.....	87
4.2 ข้าวขาว.....	87
4.3 มอดข้าวสาร.....	87
4.4 ไมโครมิเตอร์.....	87
4.5 วัดขนาดมอดข้าวสาร.....	87
4.6 FT-NIR Spectrometer ที่ใช้ทดสอบและเส้นสเปกตรัมของวัสดุที่นำมาศึกษา.....	89
4.7 สเปกตรัมเฉลี่ยของข้าวกล้องหอมมะลิ.....	90
4.8 สเปกตรัมเฉลี่ยของข้าวขาวหอมมะลิ.....	91
4.9 สเปกตรัมเฉลี่ยรวมของข้าวกล้องและข้าวขาวหอมมะลิ.....	91
4.10 สเปกตรัมเฉลี่ยของมอดข้าวสาร.....	92
4.11 สเปกตรัมเฉลี่ยรวมของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร.....	93
4.12 สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savitzky-Golay ตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิ.....	94
4.13 สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savitzky-Golay ตัวอย่างข้าวขาวหอมมะลิ.....	95
4.14 สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savitzky-Golay รวมของข้าวกล้องและข้าวขาว หอมมะลิ.....	96
4.15 สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savitzky-Golay ตัวอย่างมอดข้าวสาร.....	97
4.16 สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savitzky-Golay รวมของข้าวหอมมะลิทั้ง 2 รูปแบบ และมอดข้าวสาร.....	98
4.17 การใช้เทคนิค PCA ในการคัดแยกข้าวขาวหอมมะลิและมอดข้าวสาร.....	99
4.18 การใช้เทคนิค PCA ในการคัดแยกข้าวกล้องหอมมะลิและมอดข้าวสาร.....	99
4.19 การใช้เทคนิค PCA ในการคัดแยกตัวอย่างทดสอบมอดข้าวสารบริสุทธิ์และข้าวขาวหอมมะลิ ที่มีมอดข้าวสารปนในระดับตั้งแต่ 0-200 ตัว.....	100

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.20 การใช้เทคนิค PCA ในการคัดแยกตัวอย่างทดสอบมอดข้าวสารบริสุทธิ์และข้าวกล้องหอมมะลิ ที่มีมอดข้าวสารปนในระดับตั้งแต่ 0-200 ตัว.....	101
4.21 เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยของข้าวขาวหอมมะลิบริสุทธิ์ มอดข้าวสารและข้าวขาวหอมมะลิ ที่มีมอดข้าวสารปนระดับ 200 ตัว.....	102
4.22 เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยของข้าวขาวหอมมะลิบริสุทธิ์ มอดข้าวสารและข้าวกล้องหอมมะลิ ที่มีมอดข้าวสารปนระดับ 200 ตัว.....	102
4.23 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมอดข้าวสารจากการนับจริงและจากการทำนาย ในข้าวขาวหอมมะลิโดยวิธี PLS regression.....	105
4.24 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมอดข้าวสารจากการนับจริงและจากการทำนาย ในข้าวกล้องหอมมะลิโดยวิธี PLS regression.....	105
4.25 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในข้าวขาวหอมมะลิโดยวิธี PLS regression.....	106
4.26 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในข้าวกล้องหอมมะลิโดยวิธี PLS regression.....	106
4.27 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณมอดข้าวสารที่ปนใน ตัวอย่างทดสอบของข้าวขาวหอมมะลิ.....	107
4.28 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณมอดข้าวสารที่ปนใน ตัวอย่างทดสอบของข้าวกล้องหอมมะลิ.....	108
4.29 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ย จากการนับจริงและจากการทำนายในข้าวขาวหอมมะลิโดยวิธี PLS regression.....	111
4.30 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ย จากการนับจริงและจากการทำนายในข้าวกล้องหอมมะลิโดยวิธี PLS regression.....	112
4.31 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนัก ของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบข้าวขาวหอมมะลิ.....	113
4.32 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนัก ของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบข้าวกล้องหอมมะลิ.....	113
4.33 X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนัก ของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบข้าวขาวหอมมะลิ.....	114
4.34 X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนัก ของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบข้าวกล้องหอมมะลิ.....	115

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.35 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในข้าวขาวหอมมะลิโดยวิธี Singular Value Decomposition.....	119
4.36 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในข้าวกล้องหอมมะลิโดยวิธี Singular Value Decomposition.....	120
4.37 แผนภูมิแสดงเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี MSC ของข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิบริสุทธิ์, เส้นสเปกตรัมของข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ และเส้นสเปกตรัมของวัสดุบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ.....	122
4.38 แผนภูมิแสดงเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี MSC ของตัวอย่างข้าวขาวหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติก PE ที่ไม่มีมอดข้าวสารปนและที่มีมอดข้าวสารปนในระดับสัดส่วน 0.222% โดยน้ำหนัก.....	123
4.39 แผนภูมิแสดงเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี MSC ของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติก PE ที่ไม่มีมอดข้าวสารปนและที่มีมอดข้าวสารปนในระดับสัดส่วน 0.222% โดยน้ำหนัก.....	124
4.40 แผนภูมิแสดงเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี MSC ของตัวอย่างข้าวขาวหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์กระสอบพลาสติกสาน PP ที่ไม่มีมอดข้าวสารปนและที่มีมอดข้าวสารปนในระดับสัดส่วน 0.222% โดยน้ำหนัก.....	124
4.41 แผนภูมิแสดงเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี MSC ของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์กระสอบพลาสติกสาน PP ที่ไม่มีมอดข้าวสารปนและที่มีมอดข้าวสารปนในระดับสัดส่วน 0.222% โดยน้ำหนัก.....	125
4.42 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิถุงพลาสติก PE โดยวิธี PLS regression.....	128
4.43 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิกระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี PLS regression.....	129
4.44 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิถุงพลาสติก PE โดยวิธี PLS regression.....	129

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.45 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิกระสอบพลาสติกสถาน PP โดยวิธี PLS regression.....	130
4.46 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE.....	131
4.47 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสถาน PP.....	132
4.48 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE....	133
4.49 X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE.....	134
4.50 X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสถาน PP.....	135
4.51 X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE....	136
4.52 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิถุงพลาสติก PE โดยวิธี Singular Value Decomposition.....	143
4.53 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิถุงพลาสติก PE โดยวิธี Singular Value Decomposition.....	143
4.54 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิกระสอบพลาสติกสถาน PP โดยวิธี Singular Value Decomposition.....	144
4.55 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิกระสอบพลาสติกสถาน PP โดยวิธี Singular Value Decomposition.....	145
4.56 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างไม่ใหม่ของข้าวขาวหอมมะลิที่ไม่มี	

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
บรรจุกัมภ์โดยวิธี PLS regression.....	147
4.57 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ย จากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มี บรรจุกัมภ์โดยวิธี PLS regression.....	148
4.58 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ย จากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวหอมมะลิที่ไม่มี บรรจุกัมภ์โดยวิธี Singular Value Decomposition.....	149
4.59 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ย จากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มี บรรจุกัมภ์โดยวิธี Singular Value Decomposition.....	150
4.60 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ย จากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิ ถุงพลาสติก PE โดยวิธี PLS regression.....	152
4.61 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ย จากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิ กระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี PLS regression.....	152
4.62 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ย จากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิ ถุงพลาสติก PE โดยวิธี PLS regression.....	153
4.63 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ย จากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิ ถุงพลาสติก PE โดยวิธี Singular Value Decomposition.....	155
4.64 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ย จากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิ ถุงพลาสติก PE โดยวิธี Singular Value Decomposition.....	155

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทที่ 1 ประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ซึ่งเป็นที่มาของการทำศึกษาวิจัยนี้ และกล่าวถึงวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา และขั้นตอนของการศึกษา ตามลำดับ ดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย โดยในปี พ.ศ. 2557 มีการส่งออกผลิตภัณฑ์ข้าวไปจำหน่ายในต่างประเทศปริมาณ 10.97 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่า 174.85 พันล้านบาท [1] ผลิตภัณฑ์ข้าวไทยที่มีการส่งออกที่สำคัญได้แก่ ข้าวพันธุ์หอมมะลิ โดยข้าวพันธุ์หอมมะลิเป็นข้าวที่มีชื่อเสียงและเป็นที่รู้จักไปทั่วโลกเนื่องจากมีลักษณะเฉพาะตัว คือมีกลิ่นหอมคล้ายกับกลิ่นของใบเตย ซึ่งเกิดจากการระเหยของสาร 2-acetyl-1-pyrroline [2] และจัดเป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณ 14-18% เมื่อนำไปหุงเป็นข้าวสุกจึงหอมนุ่มและค่อนข้างเหนียวทำให้เป็นที่นิยมของผู้บริโภค โดยมีอุณหภูมิการหุงเป็นข้าวสุก (Gelatinization temperature) ที่เหมาะสมประมาณ 70 ถึง 74 องศาเซลเซียส [3] ข้าวหอมมะลิไทยมี 2 สายพันธุ์คือ พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และ กข.15 ข้าวหอมมะลิถูกยกย่องว่าเป็นข้าวเกรดคุณภาพสูง มีปริมาณการส่งออกและมูลค่ามาก โดยในปีพ.ศ. 2557 ผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิมีการส่งออกปริมาณและมูลค่า 1.87 ล้านตัน และ 52.16 พันล้านบาท ตามลำดับ หรือคิดเป็นสัดส่วนปริมาณและมูลค่า 17% และ 30% ตามลำดับ ของการส่งออกผลิตภัณฑ์ข้าวรวมของประเทศ [1]

ข้าวมีศัตรูพืชหลายชนิดเข้าทำลายทั้งในระยะที่ข้าวอยู่ในแปลงและเก็บรักษาในโรงเก็บเพื่อรอการจำหน่ายและบริโภค โดยข้าวหลังการเก็บเกี่ยวทั้งในรูปแบบข้าวเปลือก ข้าวกล้องและข้าวสารมีความเสียหายที่เกิดขึ้นจากปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการคือ ปัจจัยทางกายภาพ (Physical factor) ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศ และปัจจัยทางชีวภาพ (Biological factor) ได้แก่ แมลง ไร เชื้อรา นก และหนู ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าแมลงเป็นศัตรูที่สำคัญและทำความเสียหายให้ข้าวหลังการเก็บเกี่ยวมากที่สุด โดยจากการสำรวจความเสียหายโดยเฉลี่ยทั่วโลกของ FAO พบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแมลงอยู่ในช่วง 5 ถึง 10% ของผลผลิตทั้งหมด [4] นอกจากการสูญเสียทางเศรษฐกิจแล้ว ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแมลงยังทำให้เมล็ดพันธุ์สูญเสียความงอกและทำให้คุณภาพของข้าวไม่ได้มาตรฐานของตลาดต่างประเทศด้วย บางครั้งพบผลิตภัณฑ์ข้าวถูกประท้วงหรือส่งกลับคืนในกรณีที่พบความเสียหายและปริมาณแมลงมากเกินกำหนด แมลงศัตรูข้าวที่สำคัญมีอยู่หลายชนิด โดยแมลงที่เป็นศัตรูหลักของข้าวกล้องและข้าวสารคือ มอดข้าวสารชนิดตัวงวงข้าว (*Sitophilus oryzae* L.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอดข้าวสารสามารถแพร่พันธุ์โดยการวางไข่ทั้งภายในและภายนอกเมล็ดข้าว เมื่อไข่ฟักเป็นตัวอ่อน ตัวอ่อนจะอาศัยอยู่ภายในเมล็ดข้าวและกัดกินเนื้อข้าวเป็นอาหาร จนเจริญเติบโตเป็นตัวเต็มวัยจึงจะเจาะรูออกมาเพื่อรอกการแพร่พันธุ์ ในระหว่างนั้นตัวเต็มวัยจะแทะเมล็ดให้เป็นรอยพร้อมขับของเสียออกมาทำให้ข้าวมีกลิ่นเหม็นและเสื่อมสภาพ โดยตัวเต็มวัยสามารถบินได้ไกลและขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว [5] วัฏจักรการเจริญเติบโตของมอดข้าวสารจะใช้เวลาประมาณ 45 วัน ดังแสดงในภาพที่ 1.1 ภาพที่ 1.2 แสดงการเข้าอาศัยของมอดข้าวสารในข้าวที่เก็บรักษา ซึ่งจะสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจากขนาดรูปร่างและลักษณะสีของลำตัวที่มีสีดำแตกต่างจากเมล็ดข้าวซึ่งมีสีขาว



ภาพที่ 1.1 วัฏจักรการเจริญเติบโตของมอดข้าวสาร (ก) ระยะไข่ (ข) ระยะตัวอ่อน (ค) ระยะดักแด้ (ง) ระยะตัวเต็มวัย [6]

ภาพที่ 1.2 การเข้าอาศัยของมอดข้าวสารในข้าวที่เก็บรักษา [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการป้องกันกำจัดแมลงศัตรูข้าวที่นิยมใช้คือการใช้สารเคมีด้วยวิธีการรมสารในข้าวที่เก็บรักษาหรือผลิตภัณฑ์ข้าวสำหรับส่งออก ปัจจุบันการใช้สารรมเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั่วโลก สารเคมีที่ใช้รมกันอยู่ในปัจจุบันมีเพียง 2 ชนิดได้แก่ เมทิลโบรไมด์ (Methyl Bromide; CH_3Br) และฟอสฟีน (Phosphine; PH_3) แต่เนื่องจากสารเมทิลโบรไมด์ถูกระบุว่าเป็นตัวการทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศ จึงมีมาตรการลดการใช้จนถึงยกเลิกการใช้ในที่สุด สารฟอสฟีนเป็นอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้และมีความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างมากในปัจจุบันและอนาคต โดยพบว่ามีการใช้มากกว่า 45 ประเทศ [7]-[10] ฟอสฟีนเป็นก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของสารอลูมิเนียมฟอสไฟด์ (Aluminium phosphide) หรือสารสังกะสีฟอสไฟด์ (Zinc phosphide) กับความชื้นในอากาศ โดยปกติสารทั้ง 2 ชนิดนี้จะอยู่ในรูปของแข็ง แต่เมื่อทำปฏิกิริยาจะกลายเป็นก๊าซ Phosphine [11] การใช้ฟอสฟีนเป็นสารรมในข้าวที่เก็บรักษายังมีความต้องการการศึกษาถึงประสิทธิภาพและอัตราการใช้ที่เหมาะสมในการป้องกันกำจัดศัตรูข้าวที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน [12] การรมสารเคมีหากปฏิบัติไม่ถูกต้องจะทำให้มีประสิทธิภพต่ำในการกำจัด แมลงเกิดการปรับตัวเพื่อสร้างความต้านทานต่อสารเคมี และเกิดสารพิษตกค้างในผลิตภัณฑ์เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคได้ [5] มีรายงานว่าพิษจากฟอสฟีนมีผลต่อระบบทางเดินหายใจ อวัยวะที่ได้รับผลกระทบมักเป็นอวัยวะที่ใช้ออกซิเจนมาก เช่น ปอด สมอง หัวใจ ตับ ไต เชื่อว่าการเกิดพิษน่าจะเกิดจากการยับยั้ง Electron transportation ใน Mitochondria หากผู้ปฏิบัติงานได้รับก๊าซฟอสฟีนมากเกินไปอาจทำให้เสียชีวิตได้ [11],[13]

สำหรับข้าวที่เก็บรักษานั้น เมื่อถึงกำหนดขายผู้ประกอบการจะนำข้าวเหล่านั้นมาทำความสะอาดอีกครั้งและบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์เพื่อทำการขนส่งสู่ผู้บริโภค โดยจะมีการใช้สารเคมีสำหรับรมข้าวเพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากแมลงศัตรูในขณะขนส่งโดยเฉพาะการส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ โดยชนิดของบรรจุภัณฑ์ข้าวที่ใช้ในขนส่งสู่ตลาดภายในประเทศและการส่งออกผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิของประเทศไทย จะเป็นลักษณะกระสอบหรือถุง ได้แก่ กระสอบป่าน กระสอบพลาสติกสานชนิด Polypropylene (PP) ชนิดการสานด้วยพลาสติก PP 800 เส้นต่อกระสอบ และถุงพลาสติกชนิด Polyethylene (PE) ความหนา 100 μm ดังแสดงในภาพที่ 1.3



(a) Hemp sack

(b) PP plastic sack

(c) PE plastic bag

ภาพที่ 1.3 ชนิดของบรรจุภัณฑ์ข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาสำคัญที่พบในการส่งออกผลิตภัณฑ์ข้าว คือ การเกิดและเข้าทำลายของแมลงเป็นส่วนใหญ่ รวมถึงการเสื่อมคุณภาพของข้าวซึ่งเกิดขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกิดกลิ่นเหม็น การลดลงของกลิ่นหอม ความนุ่มและความเหนียวเมื่อหุงเป็นข้าวสุก นอกจากนี้ข้าวสุกที่มีกลิ่นเหม็นจะมีการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระและค่าปริมาณเปอร์ออกไซด์ในน้ำมันที่สกัดได้ด้วย โดยบรรจุภัณฑ์ต่างๆเหล่านี้ไม่สามารถป้องกันการเข้าทำลายของแมลงได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ข้าวที่ขนส่งสู่ตลาดทั้งภายในและภายนอกประเทศ จะถูกตรวจสอบอย่างละเอียดเพื่อป้องกันการสูญเสียทั้งปริมาณและคุณภาพจากขั้นตอนการเก็บรักษาและการขนส่ง ทำให้บางครั้งพบผลิตภัณฑ์ข้าวถูกกักกันห้ามนำเข้าหรือส่งกลับคืนจากประเทศคู่ค้า ในกรณีที่พบความเสียหายและปริมาณแมลงมากเกินไป กำหนด ดั้งนั้นการตรวจสอบเพื่อทราบถึงปริมาณแมลงที่ซ่อนอยู่ในผลิตภัณฑ์ข้าวเพื่อทำการรมสารเคมีกำจัดแมลงในอัตราที่เหมาะสม หรือทำการคัดแยกผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีแมลงอาศัยอยู่เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่น จะเป็นการควบคุมที่สำคัญสำหรับการรับประกันด้านคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ข้าวส่งออกสู่ผู้บริโภค การสุ่มเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจสอบคุณภาพข้าวจากบรรจุภัณฑ์มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของบรรจุภัณฑ์ เช่น การใช้หลาว (Stick trier or Sleeve-type trier) สำหรับแทงเข้าไปในกระสอบป่านหรือการทำลายบรรจุภัณฑ์ชนิดกระสอบพลาสติกและถุงพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างข้าวเพื่อสุ่มตรวจทดสอบ ซึ่งทุกวิธีการตรวจสอบจะต้องมีการทำลายบรรจุภัณฑ์ให้เกิดความเสียหาย ส่งผลให้เกิดการสูญเสียของเมล็ดข้าวและค่าใช้จ่ายจากบรรจุภัณฑ์ที่ได้รับความเสียหาย หากสามารถมีวิธีการใหม่ที่สามารถทำการสุ่มตรวจข้าวที่เก็บรักษาและที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์โดยไม่ทำลาย เม่นยำและมีค่าใช้จ่ายต่ำ จะช่วยลดการใช้สารเคมีในการรมข้าวเกินความจำเป็น ลดสารพิษตกค้างในข้าว และลดการเกิดอันตรายด้านสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถสำหรับการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีการนำเข้าและส่งออกให้เม่นยำและถูกต้องมากขึ้น รวมถึงสามารถลดค่าใช้จ่ายซึ่งเกิดจากการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ข้าวและบรรจุภัณฑ์ที่มีการทำลายเพื่อตรวจสอบได้อีกแนวทางหนึ่ง

ในการศึกษานี้ได้นำเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งเป็นเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย มาทำการศึกษาหาความเป็นไปได้เพื่อพัฒนาต่อสู่การประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจสอบปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่เก็บรักษาระหว่างรอการจำหน่าย และในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิของไทยที่มีการส่งออกสู่ต่างประเทศ โดยใช้ค่าสัญญาณจากสเปกตรัมแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่ได้มีการกำจัดความแปรปรวนอันเกิดจากปัจจัยต่างๆ และทำการสร้างแบบจำลองทำนายด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression โดยได้มีงานวิจัยก่อนหน้านี้ในการนำเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมาใช้ในการประเมินองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเกษตร ซึ่งเทคนิคนี้สามารถใช้ในการตรวจสอบวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพได้อย่างรวดเร็ว น่าเชื่อถือ เม่นยำ ไม่ต้องเสียเวลาในการเตรียมตัวอย่าง เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและเป็นวิธีการตรวจสอบที่ไม่ทำลายตัวอย่าง [14] นอกจากนี้ยังเป็นวิธีการวัดในอุดมคติสำหรับการแบ่งกลุ่มของคุณภาพอย่างรวดเร็ว เป็นเทคนิคที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเกษตรและ

อาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในข้าว ผลิตภัณฑ์จากธัญพืช และอุตสาหกรรมพืชน้ำมัน [15], [16] รวมถึงใช้ในการปรับปรุงพันธุ์ธัญพืชสำหรับการเพิ่มปริมาณและคุณภาพ การจัดการระบบการผลิต และการควบคุมกระบวนการผลิตแบบ On-line [15], [17], [18] ช่วงคลื่นเนียร์อินฟราเรดอยู่ในย่านระหว่างช่วงคลื่น Visible และ Mid-infrared ที่จำนวนคลื่น (Wave number) ระหว่าง $12500-4000\text{ cm}^{-1}$ หรือความยาวคลื่น (Wavelength) ระหว่าง $800-2500\text{ nm}$ ได้มีรายงานว่าเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสามารถวัดโครงสร้างทางเคมีของวัสดุชีวภาพโดยการวัดค่าการดูดซับคลื่นแบบวิธี Diffuse reflectance หรือ Transmittance ที่หลายช่วงความยาวคลื่น [14], [18] เทคนิคนี้สามารถวัดความเข้มข้นขององค์ประกอบที่แตกต่างกันของวัสดุ เช่น โปรตีน น้ำ แป้ง และพันธะไฮโดรเจน เป็นต้น [15], [20]

นอกจากการสร้างแบบจำลองทำนายด้วยวิธี PLS Regression แล้ว ในการศึกษานี้ได้ทำการนำเสนอวิธีการทำนายปริมาณมอดข้าวสารที่ปนในข้าวหอมมะลิแบบไม่ทำลายอีกวิธีการหนึ่ง คือวิธี Singular Value Decomposition (SVD) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของระบบเมตริกซ์ โดยใช้ค่าสัญญาณคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่ได้มีการกำจัดความแปรปรวนอันเกิดจากปัจจัยต่างๆ เป็นข้อมูลสำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทำนายเช่นเดียวกับวิธี PLS Regression แต่ต่างกันตรงจะใช้เฉพาะความยาวคลื่นเพียงไม่กี่คู่ที่เป็นความยาวคลื่นที่ดูดซับองค์ประกอบทางเคมีที่เด่นของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร ได้แก่ แป้ง (Starch) ในข้าว ไคติน (Chitin) และลิพิด (Lipid) ในมอดข้าวสาร มาใช้ในการวิเคราะห์ทำนาย ในขณะที่วิธี PLS Regression จะใช้ทุกความยาวคลื่นในย่านเนียร์อินฟราเรดมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทำนาย

ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้จะทำให้ได้องค์ความรู้ใหม่ ในการประยุกต์ใช้ วิธี PLS Regression และวิธี SVD สำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณมอดในข้าวหอมมะลิที่เก็บรักษาอาการจำหน่าย และในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิของไทยที่มีการนำเข้าและส่งออกสู่ต่างประเทศ ซึ่งจะมีประโยชน์ในด้านการประเมินระดับปริมาณมอดในข้าวเพื่อการป้องกันและกำจัดมอดข้าวสาร โดยสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในด้านการใช้สารเคมีในการรมข้าวเกินความจำเป็นและลดการเกิดสารพิษตกค้างในข้าว ซึ่งจะมีผลต่อการเพิ่มความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภค ลดปัญหาด้านสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน รวมถึงสามารถใช้ในกระบวนการตรวจสอบเพื่อรับรองคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวที่ขนส่งสู่ผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศได้อีกแนวทางหนึ่ง โดยช่วยให้การตรวจสอบทำได้ละเอียดแม่นยำขึ้น ลดการสูญเสียและต้นทุนค่าใช้จ่ายจากการทำลายบรรจุภัณฑ์ข้าวเพื่อทำการตรวจสอบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของตัวอย่างข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร และศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบปริมาณมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวหอมมะลิ

1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองในการทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวเก็บรักษาและผลิตภัณฑ์ข้าวโดยใช้วิธี Partial Least Squares Regression และวิธี Singular Value Decomposition จากสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

แมลง ข้าวหอมมะลิที่เก็บรักษา ข้าวหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์ ข้าวหอมมะลิที่เก็บรักษาและผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิที่มีแมลงอาศัยอยู่ในระดับต่างๆ มีความสามารถในการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรด (800-2500 นาโนเมตร) ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้สเปกตรัมมีความแตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากความสามารถในการส่องผ่านบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ของคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรด และองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างทดสอบมีความแตกต่างกัน โดยองค์ประกอบทางเคมีของข้าวจะประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรตหรือแป้ง เป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ได้มีรายงานผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ระดับนานาชาติหลายผลงานได้นำเสนอว่า แมลงที่เป็นศัตรูของข้าวโดยเฉพาะมอดข้าวสารได้มีการดูดซับคลื่นย่านเนียร์อินฟราเรดและให้สเปกตรัมที่แตกต่างจากสเปกตรัมของข้าว โดยนำเสนอองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างจากข้าวคือ ไคติน (Chitin) และลิพิด (Lipid) [21]-[25] ดังนั้นวิธี Partial Least Squares Regression และวิธี Singular Value Decomposition สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายปริมาณแมลงชนิดมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่เก็บรักษาและผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิได้

1.4 ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการศึกษา

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ช่วยให้สามารถวัดองค์ประกอบหรือสมบัติต่างๆ ของผลผลิตเกษตรและอาหารในเชิงปริมาณและคุณภาพได้ง่ายขึ้นและเป็นวิธีไม่ทำลายตัวอย่าง เช่นสามารถจำแนกกลุ่มเนื้อสัมผัสของตัวอย่างได้อย่างรวดเร็ว ไม่จำเป็นต้องใช้คณะผู้ชิมที่ต้องการการฝึกฝนให้มีความชำนาญในการชิม แต่เทคนิคนี้ต้องอาศัยการสร้างแบบจำลองเพื่อการทำนายตรวจสอบด้วยวิธีการทางเคมีเมตริกแบบต่างๆ ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยทั่วไปใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression, MLR) การถดถอยโดยใช้องค์ประกอบหลัก (Principal Component Regression, PCR) การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Squares Regression, PLSR) ในการจำแนกกลุ่มเชิงคุณภาพนิยมใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis, PCA) การวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มเชิงเส้น (Linear Discriminant Analysis, LDA) การวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Squares Discriminant Analysis, PLS-DA) การจำแนกกลุ่มด้วยวิธี SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogy) การใช้โครงข่ายใยประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) เป็นต้น [26] ในการศึกษาได้นำเทคนิคดังกล่าว โดยใช้วิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Partial Least Square Regression มาทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สำหรับการทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่เก็บรักษาระหว่างรอการจำหน่าย และในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิของไทยที่มีการส่งออกสู่ต่างประเทศ โดยอาศัยหลักการที่มอดข้าวสารและข้าวหอมมะลิมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยองค์ประกอบหลักของข้าวหอมมะลิไทยประเภทข้าวกล้องประกอบด้วยโปรตีนประมาณ 8% คาร์โบไฮเดรตประมาณ 75% (องค์ประกอบส่วนใหญ่คือแป้ง) และอื่นๆ ที่ความชื้น 14% ฐานเปียก ในทำนองเดียวกันข้าวขาวประกอบด้วยโปรตีนประมาณ 7% คาร์โบไฮเดรตประมาณ 78% และอื่นๆ ที่ความชื้น 14% ฐานเปียก [3] ในขณะที่มอดข้าวสารมีองค์ประกอบหลักคือ โปรตีน ไคตินและอินทรียสารในเปลือกนอกของแมลง ด้วยความแตกต่างกันในโครงสร้างเหล่านี้ของข้าวและมอดข้าวสาร เป็นสาเหตุทำให้การดูดซับสเปกตรัมของคลื่นแสงมีความแตกต่างกัน และได้นำผลที่ได้นี้มาใช้ในการสร้างสมการทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่เก็บรักษาและในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิที่มีการนำเข้าและส่งออก

วิธี Singular Value Decomposition (SVD) เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ในระบบเมตริกซ์แบบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear algebra) ปัจจุบันมีการใช้วิธี SVD กันอย่างกว้างขวางในงานวิจัยเช่น ด้านการกำหนดตำแหน่ง (Mapping) สัญญาณเอกซ์เรย์สำหรับการวัดการกระจายของ Acrylic acid ใน Microporous polypropylene [27], การทำนายขนาดและส่วนประกอบของแป้งข้าวสาลี [28], การปรับปรุงสัญญาณและลดความแปรปรวนของข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหว (Seismic data) [29], การทำนายปริมาณแร่ธาตุในเมล็ดข้าวสาลีที่ผ่านการขัดขาวโดยปรับตั้งระยะลูกขัดสี 6 ระดับ [30], การประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์ Rapid dynamic near-infrared (NIR) diffuse optical tomography เพื่อสร้างภาพเสมือนเกี่ยวกับการไหลเวียนของโลหิตและแสดงในจอภาพได้อย่างต่อเนื่อง สำหรับใช้ในทางการแพทย์ [31], การทำนายขนาดของวัสดุที่เข้าสู่กระบวนการขัดสี เมื่อทราบขนาดของวัสดุหลังการขัดสี ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบย้อนกลับ [32] และการระบุตำแหน่งของ Signal to Noise Ratio (SNR) ที่ต่ำ ซึ่งเป็นข้อบกพร่องของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ใน The magnetostrictive guided wave technique [33] โดยวิธี SVD จะใช้ในการหาความสัมพันธ์เชิงสัดส่วนของวัสดุสองชนิด ซึ่งในการศึกษานี้ได้แก่ข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสารในรูปแบบสัดส่วนเชิงน้ำหนัก โดยในการประเมินองค์ประกอบของข้าวและแมลงสิ่งปลอมปนได้แนวความคิดในด้านความแตกต่างกันในองค์ประกอบทางเคมีของข้าวและแมลง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้การดูดซับสเปกตรัมของคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่มีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับวิธี PLS Regression โดยองค์ประกอบหลักของข้าวคือ แป้ง (Starch) ซึ่งประกอบด้วย อมิโลส (Amylose) และ อมิโลเปคติน (Amylopectin) โดยปริมาณขององค์ประกอบทั้งสองชนิดนี้ จะมีผลต่อเนื้อสัมผัสและคุณภาพของข้าวหุงสุก ซึ่งสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกชนิดของข้าวได้ สำหรับใช้ใ้องค์ประกอบหลักที่แตกต่างจากข้าวของแมลงชนิดมอดข้าวสารซึ่งเป็นศัตรูหลักของข้าว สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ได้แก่ ไคติน (Chitin) และลิพิด (Lipid) ซึ่งทั้งสองชนิดพบมากในส่วนเปลือกแข็งของมอดข้าวสาร ด้วยเหตุที่วิธี SVD จะใช้ความยาวคลื่นเพียงไม่กี่คู่ซึ่งเป็นการวัดค่าตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ดูดซับองค์ประกอบทางเคมีหลักของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร หากวิธีการนี้มีความเป็นไปได้ในการประเมินปริมาณมอดข้าวสารที่ปนในข้าวได้ จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องมือตรวจสอบแบบ On-line และแบบพกพาได้ในราคาที่ไม่แพงกว่าการประยุกต์ใช้ด้วยวิธี PLS Regression อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองทั้งสองวิธีควบคู่กันไปด้วย

ทั้งสองวิธีจะใช้ข้อมูลเริ่มต้นเดียวกันจากสัญญาณคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่วัดได้ด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ จากนั้นนำสเปกตรัมที่ได้มาจัดการทางคณิตศาสตร์ (Spectrum pretreatment) เพื่อกำจัดความแปรปรวนจากปัจจัยสิ่งแวดล้อม ซึ่งเกิดจากหลายปัจจัยด้วยวัตถุประสงค์ต่างๆ เช่น ทำสเปกตรัมที่มีสัญญาณรบกวนให้เรียบขึ้น (Smoothing) โดยใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยของช่วงคลื่นสั้นๆ ต่อเนื่องกัน (Running mean smooth) และการปรับค่าศูนย์กลางข้อมูล (Savitzky-Golay smooth) การทำอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่ง (1st derivative, D1) เพื่อแก้ปัญหาการเลื่อนขึ้นของเส้นสเปกตรัม (Baseline shift) การทำอนุพันธ์ลำดับที่สอง (2nd derivative, D2) เพื่อแก้ปัญหาการเลื่อนขึ้นและการที่มิกซ์ซ้อนทับกัน (Overlapping peaks) การปรับเป็นค่ามาตรฐาน (Normalization) ทำเพื่อกำจัดความแปรปรวนจากปัจจัยที่ไม่ต้องการ การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (Multiplicative scatter correction, MSC) เพื่อแก้ปัญหาการกระเจิงแสงที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น ขนาดอนุภาคหรือผลที่ไม่เท่ากัน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแหล่งแสง เป็นต้น การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard normal variate, SNV) และการปรับแนวโน้ม (Detrending) ซึ่งแก้ปัญหาเช่นเดียวกับ MSC [26] จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการในการวิเคราะห์ทำนายในแต่ละวิธี และแสดงผลความแม่นยำในการทำนายปริมาณมอดข้าวสารในตัวอย่างทดสอบข้าวหอมมะลิด้วยค่าทางสถิติ

1.5 ขอบเขตของการศึกษา

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วิธีที่ไม่ทำลายตัวอย่างได้แก่ วิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD) ในการทำนายตรวจสอบปริมาณมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์และผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ได้แก่ ถุงพลาสติกชนิด PE, กระจกพลาสติกสานชนิด PP และกระจกสอบาน โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1. การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร และการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ
2. การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ ด้วยวิธี PLS Regression และวิธี SVD

3. การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิ ด้วยวิธี PLS Regression และวิธี SVD

4. การทวนสอบเพื่อเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์และที่มีบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ด้วยวิธี PLS Regression และวิธี SVD

โดยในการศึกษาจะใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer ในช่วงคลื่นแสงอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared) จำนวนคลื่นระหว่าง $12500-4000\text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่นระหว่าง 800-2500 nm) เพื่อให้ได้ข้อมูลการดูดซับสเปกตรัมคลื่นแสงขององค์ประกอบทางเคมีในวัสดุทดสอบ สำหรับการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวทดสอบ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับข้าวหอมมะลิและผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิที่มีจำหน่ายสู่ผู้บริโภคทั้งภายในประเทศและเพื่อการส่งออก คัทรูพืชและสิ่งปลอมปน กำหนดหัวข้อวิจัย วัตถุประสงค์ สมมุติฐานของการศึกษาจากปัญหาที่เกิดขึ้น ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย รวมถึงขอบเขตและขั้นตอนของการศึกษา

2. ตรวจสอบเอกสารวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับข้าวหอมมะลิ ผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิ ชนิดเมล็ดคัทรูข้าว วิธีการป้องกัน กำจัดและวิธีการตรวจสอบ เทคนิคการตรวจสอบเมล็ดคัทรูในผลิตภัณฑ์ผลผลิตชนิดอื่นๆ และศึกษาหลักการ ทฤษฎีเกี่ยวกับเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี วิธี Partial Least Squares Regression วิธี Singular Value Decomposition และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเกษตร อาหารและด้านอื่นๆ

3. กำหนดวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวหอมมะลิและเมล็ดมอดข้าวสาร ศึกษาลักษณะสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสารที่ได้จากการนำตัวอย่างข้าวหอมมะลิและเมล็ดมอดข้าวสารมาสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงแสงหรือสเปกตรัมย่าน Near infrared จากนั้นศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ ด้วยวิธี Principal Components Analysis (PCA) สำหรับการศึกษาคัดแยกแบ่งกลุ่มตัวอย่างของข้าวหอมมะลิบริสุทธิ์และมอดข้าวสารบริสุทธิ์ และการศึกษาคัดแยกแบ่งกลุ่มของตัวอย่างข้าวหอมมะลิที่มีมอดข้าวสารปนในระดับตั้งแต่ 0-200 ตัว กับกลุ่มของมอดข้าวสารบริสุทธิ์ และใช้วิธี PLS Regression สำหรับการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างข้าวหอมมะลิตั้งแต่ระดับ 0-200 ตัว และเปรียบเทียบความแม่นยำของการทำนายกับค่าการนับจริงของปริมาณมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวหอมมะลิที่ระดับการปนต่างๆ โดยทำการศึกษาทั้งในตัวอย่างข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ

3.2 วิเคราะห์ทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยทำการศึกษาในสองวิธีคือ วิธี PLS Regression และวิธี SVD กำหนดสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสาร 13 ระดับ ตั้งแต่ระดับ 0% (0 ตัว), 0.018% (10 ตัว), 0.037% (20 ตัว), 0.055% (30 ตัว), 0.074% (40 ตัว), 0.093% (50 ตัว), 0.111% (60 ตัว), 0.130% (70 ตัว), 0.148% (80 ตัว), 0.167% (90 ตัว), 0.185% (100 ตัว), 0.204% (110 ตัว) และ 0.222% (120 ตัว) ให้เป็นไปตามมาตรฐานการปนของสิ่งเจือปนในสินค้าข้าว ซึ่งกำหนดโดยกระทรวงพาณิชย์ที่ไม่เกิน 0.2% โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการทดสอบเปรียบเทียบความแม่นยำของการทำนายกับค่าการนับจริงของปริมาณมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวหอมมะลิที่ระดับการปนต่างๆ โดยทำการศึกษาทั้งในตัวอย่างข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ

3.3 วิเคราะห์ทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิ โดยศึกษาชนิดของบรรจุภัณฑ์ที่มีใช้อยู่ทั่วไปในประเทศไทย 3 ชนิด ได้แก่ กระสอบป่าน (Hemp sack), กระสอบพลาสติกสานชนิด PP (Polypropylene plastic sack) และถุงพลาสติกชนิด PE (Polyethylene plastic bag) และทำการศึกษาทำนายในสองวิธี คือวิธี PLS Regression และวิธี SVD ที่ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสาร 13 ระดับ เช่นเดียวกับการศึกษาในหัวข้อ 3.2 จากนั้นทำการทดสอบเปรียบเทียบความแม่นยำของการทำนายกับค่าการนับจริงของปริมาณมอดข้าวสารในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิที่ระดับการปนต่างๆ โดยทำการศึกษาทั้งในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ

3.4 ทวนสอบผลการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์และที่มีบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ด้วยวิธี PLS Regression และวิธี SVD ที่ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสาร 13 ระดับ เช่นเดียวกับการศึกษาในหัวข้อ 3.2

4. ดำเนินการศึกษาวิจัยตามที่ได้กำหนดไว้ วิเคราะห์ข้อมูลและรายงานผลการทดลอง
5. สรุปผลการศึกษาวิจัย ข้อเสนอแนะ และจัดทำเอกสารรายงานผลการดำเนินงาน

ส่วนรายละเอียดของการตรวจวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย ผลการดำเนินการวิจัย และการสรุปผลการวิจัยนั้นได้แสดงในบทที่ 2 3 4 และ 5 ตามลำดับ

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย องค์ประกอบและคุณภาพของเมล็ดข้าว มาตรฐานสินค้าข้าวไทย ข้าวหอมมะลิ ผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิ มาตรฐานและการตรวจสอบสินค้าข้าวหอมมะลิ แมลงศัตรูข้าวและวิธีการตรวจสอบที่มีใช้ในปัจจุบัน เทคนิคการตรวจสอบที่ใช้ในการศึกษานี้ สำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายระดับปริมาณการปนของแมลงศัตรูในข้าวหอมมะลิที่เก็บรักษาและผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิ ซึ่งได้แก่ เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี วิธี Partial Least Square Regression และเทคนิค Singular Value Decomposition และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดในส่วนต่างๆดังนี้

2.1 ข้าว

ข้าวเป็นพืชอยู่ในตระกูลหญ้า จัดเป็นพืชล้มลุกประกอบด้วยต้นอยู่ผิวดิน และรากซึ่งส่วนมากอยู่ใต้ดิน ส่วนของต้นประกอบด้วยลำต้น ใบ และรวงข้าว [34] ข้าวเป็นธัญพืชซึ่งประชากรโลกบริโภคเป็นอาหารสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทวีปเอเชีย ข้าวที่นิยมบริโภคแบ่งออกได้เป็น 2 จำพวก คือ *Oryza Glaberrima* นิยมปลูกเฉพาะในเขตร้อนของทวีปแอฟริกา และ *Oryza Sativa* ซึ่งมีการปลูกโดยทั่วไปในโลก ซึ่งสามารถแบ่งแยกออกได้เป็น 3 ชนิดคือ ชนิด Indica ปลูกมากในเขตร้อน, ชนิด Japonica ปลูกมากในเขตอบอุ่น และชนิด Javanica ข้าวที่ปลูกในประเทศไทยเป็นชนิด Indica ซึ่งแบ่งออกเป็นข้าวเจ้าและข้าวเหนียว นอกจากนี้ ข้าวยังได้ถูกมนุษย์คัดสรรและปรับปรุงพันธุ์มาโดยตลอดตั้งแต่มีประวัติศาสตร์การเพาะปลูก ข้าว ในปัจจุบันจึงมีหลากหลายพันธุ์ข้าวทั่วโลกที่ให้รสชาติและประโยชน์ใช้สอยต่างกันไป พันธุ์ข้าวที่มีชื่อเสียงระดับโลกของไทย คือ ข้าวหอมมะลิ (Thai Hom Mali rice) [35]

2.1.1 องค์ประกอบของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าวประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางกายภาพและองค์ประกอบทางด้านเคมี ซึ่งรายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

2.1.1.1 องค์ประกอบทางกายภาพ [36], [37]

เมล็ดข้าวมีโครงสร้างและส่วนประกอบดังนี้ (ภาพที่ 2.1)

1) เปลือกนอกหรือแกลบ (Hull หรือ Husk) เป็นส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว ประกอบด้วยเปลือกใหญ่ (Lemma), เปลือกเล็ก (Palea), หาง (Awn), ขั้วเมล็ด (Rachilla) กลีบรองเมล็ด (Sterile lemmas) และก้าน (Pedicel) เปลือกใหญ่จะปกคลุมอยู่ 2 ใน 3 ของเนื้อที่เมล็ด เปลือกเล็กจะยึดแน่นอยู่ภายในส่วนของเปลือกใหญ่ด้วย โครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายตะขอ (Hooklike structure) ดังนั้นเปลือกข้าวจึงปิดแน่น เปลือกนอกมีน้ำหนักประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือก

2) ส่วนที่บริโภคได้หรือเมล็ดข้าวกล้อง (Caryopsis, Brown rice or Carco rice) ซึ่งแบ่งออกเป็น ส่วนต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

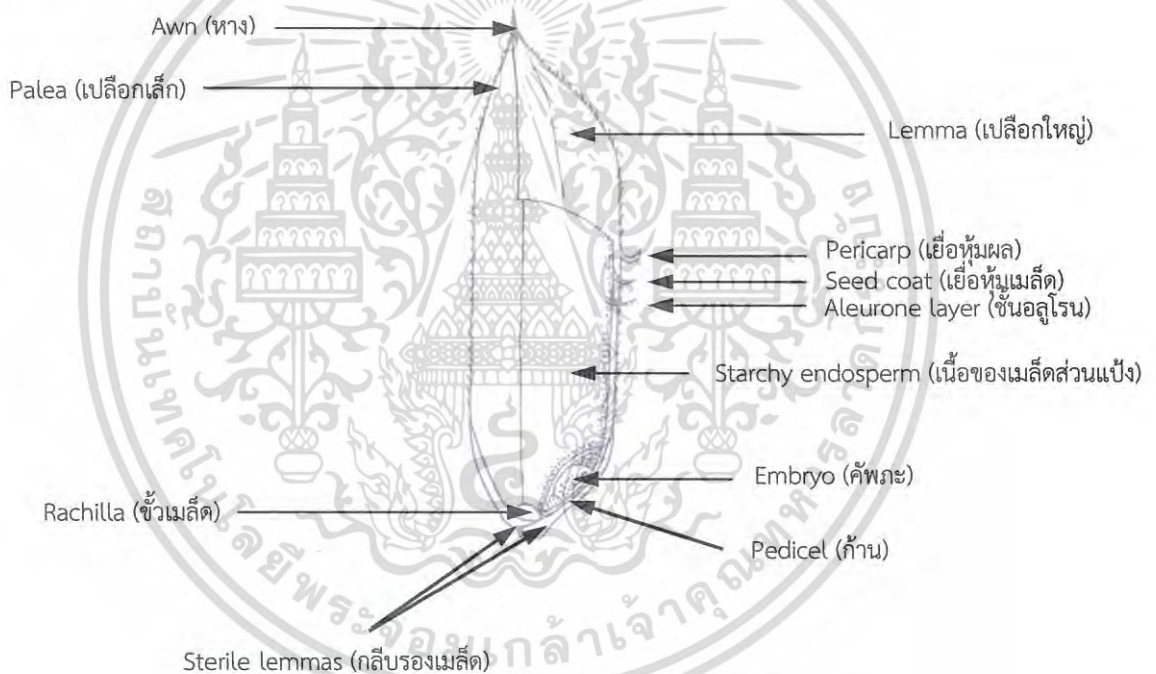
2.1 เยื่อหุ้มผล (Pericarp) เป็นผิวภายนอกของเมล็ดข้าวกล้องที่พัฒนามาจากผนังของรังไข่ของดอกข้าวมีความหนาประมาณ 10 μm

2.2 เยื่อหุ้มเมล็ด (Seed coat or Tegmen) เป็นเซลล์ชั้นเดียว มีความหนาประมาณ 0.5 μm ในส่วนนี้อุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน เซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

2.3 ชั้นออโรน (Aleurone Layer) ประกอบด้วยเซลล์ 1- 7 ชั้น เป็นชั้นที่มีคุณค่าทางอาหารสูง ภายในชั้นออโรนประกอบด้วยไขมันและโปรตีน ผนังเซลล์ประกอบด้วยโปรตีนเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ดังนั้นเมื่อบริโภคข้าวกล้องที่ยังไม่ได้ขัดสีเอาชั้นของออโรนออกไป จึงรู้สึกสากกว่าข้าวสารขาว

2.4 เอนโดสเปิร์ม (Endosperm) เป็นส่วนของเมล็ดข้าวสาร และมีแบ่งเป็น องค์ประกอบหลัก ภายในเมล็ดมีแบ่งอยู่ประมาณร้อยละ 84-93 โดยน้ำหนักแห้ง และมีโปรตีนอยู่ประมาณร้อยละ 5-14

2.5 คัพพะ หรือจุมูกข้าว (Embryo) เป็นส่วนเล็กๆ ที่อยู่ตรงปลายของเมล็ดข้าวซึ่งจะเจริญไปเป็นต้นอ่อนต่อไปภายในมีสารอาหารหลายชนิด เช่น วิตามิน B1 (Thiamine), B2 (Riboflavin) และไนอาซิน (Niacin) ซึ่งวิตามินเหล่านี้จะถูกขัดออกเมื่อผ่านกระบวนการสีข้าวหรือมีอยู่ในข้าวสารปริมาณที่น้อยมาก



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของเมล็ดข้าว (ดัดแปลงจาก [38])

2.1.1.2 องค์ประกอบทางเคมี [39]

เนื่องจากข้าวเป็นพืชอาหารหลักดังนั้นส่วนประกอบทางเคมีของข้าวจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแป้ง (คาร์โบไฮเดรต) เป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีในส่วนของแร่ธาตุอื่นๆอีกมากมายดังแสดงต่อไปนี้

1) คาร์โบไฮเดรต ในข้าวจะมีแป้งอยู่มากถึง 90% โดยน้ำหนักแห้ง กลุ่มของเม็ดแป้งที่อยู่ในอมิโล

พลาส (Amyloplast) จะมีรูปร่างกลมหรือรูปไข่ แป้งข้าวสามารถแยกเป็นองค์ประกอบย่อย 2 ชนิดคือ อมิโลเพคติน (Amylopectin) และอมิโลส (Amylose)

อมิโลเพคติน เป็นแป้งที่เป็นโพลิเมอร์ (Polymer) ของกลูโคส (Glucose) มีโครงสร้างของโมเลกุลเหมือนกิ่งไม้ (branched fraction) โดยส่วนที่เป็นเส้นตรงจะเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลของกลูโคสด้วยพันธะ α -D (1-4) bond โดย คุณสมบัติของอมิโลเพคติน ประกอบไปด้วย

- 1) มีอัตราส่วน Reducing end group ต่อ Non reducing end group แต่ละโมเลกุลมากกว่า 1
- 2) ทำปฏิกิริยากับไอโอดีน ได้สีม่วงแดงหรือน้ำตาลแดง
- 3) ดูดซับไอโอดีน (Iodine isopotentiometrically) ได้ต่ำ
- 4) น้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 10,000 DP (degree of polymerization)
- 5) ย่อยสลายด้วย เบต้า-เอไมเลส (β -amylase) ได้ต่ำ (ประมาณ 50%)
- 6) ไม่สามารถรวมตัวเป็นสารเชิงซ้อนกับ 1-butanol หรือสารอินทรีย์อื่น

อมิโลส เป็นโพลิเมอร์ของกลูโคสเช่นกัน แต่มีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นเส้นยาว (Linear fraction) โดยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -D (1-4) bond โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) อัตราส่วนของ Reducing end group ต่อ Non reducing end group แต่ละโมเลกุล มีค่าเป็น 1
- 2) ทำปฏิกิริยากับไอโอดีน ได้สีน้ำเงินเข้ม
- 3) ดูดซับไอโอดีนได้มาก
- 4) มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเพียง 600-1600 DP (degree of polymerization)
- 5) สามารถย่อยสลายด้วย เบต้า-เอไมเลส (β -Amylase) ได้ 100%
- 6) สามารถรวมตัวกับ 1-butanol และสารอินทรีย์ชนิดอื่น กลายเป็นสารเชิงซ้อน (Complex)
- 7) สามารถดูดซับด้วยเซลลูโลส
- 8) มี Intrinsic viscosity สูง และมี Solutions stability ต่ำ

2) โปรตีน เมล็ดข้าวกล้องมีปริมาณโปรตีน 4.8-12.1% โปรตีนในเมล็ดข้าวสามารถแบ่งเป็น 4 ชนิด ตามคุณสมบัติในการละลาย ได้แก่

- อัลบูมิน (Albumin) มีคุณสมบัติในการละลายน้ำ (Water soluble)
- โกลบูลิน (Globulin) มีคุณสมบัติละลายในน้ำเกลือ (salt soluble)
- โปรลามิน (Prolamin) มีคุณสมบัติละลายในแอลกอฮอล์ (alcohol soluble)
- กลูเทลิน (Glutelin) มีคุณสมบัติละลายในกรดหรือด่าง (acid or alkali soluble)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ไขมัน เมล็ดข้าวมีไขมันเพียง 1.6-2.8% ทั้งนี้ 80% ของไขมันอยู่ในส่วนของรำหยาบและรำละเอียด
- 4) แร่ธาตุ องค์ประกอบและปริมาณแร่ธาตุในเมล็ดข้าวขึ้นอยู่กับปริมาณแร่ธาตุในดิน ข้าวกล้องจะมีปริมาณแร่ธาตุสูงกว่าข้าวขาว
- 5) ไวตามิน ในข้าวกล้องมีวิตามินมากกว่าข้าวขาว ในเมล็ดข้าวจะขาดวิตามิน A, C และ D เมล็ดข้าวมีวิตามินในกลุ่มของวิตามิน B ประมาณ 34% ของไทอามิน (Thiamin: B₁) ที่มีอยู่ในเมล็ดข้าว จะอยู่ในส่วนของเยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด นิวเคลลัส และเยื่อลูโรน 47% อยู่ใน Scutellum มีเพียง 8% อยู่ในเอนโดสเปิร์มที่จะสีเป็นข้าวขาว

เมล็ดข้าวมีองค์ประกอบต่างๆมากมาย ทั้งภายนอกเมล็ดที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาและภายในที่อยู่ในรูปของสารอาหาร ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่รวมกันเป็นเมล็ดข้าว โดยข้าวแต่ละรูปแบบและส่วนที่ได้จากการขัดสีมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1 [38], [39]

ตารางที่ 2.1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวรูปแบบต่างๆ และส่วนที่ได้จากการขัดสีที่ความชื้น 14%

ส่วนของข้าว	โปรตีน (กรัม)	ไขมัน (กรัม)	เส้นใย (กรัม)	เถ้า (กรัม)	คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	เส้นใยอาหาร (กรัม)	พลังงาน	
							(กิโลจูล)	(กิโลแคลอรี)
ข้าวเปลือก	5.8-7.7	1.5-2.3	7.2-10.4	2.9-5.2	64-73	16.4-19.2	1,580	378
ข้าวกล้อง	7.1-8.3	1.6-2.8	0.6-1.0	1.0-1.5	73-87	2.9-3.9	1,520- 1,610	363-385
ข้าวสาร	6.3-7.1	0.3-0.5	0.2-0.5	0.3-0.8	77-89	0.7-2.3	1,460- 1,560	349-373
รำข้าว	11.3-14.9	15.0-19.7	7.0-11.4	6.6-9.9	34-62	24-29	670- 1,990	399-476
แกลบ	2.0-2.8	0.3-0.8	34.5-45.9	13.2- 21.0	22-34	66-74	1,110- 1,390	265-332

2.1.2 คุณภาพของเมล็ดข้าวและมาตรฐานสินค้าข้าวไทย

สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร [40] กล่าวถึงรายละเอียดเรื่องคุณภาพของเมล็ดข้าว (Grain quality) ไว้ในหนังสือคู่มือการเก็บข้อมูลพันธุ์ข้าวว่า คุณภาพเมล็ดประกอบด้วยคุณลักษณะทางกายภาพ (Physical characters) ได้แก่ข้าวเต็มเมล็ด (Whole kernel) คือเมล็ดข้างกล้องหรือข้าวสารที่อยู่ในสภาพเต็มเมล็ด และต้นข้าว (Head rice) คือเมล็ดข้าวกล้องหรือข้าวสารที่หัวหรือท้ายเมล็ดบางส่วนหักไป แต่เหลือความยาวไม่ต่ำกว่า 8 ใน 10 ส่วนของเมล็ด โดยคุณภาพของเมล็ดข้าวใช้ในการกำหนดเป็นมาตรฐานในการซื้อขาย

มาตรฐานสินค้าข้าวไทย

มาตรฐานสินค้าข้าวไทยกำหนดขึ้นโดยกระทรวงพาณิชย์เพื่อเป็นมาตรฐานในการจำหน่ายข้าวซึ่งประกาศ ณ วันที่ 31 มีนาคม 2540 มีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้ [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) มาตรฐานข้าว (Rice standard) หมายถึง คุณภาพตามประเภทหรือชนิดของข้าวโดยพิจารณาจากลักษณะของส่วนผสมของข้าวสารชนิดต่างๆ ตลอดจนการสีตามที่ได้กำหนดไว้สำหรับข้าวแต่ละประเภทหรือชนิด

2) ข้าว (Rice) หมายถึง ข้าวเจ้าหรือข้าวเหนียวไม่ว่าจะอยู่ในรูปแบบใด

3) ข้าวเปลือก (Paddy) หมายถึง ข้าวที่ไม่ผ่านการกะเทาะเปลือกออก

4) ข้าวกล้อง (Cargo rice, Brown rice, Husked rice) หมายถึง ข้าวที่ผ่านการกะเทาะเปลือกเท่านั้น

5) ข้าวขาว (White rice) ข้าวที่ได้จากการนำข้าวกล้องไปขัดเอารำออก

6) ข้าวเหนียวขาว (White glutinous rice) หมายถึง ข้าวที่ได้จากการนำข้าวกล้องเหนียวไปขัดเอารำออกเท่านั้น

7) ข้าวึ่ง (Parboiled rice) หมายถึง ข้าวที่ผ่านกระบวนการทำข้าวหนึ่งและขัดเอารำออกแล้ว

8) พันข้าว (Rice classification) หมายถึง เมล็ดข้าวที่มีขนาดความยาวระดับต่างๆตามที่กำหนด ซึ่งเป็นส่วนผสมของข้าวแต่ละชั้นตามอัตราส่วนที่กำหนด

9) ชั้นของเมล็ดข้าว (Classes of rice kernels) หมายถึง ชั้นของเมล็ดข้าวที่แบ่งตามระดับความยาวของข้าวเต็มเมล็ด

10) ส่วนของเมล็ดข้าว (Parts of rice kernels) หมายถึง ส่วนของข้าวเต็มเมล็ดแต่ละส่วนที่แบ่งตามความยาวของเมล็ดข้าวออกเป็น 10 ส่วนเท่าๆกัน

11) ข้าวเต็มเมล็ด (Whole kernels) หมายถึง เมล็ดข้าวที่อยู่สภาพเต็มเมล็ดไม่มีส่วนหักและไม่รวมถึงเมล็ดข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 9 ส่วนขึ้นไป

12) ต้นข้าว (Head rice) หมายถึง เมล็ดข้าวหักที่มีความยาวมากกว่าข้าวหักแต่ไม่ถึงความยาวของข้าวเต็มเมล็ด และให้รวมถึงเมล็ดข้าวแตกเป็นซีกที่มีเนื้อที่เหลืออยู่ตั้งแต่ร้อยละ 80 ของเมล็ดข้าว

13) ข้าวหัก (Broken kernel) หมายถึง เมล็ดข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 2.5 ส่วนขึ้นไปแต่ไม่ถึงความยาวของต้นข้าว และไม่รวมถึงเมล็ดข้าวแตกเป็นซีกที่มีเนื้อที่เหลืออยู่ไม่ถึงร้อยละ 80 ของเมล็ดข้าว

14) ขนาดเมล็ดข้าว แบ่งออกเป็น 5 ขนาดได้แก่ (ภาพที่ 2.2 และภาพที่ 2.3)

1. ข้าวเต็มเมล็ด (Whole grain) หมายถึง เมล็ดข้าวที่อยู่ในสภาพเต็มเมล็ด ซึ่งความยาวของข้าวเต็มเมล็ดคิดเป็น 10 ส่วน

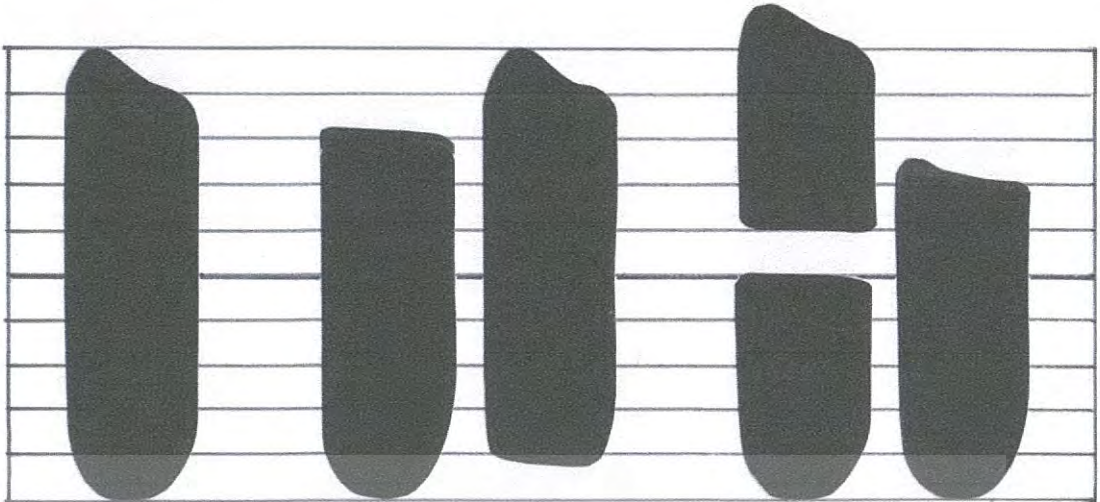
2. ต้นข้าว (Head rice) หมายถึง เมล็ดข้าวที่หักแต่มีความยาว 8-9.9 ส่วน

3. ข้าวหักใหญ่ (Big Broken Kernel) หมายถึง เมล็ดข้าวหักแต่มีความยาว 5-7.9 ส่วน

4. ข้าวหัก (Broken Kernel) หมายถึง เมล็ดข้าวหักแต่มีความยาว 2.5-4.9 ส่วน

5. ปลายข้าว (Small Broken Kernel) หมายถึง เมล็ดข้าวที่หักแล้วมีความยาวต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

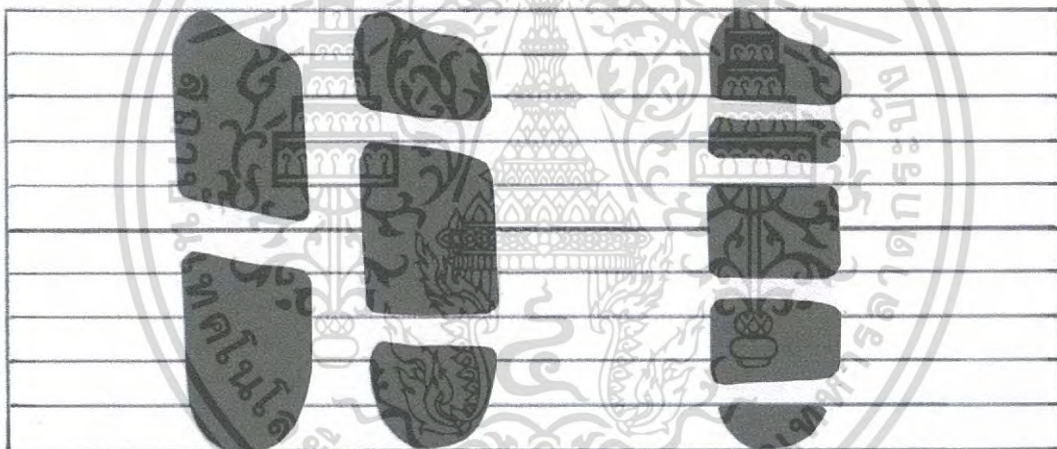


เต็มเมล็ด
แบ่งเป็น 10 ส่วน

ต้นข้าว
8-9.9 ส่วน

ข้าวหักใหญ่
5-7.9 ส่วน

ภาพที่ 2.2 ส่วนข้าวหัก (ดัดแปลงจาก [42])



ข้าวหัก
2.5-4.9 ส่วน

ปลายข้าว
เล็กกว่า 2.5 ส่วน

ภาพที่ 2.3 ส่วนข้าวหัก (ดัดแปลงจาก [42])

2.1.3 ข้าวหอมมะลิ

ข้าวหอมมะลิ (Hom Mali rice) เป็นสายพันธุ์ข้าวที่มีถิ่นกำเนิดในประเทศไทยและเป็นสินค้าส่งออกที่รู้จักไปทั่วโลก เนื่องจากมีลักษณะเฉพาะตัว คือมีกลิ่นหอมคล้ายกลิ่นของใบเตย ซึ่งเกิดจากสารระเหยชื่อ 2-acetyl-1-pyrroline โดยเป็นสารที่ระเหยหายไปได้ การรักษาความหอมของข้าวหอมมะลิให้คง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่นานนั้น ควรเก็บข้าวไว้ในที่เย็นอุณหภูมิประมาณ 15 องศาเซลเซียส เก็บข้าวเปลือกที่มีความชื้นต่ำ 14-15% ลดความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไป และมีรายงานจากนักวิชาการเกษตรกล่าวว่า การใช้ปุ๋ยโปตัสเซียมในการปลูกมีแนวโน้มช่วยให้ข้าวมีกลิ่นหอมมากขึ้น [43] ข้าวหอมมะลิจัดเป็นข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ เมื่อนำไปหุงเป็นข้าวสุกจึงนุ่มและค่อนข้างเหนียวเป็นที่นิยมของผู้บริโภค จึงทำให้มีปริมาณการส่งออกมากและราคาสูง จัดเป็นข้าวนาปี ปลูกได้เพียงปีละ 1 ครั้ง ลักษณะข้าวเปลือกเรียวยาว เมื่อสีเป็นข้าวสารจะได้ข้าวเมล็ดเรียวยาว ขาวใสเป็นเงา แกร่ง มีท้องไข่น้อย ข้าวหอมมะลิไทยมี 2 สายพันธุ์คือ พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และ กข.15 ข้าวพันธุ์ กข.15 คือข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่นำไปอาบรังสีแกมมา เพื่อให้ผลผลิตสูงกว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ประมาณ 4-6% โดยข้าวหอมมะลิ 105 มีผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 515 กิโลกรัมต่อไร่ [44] ประเทศไทยมีแหล่งเพาะปลูกข้าวหอมมะลิที่สำคัญในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (เขตทุ่งกุลาร้องไห้) และมีพื้นที่เพาะปลูกครอบคลุมกว่า 19 ล้านไร่ทั่วประเทศ โดยมีแหล่งผลิตสำคัญ คือ จังหวัดสุรินทร์ บุรีรัมย์ ศรีสะเกษ นครราชสีมา อุบลราชธานี ร้อยเอ็ด รองลงมาคือภาคเหนือ เนื่องจากสภาพดินฟ้าอากาศและพื้นที่เพาะปลูกของทั้งสองภาคคล้ายคลึงกัน เหมาะแก่การเจริญเติบโตของข้าวหอมมะลิ ข้าวหอมมะลิมีสารประกอบที่มีประโยชน์สำคัญต่อร่างกายมากมายจำแนกได้ดังนี้ [45]

- สาร Gamma-Orzanol ช่วยลดระดับไขมันคอเลสเตอรอลในเส้นเลือด ทำให้อวัยวะสำคัญต่างๆ เช่น ตับ ไต หัวใจ สมอง ตับอ่อน และอื่นๆ มีเลือดไปเลี้ยงมากขึ้น และทำให้อวัยวะที่เสื่อมสภาพให้กลับฟื้นตัว และทำงานได้อีกครั้ง ช่วยลดอัตราความเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจ, โรคตับ, โรคไต, โรคเบาหวาน, โรคความดันโลหิตสูง, โรคภูมิแพ้และโรคความจำเสื่อม โดยมีสารยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็ง
- ช่วยลดระดับของ แอล ดี แอล (LDL) คอเลสเตอรอล ซึ่งก่อให้เกิดโทษต่อร่างกาย
- ช่วยเพิ่มระดับของ เอช ดี แอล (HDL) คอเลสเตอรอล ซึ่งมีประโยชน์ต่อร่างกาย
- ช่วยลดระดับไขมันไตรกรีเซอไรด์ (Triglyceride) ในเส้นเลือด
- ไขมันที่สะสมอยู่ในส่วนต่างๆ ของร่างกายทำให้ระบบเผาผลาญทำงานได้ดีขึ้น ทำให้ไม่อ้วน มีผลให้ความดันโลหิตลดลง และช่วยลดระดับน้ำตาลในเส้นเลือด ยับยั้งโรคเบาหวานได้ผลดี
- มีกรดไขมันไลโนเลนิก (Linolenic acid) หรือโอเมก้า 3 ช่วยบำรุงสมอง ป้องกันภาวะเสื่อมของสมอง อันเป็นสาเหตุของโรคความจำเสื่อม โรคอัลไซเมอร์และโรคอัมพฤกษ์
- มีกรดไขมันไลโนเลอิก (Linoleic acid) หรือโอเมก้า 6 ช่วยให้ผิวหนังสดใสมีน้ำมีนวล และช่วยระบบสืบพันธุ์ให้ทำงานเป็นปกติ ทำให้ประจำเดือนมาปกติ
- ช่วยบำบัดอาการผิดปกติของชาย-หญิง วัยเจริญพันธุ์ (ให้ผลดีในการรักษาผู้มีบุตรยาก) และสตรีวัยทอง
- มีวิตามินอีในรูปของโทโคเฟอรอล (Tocopherol) และโทโคไตรอีนอล (Tocotrienol) ซึ่งจะช่วยยับยั้งการเกิดอนุมูลอิสระ ทำให้ร่างกายมีภูมิคุ้มกันโรคต่างๆ สำหรับโรคภูมิแพ้จะบำบัดได้ผลดีมาก
- มีสารเซราไมด์ (Ceramide) ช่วยบำรุงผิวพรรณให้นุ่มนวลอ่อนเยาว์ ลบเลือนริ้วรอยเหี่ยวย่น ต่างดำ ผิวกะด่าง ค่อยๆ จางลง

- ลดภาวะท้องผูก ช่วยลดภาวะเสี่ยงต่อการเป็นโรคริดสีดวงทวารและมะเร็งลำไส้ใหญ่
- มีสารเมลาโทนิน (Melatonin) ช่วยให้นอนหลับสบาย ช่วยลดอาการเครียด
- สารอาหารต่าง ๆ เช่น Vitamin A, Vitamin B รวม, เบต้าแคโรทีน ซึ่งมีส่วนช่วยให้การทำงานของระบบประสาทดีขึ้น

- ไตรกรีเซอไรด์, ลดอาการอักเสบ, ลดอาการบวม และช่วยสลายลิมโฟไซต์ ช่วยได้มากในผู้ที่ใช้ข้ออักเสบ เก๊าท์

- มีปริมาณสารสำคัญมากมายหลายชนิด และกรดไขมันไม่อิ่มตัวอีกหลายชนิดที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอันเป็นสาเหตุที่ทำให้เนื้อเยื่อเสื่อมสภาพ นอกจากนี้ยังมีสารอาหารที่สำคัญที่ช่วยสร้างภูมิคุ้มกันให้ร่างกายคือ สารเซเลเนียม โดยเฉพาะผู้ติดเชื้อ HIV จะได้ประโยชน์จากสารตัวนี้เป็นพิเศษ

ประเภทของข้าวหอมมะลิ

ปี พ.ศ. 2544 กรมการค้าต่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ได้ปรับปรุงมาตรฐานข้าวหอมมะลิไทย [46] โดยมีคำนิยามว่า “ข้าวหอมมะลิไทย” หมายถึง ข้าวกล้องและข้าวขาวที่แปรรูปจากข้าวเปลือกเจ้า พันธุ์ข้าวหอมที่ไวต่อช่วงแสงซึ่งผลิตในประเทศไทยในฤดูนาปี และกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ประกาศรับรอง เช่น พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และพันธุ์กข 15 ซึ่งมีกลิ่นหอมตามธรรมชาติ ขึ้นอยู่กับว่าเป็นข้าวใหม่หรือข้าวเก่า เมื่อหุงเป็นข้าวสวยแล้วเมล็ดข้าวสวยจะอ่อนนุ่ม ทั้งนี้ได้ระบุให้สินค้าข้าวหอมมะลิไทยต้องมีมาตรฐานดังนี้

1. มีข้าวหอมมะลิไทยไม่น้อยกว่าร้อยละ 92
2. มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 14
3. มีลักษณะโดยทั่วไปเป็นข้าวเมล็ดยาว มีความขาว ท้องไข่น้อยโดยธรรมชาติ
4. ไม่มีแมลงที่ยังมีชีวิตอยู่
5. มีขนาดเมล็ด ความยาวเฉลี่ยของเมล็ดที่ไม่มีส่วนใดหัก ไม่ต่ำกว่า 7.0 มม. อัตราส่วนความยาวเฉลี่ยของเมล็ดที่ไม่มีส่วนใดหักต่อความกว้างเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 3.2:1.0
6. คุณสมบัติทางเคมี มีปริมาณอมิโลสร้อยละ 13.0-18.0 มีค่าการสลายเมล็ดในต่าง ระดับ 6-7

นอกจากนั้นได้แบ่งประเภทของข้าวหอมมะลิไทยออกเป็น 2 ประเภท คือ ข้าวขาว (8 ชนิด) และข้าวกล้อง (6 ชนิด)

- ข้าวขาวแบ่งออกเป็น 8 ชนิด ดังนี้
 1. ข้าวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ชั้น 1
 2. ข้าวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ชั้น 2 (มีปริมาณส่งออกมากที่สุด)
 3. ข้าวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ชั้น 3
 4. ข้าวขาว 5 เปอร์เซ็นต์
 5. ข้าวขาว 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ข้าวขาว 15 เปอร์เซ็นต์
 7. ข้าวขาวหักเอววันเลิศพิเศษ
 8. ข้าวขาวหักเอววันเลิศ
- ข้าวกล้องแบ่งออกเป็น 6 ชนิด ดังนี้
1. ข้าวกล้อง 100 เปอร์เซ็นต์ ชั้น 1
 2. ข้าวกล้อง 100 เปอร์เซ็นต์ ชั้น 2
 3. ข้าวกล้อง 100 เปอร์เซ็นต์ ชั้น 3
 4. ข้าวกล้อง 5 เปอร์เซ็นต์
 5. ข้าวกล้อง 10 เปอร์เซ็นต์
 6. ข้าวกล้อง 15 เปอร์เซ็นต์

2.1.4 ผลกระทบข้าวหอมมะลิ

ประเทศไทยส่งออกข้าวมากเป็นอันดับหนึ่งของโลกมานานกว่า 20 ปีติดต่อกัน ปัจจุบันมีการส่งออกข้าวไทยไปประเทศต่างๆทั่วโลกมากกว่า 160 ประเทศ ในจำนวนปีละประมาณ 7 ล้านตัน โดยไทยมีส่วนแบ่งการตลาดประมาณร้อยละ 30 ของปริมาณการค้าข้าวของโลก คู่แข่งที่สำคัญของไทย คือ เวียดนาม จีนและสหรัฐอเมริกา ตามลำดับ และมีตลาดข้าวที่สำคัญ คือ ประเทศแถบเอเชียและตะวันออกกลาง โดยมีประเทศคู่ค้าที่สำคัญ คือ อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ จีน อิหร่าน และซาอุดีอาระเบีย โดยผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลถือเป็นสินค้าเกรดคุณภาพสูง เป็นข้าวที่มีชื่อเสียงและเป็นที่ยอมรับไปทั่วโลก และเป็นสินค้าที่จำหน่ายทั้งภายในประเทศและส่งออกต่างประเทศ โดยในปีพ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีการมีการส่งออกผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิเป็นปริมาณและมูลค่า 1.87 ล้านตัน และ 52.16 พันล้านบาท ตามลำดับ หรือคิดเป็นสัดส่วนปริมาณและมูลค่า 17% และ 29.83% ตามลำดับ ของการส่งออกผลิตภัณฑ์ข้าวรวมของประเทศ [1] บรรจุกัญชีข้าวหอมมะลิของประเทศไทยที่มีใช้ทั่วไปมี 3 ชนิดได้แก่ ได้แก่ กระสอบป่าน (Hemp sack) กระสอบพลาสติกสานชนิด PP (Polypropylene plastic sack) และถุงพลาสติกชนิด PE (Polyethylene plastic bag) บัทยาและคณะ (2542) [47] ได้รายงานว่าการส่งออกพบปัญหาการเกิดของแมลงศัตรูเข้าทำลายและเกิดการเสื่อมสภาพของข้าว รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการจัดการ โดยเฉพาะด้านแรงงานและค่าบรรจุกัญชีที่สูง โดยบรรจุกัญชีข้าวชนิดปิดผนึกปกติที่ใช้ในปัจจุบัน ไม่สามารถป้องกันการเกิดของแมลงศัตรูได้ ซึ่งพบการปริมาณของแมลงและหนอนเข้าทำลายข้าวผลิตภัณฑ์ข้าวมากขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาหรือในช่วงของการขนส่งผู้บริโภค โดยมีผลทำให้ข้าวเกิดการเสื่อมสภาพและข้าวที่หุงสุกมีกลิ่นเหม็น

กระทรวงพาณิชย์ได้ออกประกาศเรื่องหลักเกณฑ์และวิธีการตรวจสอบมาตรฐานสินค้าข้าวหอมมะลิไทยปี พ.ศ. 2545 [48] โดยมีส่วนที่สำคัญคือให้ผู้มีหน้าที่ตรวจสอบมาตรฐานสินค้า ดำเนินการตรวจสอบมาตรฐานสินค้าข้าวหอมมะลิไทยโดยแยกเป็น 2 ขั้นตอนคือ การตรวจสอบขั้นก่อนตรวจปล่อย และการตรวจสอบขั้นตรวจปล่อย และให้ปฏิบัติตามหลักเกณฑ์และวิธีการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การตรวจสอบขั้นก่อนตรวจปล่อย

1.1 ให้ผู้มีหน้าที่ตรวจสอบมาตรฐานสินค้า ดำเนินการตรวจสอบขั้นก่อนตรวจปล่อยโดยวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนี้

(1) ในกรณีสินค้าบรรจุกระสอบตั้งกองไว้เรียบร้อยแล้ว ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากกระสอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 ของจำนวนกระสอบทั้งหมด

(2) ในกรณีไม่อาจชักตัวอย่างโดยวิธีการตาม (1) ได้ เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการบรรจุหุ้มห่อเป็นกระสอบที่ทอด้วยเส้นใยสังเคราะห์หรือถุงพลาสติกหรืออย่างอื่นที่ผู้ซื้อได้ทำความตกลงกับผู้ทำการค้าขาออกไว้ ให้ชักตัวอย่างจากกระสอบหรือภาชนะบรรจุที่สุ่มมาจากกองสินค้าไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 ของจำนวนกระสอบหรือภาชนะบรรจุทั้งหมดด้วยวิธีการเปิดปากกระสอบหรือภาชนะบรรจุสินค้า

(3) ในกรณีสินค้าเก็บในถังไซโล ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีลำเลียงสินค้า ออกมาไม่น้อยกว่าร้อยละ 2 ของปริมาณสินค้าทั้งหมดในถังไซโล และสุ่มชักตัวอย่างทุกระยะ 1 เมตรกตัน

(4) ในกรณีสินค้ากำลังลำเลียงเข้าเก็บในคลังสินค้าหรือที่เก็บสินค้าหรือถังไซโล ให้สุ่มชักตัวอย่างสินค้าจากรถบรรทุกทุกคันรถหรือทุกๆ หน่วยที่มีปริมาณใกล้เคียงกับ 1 คันรถ

(5) ในกรณีสินค้าลำเลียงเพื่อบรรจุในภาชนะบรรจุขนาดใหญ่ (Jumbo Bag) ให้สุ่มชักตัวอย่างสินค้าเป็นระยะๆ อย่างสม่ำเสมอ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 ของจำนวนภาชนะบรรจุทั้งหมด

1.2 ในกรณีผู้จัดให้มีการตรวจสอบประสงค์จะจัดให้มีการตรวจสอบขั้นก่อนตรวจปล่อยในลักษณะตรวจปล่อยขณะทำการบรรจุ (Supervised Packing) ให้ผู้มีหน้าที่ตรวจสอบมาตรฐานสินค้า ดำเนินการตรวจสอบตามหลักเกณฑ์และวิธีการดังต่อไปนี้

(1) ก่อนเริ่มดำเนินการตรวจปล่อยขณะทำการบรรจุให้ดำเนินการ ตามข้อ 2.2

(2) ชักตัวอย่างสินค้าเต็มจำนวนที่จะพึงออกใบรับรองมาตรฐานสินค้าให้ เพื่อตรวจสอบคุณภาพสินค้าทางกายภาพ พร้อมทั้งให้ตรวจสอบภาชนะที่ใช้บรรจุหุ้มห่อไปพร้อมกันด้วย

(3) ในระหว่างการตรวจปล่อยขณะทำการบรรจุทุกระยะไม่เกิน 200 เมตรกตัน ให้ทำการตรวจสอบความชื้น ปริมาณ (ความบริสุทธิ์) ข้าวหอมมะลิไทย ขนาดเมล็ด ส่วนผสมข้าวและสิ่งที่มีอาจมีปนได้ และให้ใช้วิธีการตรวจสอบเบื้องต้นตามคำแนะนำใน ภาคผนวก ง ประกอบด้วย

(4) ตรวจสอบน้ำหนักสินค้าเต็มจำนวนที่จะพึงออกใบรับรองมาตรฐานสินค้าให้ เว้นแต่ในกรณีที่มีการบรรจุโดยใช้เครื่องชั่งอัตโนมัติ ให้สุ่มชั่งไม่น้อยกว่าร้อยละ 1 ของจำนวนกระสอบหรือภาชนะบรรจุที่จะพึงออกใบรับรองมาตรฐานสินค้าให้

1.3 ให้นำตัวอย่างสินค้าที่ชักไว้ตาม 1.1 หรือ 1.2 แล้วแต่กรณีมาคลุกเคล้ากันให้เป็นตัวอย่างเดียว ทอนและแบ่งตัวอย่างส่วนที่เหลือออกเป็น 6 ส่วน แต่ละส่วนมีน้ำหนักไม่น้อยกว่า 0.5 กิโลกรัม นำตัวอย่างแต่ละส่วนบรรจุลงในถุงหรือภาชนะที่ป้องกันการเปลี่ยนแปลงสภาพของตัวอย่างได้ ผนึกสลากแสดงวันเดือนปี และปริมาณสินค้าในกองหรือถังไซโลที่ชักตัวอย่าง แล้วให้ผู้มีหน้าที่ตรวจสอบมาตรฐานสินค้า และผู้แทนผู้จัดให้มีการตรวจสอบที่อยู่ในขณะชักตัวอย่างลงลายมือชื่อกำกับไว้ ทำตราประทับปากถุงหรือภาชนะ และให้ผู้ที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้นลงลายมือชื่อกำกับไว้ที่รอยผนึกสลากปากถุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือภาชนะอีกครั้งหนึ่ง แล้วส่งมอบตัวอย่างดังกล่าวให้ผู้มีหน้าที่รับมอบตามที่กำหนดไว้ในกฎกระทรวง และให้ถือผลวิเคราะห์ตัวอย่างขึ้นก่อนตรวจปล่อยนี้เป็นเกณฑ์ในการออกใบรับรองมาตรฐานสินค้าที่ต้องแสดงต่อเจ้าพนักงานศุลกากร

ในกรณีที่สำนักงานมาตรฐานสินค้าเป็นผู้ดำเนินการตรวจสอบให้จัดทำตัวอย่างตามวรรคหนึ่งเพียง 4 ส่วน ส่งมอบตัวอย่างดังกล่าวให้แก่ผู้ทำการค้าขาออก 1 ส่วน และนำกลับสำนักงานมาตรฐานสินค้า 3 ส่วน

1.4 ให้ประทับปิด หรือผูกติดตรา แผ่นป้าย หรือสลาก แสดงวัน เดือน ปี และปริมาณสินค้ากองหรือถังไซโลที่ชักตัวอย่าง แล้วทำตราประทับสินค้ากองหรือถังไซโลที่ได้ชักตัวอย่างไว้แล้วนั้น ในลักษณะที่สามารถใช้เป็นหลักฐานในการรักษาสินค้านั้นมิให้ถูกเพิ่มเติมสับเปลี่ยน หรือเปลี่ยนแปลงได้

2. การตรวจสอบขั้นตรวจปล่อย

2.1 สินค้าที่จะตรวจสอบขั้นตรวจปล่อยได้ ต้องเป็นสินค้าที่ปรากฏผลการตรวจสอบขั้นก่อนตรวจปล่อยว่าถูกต้องตามมาตรฐานที่กระทรวงพาณิชย์กำหนด หรือในกรณีที่มีการซื้อขายตามตัวอย่างหรือเงื่อนไข ต้องปรากฏผลการตรวจสอบว่ามีคุณภาพไม่ต่ำกว่าตัวอย่างหรือเงื่อนไขที่ผู้ซื้อได้ตกลงไว้

2.2 ก่อนเริ่มดำเนินการตรวจปล่อย ให้ผู้มีหน้าที่ตรวจสอบมาตรฐานสินค้าสุ่มชักตัวอย่างสินค้าจากกองกระสอบหรือภาชนะบรรจุหรือถังไซโล ปริมาณที่พอเหมาะเพื่อตรวจสอบความชื้น ปริมาณ (ความบริสุทธิ์) ข้าวหอมมะลิไทย ขนาดเมล็ด ส่วนผสม ข้าวและสิ่งที่มีปนได้ ระดับการสี ตลอดจนแมลงที่ยังมีชีวิตอยู่ และใช้วิธีการตรวจสอบเบื้องต้นตามคำแนะนำใน ภาคผนวก ก ประกอบด้วย

ถ้าพบว่ามีความคุณภาพส่วนหนึ่งส่วนใดหรือทั้งหมดไม่เป็นไปตามมาตรฐานหรือตามตัวอย่างหรือเงื่อนไขที่ผู้ซื้อตกลงไว้ ให้ผู้มีหน้าที่ตรวจสอบมาตรฐานสินค้าแจ้งให้ผู้จัดให้มีการตรวจสอบดำเนินการปรับปรุงคุณภาพสินค้าจนกว่ามีความถูกต้อง จึงจะดำเนินการตรวจปล่อยต่อไป

2.3 ให้ผู้มีหน้าที่ตรวจสอบมาตรฐานสินค้าดำเนินการชักตัวอย่างสินค้าเพื่อตรวจสอบคุณภาพสินค้าทางกายภาพ โดยวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนี้

(1) ในกรณีสินค้าบรรจุกระสอบ ให้ชักตัวอย่างสินค้าทุกกระสอบ

(2) ในกรณีไม่อาจชักตัวอย่างโดยวิธีดังกล่าวตาม (1) ได้ เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการบรรจุหุ้มห่อ เป็นกระสอบที่ทอด้วยเส้นใยสังเคราะห์หรือถุงพลาสติกหรืออย่างอื่นที่ผู้ซื้อได้ทำความตกลงกับผู้ทำการค้าขาออกไว้ ให้สุ่มทั้งกระสอบหรือภาชนะบรรจุสินค้าที่กำลังตรวจปล่อยเป็นระยะ ๆ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 ของจำนวนกระสอบหรือภาชนะบรรจุทั้งหมด ในแต่ละคำร้องขอให้ออกใบรับรองมาตรฐานสินค้า แล้วใช้วิธีเปิดปากกระสอบหรือภาชนะบรรจุเพื่อชักตัวอย่าง

(3) ในกรณีสินค้าเก็บในไซโลหรือเก็บในภาชนะบรรจุขนาดใหญ่ (Jumbo Bag) แล้วขนถ่ายเพื่อบรรจุกระสอบหรือภาชนะบรรจุ ให้สุ่มชักตัวอย่างสินค้าที่กำลังลำเลียงหรือขนถ่ายเป็นระยะๆ อย่างสม่ำเสมอ ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 ของจำนวนกระสอบหรือภาชนะบรรจุทั้งหมด เว้นแต่ในกรณี

ที่มีได้บรรจุหุ้มห่อ ให้ซึกตัวอย่างทุกๆ คันรถหรือทุกหน่วยหรือ ทุกกระยะขณะลำเลียงสินค้าในปริมาณที่เท่ากับ 1 คันรถบรรทุก โดยให้ซึกตัวอย่างคันรถละหรือหน่วยละไม่น้อยกว่า 0.5 กิโลกรัม

2.4 ในระหว่างการตรวจปล่อยสินค้าทุกกระยะไม่เกิน 200 เมตรกตัน ให้ทำการตรวจสอบความชื้น ปริมาณ (ความบริสุทธิ์) ข้าวหอมมะลิไทย ขนาดเมล็ด ส่วนผสมข้าวและสิ่งที่มีปนได้

2.5 ในกรณีสินค้าที่ตรวจสอบ ส่งออกโดยบรรจุกระสอบหรือภาชนะบรรจุ ให้ผู้มีหน้าที่ตรวจสอบมาตรฐานสินค้า ดำเนินการตรวจสอบกระสอบหรือภาชนะบรรจุให้เป็นไปตามที่ระบุไว้ในคำร้องขอให้ออกไปรับรองมาตรฐานสินค้าด้วย

2.6 สำหรับสินค้าที่ได้ดำเนินการตรวจสอบในขณะที่ทำการบรรจุ (Supervised Packing) ตาม 1.2 ไม่ต้องตรวจสอบและซึกตัวอย่างซ้ำอีก เว้นแต่สินค้าในกองนั้นเก็บไว้นานเกินกว่า 15 วัน นับแต่วันที่จัดทำตราประทับกองสินค้าไว้ครั้งแรก ให้ดำเนินการตรวจสอบชั้นตรวจปล่อยใหม่ตามข้อ 2

2.7 ให้ผู้มีหน้าที่ตรวจสอบมาตรฐานสินค้านำซึกตัวอย่างที่ซึกไว้ขณะตรวจสอบตาม 2.3 ในลักษณะที่สามารถป้องกันการเพิ่มเติมสับเปลี่ยนหรือเปลี่ยนแปลงได้

2.8 การตรวจสอบน้ำหนัก

ในกรณีสินค้าบรรจุกระสอบหรือภาชนะบรรจุ ถ้าซึกเป็นรายกระสอบหรือภาชนะบรรจุให้สุ่มซึกไม่น้อยกว่าร้อยละ 1 ของจำนวนกระสอบหรือภาชนะบรรจุที่จะพึงออกไปรับรองมาตรฐานสินค้าให้ ถ้าซึกพร้อมรถที่ใช้บรรทุกให้ซึกสินค้าเต็มจำนวนที่จะพึงออกไปรับรองมาตรฐานสินค้าให้

ในกรณีที่สินค้าไม่บรรจุกระสอบให้ตรวจสอบน้ำหนักเต็มจำนวนที่จะพึงออกไปรับรองมาตรฐานสินค้าให้

2.9 เมื่อตรวจสอบตามคำร้องขอให้ออกไปรับรองมาตรฐานสินค้าแต่ละคำร้องขอครบถ้วนแล้ว ให้จัดทำตัวอย่างที่ได้ซึกตัวอย่างไว้ตาม 2.3 ตามหลักเกณฑ์และวิธีการและส่งมอบให้ผู้มีหน้าที่รับมอบตั้งระบุไว้ใน 1.3

ในกรณีที่ผู้ทำการค้าขายออกซึกสินค้ามาตรฐานแจ้งความประสงค์จะขอให้ออกไปรับรองผลการตรวจสอบมาตรฐานสินค้าหรือผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเป็นตอน ๆ ตามปริมาณที่ตรวจสอบเสร็จตามที่แจ้งความประสงค์ไว้ โดยไม่ต้องรอให้การตรวจสอบครบถ้วนตามคำร้องขอให้ออกไปรับรองมาตรฐานสินค้า ให้จัดทำตัวอย่างหนึ่งตัวอย่างต่อสินค้าที่ได้ตรวจสอบแล้วเสร็จตามปริมาณที่แจ้งความประสงค์ไว้ การออกไปรับรองผลการตรวจสอบมาตรฐานสินค้าหรือผลการวิเคราะห์ตัวอย่างให้ถือผลเฉลี่ยของผลวิเคราะห์ตัวอย่างทั้งหมดของคำร้องขอนั้นเป็นเกณฑ์

กรณีสินค้าที่ได้ดำเนินการตรวจสอบในขณะที่ทำการบรรจุ (Supervised Packing) ผลวิเคราะห์ตัวอย่างตามคำร้องขอให้ออกไปรับรองมาตรฐานสินค้าแต่ละคำร้องขอ ให้อนุโลม ตามผลวิเคราะห์ตัวอย่างชั้นก่อนตรวจปล่อย โดยไม่ต้องจัดทำตัวอย่างอีก

2.10 ในกรณีที่ต้องบรรทุกสินค้าที่ได้รับการตรวจสอบไปขนถ่าย ณ ท่าเรือซึ่งอยู่ห่างไกลจากสถานที่ที่จัดให้มีการตรวจสอบ ให้จัดทำตราประทับสินค้าที่บรรทุกอยู่ในยานพาหนะนั้นไว้ในลักษณะที่สามารถใช้เป็นหลักฐานในการป้องกันการเพิ่มเติม สับเปลี่ยน หรือเปลี่ยนแปลงไว้จนกว่าจะเริ่มขนถ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 เมื่อสิ้นเวลาการตรวจสอบในแต่ละวันและการจัดให้มีการตรวจสอบนั้นยังไม่แล้วเสร็จ หรือในกรณีที่การตรวจสอบแล้วเสร็จแต่ยังมีสินค้าที่ได้ชักตัวอย่างในชั้นก่อนตรวจปล่อยคงเหลืออยู่ และผู้จัดให้มีการตรวจสอบประสงค์จะจัดให้มีการตรวจสอบชั้นตรวจปล่อยสินค้านั้นในครั้งต่อไป ให้ทำตราประทับสินค้ากองหรือถังไซโลที่เหลืออยู่นั้นเพื่อป้องกันการเพิ่มเติมสับเปลี่ยน หรือเปลี่ยนแปลงไว้ด้วย

ในปี พ.ศ. 2555 กระทรวงพาณิชย์ได้ออกประกาศเพิ่มเติมเรื่องการกำหนดให้ข้าวขาวเป็นสินค้ามาตรฐานและกำหนดมาตรฐานสินค้าข้าวขาว [49] ซึ่งมีใจความสำคัญดังนี้

ข้อ 1 คำนิยาม

- (1) ข้าวขาว หมายถึง ข้าว (*Oryza Sativa L.*) ที่ได้จากการนำข้าวกล้องเจ้าไปขัดเอารำออกแล้ว
- (2) พันธุ์ข้าว (Rice classification) หมายถึง เมล็ดข้าวที่มีขนาดความยาวระดับต่าง ๆ ตามที่กำหนด ซึ่งเป็นส่วนผสมของข้าวแต่ละชั้นตามอัตราส่วนที่กำหนด
- (3) ชั้นของเมล็ดข้าว (Classes of rice kernels) หมายถึง ชั้นของเมล็ดข้าวที่แบ่งตามระดับความยาวของข้าวเต็มเมล็ด
- (4) ส่วนของเมล็ดข้าว (Parts of rice Kernels) หมายถึง ส่วนของข้าวเต็มเมล็ดแต่ละส่วนที่แบ่งตามความยาวของเมล็ดออกเป็น 10 ส่วน เท่าๆกัน
- (5) ข้าวเต็มเมล็ด (Whole kernels) หมายถึง เมล็ดข้าวที่อยู่ในสภาพเต็มเมล็ด ไม่มีส่วนใดหักและให้รวมถึงเมล็ดข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 9 ส่วนขึ้นไป
- (6) ต้นข้าว (Head rice) หมายถึง เมล็ดข้าวหักที่มีความยาวมากกว่าข้าวหัก แต่ไม่ถึงความยาวของข้าวเต็มเมล็ด และให้รวมถึงเมล็ดข้าวแตกเป็นซีกที่มีเนื้อที่เหลืออยู่ตั้งแต่ร้อยละ 80 ของเมล็ด
- (7) ข้าวหัก (Broken) หมายถึง เมล็ดข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 2.5 ส่วนขึ้นไป แต่ไม่ถึงความยาวของต้นข้าว และให้รวมถึงเมล็ดข้าวแตกเป็นซีกที่มีเนื้อที่เหลืออยู่ไม่ถึงร้อยละ 80 ของเมล็ด
- (8) ปลายข้าวซีวัน (Small broken C 1) หมายถึง เมล็ดข้าวหักขนาดเล็กที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 7
- (9) ข้าวเมล็ดสีต่ำกว่ามาตรฐาน (Undermilled Kernels) หมายถึง เมล็ดข้าวที่ผ่านการขัดสีต่ำกว่าระดับการสีที่กำหนดไว้สำหรับข้าวแต่ละชนิด
- (10) ข้าวเมล็ดแดง (Red kernels) หมายถึง เมล็ดข้าวที่มีรำสีแดงหุ้มอยู่ทั้งเมล็ดหรือติดอยู่เป็นบางส่วนของเมล็ด
- (11) ข้าวเมล็ดเหลือง (Yellow kernels) หมายถึง เมล็ดข้าวที่มีบางส่วนของเมล็ดกลายเป็นสีเหลืองอย่างชัดเจน
- (12) ข้าวเมล็ดท้องไข (Chalky kernels) หมายถึง เมล็ดข้าวเจ้าที่เป็นสีขาวขุ่นเหมือนชอล์ค มีเนื้อที่ตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไป ของเนื้อที่เมล็ดข้าว
- (13) ข้าวเมล็ดเสีย (Damaged kernels) หมายถึง เมล็ดข้าวที่เสียอย่างเห็นได้ชัดแจ้งด้วยตาเปล่า ซึ่งเกิดจากความชื้น ความร้อน เชื้อรา แมลง หรืออื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(14) ข้าวเมล็ดลีบ (Undeveloped kernels) หมายถึง เมล็ดข้าวที่ไม่เจริญเติบโตตามธรรมชาติที่ควรจะเป็น มีลักษณะแฟบ แบน

(15) ข้าวเมล็ดอ่อน (Immature kernels) หมายถึง เมล็ดข้าวที่มีสีเขียวอ่อนได้จากข้าวเปลือกที่ยังไม่สุกแก่เพียงพอ

(16) เมล็ดพืชอื่น (Other seeds) หมายถึง เมล็ดพืชอื่น ๆ ที่มีใช้เมล็ดข้าว

(17) วัตถุอื่น (Foreign matter) หมายถึง สิ่งอื่น ๆ ที่มีใช้ข้าวรวมทั้งแกลบและรำที่หลุดจากเมล็ด

(18) ระดับการสี (Milling degree) หมายถึง ระดับของการขัดสีข้าว

(19) สีสดีพิเศษ (Extra well milled) หมายถึง การขัดสีเอารำออกทั้งหมดจนเมล็ดข้าวมีลักษณะสวยงามเป็นพิเศษ

(20) สีสดี (Well milled) หมายถึง การขัดสีเอารำออกทั้งหมดจนเมล็ดข้าวมีลักษณะสวยงามดี

(21) สีสปานกลาง (Reasonably well milled) หมายถึง การขัดสีเอารำออกเป็นส่วนมากจนเมล็ดข้าวมีลักษณะสวยงามพอสมควร

(22) สีธรรมดา (Ordinarily milled) หมายถึง การขัดสีเอารำออกแต่เพียงบางส่วน

(23) ตะแกรงเบอร์ 7 (Seive No.7) หมายถึง ตะแกรงโลหะรูกลม หน้า 0.79 มิลลิเมตร (0.031 นิ้ว) และเส้นผ่านศูนย์กลางรู 1.75 มิลลิเมตร (0.069 นิ้ว)

(24) ร้อยละ หมายถึง ร้อยละโดยน้ำหนัก ยกเว้นร้อยละของพื้นข้าว เป็นร้อยละโดยปริมาณ

ข้อ 2 ให้แบ่งชั้นของเมล็ดข้าวขาวออกเป็น 4 ชั้น ดังนี้

(1) ข้าวเมล็ดยาว ชั้น 1 (Long grain class 1) คือ ข้าวเต็มเมล็ดที่มีขนาดความยาวเกิน 7.0 มิลลิเมตร

(2) ข้าวเมล็ดยาว ชั้น 2 (Long grain class 2) คือ ข้าวเต็มเมล็ดที่มีขนาดความยาวเกิน 6.6 มิลลิเมตร ถึง 7.0 มิลลิเมตร

(3) ข้าวเมล็ดยาว ชั้น 3 (Long grain class 3) คือ ข้าวเต็มเมล็ดที่มีขนาดความยาวเกิน 6.2 มิลลิเมตร ถึง 6.6 มิลลิเมตร

(4) ข้าวเมล็ดสั้น (Short grain) คือข้าวเต็มเมล็ดที่มีขนาดความยาวไม่เกิน 6.2 มิลลิเมตร

ข้อ 3. ให้แบ่งข้าวขาวออกเป็น 8 ชนิด ดังนี้

(1) ข้าวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ชั้น 1

(2) ข้าวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ชั้น 2

(3) ข้าวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ชั้น 3

(4) ข้าวขาว 5 เปอร์เซ็นต์

(5) ข้าวขาว 10 เปอร์เซ็นต์

(6) ข้าวขาว 15 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(7) ข้าวขาว 25 เปอร์เซ็นต์เลิศ

(8) ข้าวขาว 25 เปอร์เซ็นต์

ข้อ 4 สีนค่ามาตรฐานข้าวขาวทุกชนิด ต้องมีมาตรฐาน ดังต่อไปนี้

(1) มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 14.0

(2) ไม่มีแมลงที่ยังมีชีวิตอยู่

ข้อ 5 ให้กำหนดมาตรฐานสินค้าข้าวขาว ไว้ดังต่อไปนี้

(1) ข้าวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ชั้น 1

ต้องมีพื้นข้าว ส่วนผสมของเมล็ดข้าว และระดับการสี ดังนี้

พื้นข้าว ประกอบด้วย

ข้าวเมล็ดยาวชั้น 1 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70.0 นอกนั้นเป็นข้าวเมล็ดยาวชั้น 2 ในจำนวนทั้งหมดนี้อาจมีข้าวเมล็ดยาวชั้น 3 ได้ไม่เกินร้อยละ 5.0

ส่วนผสม ประกอบด้วย

ข้าวเต็มเมล็ด ไม่น้อยกว่าร้อยละ 60.0

ข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 5.0 ส่วนขึ้นไป แต่ไม่ถึง 8.0 ส่วนไม่เกินร้อยละ 4.0 นอกนั้นเป็นต้นข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 8.0 ส่วนขึ้นไป

ข้าวที่อาจมีปนได้

ข้าวเมล็ดท้องไข ไม่เกินร้อยละ 3.0

ข้าวเหนียวขาว ไม่เกินร้อยละ 1.5

ข้าวเปลือก ไม่เกิน 5 เมล็ดต่อข้าว 1 กิโลกรัม

ระดับการสี สีดพิเศษ

(2) ข้าวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ชั้น 2

ต้องมีพื้นข้าว ส่วนผสมของเมล็ดข้าว และระดับการสี ดังนี้

พื้นข้าว ประกอบด้วย

ข้าวเมล็ดยาวชั้น 1 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 40.0 นอกนั้นเป็นข้าวเมล็ดยาวชั้น 2 และหรือชั้น 3 ในจำนวนทั้งหมดนี้อาจมีข้าวเมล็ดสั้นได้ไม่เกินร้อยละ 5.0

ส่วนผสม ประกอบด้วย

ข้าวเต็มเมล็ด ไม่น้อยกว่าร้อยละ 60.0

ข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 5.0 ส่วนขึ้นไป แต่ไม่ถึง 8.0 ส่วนไม่เกินร้อยละ 4.5 ในจำนวนนี้อาจมีข้าวหักที่มีความยาวไม่ถึง ๕.๐ ส่วน และไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7 ไม่เกินร้อยละ 0.5 และปลายข้าวขาวสีวันไม่เกินร้อยละ 0.1 นอกนั้นเป็นต้นข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 8.0 ส่วนขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าวและสิ่งทีอาจมีปนได้

ข้าวเมล็ดเหลือง ไม่เกินร้อยละ 0.2

ข้าวเมล็ดทองไข่ ไม่เกินร้อยละ 6.0

ข้าวเมล็ดเสีย ไม่เกินร้อยละ 0.25

ข้าวเหนียวขาว ไม่เกินร้อยละ 1.5

ข้าวเปลือก ไม่เกิน 7 เมล็ดต่อข้าว 1 กิโลกรัม

ข้าวเมล็ดลีบ ข้าวเมล็ดอ่อน เมล็ดพีชอื่น และวัตถุอื่น อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างรวมกันไม่เกินร้อยละ 0.2

ระดับการสี สีดีพิเศษ

(3) ข้าวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ชั้น 3

ต้องมีพื้นข้าว ส่วนผสมของเมล็ดข้าว และระดับการสี ดังนี้

พื้นข้าว ประกอบด้วย

ข้าวเมล็ดยาวชั้น 1 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30.0 นอกนั้นเป็นข้าวเมล็ดยาวชั้น 2 และหรือชั้น 3 ในจำนวนทั้งหมดนี้ อาจมีข้าวเมล็ดสั้นได้ไม่เกินร้อยละ 5.0

ส่วนผสม ประกอบด้วย

ข้าวเต็มเมล็ด ไม่น้อยกว่าร้อยละ 60.0

ข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 5.0 ส่วนขึ้นไป แต่ไม่ถึง 8.0 ส่วน ไม่เกินร้อยละ 5.0 ในจำนวนนี้อาจมีข้าวหักที่มีความยาวไม่ถึง 5.0 ส่วน และไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7 ไม่เกินร้อยละ 0.5 และปลายข้าวขาวชั้วนไม่เกินร้อยละ 0.1 นอกนั้นเป็นต้นข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 8.0 ส่วนขึ้นไป

ข้าวและสิ่งทีอาจมีปนได้

ข้าวเมล็ดเหลือง ไม่เกินร้อยละ 0.2

ข้าวเมล็ดทองไข่ ไม่เกินร้อยละ 6.0

ข้าวเมล็ดเสีย ไม่เกินร้อยละ 0.25

ข้าวเหนียวขาว ไม่เกินร้อยละ 1.5

ข้าวเปลือก ไม่เกิน 7 เมล็ดต่อข้าว 1 กิโลกรัม

ข้าวเมล็ดลีบ ข้าวเมล็ดอ่อน เมล็ดพีชอื่น และวัตถุอื่น อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างรวมกันไม่เกินร้อยละ 0.2

ระดับการสี สีดีพิเศษ

(4) ข้าวขาว 5 เปอร์เซ็นต์

ต้องมีพื้นข้าว ส่วนผสมของเมล็ดข้าว และระดับการสี ดังนี้

พื้นข้าว ประกอบด้วย

ข้าวเมล็ดยาวชั้น 1 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20.0 นอกนั้นเป็นข้าวเมล็ดยาวชั้น 2 และหรือชั้น 3 ในจำนวนทั้งหมดนี้ อาจมีข้าวเมล็ดสั้นได้ไม่เกินร้อยละ 10.0

ส่วนผสม ประกอบด้วย

ข้าวเต็มเมล็ด ไม่น้อยกว่าร้อยละ 60.0

ข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 3.5 ส่วนขึ้นไป แต่ไม่ถึง 7.5 ส่วน ไม่เกินร้อยละ 7.0 ในจำนวนนี้อาจมีข้าวหักที่มีความยาวไม่ถึง 3.5 ส่วน และไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7 ไม่เกินร้อยละ 0.5 และปลายข้าวขาวสีวัน ไม่เกินร้อยละ 0.1 นอกนั้นเป็นต้นข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 7.5 ส่วนขึ้นไป

ข้าวและสิ่งทีอาจมีปนได้

ข้าวเมล็ดแดงและหรือข้าวเมล็ดสีต่ำกว่ามาตรฐาน ไม่เกินร้อยละ 2.0

ข้าวเมล็ดเหลือง ไม่เกินร้อยละ 0.5

ข้าวเมล็ดท้องไข่ ไม่เกินร้อยละ 6.0

ข้าวเมล็ดเสีย ไม่เกินร้อยละ 0.25

ข้าวเหนียวขาว ไม่เกินร้อยละ 1.5

ข้าวเปลือก ไม่เกิน 10 เมล็ดต่อข้าว 1 กิโลกรัม

ข้าวเมล็ดลีบ ข้าวเมล็ดอ่อน เมล็ดฟิซขึ้น และวัตถุอื่น ใดๆอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างรวมกันไม่เกินร้อยละ 0.3

ระดับการสี สีดี

(5) ข้าวขาว 10 เปอร์เซ็นต์

ต้องมีพื้นข้าว ส่วนผสมของเมล็ดข้าว และระดับการสี ดังนี้
พื้นข้าว ประกอบด้วย

ข้าวเมล็ดยาวชั้น 1 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 10.0 นอกนั้นเป็นข้าวเมล็ดยาวชั้น 2 และหรือชั้น 3 ในจำนวนทั้งหมดนี้ อาจมีข้าวเมล็ดสั้นได้ไม่เกินร้อยละ 15.0

ส่วนผสม ประกอบด้วย

ข้าวเต็มเมล็ด ไม่น้อยกว่าร้อยละ 55.0

ข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 3.5 ส่วนขึ้นไป แต่ไม่ถึง 7.0 ส่วน ไม่เกินร้อยละ 12.0 ในจำนวนนี้อาจมีข้าวหักที่มีความยาวไม่ถึง 3.5 ส่วน และไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7 ไม่เกินร้อยละ 0.7 และปลายข้าวขาวสีวัน ไม่เกินร้อยละ 0.3 นอกนั้นเป็นต้นข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 7.0 ส่วนขึ้นไป

ข้าวและสิ่งทีอาจมีปนได้

ข้าวเมล็ดแดงและหรือข้าวเมล็ดสีต่ำกว่ามาตรฐาน ไม่เกินร้อยละ 2.0

ข้าวเมล็ดเหลือง ไม่เกินร้อยละ 1.0

ข้าวเมล็ดท้องไข่ ไม่เกินร้อยละ 7.0

ข้าวเมล็ดเสีย ไม่เกินร้อยละ 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าวเหนียวขาว ไม่เกินร้อยละ 1.5

ข้าวเปลือก ไม่เกิน 15 เมล็ดต่อข้าว 1 กิโลกรัม

ข้าวเมล็ดลีบ ข้าวเมล็ดอ่อน เมล็ดพีชอื่น และวัตถุอื่น อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือ หลายอย่างรวมกันไม่เกินร้อยละ 0.4

ระดับการสี สีดี

(6) ข้าวขาว 15 เปอร์เซ็นต์

ต้องมีพื้นข้าว ส่วนผสมของเมล็ดข้าว และระดับการสี ดังนี้

พื้นข้าว ประกอบด้วย

ข้าวเมล็ดยาวชั้น 1 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5.0 นอกนั้นเป็นข้าวเมล็ดยาวชั้น 2 และหรือชั้น 3 ในจำนวนทั้งหมดนี้ อาจมีข้าวเมล็ดสั้นได้ไม่เกินร้อยละ 30.0

ส่วนผสม ประกอบด้วย

ข้าวเต็มเมล็ด ไม่น้อยกว่าร้อยละ 55.0

ข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 3.0 ส่วนขึ้นไป แต่ไม่ถึง 6.5 ส่วน ไม่เกินร้อยละ 17.0 ในจำนวนนี้อาจมีข้าวหักที่มีความยาวไม่ถึง 3.0 ส่วน และไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7 ไม่เกินร้อยละ 2.0 และปลายข้าวขาวชิว้นไม่เกินร้อยละ 0.5 นอกนั้นเป็นต้นข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 6.5 ส่วนขึ้นไป

ข้าวและสิ่งที่มีปนได้

ข้าวเมล็ดแดงและหรือข้าวเมล็ดสีต่ำกว่ามาตรฐาน ไม่เกินร้อยละ 5.0

ข้าวเมล็ดเหลือง ไม่เกินร้อยละ 1.0

ข้าวเมล็ดท้องไข่ ไม่เกินร้อยละ 7.0

ข้าวเมล็ดเสีย ไม่เกินร้อยละ 1.0

ข้าวเหนียวขาว ไม่เกินร้อยละ 2.0

ข้าวเปลือก ไม่เกิน 15 เมล็ดต่อข้าว 1 กิโลกรัม

ข้าวเมล็ดลีบ ข้าวเมล็ดอ่อน เมล็ดพีชอื่น และวัตถุอื่น อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือ หลายอย่างรวมกัน

ไม่เกินร้อยละ 0.4

ระดับการสี สีดีปานกลาง

(7) ข้าวขาว 25 เปอร์เซ็นต์เลิศ

ต้องมีพื้นข้าว ส่วนผสมของเมล็ดข้าว และระดับการสี ดังนี้

พื้นข้าว ประกอบด้วย

ข้าวเมล็ดยาวชั้น 1 ชั้น 2 และชั้น 3 อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างรวมกัน โดยอาจมีข้าวเมล็ดสั้นได้ไม่เกินร้อยละ 50.0

ส่วนผสม ประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้าวเต็มเมล็ด ไม่น้อยกว่าร้อยละ 40.0

ข้าวหักที่มีความยาวไม่ถึง 5.0 ส่วน และไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7 ไม่เกินร้อยละ 28.0 ในจำนวนนี้อาจมีปลายข้าวขาวซีวันไม่เกินร้อยละ 1.0 นอกนั้นเป็นต้นข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 5.0 ส่วนขึ้นไป

ข้าวและสิ่งที่มีปนได้

ข้าวเมล็ดแดงและหรือข้าวเมล็ดสีต่ำกว่ามาตรฐาน ไม่เกินร้อยละ 5.0

ข้าวเมล็ดเหลือง ไม่เกินร้อยละ 1.0

ข้าวเมล็ดท้องไข ไม่เกินร้อยละ 7.0

ข้าวเมล็ดเสีย ไม่เกินร้อยละ 1.0

ข้าวเหนียวขาว ไม่เกินร้อยละ 2.0

ข้าวเปลือก ไม่เกิน 15 เมล็ดต่อข้าว 1 กิโลกรัม

ข้าวเมล็ดลีบ ข้าวเมล็ดอ่อน เมล็ดพีชอื่น และวัตถุอื่น อย่างไม่อย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างรวมกันไม่เกินร้อยละ 1.0

ระดับการสี สีตีปานกลาง

(8) ข้าวขาว 25 เปอร์เซ็นต์

ต้องมีพื้นข้าว ส่วนผสมของเมล็ดข้าว และระดับการสี ดังนี้

พื้นข้าว ประกอบด้วย

ข้าวเมล็ดยาวชั้น 1 ชั้น 2 และชั้น 3 อย่างไม่อย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างรวมกัน โดยอาจมีข้าวเมล็ดสั้นได้ไม่เกินร้อยละ 50.0

ส่วนผสม ประกอบด้วย

ข้าวเต็มเมล็ด ไม่น้อยกว่าร้อยละ 40.0

ข้าวหักที่มีความยาวไม่ถึง 5.0 ส่วน และไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7 ไม่เกินร้อยละ 28.0 ในจำนวนนี้อาจมีปลายข้าวขาวซีวันไม่เกินร้อยละ 2.0 นอกนั้นเป็นต้นข้าว ที่มีความยาวตั้งแต่ 5.0 ส่วนขึ้นไป

ข้าวและสิ่งที่มีปนได้

ข้าวเมล็ดแดงและหรือข้าวเมล็ดสีต่ำกว่ามาตรฐาน ไม่เกินร้อยละ 7.0

ข้าวเมล็ดเหลือง ไม่เกินร้อยละ 1.0

ข้าวเมล็ดท้องไข ไม่เกินร้อยละ 8.0

ข้าวเมล็ดเสีย ไม่เกินร้อยละ 2.0

ข้าวเหนียวขาว ไม่เกินร้อยละ 2.0

ข้าวเปลือก ไม่เกิน 20 เมล็ดต่อข้าว 1 กิโลกรัม

ข้าวเมล็ดลีบ ข้าวเมล็ดอ่อน เมล็ดพีชอื่น และวัตถุอื่น อย่างไม่อย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างรวมกันไม่เกินร้อยละ 2.0

ระดับการสี สีธรรมชาติ แต่ไม่เกินสีตีปานกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อ 6 ในกรณีที่มีการซื้อขายข้าวขาวตามตัวอย่างหรือเงื่อนไข ข้าวขาวนั้นต้องมีมาตรฐานไม่ต่ำกว่า ตัวอย่างหรือเงื่อนไขที่ผู้ซื้อตกลงไว้ และสำนักงานมาตรฐานสินค้าได้เห็นชอบแล้ว

ข้อ 7 การวินิจฉัยเกี่ยวกับมาตรฐานหรือคุณภาพของสินค้ามาตรฐานข้าวขาวหรือข้าวขาวตาม ตัวอย่าง ให้ถือผลการตรวจสอบและวิเคราะห์ของสำนักงานมาตรฐานสินค้าหรือหน่วยงานที่สำนักงาน มาตรฐานสินค้ามอบหมายเป็นเกณฑ์

ในกรณีที่มีปัญหาข้อโต้แย้งเกี่ยวกับผลการวินิจฉัย ให้ถือผลการตรวจสอบและวิเคราะห์ของ สำนักงานมาตรฐานสินค้า หรือหน่วยงานที่สำนักงานมาตรฐานสินค้ามอบหมาย แล้วแต่กรณีเป็นที่สุด

ข้อ 8 ในกรณีส่งสินค้ามาตรฐานข้าวขาวหรือข้าวขาวตามตัวอย่าง ออกไปนอกราชอาณาจักรโดย บรรจุกะสอบหรือภาชนะบรรจุอื่นใด ให้ผู้ทำการค้าขอออกแจ้งรายละเอียดเกี่ยวกับวัตถุที่ใช้บรรจุหุ้มห่อ ตลอดจนการเย็บ ปิดผนึกไว้ในคำร้องขอให้ออกใบรับรองมาตรฐานสินค้าด้วย

2.2 แมลงศัตรูข้าวและการตรวจสอบ

2.2.1 แมลงศัตรูข้าว

ข้าวมีศัตรูพืชหลายชนิดเข้าทำลายทั้งในระยะที่ข้าวอยู่ในแปลง และเก็บรักษาในโรงเก็บเพื่อรอการ จำหน่ายและบริโภค โดยข้าวหลังการเก็บเกี่ยวทั้งในรูปแบบข้าวเปลือก ข้าวกล้องและข้าวสารจะมีแมลงที่ เข้าทำลายได้ตามชนิดต่างๆ โดยจะมีความเสียหายที่เกิดขึ้นจากปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการคือ ปัจจัยทาง กายภาพ (Physical factor) ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศ และปัจจัยทางชีวภาพ (Biological factor) ได้แก่ แมลง ไร เชื้อรา นกและหนู ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าแมลงเป็นศัตรูที่สำคัญและทำความเสียหายให้ข้าวหลังการเก็บเกี่ยวมากที่สุด เนื่องจากแมลงศัตรูข้าวสามารถแพร่กระจายได้ทั่วโลก อาศัยและ มีชีวิตได้ทุกสภาพอากาศและภูมิภาคต่างๆ โดยมันสามารถติดไปกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นสิ่งบริโภคและมีการซื้อ ขายกันทั่วโลกทำให้สามารถเกิดการระบาดได้ตลอดปี ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแมลงอยู่ในช่วง 5-10% ของผลผลิตทั้งหมด จากการสำรวจความเสียหายโดยเฉลี่ยทั่วโลกของ FAO โดยในบางประเทศมีความเสียหายสูงถึง 50% [4] นอกจากการสูญเสียทางเศรษฐกิจแล้ว ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแมลงยังทำให้ เมล็ดพันธุ์สูญเสียความงอกและทำให้คุณภาพของข้าวไม่ได้มาตรฐานของตลาดต่างประเทศด้วย บางครั้งพบ ผลิตภัณฑ์ข้าวถูกประท้วงหรือส่งกลับคืนในกรณีที่พบความเสียหายและปริมาณแมลงมากเกินกำหนด ทำให้ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ข้าวของประเทศไทยจำหน่ายได้ในราคาที่ไม่ดีเท่าที่ควร [42] แมลงศัตรูข้าวที่สำคัญมีอยู่ หลายชนิดเมื่อพิจารณาตามลักษณะการเข้าทำลายจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ กัดกินหรือทะลุเล็ม จากภายนอก (External feeder) โดยจะทำให้เกิดขุยและผิวของเมล็ดข้าวถูกทำลาย ถักไยเกาะติดกันเป็น ก้อน ได้แก่ ผีเสื้อข้าวสาร มอดแป้ง มอดสยาม มอดพันเลื่อย มอดหนวดยาว และเหาหนังสือ อีกประเภท หนึ่งคือ กัดกินภายในเมล็ด (Internal feeder) โดยแมลงจะอาศัยและทำลายอยู่ภายในเมล็ด เพศเมียมัก วางไข่ที่ผิวนอกเมล็ด เมื่อไข่ฟักเป็นตัวหนอน จะเจาะเข้าสู่ภายในเมล็ดข้าว กัดกินและเจริญเติบโตจนครบ

วงจรชีวิต ตัวเต็มวัยจะเจาะเมล็ดออกมาทำให้เมล็ดข้าวเป็นรูและภายในเป็นโพรง แมลงประเภทนี้ได้แก่ มอดข้าวสาร ผีเสื้อข้าวเปลือก มอดข้าวเปลือก [50]

ระยะเวลาการเข้าทำลายของแมลงศัตรูข้าว [42]

ความเสียหายของเมล็ดและผลิตผลนั้นเกิดขึ้นจากหลายปัจจัยและสามารถเกิดขึ้นได้ทุกระยะเวลา ตั้งแต่อยู่ในแปลง ช่วงการเก็บเกี่ยวและหลังการเก็บเกี่ยว โดยที่แมลงเป็นสาเหตุสำคัญของความเสียหาย ระยะเวลาที่แมลงสามารถเข้าทำลายแบ่งได้ดังนี้

1. ก่อนเก็บเกี่ยว

แมลงศัตรูข้าวหลายชนิดเช่น ตัวงวงข้าว ตัวงวงข้าวโพดและผีเสื้อข้าวเปลือก เป็นต้น สามารถบินออกจากโรงเก็บเมล็ดไปวางไข่ที่เมล็ดหรือฝักข้าวในแปลงปลูกได้

2. ขณะเก็บเกี่ยว

ประเทศไทยนิยมเก็บเกี่ยวข้าวแล้วทิ้งไว้ในแปลงปลูกเพื่อตากเมล็ดลดความชื้น นวด หรือสีเอาเมล็ดออก ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวและทิ้งผลผลิตไว้ในแปลงหรือลานตาก ก็เป็นช่วงที่ทำให้แมลงลงทำลายได้มาก ซึ่งจะพบว่าแมลงหลายชนิดที่สามารถบินและทำลายในระยะนี้ได้

3. หลังการเก็บเกี่ยว

3.1 การปฏิบัติเกี่ยวกับเมล็ด

เมล็ดพืชและผลิตผลบางชนิดจะต้องนำมากะเทาะเปลือกหุ้มเมล็ด ขัดสี คัดแยกทำความสะอาด สะอาดช่วงระยะเวลาปฏิบัติงานเหล่านี้โดยมากจะใช้สถานที่ใกล้กับโรงเก็บหรือสถานที่เดียวกัน ซึ่งเดิมมีแมลงอาศัยอยู่แล้วทำให้แมลงเข้าไปทำลายผลิตผลได้

3.2 ขณะทำการขนส่ง

ในการขนส่งจากที่หนึ่งไปยังที่หนึ่งต้องใช้เวลานานและหากขนส่งโดยวิธีใส่กระสอบ ป่านหรือขนส่งในปริมาณมากๆ โดยมิได้บรรจุภาชนะใดๆ แมลงก็สามารถเข้าทำลายในช่วงระยะเวลานี้ได้

3.3 ขณะเก็บรักษา (Storage)

การเก็บรักษาเมล็ดพืชหรือผลิตผล คือการป้องกันและยับยั้งการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดพืชหรือผลิตผลนั้นๆ นั่นเอง การเก็บรักษาไม่สามารถเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของเมล็ดพืชและผลิตผลได้ และในระหว่างการเก็บรักษาสภาพแวดล้อมและปัจจัยต่างๆ จะมีผลต่อเมล็ดพืชและผลิตผลทำให้เสื่อมคุณภาพโดยเฉพาะแมลงซึ่งเมื่อเข้าทำลายและแพร่ระบาดทำความเสียหายเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

ประเภทของความเสียหาย (Types of Loss) [50]

1. สูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) แมลงสามารถกินอาหารได้มากกว่าน้ำหนักตัวหลายเท่า เมื่อแพร่ระบาดมากจะทำให้สูญเสียน้ำหนักมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สูญเสียคุณค่าทางอาหาร (Food Loss) เมื่อแมลงเข้าทำลายจะทำให้เมล็ดสูญเสียคุณค่าทางอาหารไป โดยแมลงชอบทำลายส่วนคัพภะ (embryo) มากกว่าส่วน endosperm เนื่องจากส่วนคัพภะจะนุ่มกว่าส่วน endosperm

3. สูญเสียความงอก (Seed Germination Loss) เนื่องจากแมลงชอบทำลายส่วนคัพภะ เป็นผลทำให้เมล็ดสูญเสียความงอก หรือบางเมล็ดถูกทำลายน้อย แม้จะงอกแต่สภาพของเมล็ดที่งอกจะไม่สมบูรณ์ และไม่สามารถเจริญเติบโตต่อไปได้

4. สูญเสียคุณภาพ (Quality Loss) ทำให้ความสม่ำเสมอของเมล็ดเสียไป การเข้าไปปะปนของแมลง และของเสียจากแมลง ทำให้เกิดกลิ่นเหม็น คุณภาพเปลี่ยนไป นอกจากนี้ซากหรือชิ้นส่วนของแมลงที่ติดอยู่กับอาหารทำให้เกิดการปนเปื้อน และคุณภาพเมล็ดเสียหาย เมื่อแมลงเข้าทำลายในปริมาณมากทำให้ความชื้นในกองเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น มีผลทำให้เชื้อจุลินทรีย์เจริญเติบโต

5. สูญเสียเงิน (Money Loss) เมื่อแมลงเข้าทำลาย ทำให้น้ำหนักของผลผลิตลดลง จึงมีผลทำให้สูญเสียรายได้ นอกจากนี้คุณภาพที่เสียไปยังทำให้ราคาลดต่ำลงด้วย

6. สูญเสียชื่อเสียง (Loss of Goodwill) ผลผลิตที่แมลงเข้าทำลายจะดูสกปรก และเสื่อมคุณภาพ ทำให้ผู้ซื้อและผู้บริโภคเสื่อมความเชื่อถือและไว้วางใจในสินค้า

มอดข้าวสาร (*Sitophilus oryzae*: Linnaeus)

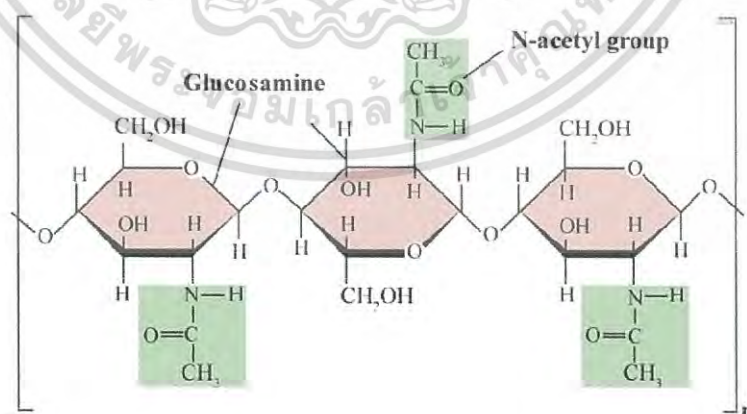
มอดข้าวสาร (Rice Weevil: *Sitophilus oryzae* L.) (ภาพที่ 2.4) เป็นแมลงศัตรูที่สำคัญที่สุด พบทำลายทั้งในข้าวเปลือกและข้าวสาร ตัวเต็มวัยของมอดข้าวสารมีสีน้ำตาลดำ ส่วนหัวจะยื่นออกมาเป็นวงง (snout) สามารถบินออกไปทำลายเมล็ดพืชตั้งแต่ยังอยู่ในไร่ นา โดยตัวเมียจะวางไข่ที่เมล็ดพืชขณะที่เมล็ดเริ่มจะสุกแก่ เมล็ดละ 4-6 ฟอง แล้วขับเมือกปิดปากรูไว้ ตัวเมียวางไข่ได้ 300-400 ฟอง ไข่จะฟักในระยะ 3-6 วัน ตัวอ่อนจะมีสีขาว ลำตัวสั้นป้อมและอาศัยกักกินอยู่ภายในเมล็ด ระยะเวลาที่เป็นตัวอ่อน 20-30 วัน จากนั้นจึงเข้าช่วงดักแด่เป็นเวลา 3-7 วัน เมื่อเป็นตัวเต็มวัยแล้วจะเจาะผิวเมล็ดออกมา ทำให้เมล็ดที่ถูกมอดข้าวสาร อาศัยอยู่เป็นรู วงจรชีวิตใช้เวลา 30-45 วัน ตัวเต็มวัยมีชีวิตรอดได้นาน 1-2 เดือนหรือมากกว่านี้ มอดข้าวสารสามารถแพร่กระจายอยู่ทั่วโลก และเนื่องจากมอดข้าวสารชอบอากาศร้อนและอบอู่ จึงพบระบาดมากแถบเอเชียและแอฟริกา แพร่กระจายได้ไกลโดยการขนส่งหรือบินไป และพบระบาดตลอดปี เพราะสามารถกินอาหารได้หลายชนิดได้แก่ เมล็ดธัญพืชทุกชนิด เช่น ข้าว ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต ข้าวบาร์เลย์ และเมล็ดพืชชนิดอื่นๆ



ภาพที่ 2.4 มอดข้าวสาร [51]

ได้มีรายงานของนักวิจัยหลายท่าน [21]-[25] ที่ได้ทำการศึกษามาก่อนหน้านี้ถึงส่วนประกอบหลักของตัวงวงข้าวจะประกอบด้วยโปรตีน (Protein) ในเปลือกแข็งของตัวงวงข้าวจะประกอบด้วย ไคติน (Chitin) และลิพิด (Lipid)

ไคตินเป็นโพลิเมอร์ที่ธรรมชาติได้สร้างให้กับสิ่งมีชีวิต ซึ่งค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1811 โดย Braconnot และโพลิเมอร์ชนิดนี้ได้ถูกเรียกว่า ไคติน โดย Odier ในปี ค.ศ. 1823 ไคตินเป็นโพลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากในโลกเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส (Cellulose) โดยโครงสร้างทั้งสองชนิดนี้ทำหน้าที่ป้องกันและสร้างความแข็งแรงให้แก่ผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ไคตินพบมากในโครงสร้างเปลือกนอกของแมลง ปู กุ้ง แคนปลาหมึก และโครงสร้างภายในของสัตว์จำพวกไม่มีกระดูกสันหลัง นอกจากนี้ยังพบในผนังเซลล์ของเห็ดราและสาหร่ายบางสายพันธุ์ ไคตินมีสูตรทางเคมีคือ $C_8H_{13}NO_5$ (ภาพที่ 2.5) องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย β (1-4) linked units of the amino sugar N-acetyl-D-glucosamine [53] โดยได้มีการศึกษามาก่อนหน้านี้พบว่าองค์ประกอบของ β (1-4)-linked hexasaccharide of 2-acetamido-2-deoxy-D-glucopyranoside ที่ได้จาก Crab chitin จะแสดงค่าการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดสูงสุดที่ประมาณช่วงความยาวคลื่น 1178 และ 1500 นาโนเมตร [23], [25]



ภาพที่ 2.5 The chemical structure of chitin [52]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โคตินถูกนำมาใช้เพื่อสกัดเป็นโคโตซาน มีคุณสมบัติย่อยสลายได้ง่าย ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ละลายได้ดีในสารละลายกรดอินทรีย์เจือจางและจับกับไอออนของโลหะได้ดี โคตินและโคโตซานถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารหลายประเภทเช่น ใช้เป็นผลิตภัณฑ์เสริมอาหารเพื่อสุขภาพในการลดไขมันและคอเรสเตอรอล ใช้เป็นสารให้ความคงตัว (Stabilizing agent) ใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืด (Thickening agent) เป็นสารกันเสียเพื่อป้องกันเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา ช่วยในการบำบัดน้ำเสีย สร้างการตกตะกอนเพื่อจับโลหะหนัก ใช้เป็นสารเคลือบผัก ผลไม้ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา เป็นต้น [52]

ลิพิด (Lipid) คือ สารอินทรีย์ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นหลัก ลิพิดมีหลายชนิด บางตัวมีโมเลกุลเป็นเส้นตรงเรียกว่า อะลิฟาติก (Aliphatic) บางตัวมีวงแหวนเรียกว่า อะโรมาติก (Aromatic) บางตัวยึดหยุ่น บางตัวเปราะบาง โมเลกุลของลิพิดมีสองส่วนทั้งที่มีขั้ว (Polar) และไม่มีขั้ว (Nonpolar) จึงทำให้ลิพิดสามารถละลายได้ทั้งในตัวทำละลายมีขั้วเช่นน้ำและไม่มีขั้วเช่นน้ำมัน โมเลกุลเหล่านี้เรียกว่า แอมฟิฟิลิก (Amphiphilic) คือโมเลกุลเดียวกันมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ ไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) และส่วนที่กลัวน้ำ ไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ตัวอย่างของลิพิดเช่น คอเลสเตอรอล (Cholesterol), ไคกลีเซอไรต์ (Diglyceride), ฟอสโฟลิพิด (Phospholipid) ไขมัน (Fat) และไข (Wax) เป็นต้น สำหรับลิพิดในเปลือกนอกของแมลงจะประกอบไปด้วย Hydrocarbons, Esters, Ketones, Epoxides, Alcohols, Fatty acids, Sterols และ Triacylglycerols [25], [54], [55] ลิพิดในเปลือกนอกจะเป็นส่วนประกอบประมาณ 0.08% ของน้ำหนักสดตัวงวงข้าว และประกอบด้วย N-alkanes และ N-alkadienes [25], [56] กลุ่มพันธะ CH_3 และ CH_2 เป็นโครงสร้างทางเคมีทั่วไปที่มีอยู่ในลิพิดมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งพันธะ long-chain hydrocarbon โดยสเปกตรัมของอินทรีย์สารประเภทไขมันในเปลือกตัวงวงข้าวจะดูดซับคลื่นสูงสุดที่ช่วงความยาวคลื่น 1130 และ 1670 นาโนเมตร โดยค่าสูงสุดเหล่านี้จะตรงกับไอเวอร์โทนที่ 1 และ 2 ของ CH_3 [25]

การป้องกันและกำจัดแมลงศัตรูข้าวเป็นสิ่งจำเป็นในการรักษาคุณภาพข้าว โดยเฉพาะในขั้นตอนของการเก็บรักษาข้าวในโรงเก็บและระหว่างการขนส่งผู้ปลูกข้าวในต่างประเทศ วิธีการที่นิยมใช้คือการใช้สารเคมีด้วยวิธีการรมสารในข้าวที่เก็บรักษาหรือผลิตภัณฑ์ข้าวสำหรับส่งออก ปัจจุบันการใช้สารรมเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั่วโลก สารเคมีที่ใช้รมกันอยู่ในปัจจุบันมีเพียง 2 ชนิด ดังนี้

1. เมทิลโบรไมด์ (Methyl Bromide) มีสูตรทางเคมีคือ CH_3Br คุณสมบัติที่ดีของเมทิลโบรไมด์ในการกำจัดศัตรูพืชคือ สามารถฆ่าแมลงได้ทุกระยะของการเจริญเติบโต ไม่ว่าจะเป็นระยะไข่ ระยะตัวอ่อน ระยะดักแด้ และระยะตัวเต็มวัย สามารถฟุ้งกระจายและแทรกซึมไปยังสิ่งที่ทำการรมได้อย่างทั่วถึง และสามารถระบายออกจากสิ่งที่รมได้ในเวลาอันสั้น และไม่ติดไฟง่าย เป็นสารที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น จุดเดือดต่ำที่ 3.6 องศาเซลเซียส สามารถระเหยเป็นก๊าซได้ทันทีที่อุณหภูมิห้อง ค่าตกค้างในเมล็ดพืชที่ทำการรมตามมาตรฐานของ Codex ในรูปของอนุโมลโบรไมด์กำหนดไว้ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อย่างไรก็ตาม เมทิลโบรไมด์จัดเป็นสารที่ระคายเคืองต่อปอดและเป็นพิษต่อระบบประสาท ผู้ได้รับพิษจะมีอาการปวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศรีษะ วิงเวียน คลื่นไส้ อาเจียน เกิดอาการชัก และหากได้รับพิษมากเกินไปอาจหมดสติและเสียชีวิตได้ และเนื่องจากเมทิลโบรไมด์ ถูกระบุว่าเป็นตัวการทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศ จึงมีมาตรการลดการใช้จนถึงยกเลิกการใช้ในที่สุดภายใต้พิธีสารมอนทรีออล ทั้งนี้ภายในปี พ.ศ. 2558 ประเทศที่กำลังพัฒนาทั้งหมดซึ่งรวมถึงประเทศไทยด้วยต้องยกเลิกการใช้เมทิลโบรไมด์ โดยประเทศพัฒนาแล้วได้ห้ามการใช้สารนี้ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2548

2. ฟอสฟีน (Phosphine) มีสูตรทางเคมีคือ PH_3 ประเทศสหรัฐอเมริกาได้เริ่มนำเอาก๊าซฟอสฟีนมาใช้ในการรมเพื่อกำจัดแมลงศัตรูผลิตผลเกษตรตั้งแต่ปี ค.ศ. 1958 ภายใต้การรับรองจากองค์การอาหารและยาโลก (FAO) โดยมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ เป็นสารที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น สามารถฟุ้งกระจายในการรมผลิตผลเกษตรได้ดี ฟอสฟีนมีจุดเดือดต่ำมากที่ -87 องศาเซลเซียส ก๊าซฟอสฟีน เป็นก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของสารอลูมิเนียมฟอสไฟด์ (Aluminium phosphide) หรือสารสังกะสีฟอสไฟด์ (Zinc phosphide) กับความชื้นในอากาศ โดยปกติสารทั้ง 2 ชนิดนี้จะอยู่ในรูปของแข็ง แต่เมื่อทำปฏิกิริยาจะกลายเป็นก๊าซฟอสฟีน สารดังกล่าวมีความสามารถในการฆ่าแมลงในระยะตัวอ่อนและตัวเต็มวัยได้เกือบทุกชนิดอย่างรวดเร็ว แต่สำหรับแมลงในระยะไข่และระยะดักแด้ ซึ่งมีอัตราการหายใจต่ำ จะทำให้ได้รับพิษจากฟอสฟีนได้ช้า จึงต้องใช้เวลาในการรมนานกว่าปกติหรือต้องใช้ความเข้มข้นที่สูงขึ้น ปัจจุบันฟอสฟีนเป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่ยิยมใช้และมีความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างมากในปัจจุบันและอนาคต โดยพบว่ามีการใช้มากกว่า 45 ประเทศ แต่การใช้ฟอสฟีนเป็นสารรมในข้าวที่เก็บรักษายังมีความต้องการการศึกษาถึงประสิทธิภาพและอัตราการใช้ที่เหมาะสมในการป้องกันกำจัดศัตรูข้าวที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน การรมสารเคมีหากปฏิบัติไม่ถูกต้องจะทำให้มีประสิทธิภาพต่ำในการกำจัด แมลงเกิดการปรับตัวเพื่อสร้างความต้านทานต่อสารเคมี และเกิดสารพิษตกค้างในผลิตภัณฑ์เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคได้ มีรายงานว่าพิษจากฟอสฟีนมีผลต่อระบบทางเดินหายใจ อวัยวะที่ได้รับผลกระทบมักเป็นอวัยวะที่ใช้ออกซิเจนมาก เช่น ปอด สมอง หัวใจ ตับ ไต เชื่อว่าการเกิดพิษน่าจะเกิดจากการยับยั้ง Electron transportation ใน Mitochondria หากผู้ปฏิบัติงานได้รับก๊าซฟอสฟีนมากเกินไปอาจทำให้เสียชีวิตได้

การตรวจสอบปริมาณแมลงที่เข้าทำลายข้าวจึงมีความจำเป็นมาก เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดปริมาณสารรมข้าวให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมและไม่ใช้ในปริมาณที่มากเกินไป (Over dose) อันเป็นผลให้เกิดสารพิษตกค้างในข้าว เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและผู้บริโภค ช่วยลดต้นทุนค่าใช้จ่ายของสารเคมีที่ใช้รมข้าว รวมถึงสามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบเพื่อรับรองคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวที่ขนส่งสู่ผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศได้อีกแนวทางหนึ่ง โดยวิธีการตรวจสอบแมลงศัตรูในข้าวที่มีใช้ในปัจจุบันได้รวบรวมไว้ในหัวข้อ 2.2.2

2.2.2 การตรวจสอบแมลงศัตรูข้าว

Neethirajan และคณะ (2007) [57] ได้รายงานว่าแมลงที่อาศัยอยู่ตามเมล็ดข้าวเป็นสาเหตุให้มีการสูญเสียทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพ ทำให้มูลค่าของผลิตภัณฑ์ลดลง โดยไม่เพียงแต่จะกัดกินเมล็ดข้าวแล้ว แมลงเหล่านี้ยังทำให้เมล็ดข้าวเกิดการเน่าเสียและเสื่อมสภาพจากผลการทำงานของส่วนต่างๆ

ในร่างกายของมัน โดยแมลงจะผลิตความร้อนและความชื้นจากขบวนการเมทาบอลิซึม รวมถึงของเสียที่ขับออกจากร่างกาย ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ทำให้เชื้อจุลินทรีย์เกิดการการพัฒนาเป็น Hotspots ในเมล็ดข้าว ข้าวที่มีแมลงอาศัยอยู่จะไม่มี ความเหมาะสมที่จะนำมาให้มนุษย์บริโภค ข้าวที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลายาวนานมีความเป็นไปได้ที่จะมีการสูญเสียในระดับที่มากขึ้นและส่งผลกระทบต่อสุขภาพของเกษตรกร ดังนั้นมาตรฐานของเมล็ดข้าวจึงได้ถูกกำหนดขึ้นในแต่ละประเทศเพื่อสร้างความพอใจให้แก่ผู้บริโภค ซึ่งคาดหวังถึงคุณภาพของเมล็ดข้าวและผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพเพิ่มขึ้น โดยปราศจากแมลง เศษซากชิ้นส่วนของหนูหรือแมลงกัดแทะ และโรคที่เกิดจากเชื้อรา เมล็ดข้าวที่ส่งเข้าตลาดทั้งภายในประเทศและส่งออกจะถูกตรวจสอบอย่างละเอียดเพื่อป้องกันการสูญเสียทั้งปริมาณและคุณภาพจากขั้นตอนการเก็บรักษาและการขนส่ง ดังนั้นการตรวจสอบเพื่อรู้ถึงปริมาณของแมลงที่ซ่อนอยู่ในเมล็ดข้าวและการคัดแยกข้าวที่มีแมลงอาศัยอยู่ไปใช้ในทางอื่น จะเป็นการควบคุมที่สำคัญสำหรับการรับประกันข้าวที่เก็บรักษา คุณภาพของเมล็ดและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับประเภทของเทคนิคการตรวจสอบแมลงในข้าวที่เก็บรักษา และอธิบายถึงหลักการการทำงานรวมถึงข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละวิธี ดังนี้

1. Grain probes and insect traps

เป็นวิธีการตรวจสอบแมลงในกองข้าวที่เก็บรักษาโดยใช้อุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกปลายแหลมสำหรับแทงเข้าไปในกองข้าว ด้านบนเจาะรูสำหรับให้เมล็ดข้าวและแมลงตกลงสู่กับดักภายในท่อทรงกระบอก ซึ่งแมลงไม่สามารถหนีได้เนื่องจากรูปร่างของกับดักที่รองรับแมลง เมล็ดข้าวจะถูกแยกออกด้วยวิธีการต่างๆเช่น การร่อนตะแกรง เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณและชนิดของแมลงที่ดักได้ อุปกรณ์นี้ได้มีการสร้างใช้และมีการพัฒนาปรับปรุงหลายแบบ อุปกรณ์ Probe trap ที่ทำด้วยวัสดุทองเหลืองได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Loschiavo and Atkinson (1973) [58] และได้ถูกนำมาปรับปรุงหลายครั้งให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนเป็นวัสดุพลาสติกเพื่อลดต้นทุนให้ถูกลง อุปกรณ์ที่เรียกว่า Pitfall and probe traps ได้ถูกพัฒนาเป็นเชิงพาณิชย์โดย Treite Inc., Salinds, CA, USA. สำหรับการตรวจสอบแมลงตัวเต็มวัยในกองข้าว [59] อย่างไรก็ตามวิธีการนี้เป็นวิธีที่ใช้แรงงานมาก มีข้อจำกัดของช่วงเวลาที่ใช้ได้ และข้อจำกัดในด้านของตำแหน่งการเก็บตัวอย่างข้าวที่จะใช้เป็นตัวแทนที่ดีของข้าวที่เก็บรักษา นอกจากนี้การอธิบายและการชี้แจงผลการตรวจสอบแมลงด้วยวิธีการนี้ทำได้ยาก เนื่องจากมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการใช้กับดักในการดักจับแมลง โดยแมลงที่ถูกดักจับจะมีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นในกองข้าวตามช่วงระยะเวลาที่เก็บรักษา [60] ชนิดของแมลง อุณหภูมิภายในกองข้าวและชนิดของข้าว เป็นต้น [61]

2. Pheromones

เป็นวิธีธรรมชาติที่สุดมีหลักการใช้สาร Pheromones เพื่อให้แมลงมารวมกลุ่มกันเป็นภาวะรวมกลุ่ม (Aggregation pheromones) หรือการใช้สาร Pheromones กระตุ้นให้เกิดการผสมพันธุ์ (Sex pheromones) ภายในกับดักเพื่อตรวจวัดจำนวนประชากรของแมลงเหยื่อล่อที่ใช้จะทำจากยางหรือพลาสติก และกับดักจะถูกสร้างจากกระดาษ พลาสติกหรือวัสดุอื่นๆ พื้นผิวของกับดักจะถูกทาด้วยกาวยเหนียวซึ่งมีสารเคมีล่อแมลงและมีทางเข้าเป็นลักษณะปล่องกรวยเพื่อดักจับแมลงเป้าหมาย กับดักบางชนิดใช้อาหารเป็นเหยื่อล่อ บางชนิดใช้สาร Pheromones กระตุ้น [62] แมลงที่พบโดยทั่วไปและสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pheromones สามารถใช้ได้คือ The lesser grain borer, *R.dominica* [63] และ The red flour beetle *tribolium castaneum*, Herbst [64] ซึ่งใช้สาร Pheromones ทำให้แมลงอยู่ในภาวะรวมกลุ่ม และ แมลงชนิด Warehouse beetle, *Trogoderma variabile* (Ballion) [65] ซึ่งใช้สาร Pheromones กระตุ้นให้เกิดการผสมพันธุ์ แม้ว่ากับดักสาร Pheromones จะสามารถใช้วัดความหนาแน่นของแมลงศัตรูข้าวได้ แต่มีหลายปัจจัยที่ทำให้การอธิบายและแปลความหมายทำได้ยากและซับซ้อน โดยปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมมีอิทธิพลโดยตรงต่อการดักจับแมลง เช่น อุณหภูมิ ภาวะฝนตก ความเร็วลม รูปแบบการวางเหยื่อล่อและลักษณะการบินของแมลงเป็นต้น [66], [67] ได้วิเคราะห์ว่ามีแมลงจำนวนมากที่บินและตอบรับเหยื่อล่อสารเคมีเพียงแค่ว่าบางช่วงเวลาเช่น ตอนพระอาทิตย์ขึ้น เทียงวัน ค่ำและกลางคืน และอุณหภูมิในช่วง 10-15 องศาเซลเซียส

3. Visual lures

เหยื่อล่อตาถูกใช้ในการล่อแมลงให้ตกลงสู่กับดักหรือภาชนะรวมเก็บ เหยื่อล่อได้แก่ สปอตไลท์ หลอดฟลูออเรสเซนต์และแสงอุลตราไวโอเล็ต ซึ่งจะดึงดูดแมลงจากในที่มืดหรือสิ่งแวดล้อมที่มีแสงน้อย เช่น ในโรงเก็บเมล็ดข้าว โรงสีและในลิฟท์ โดยวัตถุที่มีสีจะสามารถดึงดูดแมลงจากคุณสมบัติการสะท้อนและรูปร่างซึ่งแตกต่างจากพื้นหลัง กับดักหรืออุปกรณ์รวมเก็บจะถูกวางบนแสงซึ่งส่วนใหญ่ใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์หรืออุปกรณ์อื่นซึ่งเปล่งแสงช่วงความยาวคลื่นแสงอุลตราไวโอเล็ต แมลงมากกว่าร้อยละของมอดเต่าทอง แมลงบินและแมลงอื่นจะถูกดึงดูดด้วยแสงเหล่านี้ ซึ่งมันจะบินไปที่แสงในตอนกลางคืนหรือเพียงแค่วันมืดที่มันมองเห็นแสงชัดเจน อุปกรณ์กำจัดแมลงด้วยไฟฟ้าเป็นอีกอุปกรณ์หนึ่งที่มีประสิทธิภาพสามารถใช้ได้ในที่ร่มและมีแสงน้อยเช่น ภายในโรงเก็บเมล็ดข้าวหรือโรงแปรรูปผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์นี้มีประโยชน์ในสถานที่ซึ่งกับดักไม่สามารถล่อแมลงให้มาติดกับดักได้เช่นภายในตัวตึก [68] กับดักแสงได้ถูกนำมาตรวจสอบแมลงที่เกิดขึ้นและวิเคราะห์ความหนาแน่นของแมลงในแต่ละฤดูกาลมาเป็นเวลาหลายทศวรรษแล้ว แต่เพราะว่ากับดักชนิด Pheromones มีความพิเศษเฉพาะเจาะจงมากกว่า โดยสามารถดักจับแมลงได้บางชนิดที่ต้องการแทนการดักจับแมลงรวมหลายชนิดและมีความสะดวกกว่า จึงทำให้ในปัจจุบันกับดักแสงไม่ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย

4. Acoustical methods

วิธีการตรวจสอบด้วยการบันทึกคลื่นเสียง ถูกใช้ในการบันทึกเสียงของการเคลื่อนที่และกินอาหารของแมลง ซึ่งสามารถในตรวจเช็คได้ทั้งแมลงที่อาศัยอยู่ในและภายนอกเมล็ดข้าว โดยการขยายสัญญาณและการกรองเสียง Hagstrum และคณะ (1988) [69] ได้เผยแพร่เสียงของตัวอ่อนของแมลงชนิด *R. dominica* ซึ่งสามารถจะถูกใช้ในการประมาณความหนาแน่นของประชากรได้โดยปราศจากการเคลื่อนย้ายตัวอย่างเมล็ดออกจากกองข้าว นอกจากนี้ Hagstrum และคณะ (1996) [70] ได้ทำการตรวจสอบแมลงที่เกิดขึ้นและอาศัยในเมล็ดข้าว 650 กรัม พบว่าวิธีการบันทึกคลื่นเสียงสามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบเชิงปริมาณของปัจจัยทางฟิสิกส์และทางชีวภาพหลายปัจจัยที่ได้รับอิทธิพลเกี่ยวกับการเกิดเสียงและการกระจายตัวของแมลง โดยปัจจัยทางฟิสิกส์ได้แก่ ความเข้มข้น ช่วงเวลาคุณสมบัติของคลื่นเสียงที่ได้จากแหล่งกำเนิด ระยะทางไปที่ตัวรับคลื่นเสียง ความไวต่อการรับคลื่นเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสิ่งรบกวนจากสิ่งแวดล้อม [71] ปัจจัยทางชีวภาพได้แก่ ความไม่ชื้นชอบสิ่งแวดล้อม พฤติกรรมของแมลงและกิจกรรมของแมลง [72] แต่หนึ่งในข้อเสียของวิธีการนี้คือมันไม่สามารถตรวจสอบแมลงที่ตายได้ และแมลงที่อาศัยในเมล็ดข้าวในช่วงตัวอ่อนระยะเริ่มต้น

5. Electrical conductance

Pearson และคณะ (2003) [73] ได้ทำการตรวจสอบแมลงที่อาศัยในเมล็ดข้าวสาธิตโดยใช้ค่าการนำไฟฟ้า การศึกษาของพวกเขาได้แสดงถึงความแม่นยำในการตรวจสอบตัวอย่างเมล็ดข้าวสาธิตที่แมลงตัวเต็มวัยได้ 88% และแมลงดักแด้ได้ 87% และเมล็ดข้าวที่ไม่มีแมลงอาศัยได้ 100% ระบบการวัดคุณสมบัติเมล็ดข้าวโดยทั่วไปจะวัดน้ำหนัก เปอร์เซ็นต์ความชื้น เส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความแข็ง แต่ระบบนี้จะทำงานบนพื้นฐานของค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าและแรงกด เมล็ดข้าวจะแสดงคุณสมบัติค่าความต้านทานไฟฟ้าและความต่างศักย์ โดยเมล็ดข้าวความชื้นสูงจะมีค่าความต่างศักย์และความต้านทานที่ต่ำ ถ้ามีแมลงอาศัยอยู่ภายในเมล็ดข้าว สัญญาณการนำไฟฟ้าจะมีแนวโน้มต่ำลง โดยสัญญาณการนำไฟฟ้าของข้าวที่มีแมลงอาศัยอยู่จะแตกต่างจากข้าวที่ไม่มีแมลงอาศัย วิธีนี้เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ สามารถตรวจสอบเมล็ดข้าวเดี่ยวในระยะของช่วงการบริโภคได้ แต่ไม่สามารถตรวจสอบเมล็ดข้าวที่มีไข่แมลงหรือตัวอ่อนในระยะเริ่มต้นของแมลงในข้าวได้ เนื่องจากมีความชื้นต่ำและไม่สามารถแยกออกได้จากเมล็ดข้าวที่ไม่มีแมลงอาศัยอยู่ รวมถึงไม่สามารถตรวจสอบแมลงอาศัยที่ตายได้ อัตราการตรวจสอบแมลงโดยวิธีการนี้จะต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจสอบโดยการ X-rays และวิธีการนี้สามารถตรวจสอบได้เฉพาะเมล็ดข้าวเดี่ยวเท่านั้น

6. Berlese funnel method

วิธีนี้จะใช้ทั่วไปในโรงเก็บเมล็ดข้าวในประเทศแคนาดาสำหรับการตรวจสอบแมลงมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในเมล็ดข้าว Berlese funnel จะทำงานโดยใช้หลักการให้แมลงเคลื่อนย้ายออกจากความร้อน ซึ่ง Berlese funnel จะมีประสิทธิภาพในการพบตัวเต็มวัยของแมลงชนิด *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) ที่อาศัยอย่างอิสระในตัวอย่างข้าวสาธิต 49-79% แต่วิธีการนี้ทำได้ช้ามากและไม่แม่นยำสำหรับการตรวจสอบแมลงที่อาศัยอยู่ภายในเมล็ด โดยจะใช้เวลาลงถึง 5-6 ชั่วโมงต่อการตรวจสอบแมลงในข้าว 1 กิโลกรัม ซึ่งในระหว่างนี้เมล็ดข้าวจะถูกพาไหลเข้าสู่ถังเก็บ ความสามารถในการทำงานของ Berlese funnel จะขึ้นอยู่กับช่วงอายุของแมลง ขนาดของเมล็ดข้าวตัวอย่างและเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ด [74]

7. Machine vision

ในประเทศสหรัฐอเมริกา ภาพเสมือน (Visual reference image) และ การแปลความหมายด้วย line prints จะถูกใช้ในระบบการตรวจสอบแมลงอาศัยและการคัดเกรดข้าว [75] ในระบบนี้เมล็ดข้าวเดี่ยวจะถูกเปรียบเทียบกับ Photographic print ของตัวอย่างข้าว การวิเคราะห์โดยใช้ภาพทางคอมพิวเตอร์ถูกแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้สำหรับการตรวจสอบและพิสูจน์ชิ้นส่วนที่ไม่ใช่เมล็ดข้าวและแมลงในข้าวสาธิตได้ ระบบ Machine vision สำหรับการตรวจสอบแมลงในข้าวจะประกอบด้วย High speed integrated machine vision software package ซึ่งใช้กับ Monochrome CCD camera และคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Zayas and Flinn (1998) [76] ได้ทำการตรวจสอบแมลงชนิด *R. dominica* ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เต็มวัยในกองข้าวสาาลีได้แม่นยำมากกว่า 90% โดยการใช้ข้อมูลโครงสร้างและสีของมัน Ridgway และคณะ (2002) [77] ได้พัฒนา Rapid machine vision method สำหรับการตรวจสอบเต้าทองตัวเต็มวัยและมีอัตราการตรวจสอบได้แม่นยำ 89% ของตัวอย่างข้าวในท้องตลาดซึ่งมีแมลงอาศัยอยู่หลายชนิด Barbedo (2013) [78] ได้นำเสนอวิธีการวัดและตรวจนับจำนวนแมลงหริ่ขาวทั้งในระยะดักแต่ ตัวเต็มวัยและซาก โครงสร้างแข็งบนใบของต้นถั่วเหลืองด้วยวิธีการใช้ภาพเสมือน (Digital image processing) โดยใช้หลักการใช้สีของวัสดุทดสอบและแยกออกเป็นส่วนประกอบที่สนใจของภาพที่ได้ และใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์สำหรับสร้างแบบจำลองวิเคราะห์ทำนาย ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำภายใต้สภาวะทดสอบ และจากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าวิธีการนี้มีความยืดหยุ่นเพียงพอสำหรับการทดสอบภายใต้สภาวะอื่นๆ ด้วยการปรับแต่งเพียงเล็กน้อย อุปสรรคของการพัฒนาวิธี Machine vision สำหรับการพัฒนาไปใช้ในเชิงพาณิชย์ สำหรับการตรวจสอบแมลงในข้าวคือ ข้อจำกัดของอัตราการไหลของข้าวที่ผ่านเครื่อง ปัจจัยที่เป็นสิ่งที่ต้องการเช่น ความง่าย รวดเร็วและความน่าเชื่อถือ รวมถึงความซับซ้อนของอุปกรณ์ รายละเอียดของชนิด อุปกรณ์กล้อง รายละเอียดของเครื่องคอมพิวเตอร์และระบบการลำเลียงตัวอย่าง ต้องทำให้มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ข้อเสียของวิธีนี้คือ ใช้เวลานานและไม่สามารถพิสูจน์แมลงที่อาศัยในเมล็ดข้าวได้ โดยวิธีนี้สามารถตรวจสอบได้เพียงแมลงที่อาศัยอยู่ภายนอกเมล็ดข้าวเท่านั้น

8. X-ray imaging - วิธี Soft X-ray

เป็นวิธีการที่ไม่ทำลายตัวอย่างและเป็นวิธีการตรงซึ่งสามารถตรวจสอบแมลงอาศัยในเมล็ดข้าว Karunakaran และคณะ (2003) [79] ได้พิสูจน์แมลงที่อาศัยในเมล็ดข้าวสาาลีชนิด *Sitophilus oryzae* (L) ระยะตัวอ่อนและดักแต่เต็มวัยได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากกว่า 97% จาก Soft X-ray images และมันสามารถตรวจสอบเมล็ดข้าวที่ไม่มีแมลงอาศัยได้อย่างถูกต้อง 99% ระบบ Soft X-ray จะประกอบด้วยหลอด Fluoroscope ขนาด 15 kV และ 65 μ A สำหรับผลิต Real-time images เมล็ดข้าวจะถูกวางบนถาดและหุ้มด้วยพลาสติกที่หลอด X-ray และระบบตรวจสอบได้ทำการสแกนตัวอย่าง ภาพจากการตรวจสอบจะถูกตรวจจับโดย CCD black and white camera และแปลงข้อมูลด้วย Digital video creator ภาพดิจิทัลจะถูกประมวลผลเพื่อตรวจสอบแมลงภายนอกและภายในเมล็ดข้าว วิธีการนั้นนอกจากจะเป็นวิธีที่ไม่ทำลายตัวอย่าง ประหยัดเวลาแล้วยังสามารถใช้ในการพิสูจน์ความเสียหายเชิงกลในเมล็ดข้าวที่ถูกทำลายได้ เพื่อกำหนดล่วงหน้าสำหรับการนำเมล็ดข้าวไปใช้ประโยชน์ในทางต่างๆ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อจำกัดในการวินิจฉัยตัวอย่างขนาดเล็กและไข่แมลงออกจากสัดส่วนของเมล็ดข้าว รวมถึงมีข้อจำกัดในการพัฒนาให้ประสบความสำเร็จได้เนื่องจากเทคโนโลยี X-ray ยังคงมีต้นทุนที่สูง

9. Near-infrared spectroscopy

วิธีนี้ได้ถูกพัฒนาแบบอย่างต่อเนื่อง ให้เป็นวิธีที่สามารถใช้ในการตรวจสอบวิเคราะห์ส่วนประกอบของเมล็ดข้าวและสิ่งเจือปนได้อย่างรวดเร็ว น่าเชื่อถือ แม่นยำ ไม่ต้องเสียเวลาในการเตรียมตัวอย่างโดยสามารถสุ่มตัวอย่างจากกองข้าวที่เก็บรักษาหรือผลิตภัณฑ์ข้าวสำหรับการส่งออก และเป็นวิธีที่ไม่ทำลายตัวอย่าง ซึ่งวิธีนี้สามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ วิธี Near-infrared spectroscopy จะให้ข้อมูลในพื้นฐานคุณสมบัติการสะท้อนกลับของคลื่นแสงที่แตกต่างกันที่ส่องผ่านสารที่อยู่ในผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอยู่บนพื้นฐานของการดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่น 780-2,500 นาโนเมตร ซึ่งองค์ประกอบต่างๆจะสามารถถูกวิเคราะห์โดยการจัดหมวดหมู่ตามการดูดซับเส้นสเปกตรัม ได้มีรายงาน่ววิธี Near-infrared spectroscopy สามารถวัดโครงสร้างทางเคมีของวัสดุชีวภาพโดยการวัดค่าการดูดซับคลื่นแบบวิธี Diffuse reflectance หรือ Transmittance ที่หลายช่วงความยาวคลื่น เทคนิคนี้สามารถวัดความเข้มข้นขององค์ประกอบที่แตกต่างกันของวัสดุ เช่น โปรตีน น้ำ แป้ง และพันธะไฮโดรเจน เป็นต้น ช่วงคลื่น Near-infrared อยู่ในย่านระหว่างช่วงคลื่น Visible และ Mid-infrared ซึ่งถูกประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจสอบวิเคราะห์อาหารและผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในข้าว ผลิตภัณฑ์จากธัญพืช และอุตสาหกรรมพืชน้ำมัน รวมถึงใช้ในการปรับปรุงพันธุ์ธัญพืชสำหรับการเพิ่มปริมาณและคุณภาพ การจัดการระบบการผลิต และการควบคุมกระบวนการผลิตแบบ On-line ได้มีงานวิจัยหลายงานที่มีการประยุกต์ใช้วิธี Near-infrared spectroscopy สำหรับการตรวจสอบแมลงศัตรูในข้าวสาลีและเศษชิ้นแมลงในผลิตภัณฑ์แปรรูปข้าวสาลีดังนี้

Ridgway และคณะ (1996) [21] ได้รายงานการตรวจสอบแมลงชนิด Granary weevil ที่เข้าอาศัยในเมล็ดข้าวสาลีเดี่ยวในระยะตัวอ่อนและระยะดักแด้ ด้วยเทคนิค NIR reflectance spectroscopy ผลการศึกษาพบว่าสมการทำนาย ถูกสร้างด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression ด้วยข้อมูลเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่ง (pretreatment) ด้วยวิธี SNV ในช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร และได้สรุปว่า การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีมีผลต่อระดับการดูดกลืนคลื่นแสงย่าน NIR การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดจากความชื้นที่เพิ่มขึ้นจากระบวนการเมตาบอริซึมของแมลง, ปริมาณโปรตีน และโคตินในแมลง

Dowell และคณะ (1998) [23] ได้รายงานว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้ Near-infrared diode array spectrometer ในการตรวจสอบแบบผสมผสานกับระบบคุณลักษณะของเมล็ดข้าวสาลีเดี่ยวในการตรวจสอบการเกิด Rice weevil, Lesser grain borer และ Angoumois grain moth สมการทำนายถูกสร้างด้วยวิธี PLS Regression ในช่วงความยาวคลื่นที่มีอิทธิพลต่อสมการทำนาย 1000-1350 และ 1500-1680 นาโนเมตร พวกเขาพบว่าค่าการดูดกลืนคลื่นแสงจะสูงสุดที่ 1178 และ 1500 นาโนเมตร อันเกิดจากอิทธิพลของพันธะโมเลกุลในเปลือกแข็งของแมลงหรือโคติน โดยโคตินถูกนำเสนอเพื่ออธิบายความแตกต่างระหว่างเมล็ดข้าวที่สมบูรณ์และเมล็ดข้าวที่มีแมลงระยะดักแด้อาศัย พวกเขาได้ศึกษาเพิ่มเติมพบว่า NIRs สามารถตรวจสอบแมลงระยะดักแด้ขนาดเล็กที่อาศัยในเมล็ดข้าวได้ โดยสามารถตรวจสอบพบแมลงชนิด 3rd และ 4th instars ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% แต่เทคนิคนี้ให้ผลการตรวจสอบที่ไม่น่าเชื่อถือเมื่อทำการตรวจสอบแมลงระยะตัวอ่อนที่มีขนาดเล็กกว่านี้

Baker และคณะ (1999) [80] ได้ใช้วิธีและกระบวนการวิเคราะห์เดียวกับ Dowell และคณะ (1998) ในการตรวจสอบเมล็ดข้าวสาลีที่มีปรสิตชนิด Anisopteromalus calandrae ที่อาศัยบน Rice weevil และแยกเมล็ดข้าวสมบูรณ์จากเมล็ดข้าวที่มีเฉพาะ Rice weevil อาศัยและเมล็ดข้าวที่มีปรสิตระยะตัวอ่อนและระยะดักแด้อาศัยบน Rice weevil พวกเขาได้นำเสนอสมการทำนายซึ่งมีความแม่นยำ 97.4% สำหรับการคัดแยกเมล็ดข้าวสมบูรณ์ และแม่นยำ 90-100% สำหรับเมล็ดข้าวที่มี Rice weevil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาศัย หรือมีปริมาตรระยะตัวอ่อนหรือระยะดักแต่อาศัยบน Riceweevil ด้วยการใช้ PLS factors 13 แต่วิธีการนี้ให้ผลที่ไม่น่าเชื่อถือสำหรับการตรวจสอบปริมาตรระยะตัวอ่อนขนาดเล็กอันเนื่องจากขนาดของมันที่เล็กเกินไป

Ridgway และคณะ (1999) [81] ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า ช่วงความยาวคลื่น 700-1100 นาโนเมตร สามารถใช้ในการตรวจสอบ Grain weevil ในระยะตัวอ่อนและระยะดักแต่อาศัยในเมล็ดข้าวสาาลีได้ และพบว่าที่ความยาวคลื่น 982 และ 1014 นาโนเมตร มีอิทธิพลต่อสมการทำนายที่สร้างขึ้นตามการลดลงของปริมาณแป้งในเมล็ด และที่ความยาวคลื่น 972 และ 1032 นาโนเมตร มีอิทธิพลต่อสมการทำนายที่ได้ตามการเพิ่มขึ้นของความชื้นเมล็ดที่เกิดจากกิจกรรมของแมลง และสมการทำนายสามารถตรวจคัดแยกเมล็ดข้าวสาาลีที่มีแมลงชนิด *S. granaries* ในระยะดักแต่อาศัยและไม่มีได้อย่างถูกต้องมากกว่า 96% เมื่อสมการทำนายถูกสร้างด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression (1100-2500 μm)

Elizabeth และคณะ (2002) [82] ได้วิเคราะห์ว่าระบบ NIR เป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการตรวจสอบเมล็ดข้าวสาาลีเดี่ยวที่มี Rice weevil ทั้งที่มีชีวิตหรือไม่มีชีวิตที่อาศัยอยู่ในเมล็ดข้าวที่ช่วงอายุต่างๆ โดยได้จัดหมวดหมู่เมล็ดข้าวที่ไม่มี Rice weevil อาศัย, เมล็ดข้าวที่มีดักแต่ Rice weevil, เมล็ดข้าวที่มี Rice weevil ตัวอ่อนขนาดใหญ่ และเมล็ดข้าวที่มี Rice weevil ตัวอ่อนขนาดกลาง ได้อย่างแม่นยำ 94%, 92%, 84% และ 62% ตามลำดับ

Maghirang และคณะ (2003) [83] ได้รายงานวาระบบ NIR สามารถใช้ในการตรวจสอบเมล็ดข้าวสาาลีเดี่ยวซึ่งมี Rice weevil ที่มีชีวิตหรือตายได้ พวกเขาได้พัฒนาสมการทำนายโดยใช้ช่วงความยาวคลื่นแสง 950-1690 นาโนเมตร สำหรับการตรวจสอบแมลงที่มีชีวิตและตายในเมล็ดข้าวสาาลี ผลการศึกษาพบว่าสมการทำนายที่พัฒนาขึ้นสามารถคัดแยกแมลงระยะตัวอ่อนและดักแต่ที่มีชีวิตจากแมลงระยะตัวอ่อนและดักแต่ที่ตายได้ถูกต้อง 86% และ 96% ตามลำดับ และสามารถคัดแยกแมลงระยะตัวอ่อนและดักแต่ที่ตายจากแมลงระยะตัวอ่อนและดักแต่ที่มีชีวิตได้ถูกต้อง 92% และ 93% ตามลำดับ

Perez-Mendoza และคณะ (2003) [25] ได้ทำการศึกษาตรวจสอบเศษชิ้นแมลงในแป้งข้าวสาาลี โดยการใช้เทคนิค Near-infrared spectroscopy ในช่วงความยาวคลื่น 400-1700 นาโนเมตร มาทำการสร้างสมการทำนายจำนวนเศษชิ้นแมลงชนิด Rice weevil (น้อยกว่าหรือมากกว่า 130 ชิ้น) ในตัวอย่างแป้งสาาลี 50 กรัม อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังไม่แม่นยำเพียงพอสำหรับตรวจสอบเศษชิ้นแมลงในระดับที่ FDA กำหนด (ระดับ 75 เศษชิ้นแมลงต่อแป้งสาาลี 50 กรัม) แต่ Perez-Mendoza และคณะ ประสบความสำเร็จในการแบ่งระดับช่วงอายุของตัวเต็มวัยของ Rice weevil, Lesser grain borer และ Red flour beetle ซึ่งทั้ง 3 ชนิด เป็นศัตรูของข้าวที่เก็บรักษา โดยการลดลงของเปอร์เซ็นต์ความชื้นและการเพิ่มขึ้นของลิปิดในเปลือกแข็งของแมลงเป็นไปตามการเพิ่มขึ้นของอายุ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักสำหรับ NIRS ในการคัดแยกแมลงที่หนุ่มกว่าออกจากแมลงที่แก่กว่า นอกจากนั้น Perez-Mendoza และคณะ (2005) [84] ยังได้ศึกษาเพิ่มเติม โดยขยายช่วงความยาวคลื่นถึง 2500 นาโนเมตร เพื่อตรวจสอบเศษชิ้นแมลงในแป้งสาาลีที่ผลิตจากข้าวสาาลีที่มีแมลงอาศัยอยู่ภายใน พวกเขาพบว่าข้าวสาาลีที่มีแมลงอาศัยด้วยตัวเต็มวัยของ Lesser grain borer เมื่อผลิตเป็นแป้งสาาลีจะพบปริมาณเศษชิ้นแมลง มากกว่าข้าวสาาลีที่มีแมลงอาศัยในระยะตัวอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และดักแด้ พวกเขาได้คาดคะเนว่าระดับสูงสุดที่ผู้ประกอบการโรงสีจะสามารถยอมรับได้สำหรับการผลิตแป้งสาลี คือระดับเศษขึ้นแมลงต่ำกว่าระดับที่ FDA กำหนดหรือที่สัดส่วนการปนของเมล็ดที่มีแมลงระยะตัวอ่อนและดักแด้อาศัย 0.95-1.5% (380-640 เมล็ดข้าวสาลีที่มีแมลงอาศัยต่อข้าวสาลี 1 กิโลกรัม) หรือที่สัดส่วนการปนของเมล็ดที่มีแมลงระยะตัวเต็มวัยอาศัย น้อยกว่า 0.05% (20 เมล็ดข้าวสาลีที่มีแมลงอาศัยต่อข้าวสาลี 1 กิโลกรัม)

Paliwal และคณะ (2004) [85] ได้รายงานผลการศึกษาใช้ NIR spectroscopy ในการตรวจสอบ Rice weevil และ Lesser grain borer ในข้าวสาลีเก็บรักษา พวกเขาใช้วิธี PCA ในการจำแนกเมล็ดข้าวที่มีตัวอ่อนของแมลงอาศัยที่ระดับการเข้าอาศัยต่างๆ และพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะคัดแยกเมล็ดข้าวที่มีแมลงเหล่านี้อาศัยอย่างน้อยที่สุดที่ระดับ 25 % และจะคัดแยกง่ายขึ้นเมื่อระดับการเข้าอาศัยมากขึ้น พวกเขาได้พัฒนาสมการทำนายสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณตามระดับปริมาณการเข้าอาศัยของแมลงด้วยวิธี PLS regression และพบว่าการทำนายมีความแม่นยำสูงที่ระดับปริมาณการเข้าอาศัยของแมลงอัตราสูง แต่ความแม่นยำต่ำที่ระดับปริมาณการเข้าอาศัยของแมลงอัตราต่ำ

Tan และคณะ (2015) [86] ได้นำเสนอวิธีการตรวจสอบแมลงศัตรูในผลิตภัณฑ์ข้าวแปรรูปที่เก็บรักษาในโรงเก็บและวิเคราะห์ชนิดของแมลงศัตรูได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำด้วยเทคนิค Terahertz time-domain spectroscopy โดยใช้คุณสมบัติการดูดซับคลื่นแสงย่านความถี่ 0.2-1.6 THz และดัชนีการหักเหแสงของตัวอย่างทดสอบแป้งที่แปรรูปจากเมล็ดข้าว และตัวอย่างทดสอบแป้งข้าวที่มีแมลงศัตรูชนิด Sitophilus zeamais (S. zeamais) ปนอยู่ในอัตราต่างๆ แบบจำลองทำนายที่สร้างขึ้นใช้วิธี Partial Least-Squares Discriminate Analysis (PLS-DA) สำหรับการคัดแยกตัวอย่างทดสอบออกเป็น 2 กลุ่มคือตัวอย่างแป้งข้าวบริสุทธิ์และตัวอย่างแป้งข้าวที่มีศัตรูพืชปน ให้ผลการวิเคราะห์ทำนายที่มีความถูกต้องแม่นยำ โดยมีค่าทางสถิติ RESECV และ RESEP ที่ต่ำกว่า 0.150 ทั้งสองค่า ซึ่งการศึกษานี้จะเป็นวิธีตรวจสอบแมลงที่อาศัยและทำลายข้าวได้สะดวกและรวดเร็ว

นอกจากวิธีการต่างๆที่ใช้ในการตรวจสอบแมลงศัตรูในข้าวแล้ว ในงานศึกษานี้ได้ทำการรวบรวมวิธีการต่างๆในการตรวจสอบแมลงและสิ่งเจือปนในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอื่นๆด้วย ดังแสดงในหัวข้อ 2.2.3

2.2.3 การตรวจสอบแมลงศัตรูและสิ่งเจือปนในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรอื่นๆ

ได้มีการใช้เทคนิควิธีการต่างๆในการตรวจสอบแมลงศัตรูและสิ่งเจือปนในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรชนิดอื่นๆ โดย Choo Lum Ng และคณะ (2007) [87] ได้ศึกษาใช้เทคนิค Near-infrared spectroscopy ในการตรวจสอบการเสื่อมคุณภาพของน้ำมันทอด โดยทำการหาค่าชี้วัดการเสื่อมคุณภาพ 2 ตัวแปรคือ ค่า Total polar materials (TPMs) และค่า Free fatty acids (FFAs) โดยสร้างแบบจำลองทำนายโดยใช้วิธี Forward Stepwise Multiple Linear Regression (FSMLR) and Partial Least-Squares (PLS) Regression และใช้ชุดทดสอบแบบจำลองทำนายที่แยกอิสระกันทั้งสองวิธี ผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาด้วยวิธี PLS จะให้ค่าทางสถิติ Correlations (R) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า

ทำนายด้วยแบบจำลองและค่าที่วัดด้วยวิธีการทางเคมีในห้องปฏิบัติการ ที่ดีกว่าแบบจำลองที่พัฒนาด้วยวิธี FSMLR ในช่วงความยาวคลื่น 700-1100 นาโนเมตร โดยมีค่า R เท่ากับ 0.983 and 0.943 ตามลำดับ ในขณะที่ช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร แบบจำลองที่พัฒนาด้วยวิธี FSMLR จะให้ค่า R ที่ดีกว่าวิธี PLS โดยมีค่า R เท่ากับ 0.999 และ 0.983 ตามลำดับ

Balasubramanian และคณะ (2007) [88] ได้ศึกษาใช้เทคนิค DNA fingerprinting ในการตรวจสอบจำนวนสัดส่วนโดยน้ำหนักของเศษชิ้นแมลงชนิด *Tribolium castaneum* (Herbst) and *T. confusum* (Jaquelin du Val) ในผลิตภัณฑ์แป้งข้าวสาลี ที่ระดับการปน 1.0, 0.5, 0.25, 0.1, และ 0.05 % โดยน้ำหนัก ในแป้งข้าวสาลี 200 มิลลิกรัม ผลการทดสอบพบว่าเทคนิคนี้สามารถตรวจสอบได้เพียงแคในระดับการปนของเศษชิ้นแมลงในแป้งข้าวที่สัดส่วน 1.0% โดยน้ำหนัก (20 มิลลิกรัม) เทคนิคนี้มีประโยชน์ โดยสามารถบอกได้ถึงชนิดของเศษแมลงที่ปนในผลิตภัณฑ์แป้งข้าวสาลี และต้องมีการพัฒนาเพื่อให้สามารถตรวจวิเคราะห์การเจือปนของเศษชิ้นแมลงในระดับที่ต่ำกว่าในปัจจุบัน

Raman และคณะ (2007) [89] ได้ศึกษาใช้เทคนิคการตรวจวัดทางเสียงในการตรวจสอบแมลงบินชนิดยุง ในป่าไม้ ซึ่งคณะผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการสร้างอุปกรณ์ราคาถูกลำบากสำหรับการตรวจวัดคลื่นเสียงของสิ่งแวดล้อมและบันทึกเสียงได้ 10 ชั่วโมง/ครั้ง โดยทำการทดสอบ 25 ครั้ง รวม 250 ชั่วโมง และนำข้อมูลบันทึกลงในคอมพิวเตอร์และใช้โปรแกรมในการตรวจวิเคราะห์และคัดแยกเสียงในกิจกรรมต่างๆของยุงออกจากเสียงอื่นๆที่บันทึกได้ ที่ช่วงคลื่นความถี่ 44100 Hz โดยมีความผิดพลาดเพียง 6.5%

Toyoshima และคณะ (2008) [90] ได้ทำการศึกษาความสามารถของการใช้ Near-infrared spectroscopy ในการตรวจสอบแมลง (The peach fruit moth, *Carposina sasakii*) ในผลแอปเปิ้ล ("Fuji" cultivar) โดยใช้คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรด ส่องผ่านไปที่ผลแอปเปิ้ล โดยมีจุดรับสัญญาณ NIR ที่สะท้อนกลับมา (Detector) 2 จุด ซึ่งติดตั้งที่ด้านบนและด้านล่างของภาชนะวางวัสดุแอปเปิ้ล ในอุปกรณ์ Near-infrared spectroscopy ผลการทดสอบพบว่าสมการทำนายมีความสามารถในการตรวจสอบผลแอปเปิ้ลที่มีแมลงอาศัยที่เก็บเกี่ยวในปี 2004 ที่ 0.87 ± 1.95 ($r \pm \text{SEP}$) และมีความแม่นยำในการทำนายเมื่อเทียบกับกับการตรวจสอบจริงที่ 92.4% ในขณะที่การตรวจสอบผลแอปเปิ้ลที่มีแมลงอาศัยที่เก็บเกี่ยวในปี 2005 สมการทำนายมีความสามารถในการตรวจสอบที่ 0.85 ± 2.79 และมีความแม่นยำในการทำนายเมื่อเทียบกับกับการตรวจสอบจริงที่ 94.5% สำหรับแอปเปิ้ลที่เก็บเกี่ยวในปี 2004 และ 93.7% สำหรับแอปเปิ้ลที่เก็บเกี่ยวในปี 2005

Chen และคณะ (2009) [91] ได้ทำการศึกษาประยุกต์ใช้เทคนิค Near-infrared image processing ในการตรวจสอบแมลงในสินค้าเกษตร ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ทั้งภายในและภายนอกของสินค้าเกษตร และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการคุณภาพของสินค้าเกษตรก่อนขนส่งสู่ผู้บริโภค

Bhuvaneswari และคณะ (2010) [92] ได้ทำการศึกษาตรวจวัดเศษชิ้นแมลงในผลิตภัณฑ์ Semolina ซึ่งผลิตจากข้าวสาลี ใช้ในอุตสาหกรรมการทำเส้นพาสต้าและเส้นก๋วยเตี๋ยว ซึ่งในผลิตภัณฑ์ Semolina จะมีจุดต่างเล็กๆ เกิดขึ้นจากรำข้าว เมล็ดข้าวที่เป็นโรคหรือเศษชิ้นแมลง *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) เจือปน ได้ทำการศึกษาตรวจเศษชิ้นแมลงเหล่านี้ 3 วิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แก่ วิธี Acid hydrolysis and flotation (AOAC method 993.26) วิธีใช้เครื่อง Electronic speck counter (SPX Maztech Micrco Vision) และวิธี Near-infrared hyperspectral imaging ผลการทดสอบพบว่า ทั้งสามวิธีให้ผลตรวจสอบมีความสัมพันธ์ที่ดีกับจำนวนเศษชิ้นแมลงที่ปนในตัวอย่างทดสอบ แต่วิธีใช้เครื่อง Electronic speck counter และ วิธี Near-infrared hyperspectral imaging จะไม่ต้องทำลายตัวอย่างทดสอบและใช้เวลาสั้นกว่า โดยวิธี Near-infrared hyperspectral imaging จะมีค่าการตรวจสอบที่แสดงเป็นค่าทางสถิติที่ดีกว่าแต่เครื่องมีราคาแพงกว่ามาก และยังใช้ในระดับงานวิจัย

Shah และ Khan (2014) [93] ได้นำเสนอว่าวิธีการ Near-infrared hyperspectroscopic imaging and soft X-rays มีความเป็นไปได้สำหรับการตรวจสอบแมลงศัตรูที่อาศัยในเมล็ดธัญพืชในโรงเก็บรักษาระดับอุตสาหกรรม โดยภาพเสมือนจะถูกสร้างขึ้นจากการสแกนตัวอย่างทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลสเปกตรัม และใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์สร้างภาพเสมือนขึ้น โดยมีความแม่นยำของการตรวจสอบคัดแยกตัวอย่างทดสอบที่มีแมลงศัตรูอาศัยอยู่ 80-100% ขึ้นอยู่กับอัตราการปนของแมลงศัตรู สำหรับวิธีการ X-rays เป็นวิธีการที่สามารถตรวจสอบได้ถึงไข่แมลงที่อาศัยอยู่ภายในเมล็ดธัญพืชภายในโรงเก็บรักษา โดยแมลงศัตรูที่สำคัญคือ *Aspergillus spp.*, *Penicillium spp.* และ *Fusarium spp.* ซึ่งจะผลิตสารพิษ Mycotoxins นอกจากนี้เทคนิคภาพเสมือนนี้ให้ผลการทดสอบที่ดีในการตรวจสอบเชื้อราที่เกิดในเมล็ดธัญพืชที่เก็บรักษา

Moscetti และคณะ (2014) [94] ได้ทำการตรวจสอบแมลงที่เข้าอาศัยใน Chestnuts (*Castanea sativa*, Miller) ซึ่งแมลงศัตรูที่สำคัญคือ *Tortrices (Cydia splendana Hb., Cydia fagiglandana Zel. And Pammene fasciana L.)* and Weevil (*Curculio elephas Gyl.*) โดยใช้เทคนิค NIR spectroscopy วิธี PCA ในการคัดแยกระหว่าง Chestnuts ที่ไม่มีแมลงอาศัยและ Chestnuts ที่มีแมลงอาศัย ผลการศึกษาพบว่า การใช้วิธี Near-infrared spectroscopy ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2300 นาโนเมตร มีความเป็นไปได้ในการตรวจสอบแมลงที่อาศัยและเข้าทำลายใน Chestnuts แบบไม่ทำลายและรวดเร็ว ความยาวคลื่นที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการจำแนกคือ 1582, 1900 และ 1964 นาโนเมตร โดยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเดิมคือ Flotation sorting method พบว่าวิธี Near-infrared spectroscopy มีความผิดพลาดรวมในการคัดแยก 8.41% ต่ำกว่าวิธี Floating ซึ่งมีความผิดพลาดรวมที่ 18.83%

จากผลการศึกษาของนักวิจัยหลายท่านที่ได้กล่าวข้างต้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าวิธี Near-infrared spectroscopy เป็นวิธีการหนึ่งที่มีความเป็นไปได้และมีศักยภาพสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายของแมลงศัตรูที่อาศัยหรือปนอยู่ในผลิตผลทางการเกษตรต่างๆ ซึ่งรวมถึงข้าวหอมมะลิที่เก็บรักษาและผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิไทยที่มีการจำหน่ายเชิงการค้าด้วย โดยหลักการพื้นฐานของวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีและรายละเอียดส่วนต่างๆ ได้ถูกอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.3

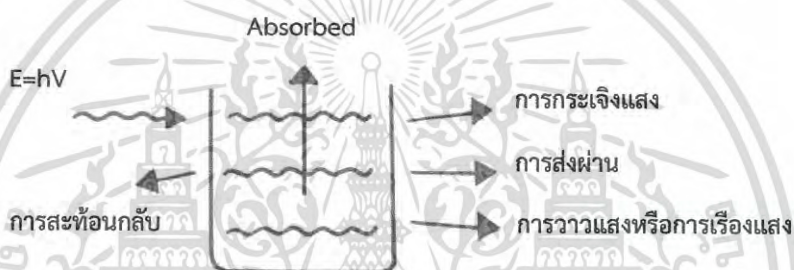
2.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

NIR (Near-infrared) Spectroscopy ได้ถูกนำมาใช้งานในช่วงปลายของทศวรรษ 1970 เป็นวิธีการวิเคราะห์หิโมเลกุลที่ไม่ทำลายตัวอย่าง โดยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกตัวอย่างดูดกลืนในช่วงความ

ยาวคลื่นประมาณ 800-2500 นาโนเมตร NIR Spectroscopy มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมหลาย ๆ ด้าน โดยเฉพาะด้านอาหารและยา ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ในการจำแนกองค์ประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้เป็นอย่างดี [95]

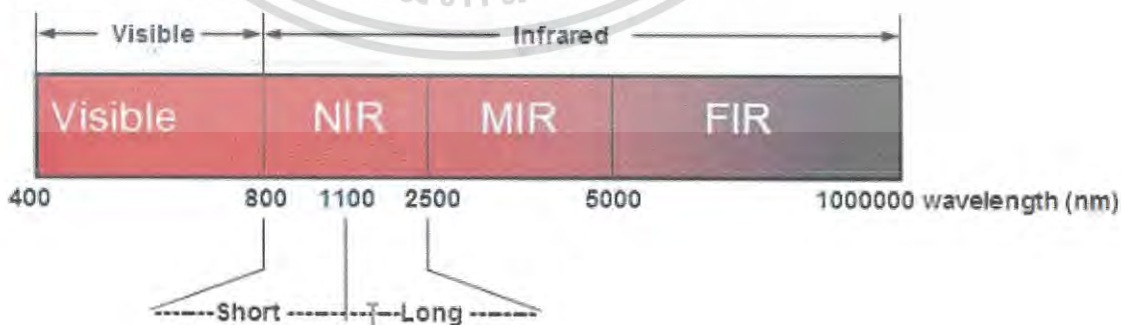
2.3.1 หลักการพื้นฐานของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี [96]

NIR Spectroscopy เป็นวิธีการวิเคราะห์โมเลกุลที่ไม่ทำลายตัวอย่าง โดยอาศัยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนโดยตัวอย่าง เป็นวิธีการที่ให้ผลที่ดีและรวดเร็ว ถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดผลิตภัณฑ์ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ตั้งแต่การตรวจสอบวัตถุดิบไปจนถึงการตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยหลักการของสเปกโทรสโกปี คือ เมื่อลำแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ จะมีแสงบางส่วนที่จะถูกดูดกลืน (Absorbed) บางส่วนผ่านทะลุออกไป (Transmitted) บางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ (Reflected) บางส่วนเกิดการวาวแสงหรือการเรืองแสง (Fluorescence or Phosphorescence) และบางส่วนอาจเกิดการกระเจิงแสง ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การกระทำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารต่างๆ (ดัดแปลงจาก [96])

คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรด (Near infrared; NIR) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ระหว่างช่วงคลื่นแสงย่านวิสิเบิล (Visible) และช่วงคลื่นแสงอินฟราเรดย่านกลาง (Middle infrared; MIR) คลื่นแสง NIR มีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 800-2500 นาโนเมตร สามารถแบ่งช่วงความยาวคลื่นออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงคลื่นสั้นที่มีความยาวคลื่น 800-1100 นาโนเมตร และช่วงคลื่นยาวที่มีความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร [97] ดังในภาพที่ 2.7



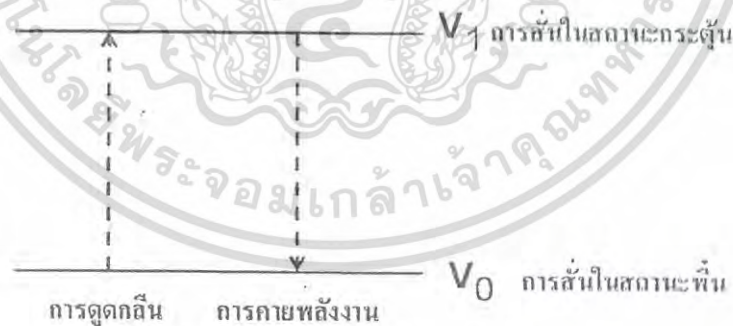
ภาพที่ 2.7 ช่วงสเปกตรัมของคลื่นแสงอินฟราเรด [97]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานของคลื่นแสง NIR จะอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับการสั่น (Vibration) ของพันธะภายในโมเลกุล หากการสั่นของพันธะใดเกิดที่ความถี่ที่ตรงกับความถี่ของคลื่นแสง NIR ก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนขึ้น ซึ่งการดูดกลืนแสง NIR ใช้มากในการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพของสารประกอบอินทรีย์ในผลผลิตต่างๆ

การสั่นของพันธะในลักษณะต่างๆ จะมีการดูดกลืนพลังงานที่เป็นเฉพาะของมัน เนื่องจากโมเลกุลหนึ่งๆ มีพันธะได้หลายแบบ ซึ่งแต่ละพันธะก็มีรูปแบบการสั่นได้อีกหลายรูปแบบ ทำให้โมเลกุลหนึ่งๆ จะแสดงการดูดกลืนแสง NIR ได้หลายช่วงคลื่นพร้อมกัน ลักษณะการดูดกลืนแสงจะเกิดเป็นแถบ (Band) หรือ พีก (Peak) แสดงถึงพลังงานคลื่นแสง NIR ที่ถูกดูดกลืน ซึ่งสามารถวัดได้ใน 2 รูปแบบ คือรูปแบบความเข้มแสงที่ส่องผ่าน (Transmittance) และรูปแบบความเข้มแสงสะท้อนออกมา (Reflectance) แล้วนำค่าความเข้มแสงที่ได้ในแต่ละความยาวคลื่น มาเขียนกราฟโดยให้แกนนอนเป็นค่าความยาวคลื่น แกนตั้งเป็นค่าการดูดกลืนแสง จะได้กราฟการดูดกลืนแสงของตัวอย่างนั้นๆ กราฟที่ได้เรียกว่า เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม (NIR spectrum) โมเลกุลของสารแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างกัน เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจึงได้สเปกตรัมที่มีลักษณะต่างกัน

จากทฤษฎีของกลศาสตร์ควอนตัม อธิบายว่าโมเลกุลของสารประกอบขึ้นด้วยอะตอมที่เชื่อมต่อกันด้วยการสร้างพันธะเคมี (Chemical bonding) พันธะในโมเลกุลจะเกิดการสั่น (Vibration) อยู่ตลอดเวลา เรียกการสั่นชนิดนี้ว่า การสั่นในสถานะพื้น (Vibration ground state) ด้วยความถี่ซึ่งมีค่าเฉพาะ (Quantized frequency) ถ้าโมเลกุลเกิดอันตรกิริยากับรังสี NIR จะดูดกลืนรังสีที่มีความถี่ตรงความถี่ค่าเฉพาะ จนทำให้เกิดการสั่นในสถานะกระตุ้น (Vibration excited state) ระดับโอเวอร์โทน โมเลกุลไม่สามารถอยู่ในสถานะกระตุ้นได้จึงต้องคายพลังงานออกมาในรูปความร้อนเพื่อให้กลับคืนสู่การสั่นในสถานะพื้นตามเดิม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า แทรนซิชัน (Transition) ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานการสั่น [98]

ในสารประกอบอินทรีย์จะมีหมู่ฟังก์ชันในกลุ่ม X-H เป็นโมเลกุลหลัก สามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) และดูดกลืนคลื่นแสง NIR ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นและเปลี่ยนระดับพลังงานการสั่นจากสถานะพื้น (Ground vibration) แล้วเปลี่ยนไปยังสถานะกระตุ้น (Excited vibration) โมเลกุลของ

สารอินทรีย์ที่มี H เป็นองค์ประกอบอยู่ในพันธะ โดยพันธะ O-H จะพบในโครงสร้างของโมเลกุลน้ำ พันธะ O-H และ C-H จะพบในโครงสร้างของโมเลกุลแป้งและน้ำตาล พันธะ N-H จะพบในโครงสร้างของโมเลกุลโปรตีน และพันธะ C-H จะพบในโครงสร้างของโมเลกุลไขมัน [97]

การเกิดอันตรกิริยาของรังสีอินฟราเรดย่านใกล้กับสสาร เมื่อรังสีอินฟราเรดย่านใกล้เดินทางผ่านเข้าไปยังสสาร จะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับอะตอมและโมเลกุลของสสารนั้น รังสีบางส่วนจะถูกดูดกลืน (Absorption) เอาไว้ บางส่วนจะผ่านออกมา (Transmission) และบางส่วนเกิดการสะท้อน (Reflection) ปรากฏการณ์เหล่านี้จะเกิดเพียงอันใดอันหนึ่งหรือเกิดพร้อมๆกันก็ได้ ดังสมการ Eq. 2.1 และภาพที่ 2.9

$$I_o = I_a + I_t + I_r \quad (\text{Eq. 2.1})$$



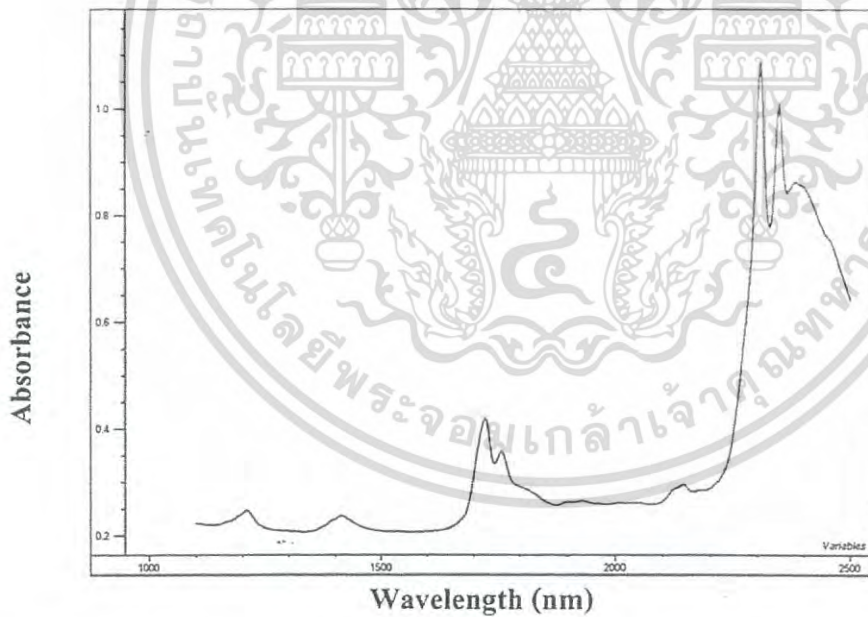
ภาพที่ 2.9 รูปแบบการเกิดอันตรกิริยาของรังสีอินฟราเรดย่านใกล้กับสสาร [98]

เมื่อสสารเกิดอันตรกิริยากับรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ ความเข้มของแถบการดูดกลืนใน NIR สเปกตรัมจะนิยมแสดงในรูปค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ในแกนตั้ง และความยาวคลื่น (Wavelength) ในแกนนอน ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสาร ดังนี้

กรณีวัดแสงส่องผ่าน : $A = \epsilon bc = \log (1/T) = \log (I_0/I_t)$ (Eq. 2.2)

กรณีวัดแสงสะท้อน : $A = \epsilon bc = \log (1/R) = \log (I_0/I_r)$ (Eq. 2.3)

- A คือ ค่าการดูดกลืนแสง
 ϵ คือ สภาพดูดกลืนโมลาร์ (molar absorptivity) เป็นค่าคงที่ของแต่ละสาร
 b คือ ความหนาของตัวอย่าง
 c คือ ความเข้มข้นของสารที่ดูดกลืนแสง
 T คือ แสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่าง
 R คือ แสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่าง
 I_0 คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบตัวอย่าง
 I_t คือ ความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่าง
 I_r คือ ความเข้มแสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่าง



ภาพที่ 2.10 NIR สเปกตรัม แสดงในรูปค่าการดูดกลืน (absorbance) กับความยาวคลื่น (wavelength) [98]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การทำงานของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี อาศัยการดูดซับพลังงานแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของตัวอย่างแต่ละชนิดซึ่งไม่เท่ากัน ดังนั้นเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจึงจำเป็นต้องมีความสามารถในการแยกลำแสงออกเป็นทีละความยาวคลื่นได้ เพื่อที่จะใช้แสงที่ความยาวคลื่นนั้นส่องไปยังตัวอย่างแล้ววัดความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมาเปรียบเทียบกับความเข้มของแสงที่ส่องเข้าไป (Reflectance) หรือวัดความเข้มแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มของแสงที่ส่องเข้าไป (Transmittance) ทำแบบนี้ทีละความยาวคลื่น แล้วจึงนำความเข้มแสงนั้นมาเขียนกราฟการดูดกลืนแสงของตัวอย่างนั้นๆ และนำข้อมูลที่ไว้วิเคราะห์ต่อไป

ส่วนประกอบของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีที่สำคัญ ได้แก่

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source) เป็นแหล่งให้พลังงานแสง
2. โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) เป็นอุปกรณ์แยกความคลื่นแสงออกเป็นแต่ละความยาวคลื่น โดยอาศัยเกรตติง (Grating) ที่มีช่องผ่านแสงเข้าและแสงออก เพื่อควบคุมให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ
3. ตำแหน่งที่วางตัวอย่าง (Sample presentation) คือตำแหน่งที่แสงเดินทางไปที่ตัวอย่างและเกิดอันตรกิริยากับตัวอย่างทดสอบในรูปแบบที่ต้องการวิเคราะห์
4. ตัวตรวจวัดสัญญาณ (Detector) เป็นอุปกรณ์ที่วัดความเข้มของแสงหรือค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง
5. ระบบอ่านสัญญาณ (Read out) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจวัดสัญญาณเป็นค่าออกมา โดยอาจเป็นตัวเลขหรือเป็นเส้นกราฟแล้วบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์

หลักการการทำงานของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์เนียร์อินฟราเรดคือ แสงจากแหล่งให้พลังงานแสง (Light source) ที่มีการกระจายของแสง และควบคุมด้วยระบบโมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) ให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ แล้วส่งผ่านไปยังตัวอย่าง (Sample) และวัดปริมาณแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนไว้ด้วยอุปกรณ์สำหรับตรวจวัด (Detector) และแปลงเป็นสัญญาณส่งเข้าสู่ส่วนประมวลผล (Read out) ด้วยโปรแกรม ให้ออกมาในรูปแบบที่ผู้ใช้สามารถนำค่านั้นไปใช้ได้ แล้วบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์ โดยจะบันทึกปริมาณแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนไว้เทียบกับความยาวคลื่นต่างๆ แล้วนำมาจับคู่กับค่าการวิเคราะห์เคมี

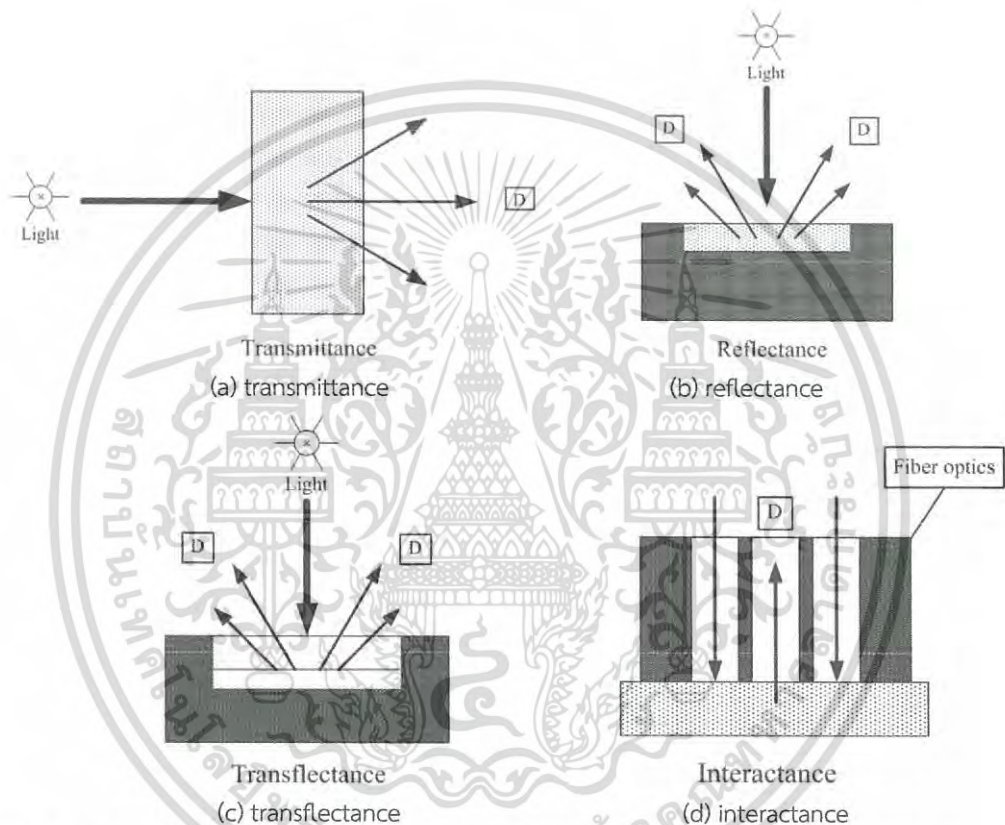
รูปแบบที่ตัวอย่างเกิดอันตรกิริยา (Interaction)

เครื่องสเปกโตรมิเตอร์เนียร์อินฟราเรด เป็นเครื่องมือที่ให้คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรด ส่องมายังตัวอย่าง เมื่อคลื่นแสงเนียร์อินฟราเรดผ่านไปยังตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยากับตัวอย่างได้หลายแบบ เช่น Transmittance, Reflectance, Transflectance และ Interactance ดังแสดงในภาพที่ 2.11

1. Transmittance แสงตกกระทบตัวอย่างด้านหนึ่ง โดยที่ Detector จะวัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่างในด้านตรงกันข้าม ดังแสดงในภาพที่ 2.11 (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Reflectance แสงจะตกกระทบที่ผิวของตัวอย่าง และอาจแพร่กระจายในปริมาณหนึ่งก่อน แล้ววัดปริมาณแสงสะท้อนกลับออกมาโดย Detector ดังแสดงในภาพที่ 2.11 (b)
3. Transflectance แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบตัวอย่างและส่องผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบวัตถุที่ไม่ดูดกลืนแสง (แผ่นเซรามิก, ทอง หรืออลูมิเนียม) ที่อยู่ด้านล่างตัวอย่าง แล้วเกิดการสะท้อนกลับมายัง Detector ดังแสดงในภาพที่ 2.11 (c)
4. Interactance กระบวนการนี้เกิดในกรณีที่ใช้หัววัดใยแก้วนำแสง (Fiber optics probe) แสงจะออกมาจากส่วนวงแหวนด้านนอกของหัววัดมาตกกระทบตัวอย่าง และแสงที่สะท้อนออกมาจากเนื้อตัวอย่างจะถูกส่งไปยังที่ Detector บริเวณส่วนกลางของใยแก้วนำแสง ดังแสดงในภาพที่ 2.11 (d)

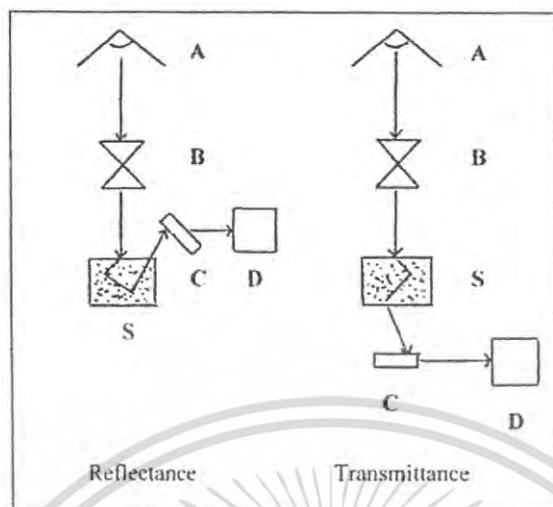


ภาพที่ 2.11 รูปแบบที่วัตถุเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับแสง NIR (a) transmittance, (b) reflectance, (c) transflectance และ (d) interactance [99]

Williams (2007) [100] อธิบายว่าเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี สามารถใช้ได้ทั้งแบบ Reflectance และ Transmittance เครื่องมือแบบ Reflectance มักจะเรียกว่าเป็นเครื่อง NIR ส่วนเครื่องมือแบบ Transmittance จะอยู่ในส่วนของเครื่อง NIT เครื่องมือแบบ Reflectance จะมีแหล่งกำเนิดแสงและ Detector อยู่ภายในและอยู่ด้านเดียวกับตัวอย่าง สำหรับเครื่องมือแบบ Transmittance แสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงจะผ่านหรือแพร่ (diffuse) แล้ว Detector จะเป็นตัวรับแสง

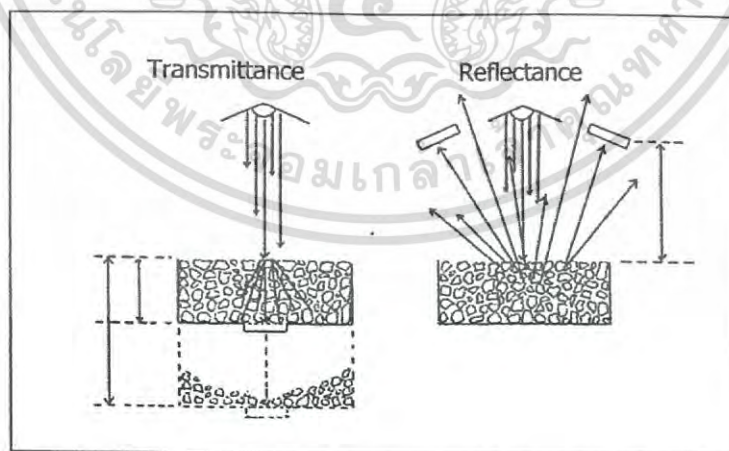
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ผ่านออกมาจากตัวอย่าง ภาพที่ 2.12 แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างเครื่องมือแบบ Reflectance และแบบ Transmittance



ภาพที่ 2.12 การออกแบบเครื่องมือแบบพื้นฐาน A = light source, B = wavelength selection system, C = detector, D = computer และ S = sample [100]

ภาพที่ 2.13 แสดงความแตกต่างของ Path length ระหว่างเครื่องมือแบบ Reflectance และแบบ Transmittance ซึ่ง Path length คือระยะทางระหว่างผิวหน้าของตัวอย่างและ Detector เป็นค่าคงที่ที่สำคัญสำหรับเครื่องมือแบบ Reflectance ส่วนเครื่องมือแบบ Transmittance นั้น Path length จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและการตั้งค่าที่เหมาะสมระหว่างการพัฒนาแบบจำลองคาลิเบรชัน (Calibration model) [100]



ภาพที่ 2.13 ความแตกต่างของ path length ระหว่างเครื่องมือแบบ Transmittance และแบบ Reflectance [100]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยส่วนใหญ่นิยมวัดค่าในรูปแบบ Reflectance ที่วัดค่าความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมา เปรียบเทียบกับความเข้มแสงที่ส่องเข้าไป หรือ Transmittance ที่วัดความเข้มแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่าง เปรียบเทียบกับความเข้มแสงที่ส่องเข้าไป โดยเทคนิค NIRS สามารถตรวจวัดองค์ประกอบของผลผลิตได้ทั้งในรูปแบบ Transmittance และ Reflectance โดยให้ประสิทธิภาพของการตรวจวัดไม่ต่างกัน แต่การเลือกรูปแบบในการวัดและช่วงของสเปกตรัมที่ใช้งานเป็นสิ่งสำคัญ รุ่งนภา (2550) [101] ได้วิเคราะห์หาไขมันและความชื้นในผลิตภัณฑ์เนยแข็งด้วย NIR spectroscopy พบว่าในตัวอย่างที่มีความชื้นหรือไขมันสูง ถ้าวัดด้วยรูปแบบ Reflectance จะให้ผลการวัดที่ไม่ค่อยดี เนื่องจากผิวหน้าที่เปียกของตัวอย่าง จึงให้ค่าที่สูงกว่าปกติ ทำให้ไม่สามารถทำนายความเข้มข้นที่ถูกต้องได้ จึงเปลี่ยนรูปแบบการวัดใหม่โดยวิธี Transmittance ในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 นาโนเมตร ซึ่งรูปแบบการวัดนี้แสง NIR สามารถส่องผ่านตัวอย่างได้มากกว่า จึงทำให้เกิดค่าผิดพลาดที่ผิวนำน้อยกว่า คลื่นแสง NIR ในช่วงคลื่นสั้นที่มีความยาวคลื่น 800-1100 นาโนเมตร แสงสามารถส่องผ่านตัวอย่างได้ลึกถึง 10 มิลลิเมตร เป็นช่วงคลื่นที่เหมาะสมกับตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นหรือน้ำสูง ส่วนช่วงคลื่นยาวที่มีความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร แสงสามารถส่องผ่านตัวอย่างได้ลึกประมาณ 1-3 มิลลิเมตร จึงเป็นช่วงคลื่นที่เหมาะสมกับตัวอย่างที่มีปริมาณความชื้นหรือน้ำน้อย ดังนั้น ตัวอย่างที่เป็นของเหลวหรือเป็นของแข็งที่เป็นชั้นบางๆ สามารถใช้รูปแบบ Transmittance ตรวจวัด ส่วนตัวอย่างที่เป็นของแข็งนิยมตรวจวัดในรูปแบบ Reflectance ปัจจัยที่มีผลต่อเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม (Factors affecting NIR spectra)

1 ขนาดอนุภาคของตัวอย่าง (Particle size) ตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน จะทำให้ได้เส้นสเปกตรัมที่แตกต่างกันด้วย โดยตัวอย่างขนาดเล็กสามารถสะท้อนแสงได้ดีกว่าตัวอย่างขนาดใหญ่ ฉะนั้นค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมตัวอย่างที่มีขนาดเล็กจึงมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ [97]

2 ความชื้น (Moisture) ตัวอย่างที่มีความชื้นสูงจะมีค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมสูงกว่าตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำ จากการศึกษาของ Osborne *et al.* (1993) [97] พบว่าสเปกตรัมของข้าวสาลีก่อนอบและหลังอบแห้ง จะเห็นพีกของน้ำหายไปและค่าการดูดกลืนแสงลดลงทั้งสเปกตรัม เนื่องจากตัวอย่างแห้งสะท้อนแสงได้มากกว่าตัวอย่างเปียก

3 อุณหภูมิของตัวอย่าง (Sample temperature) ตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างเดียวกัน แต่อุณหภูมิในตัวอย่างแตกต่างกันก็อาจทำให้ได้เส้นสเปกตรัมที่ต่างกัน เมื่อวัดผลพีกที่อุณหภูมิ 3 ระดับ พบสเปกตรัมมีความแตกต่างในช่วงการดูดกลืนแสงของน้ำที่พีก 970 นาโนเมตร เนื่องจากอุณหภูมิของตัวอย่างจะมีผลโดยตรงต่อโมเลกุลของน้ำ ซึ่งความแตกต่างของสเปกตรัมนี้จะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน แต่สามารถส่งผลกระทบต่อความแม่นยำสมการได้มาก [102]

4 การบรรจุ (Packing) ตัวอย่างในเซลล์บรรจุที่มีการอัดตัวแน่นมาก ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างตัวอย่างน้อย มีการสะท้อนกลับของแสงมาก ค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมจะมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่มีการอัดตัวกันน้อย [103]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นวิธีการวิเคราะห์โมเลกุลที่ไม่ทำลายตัวอย่าง ได้ผลดีและรวดเร็ว นำมาใช้ในการตรวจวัดผลิตภัณฑ์ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ตั้งแต่การตรวจสอบวัตถุดิบไปจนถึงการตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ตั้งแต่ปี 1980 ประเทศญี่ปุ่นเริ่มใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลผลิตทางการเกษตร อุตสาหกรรมยาและปิโตรเลียม ปัจจุบันมีการนำมาใช้ในการทดสอบรสชาติของข้าวระหว่างพันธุ์และข้าวที่มีกรรมพันธุ์ วิเคราะห์องค์ประกอบของซอสถั่วเหลือง ประเมินคุณภาพของน้ำอ้อย เป็นต้น สำหรับในประเทศไทยมีการนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้ในการอุตสาหกรรมหลายประเภท สามารถใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์องค์ประกอบในวัตถุดิบได้หลายชนิด เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ความชื้น เส้นใย ชี้เถ้า น้ำมัน กรดไขมันอิสระ เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 2.2 นอกจากนี้ อุตสาหกรรมทางด้านข้าว ได้ใช้ในการทำนายองค์ประกอบต่างๆ เช่น กรดอะมิโนในข้าวกล้อง [104] กรดอะมิโนในแป้งข้าวเจ้า [105] กรดอะมิโนและไนโตรเจนในแป้งข้าวเจ้า [106] สำหรับการทำนายองค์ประกอบทางคุณภาพของข้าวสาร เช่น ปริมาณอะไมเลส (Amylase content), อุณหภูมิแป้งสุก (Gelatinization temperature), ความคงตัวของแป้งสุก (Gel consistency) และ Alkali spread value [107], กรดไขมัน (Fatty acid) [108], ปริมาณโปรตีน (Protein content) และสมบัติการคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation properties) [109] สำหรับพืชอื่น อาทิ การทำนายกรดอะมิโนที่จำเป็นในถั่วเหลือง, อาหารที่เป็น Rapeseed (เป็นพืชในตระกูลมัสตาร์ด), เมล็ดทานตะวัน, อาหารจากปลา อาหารจากเนื้อ, อาหารจากสัตว์ปีก [110]

ตารางที่ 2.2 การใช้ประโยชน์เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในประเทศไทย [42]

ชนิดอุตสาหกรรม	ชนิดของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์	องค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์
อุตสาหกรรมมันสำปะหลัง	มันแผ่นและมันอัดเม็ด	ความชื้น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เส้นใย ชี้เถ้า
อุตสาหกรรมอาหารสัตว์และสัตว์น้ำ	วัตถุดิบ (ข้าวโพด ข้าวสาลี ปลาป่น กระดุกป่น ถั่วเหลืองป่น ปลาขี้ขาว และผลิตภัณฑ์สำเร็จ)	ความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใย ชี้เถ้า
อุตสาหกรรมแป้ง	วัตถุดิบ (สินค้านำเข้า) และผลิตภัณฑ์สำเร็จ	ความชื้น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เส้นใย ชี้เถ้า กลูเต็น
นมและผลิตภัณฑ์นม	น้ำนมดิบ นมผง นมหวาน	ความชื้น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน
น้ำมันพืช	วัตถุดิบ (ถั่วเหลือง รำข้าว)	ความชื้น โปรตีน น้ำมัน ไขมันอิสระ

ขั้นตอนการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการวัดองค์ประกอบทางเคมีหรือสมบัติทางกายภาพของผลผลิตเกษตรและอาหาร [26]

1. กำหนดตัวอย่างที่จะใช้ เช่น ผลไม้ควรให้ตัวอย่างทั้งหมดครอบคลุมสมบัติที่จะวัดและอยู่ในช่วงกว้างที่ครอบคลุมตัวอย่างที่ต้องการวัดเพื่อใช้งานจริง โดยปกติควรใช้อย่างน้อย 200 ตัวอย่างขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ตัวอย่างควรเตรียมตัวอย่างให้มีความสม่ำเสมอมากที่สุด เช่น ความหนา ขนาดเมล็ด สิ่งแวดล้อม ในห้องปฏิบัติการ เป็นต้น

2. นำตัวอย่างมาสแกนด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ จะได้ข้อมูลเชิงแสง (Optical data) ในรูปแบบสเปกตรัมของแต่ละตัวอย่าง เมื่อได้ข้อมูลครบทุกตัวอย่างให้ตรวจสอบค่านอกกลุ่ม (Outlier) โดยการสังเกตด้วยตา หากมีสเปกตรัมผิดปกติให้พิจารณาตัดออก หรือใช้วิธี Principle Component Analysis (PCA) สเปกตรัมผิดปกตินี้อาจเกิดจากการสแกนที่ผิดพลาด

3. นำตัวอย่างมาวัดองค์ประกอบทางเคมีหรือสมบัติทางกายภาพที่ต้องการด้วยวิธีมาตรฐานที่ยอมรับได้ ซึ่งเรียกค่าที่ได้ว่าค่าอ้างอิง (Reference data) ของแต่ละตัวอย่าง เมื่อได้ข้อมูลครบทุกตัวอย่างให้ตรวจสอบค่านอกกลุ่ม รมฤทธิ์ (2555) [111] ให้ข้อเสนอแนะว่าก่อนการวัดค่าอ้างอิงผู้วัดควรฝึกปฏิบัติจนให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องแม่นยำ เพราะความแม่นยำของแบบจำลองแคลิเบรชันจะขึ้นโดยตรงกับความแม่นยำของการวิเคราะห์ทางเคมีด้วย

4. นำข้อมูลเชิงแสงและค่าอ้างอิงมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เช่น Unscrambler, Win ISI, Opus, NIRCal เป็นต้น โดยเรียงลำดับข้อมูลตามค่าอ้างอิงจากน้อยไปหามาก แล้วแบ่งข้อมูลเป็น 2 ชุด คือ ชุดสร้างแบบจำลองหรือสมการ (Calibration set) และชุดพิสูจน์ความแม่นยำของแบบจำลอง (Prediction set) โดยปกติแล้วใช้อัตราส่วน Calibration set มากกว่า Prediction set เช่น 7:3 หรือ 8:2 เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายให้ตัวอย่างลำดับที่ 1-8, 11-18, 21-28,... อยู่ใน Calibration set และตัวอย่างลำดับที่ 9-10, 19-20, 29-30,... อยู่ใน Prediction set ทั้งนี้ให้ค่าน้อยสุดและค่ามากที่สุดอยู่ใน Calibration set เนื่องจากแบบจำลองต้องครอบคลุมช่วงของข้อมูลทั้งหมด หากตัวอย่างน้อยกว่า 100 ตัวอย่างไม่ควรแบ่งเป็นชุด Calibration set และชุด Prediction set เนื่องจากการสร้างแบบจำลองทำจากตัวอย่างที่น้อยเกินไปจะทำให้แบบจำลองไม่น่าเชื่อถือ

5. สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปโดยใช้สเปกตรัมเริ่มต้น (Original spectrum) หรือสเปกตรัมที่ผ่านการจัดการทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีทางเคโมเมตริกแบบต่างๆ

6. เมื่อได้แบบจำลอง สามารถพิสูจน์ความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้ Prediction set โดยพิจารณาจากค่าทางสถิติที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของแบบจำลอง หากตัวอย่างน้อยกว่า 100 ตัวอย่างควรใช้วิธี Cross validation

7. หากแบบจำลองมีความแม่นยำเพียงพอให้นำมาพิสูจน์อีกครั้งหนึ่งโดยใช้ตัวอย่างกลุ่มใหม่แล้วทดลองตามข้อ 2 และ 3 นำสเปกตรัมที่ได้แทนลงในแบบจำลอง (โดยวิธีการของโปรแกรมสำเร็จรูป) ซึ่งจะประเมินค่าองค์ประกอบทางเคมีหรือสมบัติทางกายภาพออกมาแล้วเทียบค่าอ้างอิง ซึ่งโปรแกรมจะคำนวณค่าทางสถิติที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำและความผิดพลาดให้ทราบ

จากที่กล่าวมาข้างต้น ข้อมูลสเปกตรัมย่านเนียร์อินฟราเรด ของวัสดุเกษตรจะอยู่ในรูปสัญญาณคลื่น ซึ่งมีโอกาสถูกรบกวนจากอิทธิพลของปัจจัยแวดล้อม เครื่องมือและผู้ปฏิบัติงาน ทำให้ลักษณะของข้อมูลสเปกตรัมที่วัดได้อาจเกิดผิดปกติ จึงมีความจำเป็นต้องมีการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมเหล่านี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลกระทบจากสิ่งรบกวนต่างๆ เพื่อที่จะนำข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งแล้วไปทำ

การสร้างสมการทำนายที่มีความแม่นยำต่อไป โดยวิธีการรูปแบบต่างๆในการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัม วิธีวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมที่ปรับแต่งแล้วเพื่อสร้างสมการทำนาย และค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิสูจน์ความแม่นยำและความถูกต้องของการทำนายได้นำเสนอในหัวข้อที่ 2.3.4

2.3.4 วิธีการทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดการและวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด

2.3.4.1 การแปลงหรือการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัม

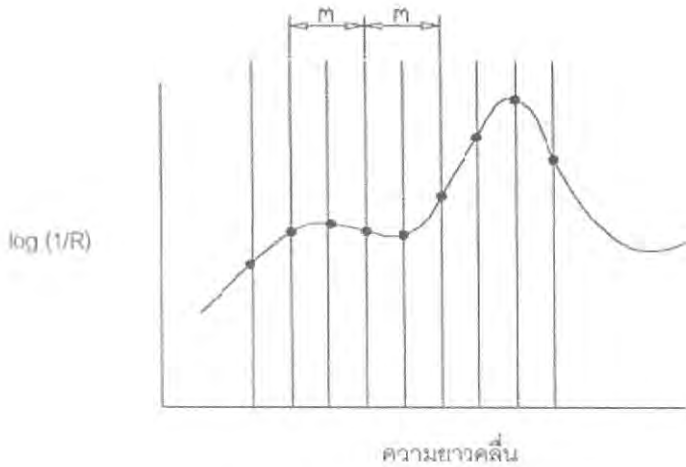
การแปลงข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์เนียร์อินฟราเรด เพื่อลดอิทธิพลของปัจจัยดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สเปกตรัมมีความแตกต่างกัน ส่งผลต่อสมการที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำในการทำนายลดลง ดังนั้นการแปลงข้อมูลสเปกตรัมโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ถือเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้ขั้นตอนการสร้างสมการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น

การลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน

เครื่องมือทั่วไปที่ใช้วัดสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรด จะถูกออกแบบให้มีความคลาดเคลื่อนต่ำในการวัดค่า $\log(1/R)$ และค่าความยาวคลื่น อย่างไรก็ตามสัญญาณสเปกตรัมที่วัดได้บางครั้งจะมีสัญญาณรบกวนแทรกเข้ามาส่งผลให้สเปกตรัมไม่เรียบ มีวิธีการหลายวิธีที่ทำให้สัญญาณเรียบต่อเนื่องซึ่งจะกำจัดสัญญาณรบกวนออกจากสเปกตรัมได้ วิธีเบื้องต้นที่จะช่วยลดสัญญาณรบกวนจะกระทำได้โดยการวัดสเปกตรัมหลายๆครั้งโดยนำตัวอย่างมาสแกนหลายๆครั้งและใช้ค่าเฉลี่ยของสเปกตรัม สำหรับวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถนำมาใช้ลดสัญญาณรบกวนนอกเหนือจากวิธีเบื้องต้นดังกล่าวที่นิยมใช้คือ

1 วิธีการเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Running mean smooth or N-Point smooth)

วิธีนี้มีข้อดีคือเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดโดยมีหลักการคือการแทนค่า $\log(1/R)$ แต่ละจุดหรือแต่ละความยาวคลื่นด้วยค่าเฉลี่ยของค่า $\log(1/R)$ ในช่วงความยาวคลื่นที่มีจุดศูนย์กลางของช่วงตรงกับจุดที่ถูกแทนที่ จำนวนของจุดที่นำมาเฉลี่ยคือ $n = 2m+1$ โดยที่ m คือจำนวนของจุดทั้งสองด้านของจุดศูนย์กลางดังแสดงในภาพที่ 2.14 [112] ในภาพเลือก $m = 2$ ซึ่งจะได้ $n = (2 \times 2) + 1 = 5$ จุดการเฉลี่ยเริ่มจากการนำค่า $\log(1/R)$ ของทั้ง 5 จุดมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ยนำค่าเฉลี่ยมาสร้างสเปกตรัมใหม่โดยในช่วงความยาวคลื่นแรก (ความยาวคลื่นแรกถึงความยาวคลื่นที่ 5) โดยนำค่าเฉลี่ยดังกล่าวมาเป็นค่าสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นที่ 3 หรือความยาวคลื่นที่จุดศูนย์กลางช่วงต่อจากนั้นจะเลื่อนช่วงไปทางขวา 1 จุดแล้วคำนวณซ้ำจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่นข้อมูลสเปกตรัมที่สร้างขึ้นใหม่ในที่สุดจะมีจำนวนข้อมูลช่วงเริ่มต้นหายไป m ข้อมูลและช่วงท้ายหายไป m ข้อมูล



ภาพที่ 2.14 จำนวนจุดทั้งสองด้าน ($m = 2$, $n = 5$) ของการเฉลี่ย [112]

2. วิธี Savitzky-Golay smooth

เป็นวิธีที่ทำให้สัญญาณสเปกตรัมเรียบที่นิยมใช้มากที่สุดซึ่งจะเลือกใช้ในกรณีที่

1. ข้อมูลมีสัญญาณรบกวนมากไม่เรียบ
2. ต้องการทำให้สัญญาณเรียบและยังคงรูปร่างของสเปกตรัมเหมือนกับที่เริ่มต้น
3. เมื่อรูปร่างของสเปกตรัมมียอดแหลมเป็นจำนวนมาก

หลักการของวิธีนี้คือกำหนดข้อมูลในช่วงความยาวคลื่น ($n = 2m+1$) เหมือนกับวิธีการเฉลี่ยเคลื่อนที่นำข้อมูลสเปกตรัมหรือ $\log(1/R)$ ในช่วงที่กำหนดโดยเริ่มจากข้อมูลจำนวน $2m+1$ จุดแรกมาหาสมการพหุนามที่สามที่สามารถนำมาคำนวณค่าสเปกตรัมที่แต่ละจุดหรือแต่ละความยาวคลื่นในช่วงได้ใกล้เคียงที่สุดโดยวิธี Least square เมื่อได้สมการแล้วนำมาคำนวณค่าสเปกตรัมที่จุดศูนย์กลางของช่วงแล้วนำค่าที่คำนวณไปแทนค่าสเปกตรัมเดิมที่จุดหรือความยาวคลื่นนั้นค่าที่คำนวณได้ถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงค่าจริงมากกว่าสเปกตรัมที่เริ่มต้นที่ถูกแทนที่เนื่องจากสัญญาณรบกวนได้ถูกกำจัดออกไปแล้วขั้นตอนต่อไปคือเลื่อนช่วงที่เท่ากันนี้ไปทางขวา 1 จุด (อาจเป็น $2m$ หรือ $4m$ ขึ้นอยู่กับความละเอียดของข้อมูล) แล้วทำซ้ำตามขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นจนกระทั่งช่วงความยาวคลื่นถูกเลื่อนไปจนครอบคลุมความยาวคลื่นหรือจุดสุดท้ายสเปกตรัมที่สร้างขึ้นใหม่จะมีจำนวนข้อมูลในส่วนต้นและส่วนท้ายหายไปเท่ากับ m จุดเหมือนดังกรณีการเฉลี่ยเคลื่อนที่ และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่จะพบว่าการใช้วิธี Savitzky-Golay smooth จะยังคงรักษาขนาดของยอดแหลมในสเปกตรัมให้มีขนาดเท่ากับสเปกตรัมเริ่มต้นไม่ว่าจะเป็นยอดแหลมที่มีฐานกว้างหรือฐานแคบก็ตาม

การลดผลกระทบจากปัจจัยที่มีผลต่อค่าสเปกตรัม

ปัจจัยหลักๆที่ทำให้เกิดผลดังกล่าวต่อสเปกตรัมคือขนาดอนุภาคของตัวอย่าง (Particle size) และความชื้นในตัวอย่าง (Moisture content) โดยปัจจัยทั้งสองจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการกระเจิงแสง

(Scattering) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้แสงเปลี่ยนทิศทางอันเป็นผลจากการสะท้อนแสงการหักเหหรือการเบี่ยงเบนแสงแสงที่เกิดการกระเจิงจะไม่ทะลุทะลวงลึกลงไปในตัวอย่างมากและจะสะท้อนกลับมาที่ผิวของตัวอย่างโดยแทบจะไม่มีข้อมูลการดูดกลืนแสงการกระเจิงแสงจะเกิดขึ้นในตัวอย่างที่มีอนุภาคเล็กๆ นอกจากนั้นแล้วการกระเจิงแสงยังขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงด้วยเนื่องจากความเร็วของแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันจะไม่เหมือนกันเมื่อผ่านลงไปในตัวอย่างเดียวกันซึ่งทำให้เห็นสเปกตรัมได้รับผลกระทบจากขนาดอนุภาคที่แตกต่างไม่เท่ากันตลอดความยาวคลื่นโดยสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นสูงจะแตกต่างกันมากกว่าสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นต่ำ

วิธีการลดผลจากปัจจัยที่มีต่อสเปกตรัม

สเปกตรัมที่ได้จากการดูดกลืนแสงในย่านเนียร์อินฟราเรด เป็นสเปกตรัมที่มีการเหลื่อมซ้อนทับกันอยู่ (Overlapping band) ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงควรนำไปปรับแต่งด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ก่อนเพื่อปรับสเปกตรัมให้มีความเด่นชัดมากขึ้นและลดความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง วิธีการที่นิยมใช้มีดังนี้คือ

1 วิธีอนุพันธ์ (Derivative) เป็นการหาความชันของเส้นสเปกตรัม เพื่อแก้ปัญหาพีกที่มีฐานกว้าง (Broad peak) เนื่องจากการซ้อนทับกันของพีก (Overlapping) และอิทธิพลจากการยกตัวของเส้นสเปกตรัม (Base line shift) ที่เกิดจากการกระเจิงแสง (Scattering light) เมื่อแสงตกกระทบที่ตัวอย่างทำให้แสงเปลี่ยนทิศทาง ซึ่งมีผลต่อการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากขนาดของตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ การอัดตัว และการกระจายตัวของตัวอย่างภายในเซลล์บรรจุที่แตกต่างกัน รวมทั้งความชื้นภายในตัวอย่างที่แตกต่างกันด้วย [113] แบ่งเป็น 2 วิธีคือ

1.1 First derivative

เป็นการคำนวณอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของสเปกตรัมซึ่งสัญญาณที่มีความชันจะถูกเน้นมากกว่าสัญญาณที่ค่อนข้างแบนราบ วิธีนี้จะถูกใช้เน้นลักษณะที่ชัดเจนแต่มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับโครงสร้างที่มีแถบการดูดซับคลื่นที่กว้าง การประยุกต์ใช้ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ การประเมินแถบการดูดซับคลื่นที่กว้างนี้มักจะทำในเทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดโดยการคำนวณอนุพันธ์ โครงสร้างเหล่านี้จะมีรูปร่างที่สูงชันขึ้น ซึ่งสามารถได้รับการประเมินได้ง่ายขึ้น

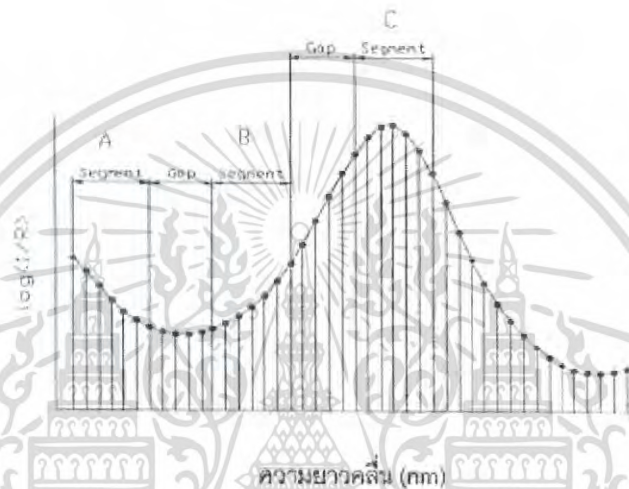
เมื่อใช้อนุพันธ์เป็นการจัดการข้อมูลเบื้องต้น จะต้องคำนึงถึงว่าสัญญาณรบกวนจะถูกจัดการเช่นกัน สิ่งนี้จะซ้อนทับบนสเปกตรัมเป็นสิ่งรบกวนเพิ่มเติม และสามารถทำให้สัญญาณของตัวอย่างเลวลงการคำนวณ First derivative หรือความชันของสเปกตรัม สามารถทำได้ดังสมการที่ 2

$$\text{First derivative} = \text{Slope} = B-A \quad (\text{Eq. 2.4})$$

โดยที่ A และ B คือค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของส่วน (Segment) ที่มีช่วงเท่ากันและอยู่ติดกัน

ในการคำนวณต้องกำหนดขนาดของส่วน (Segment) และช่อง (Gap) ก่อนซึ่งส่วนคือขนาดของความยาวคลื่นที่ทำการเฉลี่ยให้ได้ค่าใหม่เพื่อเป็นตัวแทนขึ้นมาหนึ่งจุดแล้วทำการข้ามช่วงความยาวคลื่นไปเท่ากับขนาดของช่องเพื่อเริ่มนับจุดแรกในการคำนวณส่วนต่อไป ตัวอย่างดังในภาพที่ 2.15

[112] เป็นสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นที่แต่ละจุดห่างกัน 2 nm มีขนาดส่วนและช่องเท่ากับ 12 และ 10 nm ตามลำดับโดยที่จุด A คือจุดที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยในช่วงความยาวคลื่น 12 nm (ขนาดส่วน) จากนั้นเข้าไป 10 nm (ขนาดช่อง) แล้วจึงเฉลี่ยอีกครั้งในช่วงความยาวคลื่น 12 nm เพื่อให้เป็นจุด B แล้วนำค่า A ลบจากค่า B ผลที่ได้นำไปแทนค่าสเปกตรัมที่จุดเริ่มต้นของส่วนแรกซึ่งคำนวณจะกระทำทุกส่วนต่อเนื่องกันไปจนตลอดความยาวคลื่นต่อจากนั้นก็ขยับส่วนไปทางขวา 1 จุดหรือ 2 nm แล้วคำนวณซ้ำเหมือนที่กล่าวมาจนเสร็จสิ้น First derivative ใช้ได้ผลกับตัวอย่างที่มีเนื้อสม่ำเสมอและมีการกระจายของอนุภาคสม่ำเสมอทั่วถึงนอกจากนั้นแล้ว First derivative ของสเปกตรัมจะช่วยแก้ปัญหาที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น



ภาพที่ 2.15 Segment size และ Gap size ที่กำหนดในสเปกตรัมเพื่อคำนวณ Derivative [112]

1.2 Second derivative

การแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 1 (First derivative) สามารถลดปัญหาการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแกน Y ทำให้เส้นสเปกตรัมเลือนมาชิดกัน แต่พิกของสเปกตรัมยังมีฐานกว้าง จึงไม่สามารถแยกพีกออกจากกันอย่างชัดเจนได้ อีกทั้งวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 ให้ความหมายเป็นค่าความชันของสเปกตรัมแต่ละความยาวคลื่นซึ่งทำให้แปลความหมายได้ยาก แต่การแปลงข้อมูลด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 (Second derivative) สามารถลดผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแกน Y ที่ชัดเจนกว่าวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 และแยกพีกสเปกตรัมที่มีการซ้อนทับกันออกจากกันได้อย่างชัดเจน ทำให้ทราบตำแหน่งความยาวคลื่น แต่สเปกตรัมมีลักษณะหัวกลับลงมาด้านล่าง (ภาพที่ 2.16) ดังนั้น การคำนวณการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 จึงเป็นที่นิยมมากกว่าวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 โดยการเพิ่มอันดับของอนุพันธ์สูงขึ้น ก็จะได้สเปกตรัมที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นข้อมูลที่ดีในกรณีวิเคราะห์เชิงคุณภาพ แต่การทำอนุพันธ์ที่สูงเกินไปทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณวัดกับสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio) ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแถบสัญญาณรบกวนมักมีรูปร่างแคบชัน ดังนั้นเมื่อแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์สเปกตรัมที่ได้ของสัญญาณรบกวน จึงมีแอมพลิจูด (Amplitude) เต็มซัดมากยิ่งขึ้นจนสามารถรบกวนการวิเคราะห์ได้

วิธี Second derivative เป็นการคำนวณผลลบของค่าที่ได้จากวิธี First derivative ที่ติดกันนั่นเองหรือเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัม สามารถทำได้ ดังสมการที่ 2.5

$$\frac{d^2 \log(1/R)}{d\lambda^2} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

ซึ่งเขียนแทนด้วย

$$d^2 \log(1/R)$$

สามารถคำนวณได้จาก

Second derivative = change in slope

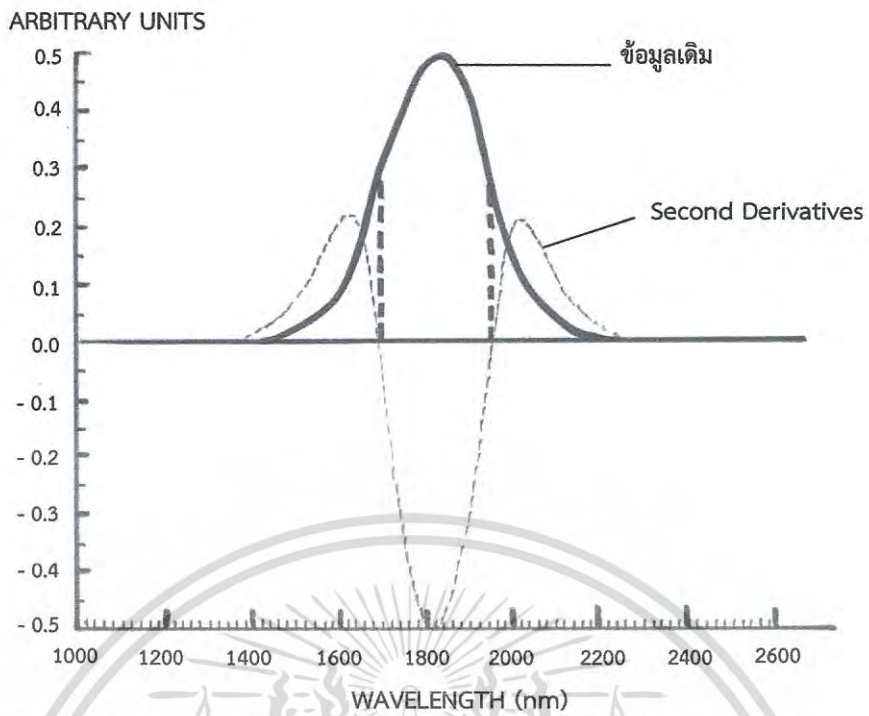
= First derivative แรก - First derivative ถัดมา

= (C-B) - (B-A)

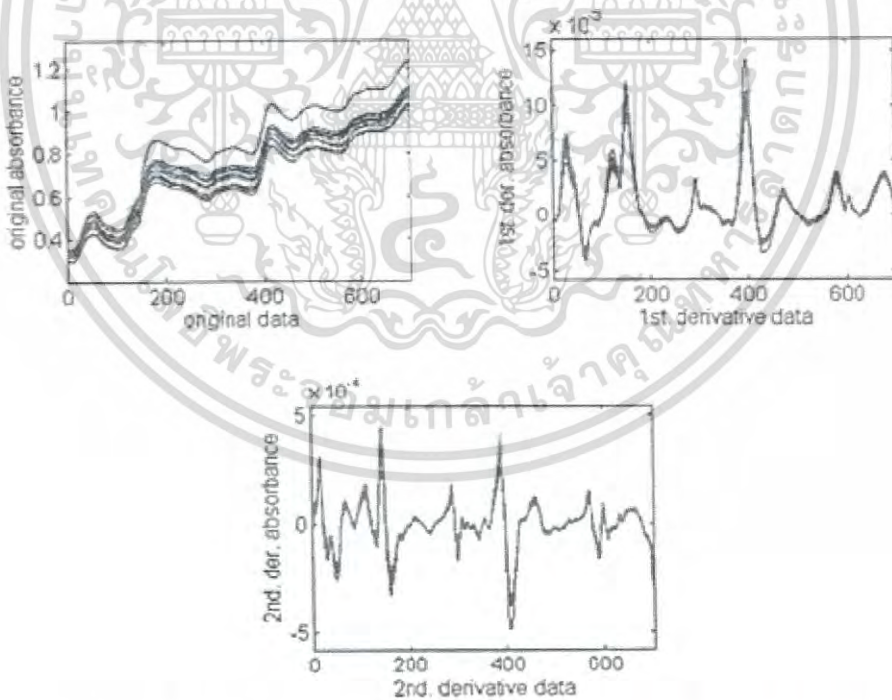
= C-2B+A

โดยที่ A, B และ C เป็นค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของส่วนที่อยู่ติดกันและมีช่วงเท่ากัน

ในการคำนวณจะคล้ายกับ First derivative โดยการคำนวณค่า Second derivative ของจุดแรกต้องหาค่า C ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมในช่วงที่สาม แล้วคำนวณผลลบของค่าเฉลี่ยในส่วนแรกและส่วนที่สองซึ่งก็คือ B-A แล้วคำนวณผลลบของค่าเฉลี่ยในส่วนที่สองและส่วนที่สามซึ่งก็คือ C-B แล้วนำผลลบค่าแรกมาลบออกจากผลลบค่าที่สองตามสมการค่าผลลบสุดท้ายที่นำไปแทนค่าสเปกตรัมที่จุดแรกของส่วนแรกและคำนวณผลลบตามสมการไปจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ต่อจากนั้นจึงเลื่อนไปทางขวา 1 จุดหรือ 2 nm แล้วทำการหาซ้ำจนเสร็จสมบูรณ์ การเปรียบเทียบลักษณะของสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative และวิธี Second derivative กับเส้นสเปกตรัมเดิมแสดงในภาพที่ 2.17 [112]



ภาพที่ 2.16 สเปกตรัม และ Second derivative ของสเปกตรัม [ดัดแปลงจาก (97)]



ภาพที่ 2.17 First Derivative และ Second Derivative เปรียบเทียบกับสเปกตรัมเดิม [112]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

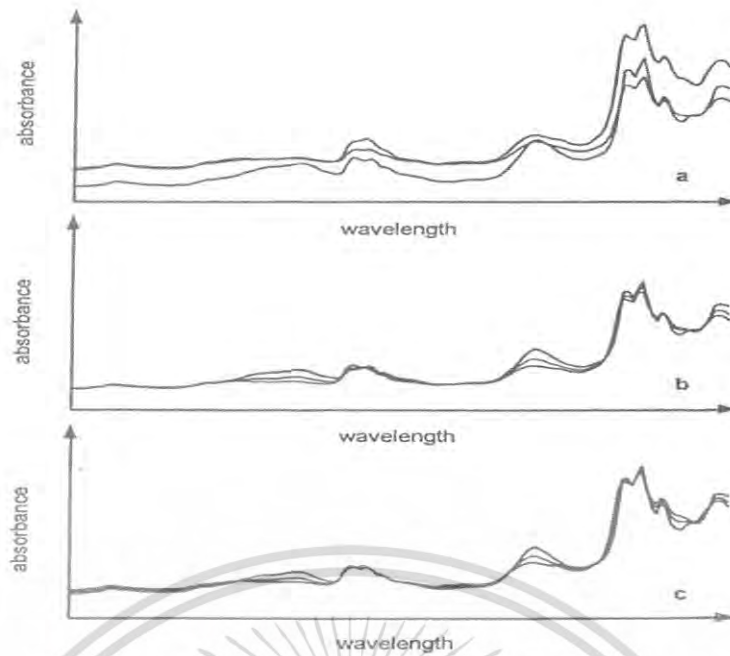
2. วิธี Multiplicative Scatter Correction (MSC)

เป็นวิธีการที่ช่วยลดผลจากการกระเจิงของแสง (Scattered light) ต่อ NIR สเปกตรัมที่ได้จากการวัดแบบ Diffuse reflectance และแบบ Transmission โดยทั่วไปการกระเจิงแสงทำให้ความชันของสเปกตรัมโดยรวมเปลี่ยนไปเปรียบเสมือนกับว่าสเปกตรัมถูกทำให้หมุนรอบจุดที่ความยาวคลื่นต่ำสุด (Multiplicative effect) วิธีการ MSC คือทำการหมุนสเปกตรัมของแต่ละตัวอย่างให้มาตรงกับสเปกตรัมเฉลี่ยโดยมีขั้นตอน คือในแต่ละตัวอย่างต้องหาค่าคงที่ค่าหนึ่งมาหารค่า $\log(1/R)$ ของทุกๆจุดเพื่อปรับความชันของสเปกตรัมที่เปลี่ยนไป

การใช้วิธี MSC ให้ผลต่อรูปร่างของสเปกตรัมแตกต่างจากการใช้วิธี Second Derivative อย่างเห็นได้ชัดแม้ว่าผลของการปรับแก้จะเป็นไปในแนวเดียวกันในการวิเคราะห์โดยรูปร่างของสเปกตรัมหลังการใช้วิธี MSC แล้วจะมีรูปร่างไม่แตกต่างจากก่อนการปรับแก้มากดังภาพที่ 2.18 [113] ในขณะที่รูปร่างของสเปกตรัมหลังจากวิธี Second Derivative จะแตกต่างจากสเปกตรัมเริ่มต้นอย่างชัดเจน การใช้วิธี MSC จะให้ผลได้ดีที่สุดถ้ามีการปรับแก้การเลื่อนตัว (Base line shift) ของสเปกตรัมก่อน โดยในขั้นแรกสเปกตรัมเฉลี่ยจะคำนวณจากทุกๆสเปกตรัมของชุดข้อมูลคาลิเบรชัน แล้วแต่ละสเปกตรัม $X(i)$ จะถูกแปรเปลี่ยนไปตาม (Eq. 2.6)

$$X(i)' = u + v \cdot X(i) \quad (\text{Eq. 2.6})$$

ค่าสัมประสิทธิ์ u และ v จะถูกเลือกเพื่อให้ความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงแล้ว $X(i)'$ กับสเปกตรัมเฉลี่ยน้อยที่สุด ซึ่งวิธีการนี้มักจะใช้สำหรับการวัดแบบการสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse reflection)



ภาพที่ 2.18 การปรับแต่งสเปกตรัมโดยใช้ MSC (a คือ raw spectral data หลังจากการเพิ่มโดย สุ่มขนาดตัวอย่างที่มี Pathlengths ต่างกัน, b คือ original spectra, c คือสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่ง หลังการทำ MSC) [113]

3.วิธีการลบโดยค่าคงที่ (Subtraction of Constant Offset)

สเปกตรัมจะถูกปรับแบบเชิงเส้นเพื่อให้ค่า Y ที่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งเป็นการกำจัดปัญหาการ ขยับขึ้นของเบสไลน์ (Baseline Shift) เชิงเส้น สิ่งเหล่านี้เกิดจาก เช่น ค่าที่แตกต่างกันของการขยาย สัญญาณของดีเทคเตอร์ (Detector Amplification) [113]

4.วิธีการลบโดยเส้นตรง (Subtraction of a Straight Line)

ในแต่ละช่วงความถี่ที่เลือกไว้ เส้นตรงเส้นหนึ่งจะถูกฟิตเส้นสเปกตรัมโดยใช้วิธี Partial Least Squares (PLS) เส้นตรงเส้นนี้จะถูกลบออกจากสเปกตรัมดังกล่าว การใช้งานเพื่อกำจัดปัญหาความเอียง เชิงเส้นของการขยับขึ้นของเบสไลน์ [113]

5. วิธี Standard Normal Variate (SNV) and Detrending

เป็นวิธีการกำจัดอิทธิพลของการกระเจิงแสงอีกวิธีหนึ่ง สำหรับการวัดด้วยวิธีการสะท้อนแบบ แพร่ (Diffuse reflectance) ซึ่งโดยทั่วไปจะทำให้เกิดสเปกตรัมที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากการกระจาย ตัวที่ไม่สม่ำเสมอของอนุภาคในตัวอย่าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการกระเจิงแสงที่สูงและเป็นสาเหตุให้เกิด ความแปรปรวนส่วนใหญ่ในข้อมูลที่วัดได้ การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard Normal Variate; SNV) โดยวิธีนี้มักจะใช้คู่กับการปรับแนวโน้มของเส้นสเปกตรัม (Detrending) โดยใช้การปรับแก้ ด้วย SNV ก่อนแล้วจึงตามด้วย Detrending หรือการลดความโน้มเอียงเส้นสเปกตรัม โดยผลจากการ ปรับแก้ด้วยวิธีนี้จะคล้ายคลึงกับการปรับแก้ด้วยวิธี MSC แต่จะแตกต่างกันตรงวิธี SNV ไม่จำเป็นต้องใช้ สเปกตรัมอ้างอิงเหมือนวิธี MSC ที่ต้องใช้สเปกตรัมเฉลี่ยเป็นค่าอ้างอิง [98] โดยในขั้นแรกสเปกตรัมจะถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาหาค่าเฉลี่ย และนำค่าเฉลี่ยนั้นมาลบออกจากทุกๆจุดในสเปกตรัมจะได้สเปกตรัมใหม่เรียกว่า Center spectrum จากนั้นนำแต่ละจุดบน Center spectrum มายกกำลังสองแล้วนำค่าที่ยกกำลังสองของทุกๆจุดมารวมกันแล้วหารค่ารากที่สอง จากนั้นนำค่าที่หารากที่สองแล้วมาหารแต่ละจุดบน Center spectrum จะได้สเปกตรัมใหม่ที่เป็นตัวแทนของสเปกตรัมเดิม

6. วิธี Normalization

เป็นวิธีการปรับแก้กลุ่มของสเปกตรัมเพื่อให้ได้สเปกตรัมมีจุดสำคัญที่เด่นชัด และเป็นการกำจัดความแปรปรวนอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งจะช่วยให้สามารถศึกษาทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้ดีขึ้น หรือเป็นการลดความซับซ้อนของข้อมูล ช่วยให้ให้นำข้อมูลสเปกตรัมไปทำสมการทำนาย (Calibration equation) ได้ง่ายขึ้น การใช้งานเทียบได้กับวิธี SNV แบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ คือ

6.1 Mean Normalization

$$X(i,k) = (x(i,k)/\text{Mean}(x i,*)) \quad (\text{Eq. 2.7})$$

6.2 Max Normalization

$$X(i,k) = (x(i,k)/\text{Max}(x i,*)) \quad (\text{Eq. 2.8})$$

6.3 Range Normalization

$$X(i,k) = (x(i,k)/(\text{Max}(x i,*) - \text{Min}(x i,*))) \quad (\text{Eq. 2.9})$$

เมื่อ x คือ ค่าตัวแปรที่ตำแหน่งใดๆ

i คือ หมายเลขตัวอย่าง

k คือ ความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งนั้น

$*$ คือ ความยาวคลื่นทุกๆ ความยาวคลื่นในสเปกตรัม

วิธีการแปลงข้อมูลสเปกตรัมที่ดีที่สุดก็คือ วิธีที่ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้สมการทำนายที่มีความสามารถในการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้ใกล้เคียงที่สุด อย่างไรก็ตามไม่มีกฎตายตัวแน่นอนสำหรับการตัดสินใจเลือกวิธีที่จะใช้ในการแปลงข้อมูล วิธีที่ดีที่สุดคือ การลองผิดลองถูกในการทดลองใช้แต่ละวิธีจนกว่าจะได้สมการทำนายที่แม่นยำสุด โดยต้องเข้าใจความหมายและคำนึงถึงข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีให้ชัดเจน

2.3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลและสร้างแบบจำลองทำนายจากสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด

2.3.4.2.1 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยทั่วไป ต้องมีการสร้างสมการหรือแบบจำลองทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมี ในการสร้างสมการจำเป็นต้องมีกลุ่มตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการถดถอยเชิงเส้นระหว่างข้อมูลวิเคราะห์ทางเคมีกับข้อมูลสเปกตรัม กลุ่มตัวอย่างที่ดีจะต้องมีจำนวนตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์อย่างพอเพียงทั้งตัวอย่างในปัจจุบันและตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ในอนาคต โดยเฉพาะปริมาณองค์ประกอบทางเคมี จะต้องมีค่าครอบคลุมปริมาณทั้งต่ำสุดและสูงสุดของตัวอย่าง โดยมีการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) ที่ถูกต้อง เพียงพอและเป็นตัวแทนที่ดีของประชากร การสุ่มตัวอย่างถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการที่จะได้สมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ดี ทำให้ค่าผิดพลาดที่ได้จากการทดลองลดลง นอกจากนี้ควรพิจารณาวิธีวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งควรเป็นวิธีที่เป็นมาตรฐานและมีความแม่นยำเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง เนื่องจากส่งผลต่อสมการที่สร้างขึ้นต่อไป [99] โดยความแม่นยำของ NIR spectroscopy ขึ้นกับความแม่นยำของวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ สำหรับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์จะต้องทำการเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับตัวอย่างที่จะนำไปวัดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ NIR ในอนาคต [98]

การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าองค์ประกอบต่างๆ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ [114]

1. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองที่ใช้ทำนาย เป็นขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองมาตรฐานที่ใช้การทำนายค่าองค์ประกอบที่ต้องการทราบ เรียกขั้นตอนนี้ว่า การทำแคลิเบรชัน (Calibration) และแบบจำลองที่สร้างขึ้นได้เรียกว่า แบบจำลองแคลิเบรชัน (Calibration) หรือโมเดลแคลิเบรชัน (Calibration model)

2. ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้นมา เป็นการตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของแบบจำลองมาตรฐานที่สร้างได้จากขั้นตอนการทำแคลิเบรชัน เรียกขั้นตอนนี้ว่า การทำแวลิดชัน (Validation) หรือการทวนสอบ (Verification) เมื่อได้ผลการตรวจสอบที่น่าเชื่อถือแล้วจึงจะนำแบบจำลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้ทำนายค่าองค์ประกอบที่ต้องการศึกษาจากสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดที่วัดมาได้

การทำแคลิเบรชัน [115]

ขั้นตอนการทำแคลิเบรชัน แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ

1) กำหนดตัวแปรอิสระ (Independent Variables) และตัวแปรตาม (Dependent Variables) ซึ่งตัวแปรอิสระ คือ ค่าที่อ่านได้จากสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด เช่น ค่า $\log(1/R)$ เป็นต้น ส่วนตัวแปรตาม คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน เช่น การวิเคราะห์หาโปรตีน (Clued protein) ด้วยวิธี Kjeldahl procedure เป็นต้น

2) การสร้างแบบจำลองแคลิเบรชัน

การสร้างแบบจำลองนั้นสิ่งที่สำคัญคือการหาตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่ต้องการทำนาย ซึ่งการคัดเลือกหาตัวแปรอิสระ แบ่งเป็น 2 วิธีหลัก คือ วิธีการเลือกความยาวคลื่น (Wavelength selection method) และวิธีใช้สเปกตรัมทั้งหมด (Full spectrum analysis methods)

1 วิธีการเลือกความยาวคลื่น (Wavelength selection method) เป็นวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเฉพาะความยาวคลื่นที่ว่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่จะทำการทำนาย เทคนิคในการคัดเลือกตัวแปรอิสระนี้มีหลายวิธี เช่น 1) เลือกจากความถี่ความชันหรือเอกสารอ้างอิงที่บอกถึงช่วงความยาวคลื่นที่คาดว่าจะสัมพันธ์กับค่าที่จะทำการวิเคราะห์ 2) เทคนิคทางสถิติในการคัดเลือกความยาวคลื่นที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์ เช่น การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression) หรือการสร้างกราฟคอเรลโลแกรม (Correllelogram) ซึ่งการสร้าง Correllelogram เป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกน X คือความยาวคลื่น กับแกน Y คือค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ง่ายของความสัมพันธ์ระหว่าง ข้อมูลเชิงแสง ณ ความยาวคลื่นนั้นกับค่าวิเคราะห์ที่หามาได้ด้วยวิธีมาตรฐาน จะช่วยให้สามารถคัดเลือกความยาวคลื่นที่มีความเป็นไปได้ที่จะมีความสัมพันธ์กับค่าที่จะทำการวิเคราะห์ ซึ่งการสร้างแบบจำลองแคลิเบรชันแบบ wavelength selection นี้ได้แก่ Simple Linear Regression, Multiple Linear Regression (MLR) แต่การเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดไม่ใช่เรื่องง่าย และอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ ค่าข้อมูลที่ไม่ถูกต้องอาจเกิดปัญหาทำให้ได้ค่าทำนายที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่แท้จริงอันเนื่องมาจากความผิดพลาดจากการสร้างสมการ

- Simple linear regression (SLR) เป็นการสร้างสมการที่ประกอบด้วยตัวแปรสองชนิดที่มีความสัมพันธ์กัน คือ ตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) SLR เป็นการเลือกพิจารณาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างที่ความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียว (Single wavelength)

สมการ SLR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$y = b_0 + b_1x \quad (\text{Eq. 2.10})$$

เมื่อ Y = ค่าองค์ประกอบทางเคมี

X = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นตำแหน่งเดียว

b_0 = ค่าคงที่ ณ จุดตัดแกน Y เมื่อ X มีค่าเท่ากับศูนย์

b_1 = ค่าคงที่การถดถอย

การสร้างสมการ Calibration โดยใช้ Simple linear regression ในเทคนิค NIR เป็นการเลือกใช้ค่าการดูดกลืนแสงที่สัมพันธ์กับค่าที่ต้องการวิเคราะห์เพียงความยาวคลื่นเดียว ซึ่งทำให้ค่า Correlation ที่ได้มีค่าต่ำจึงไม่นิยมนำมาใช้ในการสร้างสมการ calibration

- Multiple Linear Regression (MLR) มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า Inverse least squares เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการสร้างสมการ Calibration โดยใช้ตัวแปรอิสระ (X) มากกว่า 1 ตัวในการประมาณค่าตัวแปรตาม (Y) ซึ่งเป็นค่าตัวแปรที่ได้จาก Reference Methods 1 ตัว จะทำให้สมการที่ได้ลดความผิดพลาดในการประมาณค่าลงได้ หากพิจารณาในเรื่องการใช้เทคนิค NIR spectroscopy ในการหาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างก็หมายถึงการพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงที่หลายความยาวคลื่นนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ MLR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 \dots + b_nX_n \quad (\text{Eq. 2.11})$$

เมื่อ X_1, X_2, \dots, X_n = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น n ตำแหน่ง
 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ความยาวคลื่น n ตำแหน่ง

ข้อดีข้อเสียของการใช้เทคนิค Multiple Linear Regression

ข้อดี

1. การสร้างสมการอยู่บนพื้นฐานของกฎของ Beer
2. ค่อนข้างสะดวกรวดเร็วในการคำนวณค่าต่างๆและการสร้างสมการ
3. เหมาะสำหรับตัวอย่างผสมที่ประกอบไปด้วยสารหลายชนิด เพราะความรู้เกี่ยวกับการสั่นไหวของสารในแต่ละความยาวคลื่นเฉพาะ ทำให้สามารถคัดเลือกความยาวคลื่นที่เกี่ยวข้องกับสารต่างๆที่มีอยู่ในส่วนผสมและนำมาสร้างสมการ

ข้อเสีย

1. การคัดเลือกหาความคลื่นที่เกี่ยวข้องค่อนข้างเสียเวลาและบางครั้งค่าที่อ่านได้ในแต่ละความยาวคลื่นที่เลือกมาอาจมีความสัมพันธ์กัน ทำให้เกิดปัญหาความซ้ำซ้อนของตัวแปรที่เรียกว่า การเกิด Collinearity
2. การมีตัวแปรอิสระมาก คือ มีหลายความยาวคลื่นมาเกี่ยวข้องจำเป็นต้องมีการสุ่มตัวอย่าง มาวิเคราะห์มากขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองและเสียเวลาในการวิเคราะห์โดยเฉพาะวิธีการทาง Reference method ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวิธีการวัดค่าหาเคมีประเภท Wet analysis
2. วิธีใช้สเปกตรัมทั้งหมด (Full spectrum analysis methods) วิธีการคัดเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสม (Wavelength selection method) จากความยาวคลื่นทั้งหมดที่มีในสเปกตรัมมาสร้างสมการ Calibration ดังวิธีที่ได้กล่าวมาแล้ว บางครั้งอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ ถ้ามีการสร้างสมการที่ไม่ถูกต้องซึ่งอาจเกิดปัญหาทำให้ค่าที่ทำนายต่ำกว่าหรือสูงกว่าที่แท้จริง (Underestimation) อันเนื่องมาจากการเกิดความคลาดเคลื่อนจากการสร้างสมการ (Interference) หรือเกิดปัญหาเมื่อมีจำนวนตัวอย่างที่นำมาใช้ในการสร้างสมการทำนายมีน้อย จึงทำให้ได้สมการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไปในสมการ ทำให้ข้อมูลไม่น่าเชื่อถือ (Over fitting) การใช้ข้อมูลทั้งหมดที่มีในทุกความยาวคลื่นของสเปกตรัม (Full spectrum) น่าจะเป็นหนทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตามปัญหาที่มีอยู่ คือการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไป การใช้วิธีทางสถิติในการจัดกลุ่มแยกประเภทตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกันและทำการสร้างตัวแปรใหม่ที่เกิดมาจากตัวแปรเดิมจะช่วยทำให้แก้ปัญหาดังกล่าวได้ วิธีการทางสถิติที่นิยมใช้ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 Principal component regression (PCR) เป็นการวิเคราะห์ผล โดยทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) ด้วยการแบ่งกลุ่มตัวแปรอิสระเดิมที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรใหม่หรือองค์ประกอบที่เรียกว่าแฟกเตอร์ (factor score; F) หรือ Principal combination (PC) เรียกว่าการทำ Principal Components Analysis (PCA) จากนั้นจึงนำค่าตัวแปรใหม่ที่สร้างขึ้นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่ได้มาได้จากวิธี Reference Methods เพื่อสร้างสมการ Calibration โดยใช้หลักการของ MLR

สมการ PCR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Y = b_0 + b_1PC_1 + b_2PC_2 \dots + b_nPC_n \quad (\text{Eq. 2.12})$$

เมื่อ PC_1, PC_2, \dots, PC_n = ค่าตัวแปรใหม่ที่ตำแหน่ง n ตัวแปร

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่วงน้ำหนักที่ตำแหน่ง n ตัวแปร (Calibration coefficient)

- Principal Components Analysis (PCA)

เป็นวิธีการหนึ่งทางสถิติในการวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัว (Multivariate analysis) โดยใช้เทคนิคการลดจำนวนของตัวแปรอิสระในกรณีที่มีตัวแปรอิสระมีจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น วัดค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมที่ 700 ความยาวคลื่น จำนวนสเปกตรัมดังกล่าว คือจำนวนของสเปกตรัมอิสระนั่นเอง การลดลงของจำนวนตัวแปรมีวิธีการคือ แบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่เรียกว่า factor หรือ องค์ประกอบ factor ที่สร้างขึ้น อีกนัยหนึ่งก็คือผลรวมของค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นที่มีน้ำหนักแตกต่างกัน factor จะมีได้หลาย factor โดยแต่ละ factor จะแตกต่างกันที่น้ำหนักของแต่ค่าสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งประกอบกันเป็น factor นั้นๆ factor แรกจะถูกสร้างขึ้นมาให้สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าสเปกตรัมได้มากที่สุด factor ที่สองอธิบายความแปรปรวนที่เหลือซึ่งทำให้ factor แต่ละ factor แยกจะไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน (Non-Collinearity) ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ เมื่อทำการหา factor เรียบร้อยแล้ว นำ factor ที่ได้มาทำ Regression กับค่าทางเคมีโดยใช้วิธีการกำลังสองน้อยที่สุด ทำให้ได้ค่า Chemical loading หรือ Calibration coefficient

2.2 Partial least squares (PLS) Regression เป็นเทคนิคหนึ่งที่ยอมรับในการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดและเป็นเทคนิคในการลดจำนวนตัวแปรเช่นเดียวกับวิธี PCR แต่ PLS Regression จะแตกต่างกับ PCR ตรงที่ในช่วงจัดกลุ่มลดจำนวนตัวแปรโดยการสร้างตัวแปรใหม่นั้นจะมีการนำข้อมูลตัวแปรตาม (Y) เข้ามาร่วมในการสร้างตัวแปรใหม่ที่เรียกว่า ค่าคะแนนปัจจัยด้วย (factor loading) จะเห็นว่า PLS Regression เป็นกระบวนการขั้นตอนเดียวไม่จำเป็นต้องมีการแยกไปทำตามขั้นตอน Regression อีก เนื่องจากค่าคะแนนปัจจัยที่สร้างขึ้นใหม่จะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามอยู่แล้ว ในขณะที่วิธีการ PCR ค่าคะแนนปัจจัย ที่สร้างขึ้นใหม่จะมีความเกี่ยวข้องกับข้อมูลตัวแปรเดิมใน

สเปกตรัมเท่านั้น จำเป็นต้องนำค่าคะแนนปัจจัยที่ได้ไปหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม (Y) โดยการสร้างสมการถดถอยอีกครั้งก่อนนำไปใช้ในการทำนายตัวแปรตามต่อไป [115]

สมการ PLS Regression สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

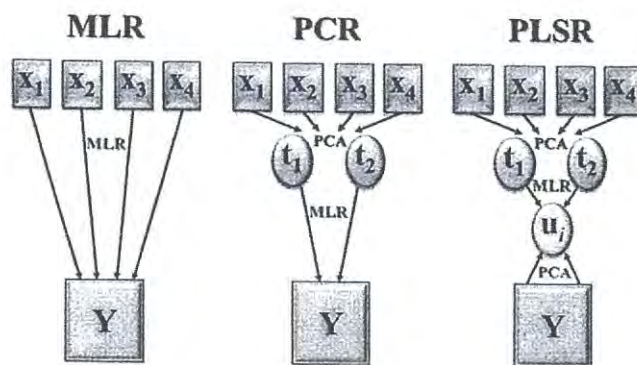
$$Y = b_0 + b_1F_1 + b_2F_2 \dots + b_nF_n \quad (\text{Eq. 2.13})$$

เมื่อ F_1, F_2, \dots, F_n = ค่าตัวแปรใหม่ที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูล Y ที่ตำแหน่ง n ตัวแปร
 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่วงน้ำหนักที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูล Y ที่ตำแหน่ง n ตัวแปร (Calibration coefficient)

ลักษณะสเปกตรัมของคลื่นแสง NIR โดยทั่วไปจะมีสเปกตรัมซ้อนทับกันและมีพีกที่กว้าง ดังนั้นการสร้างสมการทำนายองค์ประกอบทางเคมีที่พิจารณาเพียงความยาวคลื่นเดียวหรือจำนวนความยาวคลื่นน้อยๆ จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ไม่ถูกต้องไม่เท่ากับการพิจารณาทั้งสเปกตรัม (Full spectrum) หรือบางช่วงของสเปกตรัม วิธีการพิจารณาเช่นนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น Saranwong (2001) [116] ได้ศึกษาการพัฒนาสมการที่ใช้ในการทำนายค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solid) และค่าน้ำหนักเนื้อแห้ง (Dry matter) ของมะม่วงด้วยวิธี PLS regression กับ MLR ในการสร้างสมการทำนาย พบว่า วิธี PLS regression ให้ค่าผิดพลาดของสมการทำนายของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่ำกว่าวิธี MLR แต่สำหรับสมการทำนายค่าน้ำหนักเนื้อแห้งด้วยวิธี PLS regression กับ MLR ที่สร้างขึ้นให้ค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ ณัฐกานต์และคณะ (2547) [117] ที่ได้ศึกษาการทำนายปริมาณอมิโนส ปริมาณโปรตีน และปริมาณความชื้นของข้าวเจ้าของไทยด้วยเทคนิค NIR spectroscopy พบว่าวิธี PLS regression สามารถสร้างสมการที่ใช้ในการทำนายคุณภาพข้าวได้แม่นยำมากกว่าวิธี SLR และ MLR ในการทำนายค่าองค์ประกอบทางเคมีจากค่าการดูดกลืนแสงในช่วง NIR สมการทำนายแบบ MLR และ PLS Regression จะมีความแม่นยำเท่าเทียมกัน หากสมการทำนายที่สร้างขึ้นใช้กลุ่มความยาวคลื่นหรือช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม สมการทำนายที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมหรือไม่ สามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (Coefficient of correlation; R) ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มสร้างสมการ (Standard error of calibration; SEC) และค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิงกับค่าที่ได้จาก NIR (Bias) [103]

Cho (2556) [118] ได้อธิบายภาพที่ 2.19 ซึ่งแสดงการทำแบบจำลองแคลิเบรชันด้วยวิธี MLR, PCR และ PLS Regression โดยวิธี PLS Regression เมื่อนำตัวอย่างมาสแกนได้สเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด ซึ่งจะได้ข้อมูลเชิงแสง เช่น ค่าการดูดซับคลื่นที่ความยาวคลื่นใดๆ ได้แก่ $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ หลังจากนั้นนำค่า X_n เหล่านั้นมาทำ PCA เพื่อลดจำนวนตัวแปรเดิมลงโดยการสร้างตัวแปรใหม่ คือ t_1 และ t_2 หลังจากนั้นจะนำตัวแปรใหม่ที่ได้ออกมาทำ MLR กับตัวแปร U_i ซึ่งได้จากการทำ PCA ของตัวแปร Y (ค่าทางเคมี) ทำให้ได้ค่า Chemical loading หรือ Calibration coefficient สำหรับการสร้างสมการทำนาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.19 การทำแบบจำลองแคลิเบรชันด้วยวิธี MLR, PCR และ PLS regression

3) ขั้นตอนการทดสอบสมการ (Validation test) เมื่อได้สมการทำนายค่าองค์ประกอบทางเคมีแล้ว ต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพของสมการก่อนนำไปใช้จริง ซึ่งมี 2 วิธีคือ

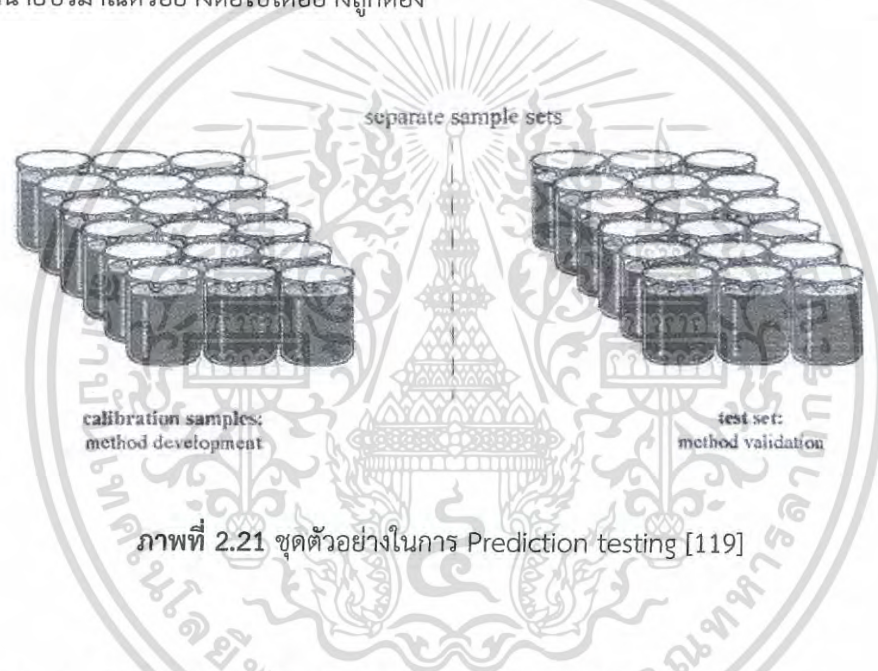
3.1 Full cross validation (ภาพที่ 2.20) เป็นการทดสอบภายในกลุ่มตัวอย่าง (Internal validation) โดยตัวอย่างที่นำมาทดสอบสมการ คือ ตัวอย่างชุดเดียวกับที่ใช้สร้างสมการทำนายค่าทางเคมี โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้คือ ตัดตัวอย่างที่ 1 ออกจากชุดตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการทำนายค่าทางเคมี จากนั้นใช้ตัวอย่างที่เหลือทำการคำนวณหาสมการ เมื่อได้สมการแล้ว จึงนำตัวอย่างที่ 1 มาทดสอบสมการ ขึ้นต่อไปใส่ตัวอย่างที่ 1 กลับคืน และตัดตัวอย่างที่ 2 ออกจากชุดตัวอย่าง แล้วจึงสร้างสมการทำนายค่าทางเคมี นำสมการที่ได้จากการทำนายของตัวอย่างที่ 2 ทำขั้นตอนข้างต้นซ้ำจนกระทั่งหาค่าทางเคมีของตัวอย่างครบทั้งชุด ดังนั้นตัวอย่างแต่ละความเข้มข้นจะถูกตัดออกจากชุดตัวอย่าง 1 ครั้งเท่านั้น ทำการหาค่า RMSECV (Root mean square error of cross validation)



ภาพที่ 2.20 ชุดตัวอย่างในการ full cross validation [119]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 Prediction testing (ภาพที่ 2.21) เป็นการทดสอบสมการแบบภายนอกกลุ่มตัวอย่าง (External validation) โดยการเตรียมตัวอย่างชุดใหม่มาทำการวิเคราะห์ในสภาวะการทดลอง เช่นเดียวกันกับตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการทำนายค่าทางเคมี (Calibration set) รวมถึงวิธีการแปลงข้อมูลสเปกตรัมก็ต้องเป็นชุดเดียวกันกับตัวอย่างที่สร้างสมการ (Calibration set) เรียกชุดตัวอย่างที่นำมาทดสอบสมการนี้ว่าชุดทดสอบ (Validation set) วิธีการเตรียมตัวอย่างทำเช่นเดียวกับกลุ่มตัวอย่างใน Calibration set แต่จุดที่ต้องระวังคือ ค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ต้องการหาในตัวอย่าง Validation set ต้องมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับ Calibration set หลังจากได้สเปกตรัมของชุด Validation set นำค่าที่ได้ไปคำนวณจากสมการทำนายองค์ประกอบทางเคมีจากนั้นดูผลการคำนวณที่ได้จากค่าสถิติ ได้แก่ R^2 (Coefficient of determination), bias, RMSEP (Root mean square error of prediction), SEP (Standard error of prediction) ถ้าผลการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับผลที่อ้างอิง และให้ค่าทางสถิติที่ดี แสดงว่าสมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีนั้นยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ทำนายปริมาณตัวอย่างต่อไปได้อย่างถูกต้อง



ภาพที่ 2.21 ชุดตัวอย่างในการ Prediction testing [119]

2.3.4.2.2 เทคนิค Singular Value Decomposition (SVD)

เทคนิค Singular Value Decomposition (SVD) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับการวิเคราะห์ทำนาย ซึ่งประกอบด้วยชุดสมการหรือเมตริกซ์ขนาดต่างๆ สำหรับการประยุกต์ใช้ ซึ่งหนึ่งในการประยุกต์ใช้คือการทำนายมอดข้าวสารที่ปนในข้าวในรูปแบบของสัดส่วน เทคนิค SVD จะใช้พื้นฐานของการคำนวณในรูปแบบของเมตริกซ์ตามทฤษฎีของวิธี Linear algebra [105] โครงสร้างของ SVD จะประกอบด้วย 3 เมตริกซ์ที่มีความสัมพันธ์กัน ได้แก่

$$A \cdot X = B \quad (\text{Eq. 2.14})$$

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ (Linear mapping) ที่คูณกับเวกเตอร์ X เพื่อให้ได้ เวกเตอร์ B ถ้าชุดสมการมีสมการเส้นตรง m สมการกับค่า Coefficients n ค่า ขนาดของเมตริกซ์ A, X และ B สามารถอธิบาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายเป็น $m \times n$, $n \times 1$ and $m \times 1$ ตามลำดับ โดยเมตริกซ์ A และ B คือ ค่าที่ทราบและถูกนำไปใส่ในสมการเพื่อหาค่าเมตริกซ์ X

ในเทอมของเมตริกซ์จัตุรัส (Square matrix) การคำนวณหาค่าเมตริกซ์ X ทำได้โดยนำอินเวอร์สของเมตริกซ์ A คูณกับเมตริกซ์ B ดังสมการ

$$X = A^{-1} \cdot B$$

ในกระบวนการของเทคนิค SVD เมตริกซ์ A ประกอบด้วย 3 เมตริกซ์ย่อยที่มีความสัมพันธ์ในรูปแบบ

$$A = U \cdot W \cdot V^T$$

$$\begin{pmatrix} A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_1 & w_2 & \dots & w_N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V^T \end{pmatrix}$$

เมื่อ

A คือ เมตริกซ์ $m \times n$

U คือ $m \times n$ column-orthogonal matrix

W คือ $n \times n$ diagonal matrix ซึ่งประกอบด้วยสมาชิกที่มีค่า ≥ 0

V^T คือ ค่า transpose of orthogonal matrix V

โดย column ของ u_i และ v_i ในเมตริกซ์ U และ V ถูกเรียกว่า left and right singular vectors ตามลำดับ สำหรับส่วนประกอบที่มีค่าใน diagonal matrix ถูกเรียกว่า singular values ซึ่งเมื่อต้องการหาค่าอินเวอร์สของเมตริกซ์ A จะได้ว่า

$$A^{-1} = V \cdot [\text{diag}(1/w_i)] \cdot U^T$$

โดย

$[\text{diag}(1/w_i)]$ คือ inverse of diagonal element of matrix W

ดังนั้นเมื่อแทนค่า A^{-1} ในสมการหาค่าเมตริกซ์ X จะได้สมการ

$$X = V \cdot [\text{diag}(1/w_i)] \cdot U^T \cdot B$$

เมื่อรู้ค่าเมตริกซ์ A และเมตริกซ์ B ก็จะสามารถคำนวณหาค่าเมตริกซ์ X ได้ ซึ่งจะทำให้สามารถสร้างสมการทำนายหรือแบบจำลองทำนายที่มีประสิทธิภาพได้

ได้มีการศึกษานำเทคนิค SVD มาประยุกต์ใช้โดยนักวิจัยหลายท่านในด้านต่างๆ ดังนี้

Koprinarov และคณะ (2002) [27] ได้ใช้เครื่อง Scanning transmission X-ray microscopy (STXM) และใช้เทคนิค SVD ในการกำหนดตำแหน่ง (Mapping) การกระจายตัวของ Poly acrylic acid ใน Microporous polypropylene ของชั้น Membrane ซึ่งเทคนิคนี้เป็นทางเลือกใหม่ของการกำหนดตำแหน่งขององค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างเชิงซ้อน Polymeric systems

Fistes และ Tanovic (2006) [28] ได้ทำการตรวจสอบทำนายขนาดโครงสร้างส่วนประกอบของแป้งข้าวสาลีด้วยการใช้สมการในรูปแบบของเมตริกซ์ ผลการวิเคราะห์พบว่ามีความแม่นยำในการทำนายขนาดของอนุภาครวมของแป้งสาลี 97.42% ทำนายปริมาณเถ้า (Ash) ในรูปแบบของสัดส่วนโดยขนาดได้แม่นยำ 94.66% ทำนายปริมาณโปรตีนในรูปแบบสัดส่วนโดยขนาดได้แม่นยำ 97.43% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าวิธีการนี้สามารถใช้ในการทำนายส่วนประกอบของแป้งข้าวสาลีได้ดีเมื่อเทียบกับสัดส่วนปริมาณของส่วนประกอบจริงของแป้งข้าวสาลี

Bekara และ Baan (2007) [29] ได้ทำการประยุกต์ใช้เทคนิค Singular Value Decomposition (SVD) ในการปรับปรุงสัญญาณและลดความแปรปรวนของข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหว (Seismic data)

Choomjaihan (2008) [30] ได้ทำการศึกษาประยุกต์ใช้เทคนิค Singular Value Decomposition (SVD) ในการวิเคราะห์ทำนายปริมาณโครงสร้างของวัสดุเกษตร ซึ่งในการศึกษาทำการวิเคราะห์ทำนายปริมาณแร่ธาตุในเมล็ดข้าวสาลี 2 พันธุ์คือ Consort และ Mallacca ที่ระดับการขัดขาว โดยการปรับตั้งระยะลูกขัดสี 6 ระดับ ซึ่งจะมีความเข้มข้นของแร่ธาตุที่แตกต่างกัน โดยเทคนิคนี้จะเป็นวิธีการทางเลือกใหม่สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายปริมาณโครงสร้างของวัสดุเกษตรหลังจากผ่านกระบวนการขัดสี

Gupta และคณะ (2009) [31] ทำการศึกษาพบว่าเทคนิค Singular Value Decomposition (SVD) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์ Rapid dynamic near-infrared (NIR) Diffuse optical tomography เพื่อสร้างภาพเสมือนเกี่ยวกับการไหลเวียนของโลหิตและแสดงในจอภาพได้อย่างต่อเนื่อง สำหรับใช้ในทางการแพทย์ได้

Fistes และคณะ (2013) [32] ได้ทำการเสนอวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Breakage matrix ในการวิเคราะห์ทำนายขนาดของวัสดุที่เข้าสู่กระบวนการขัดสี เมื่อทราบขนาดของวัสดุหลังการขัดสี ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบย้อนกลับ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนควบคุมขนาดของวัสดุที่เข้าสู่กระบวนการขัดสีได้ตามที่ต้องการ โดยการศึกษาจะใช้เมล็ดข้าวสาลีพันธุ์ Sonata 3 ขนาดได้แก่ขนาด <math> < 2.5 \times 20 \text{ mm}</math>, $2.5 - 2.8 \times 20 \text{ mm}$ และ $> 2.8 \text{ mm}$ เป็นวัสดุที่เข้าสู่กระบวนการขัดสี

Tang และคณะ (2016) [33] ได้ทำการประยุกต์ใช้เทคนิค Singular Value Decomposition (SVD) ในการระบุตำแหน่งของ The signal to noise ratio (SNR) ที่ต่ำได้ ซึ่งเป็นข้อบกพร่องของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ใน The magnetostrictive guided wave technique ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปที่ส่วนประกอบของวัสดุที่ตรวจสอบและรับ

สัญญาณสะท้อนกลับเพื่อวิเคราะห์จุดบกพร่อง โดยถูกนำไปใช้อุตสาหกรรมปิโตรเคมี, อุตสาหกรรมนิวเคลียร์, ตรวจสอบข้อบกพร่องของสะพานและรางรถไฟ เป็นต้น

2.3.4.3 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างแบบจำลองทำนาย

1. สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (Coefficient of correlation, R)

แสดงระดับซึ่งข้อมูล 2 ชุด (ข้อมูลตัวเลข X และ Y ในที่นี้ข้อมูล X คือข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิง ข้อมูล Y คือข้อมูลจากการทำนายด้วยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี) สอดคล้องซึ่งกันและกัน ความสอดคล้องที่สมบูรณ์จะไม่มี ความแตกต่างกันเลยระหว่าง 2 ชุดข้อมูล ผลของค่า R จะเท่ากับ 1.00 ในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ และ X และ Y อาจจะมี ความสัมพันธ์เป็นเชิงบวกหรือลบก็ได้ โดยคำนวณได้จากสมการ

$$R = \frac{\Sigma(X*Y) - [(\Sigma X * \Sigma Y) / N]}{\{[\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2 / N]\} * \{[\Sigma Y^2 - (\Sigma Y)^2 / N]\}}^{1/2} \quad (\text{Eq. 2.15})$$

เมื่อ	X	คือ	ค่าที่ได้จากการทดสอบทางเคมี
	Y	คือ	ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIR spectroscopy
	N	คือ	จำนวนตัวอย่าง

2. สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R²)

แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดยความแปรปรวน ในข้อมูล Y ค่าของ R² จะเป็นบวกเสมอ โดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของ R ในทางปฏิบัติ R² ให้ข้อมูลและใช้กันมากกว่า R การแปลความหมายของค่า R และ R² แสดงดังตารางที่ 2.12 และคำนวณได้จากสมการ

แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดยความแปรปรวนในข้อมูล Y ค่าของ R² จะเป็นบวกเสมอ เช่น ถ้า R = 0.97 แล้ว R² = 0.941 หมายความว่า 94.1 เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนในข้อมูล X และ 5.9 เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนในข้อมูล X เกิดขึ้นจากตัวแปรอื่น เช่น การเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดลองอ้างอิงและอื่นๆ ค่า R² เป็นบวกเสมอโดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของ R ในทางปฏิบัติ R² ให้ข้อมูลและใช้กันมากกว่า R การแปลความหมายของค่า R และ R² แสดงดังตารางที่ 2.3 และคำนวณได้จากสมการ

$$R^2 = \left[1 - \frac{SSE}{SST} \right] \quad (\text{Eq. 2.16})$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } SSE &= \Sigma(X - Y)^2 \\ SST &= \Sigma(X - \bar{X})^2 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X	คือ	ค่าที่ได้จากการทดสอบทางเคมี
Y	คือ	ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIR spectroscopy
\bar{X}	คือ	ค่าเฉลี่ยของค่าที่ได้จากการทดสอบทางเคมี

ตารางที่ 2.3 การแปลความหมายของค่า R และ R² [100]

R	R ²	การแปลความหมาย
Up to +/-0.5	Up to 0.25	ไม่สามารถใช้ใน NIR calibration
+/-0.51-0.70	0.26-0.49	เป็นความสัมพันธ์ที่แย่มาก ควรหาเหตุผล
+/-0.71-0.80	0.50-0.64	OK สำหรับการคัดเลือกอย่างหยาบๆ
+/-0.81-0.90	0.66-0.81	OK สำหรับการคัดเลือกและการประมาณค่าอย่างหยาบๆ
+/-0.91-0.95	0.83-0.90	ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย
+/-0.96-0.98	0.92-0.96	ใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
+/-0.99+	0.98+	ดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้

3. ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มสร้างสมการ (Standard error of calibration; SEC)

คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และค่าอ้างอิงในเซตตัวอย่างชุดแคลิเบรชัน ซึ่งค่าที่บอกถึงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการทำนายต่อไปได้ดีหรือไม่ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย

4. ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มทดสอบสมการ (Standard error of prediction; SEP)

คือค่าที่แสดงสมรรถนะของการทำนาย ซึ่งเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและค่าอ้างอิงในตัวอย่างชุดทดสอบสมการ ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงการนำเอาสมการที่สร้างขึ้น มาทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากเครื่อง NIR มีความแม่นยำสูงหรือต่ำ ซึ่งถ้าค่าที่คำนวณได้มีค่าน้อย หมายความว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำสูง

$$SEP = \left(\frac{\sum (X - Y)^2}{N} - \left[\frac{\sum (X - Y)}{N} \right]^2 \right)^{1/2} \quad (\text{Eq. 2.17})$$

เมื่อ	X	คือ	ค่าที่ได้จากการทดสอบทางเคมี
	Y	คือ	ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIR spectroscopy
	N	คือ	จำนวนตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Average of difference between actual value and NIR value; bias)

คือค่าเฉลี่ยของการทำนายข้อมูลของตัวแปรตาม (Y) และค่าเฉลี่ยข้อมูลของตัวแปรอิสระ (X) มีความแตกต่างกันหรือไม่ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย เป็นการวัดความแม่นยำโดยรวมของแบบจำลอง

$$\text{bias} = \frac{\Sigma(X-Y)}{N} \quad (\text{Eq. 2.18})$$

6. ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการทำนาย (Root mean squared error of prediction; RMSEP)

เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพของแบบจำลอง การคำนวณค่า RMSEP ได้รวมค่า Bias ไว้ด้วย ถ้าไม่มีค่า bias ค่า SEP และ RMSEP จะมีค่าเท่ากัน มีการใช้ RMSEP มากกว่า SEP แต่การรายงานผลโดยใช้ SEP กับ Bias แสดงถึงความแม่นยำของการทำนายได้ดี เนื่องจาก RMSEP เกี่ยวข้องกับ Bias แต่ไม่ได้แสดงขนาดและเครื่องหมาย โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\text{RMSEP} = \sqrt{\frac{\Sigma(X-Y)^2}{N}} \quad (\text{Eq. 2.19})$$

7. อัตราส่วนระหว่างค่าความผิดพลาดมาตรฐานกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of standard error of prediction to the standard deviation; RPD)

คือค่าอัตราส่วนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าทางเคมีกับค่าความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนายในชุดทดสอบ (SEP) ค่า SEP ควรต่ำกว่า SD มากๆ ซึ่งอัตราส่วนควรเท่ากับ 5 หรือมากกว่า บางกรณีตัวอย่างมีความสม่ำเสมอมาก ค่า SD จึงไม่สูง จึงทำให้ค่า RPD อาจจะไม่สูงตามไปด้วย ดังนั้น RPD เท่ากับ 2.5-3.0 ก็อาจแสดงถึงการวิเคราะห์ที่แม่นยำ ถ้า SD มีค่าเพียง 0.4-0.5 การอธิบายผลของค่า RPD แสดงดังตารางที่ 2.4

$$\text{RPD} = \frac{\text{SD}}{\text{SEP}} \quad (\text{Eq. 2.20})$$

ตารางที่ 2.4 การอธิบายผลของค่า RPD [100]

RPD	ความหมาย	การประยุกต์ใช้
0.0-2.3	ไม่ดีเลย	ไม่แนะนำ
2.4-3.0	ไม่ดี	คัดเลือก แบบหยาบๆ (แบ่งกลุ่ม)
3.1-4.9	พอใช้	คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) ได้
5.0-6.4	ดี	ควบคุมคุณภาพได้
6.5-8.0	ดีมาก	ควบคุมกระบวนการได้
8.1+	ดีเยี่ยม	ได้ทุกการประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการดำเนินงานศึกษาวิจัยของการตรวจสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอด
ข้าวสารในข้าวหอมมะลิและผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิด้วยวิธี Partial Least Squares Regression และวิธี
Singular Value Decomposition ได้แสดงในบทที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยประกอบไปด้วย 3 หัวข้อ หัวข้อแรกกล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง หัวข้อที่สองกล่าวถึง ขั้นตอนการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด หัวข้อที่สามกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย โดยรายละเอียดทั้ง 3 หัวข้อมีดังนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมตัวอย่างข้าว ในการทดลองใช้ข้าวเจ้าพันธุ์หอมมะลิที่จำหน่ายเป็นการค้า โดยมีการรับรองจากกรมการค้าภายในว่าเป็นข้าวหอมมะลิ 100% ชั้น 1 คือชั้นดีเลิศ โดยต้องมีข้าวหอมมะลิไม่น้อยกว่าร้อยละ 92 ความชื้นไม่เกิน 14% ตามประกาศของกระทรวงพาณิชย์เรื่องมาตรฐานข้าวหอมมะลิ [41] ข้าวที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือข้าวขาวหอมมะลิ (Milled Hom Mali rice) และข้าวกล้องหอมมะลิ (Brown Hom Mali rice)

การเตรียมตัวอย่างแมลง ในการศึกษาใช้แมลงชนิดมอดข้าวสาร (Rice weevil; *Sitophilus oryzae* L.) ระยะตัวเต็มวัยซึ่งได้จากการเพาะเลี้ยงด้วยข้าวพันธุ์หอมมะลิความชื้นประมาณ 13.5 % ในห้องปฏิบัติการอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 55-60 % เป็นเวลาประมาณ 45 วัน สำหรับนำมาปนในตัวอย่างข้าวที่สัดส่วนต่างๆเพื่อทำการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเส้นสเปกตรัม ในการทดสอบใช้ Multi Purpose Analyzer FT-NIR Spectrometer (Bruker Corporation, Germany) (ภาพที่ 3.1) ซึ่งจะมีภาชนะรูปทรงกระบอกหนา 0.5 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8.7 เซนติเมตร สูง 9 เซนติเมตร ทำจากโลหะที่มีพื้นเป็นกระจกควอทซ์หนา 0.3 เซนติเมตร ใช้ในการบรรจุวัสดุทดสอบ (ภาพที่ 3.2) สำหรับให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงของ FT-NIR Spectrometer ผ่านทะลุกระจกควอทซ์มาที่วัสดุทดลอง เพื่อให้ได้เส้นสเปกตรัมสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป



ภาพที่ 3.1 เครื่อง FT-NIR Spectrometer (Bruker Corporation, Germany)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.2 ภาพขณะใส่ตัวอย่างทดสอบ

3.2 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด

3.2.1 การเก็บข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด

การเก็บข้อมูลเส้นสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดของตัวอย่างทดสอบ จะนำตัวอย่างทดสอบมาทำการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer และเก็บข้อมูลในรูปแบบค่าการดูดซับคลื่นเนียร์อินฟราเรดของวัสดุ $[\log(1/R)]$ เมื่อ R คือค่า diffuse reflectance ในช่วงจำนวนคลื่น $12,500-4,000 \text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่น 780-2,500 นาโนเมตร) โดยภาพขณะใส่ตัวอย่างทดสอบจะถูกหมุนเพื่อให้คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดส่องผ่านไปที่วัสดุทดสอบได้อย่างทั่วถึง ซึ่งจะได้ข้อมูลเส้นสเปกตรัมทั้งหมด 64 เส้นและเฉลี่ยเป็นเส้นสเปกตรัม 1 เส้น จากนั้นจะถูกแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยกระบวนการทั้งหมดใช้เวลาน้อยกว่า 1 นาทีต่อตัวอย่างทดสอบ

3.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดและสร้างแบบจำลองทำนาย

เส้นสเปกตรัมที่ได้จากตัวอย่างทดสอบจะต้องถูกนำไปกำจัดค่าความแปรปรวนต่างๆ (pretreatment) อันเกิดจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมระหว่างการทดลอง ก่อนที่จะนำค่าการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดของโครงสร้างตัวอย่างทดสอบเหล่านั้นไปทำการสร้างแบบจำลองทำนายในแต่ละเทคนิคต่อไป โดยวิธีการกำจัดค่าความแปรปรวนต่างๆมีดังนี้

1. การปรับปรุงค่าสเปกตรัมด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV)
2. การปรับปรุงค่าสเปกตรัมด้วยวิธี Normalization (Mean, Maximum, Min-Max)
3. การปรับปรุงค่าสเปกตรัมด้วยวิธี Multiplicative scatter correction (MSC)
4. การปรับปรุงค่าสเปกตรัมด้วยวิธี Smoothing
5. การปรับปรุงค่าสเปกตรัมด้วยวิธี 1st Derivative
6. การปรับปรุงค่าสเปกตรัมด้วยวิธี 2nd Derivative
7. การปรับปรุงค่าสเปกตรัมด้วยวิธี Baseline offset
8. การปรับปรุงค่าสเปกตรัมด้วยวิธี Straight line subtraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. การปรับปรุงค่าสเปกตรัมด้วยวิธี 1st Derivative+ SNV

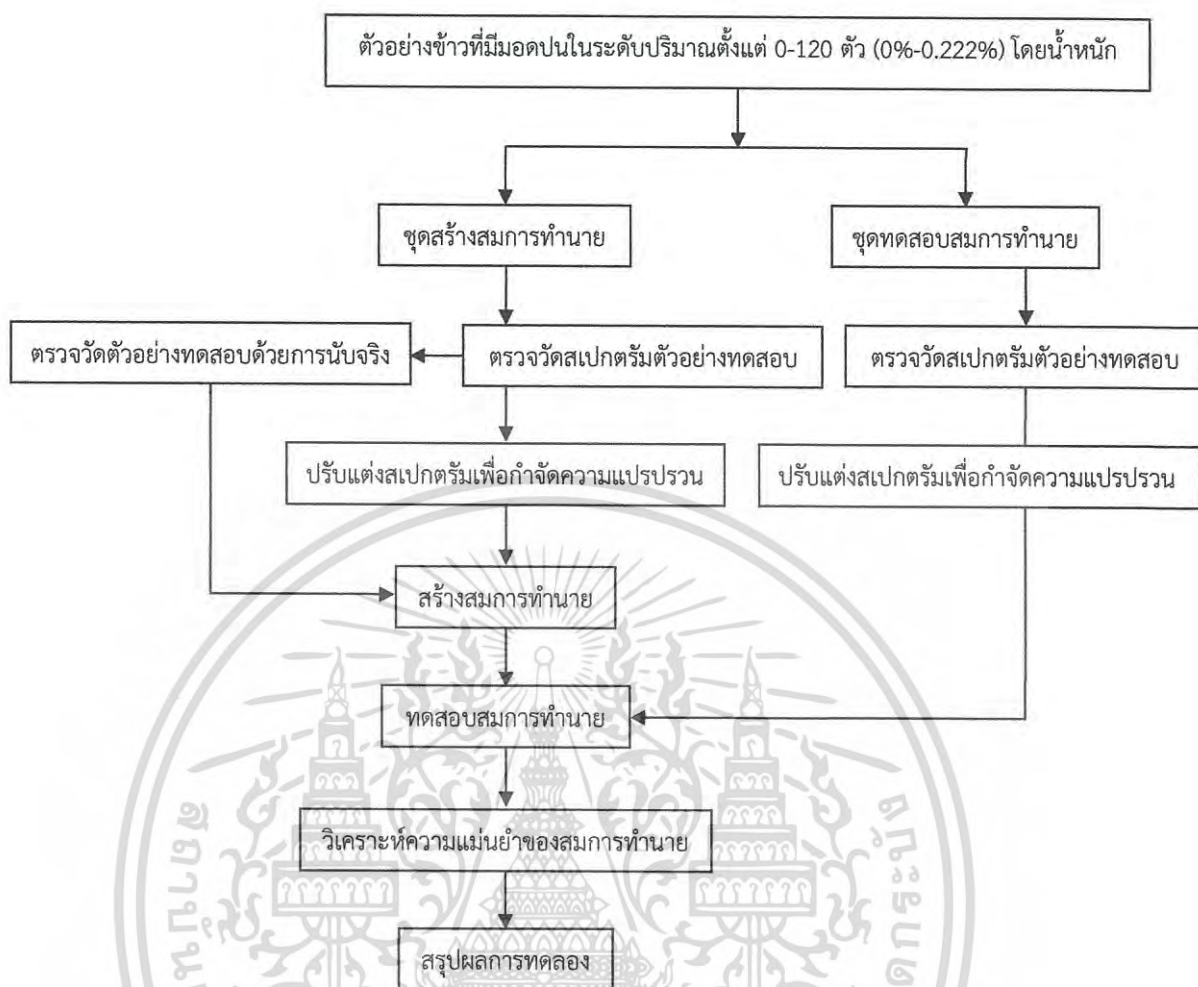
10. การปรับปรุงค่าสเปกตรัมด้วยวิธี 1st Derivative+ MSC

3.2.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดและสร้างแบบจำลองทำนาย

ด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLS Regression)

ในการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด และการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการทำนายตรวจสอบปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนัก มอดข้าวสารในข้าวและผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี วิธี PLS Regression จะใช้ตัวอย่างจำนวน 80% ของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด สำหรับการสร้างแบบจำลองทำนาย (A calibration model) และ 20% ของตัวอย่างทดสอบทั้งหมด จะถูกใช้สำหรับเป็นชุดทดสอบแบบจำลองทำนาย (A validation set) สำหรับการตรวจสอบปริมาณสัดส่วนการปนของมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวแต่ละการทดลอง

ข้อมูลเส้นสเปกตรัมทั้งหมดที่ได้รับการกำจัดค่าความแปรปรวนต่างๆ (Pretreatment) แล้วจะถูกนำไปทำการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ PLS Regression ด้วยโปรแกรม OPUS 7.0 (Bruker Corporation, Germany) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดทุกระดับการปนของมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวทดสอบเพื่อสร้างแบบจำลองทำนาย และขั้นตอนการทดสอบแบบจำลองทำนายจะใช้ในการวิเคราะห์ความแม่นยำของการทำนายระดับการปนของมอดข้าวสารในตัวอย่างทดสอบ ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ชุดสร้างแบบจำลองทำนายจะแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination of calibration set; R^2) และ ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังในชุดสร้างแบบจำลองทำนาย (Root mean square error of estimation ; RMSEE) และผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ชุดทดสอบแบบจำลองทำนายจะแสดงผลในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination of validation set; r^2), ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการทำนาย (Root mean square error of prediction ; RMSEP) อัตราส่วนระหว่างค่าความผิดพลาดมาตรฐานกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of standard error of prediction to the standard deviation; RPD) และค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias) เมื่อจำนวน PLS factors ที่เหมาะสมได้ถูกเลือกนำมาใช้เพื่อให้แบบจำลองมีการทำนายค่าที่ผิดพลาดต่ำที่สุด ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS Regression จะให้ช่วงความยาวคลื่นสำคัญที่แสดงการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดของโครงสร้างทางเคมีที่สำคัญของข้าวและมอดข้าวสารเช่น คาร์โบไฮเดรต, อินทรีย์สาร (Lipid) และไคติน (Chitin) เป็นต้น โดยมีค่า Regression coefficient ที่แสดงในรูปแบบของแผนภูมิ Regression coefficient plot สำหรับใช้เป็นตัวชี้วัดเพื่อเลือกความยาวคลื่นที่สำคัญ ในการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนของมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวทดสอบ ขั้นตอนต่างๆของการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS Regression ของการทดลองแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารในตัวอย่างทดสอบข้าวหอมมะลิ ด้วยวิธี Partial Least Squares Regression

3.2.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดและสร้างแบบจำลองทำนายด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD)

สำหรับการศึกษาทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD) จะทำการหาค่าสัดส่วน x ในวิธีการทางคณิตศาสตร์รูปแบบของเมตริกซ์ จากสมการ

$$X = A^{-1} \cdot B \quad (\text{Eq. 3.1})$$

โดย

$$A = U \cdot W \cdot V^T \quad (\text{Eq. 3.2})$$

และ

$$A^{-1} = V \cdot [\text{diag}(1/w_j)] \cdot U^T \quad (\text{Eq. 3.3})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้โปรแกรม MatLab R2010b สำหรับการหาค่าตัวแปรต่างๆในสมการและค่าสัดส่วนเมตริกซ์ X

เมตริกซ์ A คือค่าการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่ความยาวคลื่นใดๆ ที่เป็นของตำแหน่งโครงสร้างพันธะโมเลกุลหลักของข้าวและมอดข้าวสาร โดยทำการเลือกความยาวคลื่นที่เป็นตำแหน่งของโครงสร้างทางเคมีหลักของข้าวและมอดข้าวสารชนิดละ 3 ความยาวคลื่น รวมเป็น 6 ความยาวคลื่น มาทำการสร้างสมการหรือแบบจำลองทำนาย โดยขนาดของเมตริกซ์ A คือ 6x2

เมตริกซ์ B คือค่าการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดของตัวอย่างทดสอบที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่เลือก เพื่อนำไปวิเคราะห์สร้างแบบจำลองทำนาย โดยขนาดของเมตริกซ์ B คือ 6x1

เมตริกซ์ X คือค่าสัดส่วนของข้าวและมอดข้าวสาร ของตัวอย่างทดสอบที่นำมาศึกษา โดยขนาดของเมตริกซ์ X คือ 2x1 โดยสามารถแสดงสมการเมตริกซ์เพื่อหาค่า เมตริกซ์ X ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} A_{rw,WL1} & A_{rs,WL1} \\ A_{rw,WL2} & A_{rs,WL2} \\ A_{rw,WL3} & A_{rs,WL3} \\ A_{rw,WL4} & A_{rs,WL4} \\ A_{rw,WL5} & A_{rs,WL5} \\ A_{rw,WL6} & A_{rs,WL6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{rw,i} \\ x_{rs,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{WL1,i} \\ b_{WL2,i} \\ b_{WL3,i} \\ b_{WL4,i} \\ b_{WL5,i} \\ b_{WL6,i} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

เมื่อ $A_{rw,WLn}$ คือค่าการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดของโครงสร้างหลักมอดข้าวสารที่ตำแหน่งความยาวคลื่น n

$A_{rs,WLn}$ คือค่าการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดของโครงสร้างหลักข้าวหอมมะลิที่ตำแหน่งความยาวคลื่น n

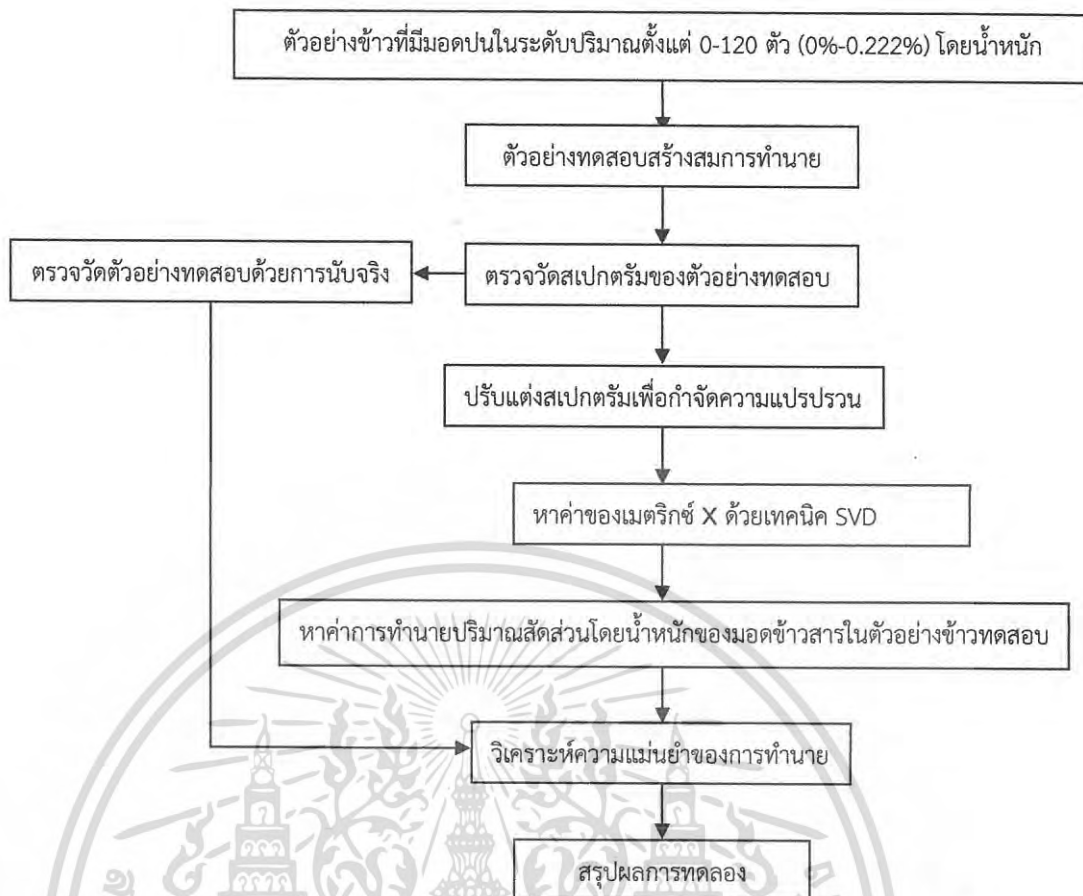
$x_{rw,i}$ คือค่าสัดส่วนของมอดข้าวสารในตัวอย่างทดสอบ i

$x_{rs,i}$ คือค่าสัดส่วนของข้าวหอมมะลิในตัวอย่างทดสอบ i

$b_{WLn,i}$ คือค่าการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดของตัวอย่างทดสอบ i ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น n

เมื่อได้ค่าสัดส่วนเมตริกซ์ X แล้วจะนำค่าเมตริกซ์ X ไปทำการหาค่าสัดส่วนเชิงน้ำหนักของปริมาณมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวทดสอบ จากนั้นทำการเปรียบเทียบความแม่นยำของการทำนายกับค่าสัดส่วนเชิงน้ำหนักจริงของมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวทดสอบ โดยจะแสดงความสามารถของการทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิในรูปแบบค่าทางสถิติเช่นเดียวกับวิธี PLS Regression คือแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination of validation set; r^2), ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการทำนาย (Root mean square error of prediction ; RMSEP) อัตราส่วนระหว่างค่าความผิดพลาดมาตรฐานกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of standard error of prediction to the standard deviation; RPD) และค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias) ขึ้นตอนต่างๆของการวิเคราะห์ด้วยวิธี SVD ของการทดลองแสดงในภาพที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารในตัวอย่างทดสอบข้าวหอมมะลิ ด้วยเทคนิค Singular Value Decomposition

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอน ซึ่งแต่ละขั้นตอนจะมีการเตรียมวัสดุทดสอบ สำหรับทำการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer เพื่อให้ได้เส้นสเปกตรัมสำหรับนำไปวิเคราะห์ข้อมูลและสร้างแบบจำลองทำนายในแต่ละวิธีดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนี้

3.3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร และการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ

3.3.1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ทำการศึกษาข้าวพันธุ์หอมมะลิ 2 รูปแบบคือ ข้าวกล้องหอมมะลิ (Brown Hom mali rice) และข้าวขาวหอมมะลิ (Milled Hom mali rice) โดยคุณสมบัติทางกายภาพทำการศึกษาน้ำหนักและน้ำหนักของข้าวหอมมะลิทั้ง 2 รูปแบบ และมอดข้าวสาร โดยทำการวัดขนาดของเมล็ดข้าวทั้ง 3 มิติ เพื่อให้ได้ข้อมูลความยาว ความกว้างและความหนา จำนวน 100 เมล็ด และ

นำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นขนาดต่อเมล็ดข้าวด้วยอุปกรณ์ไมโครมิเตอร์ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของเมล็ดข้าวจำนวน 100 เมล็ด ด้วยอุปกรณ์ตาชั่งน้ำหนักดิจิทัลความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่งและนำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นน้ำหนักต่อเมล็ดข้าวทั้ง 2 รูปแบบ สำหรับมอดข้าวสารทำการวัดขนาดและน้ำหนักในระยะตัวเต็มวัยที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยวัดขนาดทั้ง 3 มิติ เพื่อให้ได้ข้อมูลความยาว ความกว้างและความหนา ด้วยอุปกรณ์ไมโครมิเตอร์ จำนวน 100 ตัว และนำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นขนาดต่อตัวมอดข้าวสาร จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของมอดข้าวสารจำนวน 100 ตัว ด้วยอุปกรณ์ตาชั่งน้ำหนักดิจิทัลความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่งและนำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นน้ำหนักต่อตัวมอดข้าวสาร

3.3.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร

การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิ ทำการชั่งตัวอย่างข้าวที่ทดสอบทั้ง 2 รูปแบบ ให้ได้น้ำหนัก 100 กรัมต่อตัวอย่าง ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง จากนั้นทำการเทตัวอย่างข้าวทดสอบลงในภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกของเครื่องมือวัด FT-NIR spectrometer จากนั้นทำการสแกนข้าวหอมมะลิทดสอบทั้ง 2 รูปแบบเพื่อให้ได้สเปกตรัมของข้าวทดสอบ ทั้งหมด 40 ตัวอย่างต่อรูปแบบข้าวและหาค่าเฉลี่ยของรูปแบบสเปกตรัมที่ได้ สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของมอดข้าวสาร จะทำการบรรจุมอดข้าวสารระยะตัวเต็มวัยจำนวน 100 กรัมลงในภาชนะใส่ตัวอย่างทดสอบและวัดค่าสเปกตรัมด้วยเครื่องมือวัด FT-NIR spectrometer เช่นกัน ทดสอบทั้งหมด 10 ซ้ำ และหาค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมที่ได้

3.3.1.3 การศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ

นำมอดข้าวสารระยะตัวเต็มวัยมาปนในตัวอย่างข้าวทดสอบซึ่งชั่งน้ำหนักให้ได้ 100 กรัมต่อตัวอย่าง ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง โดยข้าวที่ทำการทดสอบใช้จะตัวอย่างข้าวจากโรงสีขนาดใหญ่ที่มีการส่งออก 4 แหล่ง แหล่งละ 10 ตัวอย่าง ในเขตพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ รวมทั้งหมด 40 ตัวอย่างในแต่ละระดับการปน กำหนดระดับการปนตั้งแต่ระดับ 0 ตัว และเพิ่มขึ้นทีละ 10 ตัว จะกระทั่งระดับการปนสูงสุด 200 ตัว รวมเป็นทั้งหมด 21 ระดับ รวมใช้ตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 840 ตัวอย่างต่อการทดลอง และทำการทดลองทั้งในตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิและข้าวขาวหอมมะลิ จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบไปทำการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

3.3.2 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD)

การทดสอบแบ่งเป็น 2 การทดลองคือ การตรวจสอบระดับปริมาณการปนของมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ แต่ละการทดลองนำมอดข้าวสารมาปนในตัวอย่างข้าวเชิงสัดส่วนโดย

น้ำหนัก (%) 13 ระดับ ตั้งแต่ระดับการปน 0% (0 ตัว), 0.018% (10 ตัว), 0.037% (20 ตัว), 0.055% (30 ตัว), 0.074% (40 ตัว), 0.093% (50 ตัว), 0.111% (60 ตัว), 0.130% (70 ตัว), 0.148% (80 ตัว), 0.167% (90 ตัว), 0.185% (100 ตัว), 0.204% (110 ตัว) และ 0.222% (120 ตัว) ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้โดยกระทรวงพาณิชย์ที่กำหนดสิ่งปลอมปนในสินค้าข้าวไม่เกิน 0.2 % โดยน้ำหนัก [114] และชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบที่มีมอดข้าวสารปนในแต่ละระดับด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง ให้ได้ตัวอย่างละ 100 กรัม แต่ละระดับการปนทำการทดสอบโดยใช้ตัวอย่างจำนวน 40 ตัวอย่าง จากโรงสีขนาดใหญ่ที่มีการส่งออก 4 แหล่ง แหล่งละ 10 ตัวอย่าง รวมใช้ตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 520 ตัวอย่างต่อการทดลอง

3.3.3 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD)

การเตรียมตัวอย่างทดสอบแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือการเตรียมตัวอย่างทดสอบสำหรับการศึกษาความสามารถในการส่องผ่านคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดไปสู่ตัวอย่างข้าวที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ข้าวชนิดต่างๆ และขั้นตอนที่สองคือการเตรียมตัวอย่างทดสอบสำหรับการทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวชนิดต่างๆ ที่คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดสามารถส่องผ่านได้

การเตรียมตัวอย่างทดสอบในขั้นตอนแรกประกอบด้วย การนำตัวอย่างข้าวหอมมะลิ 2 รูปแบบคือข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ จากโรงสีขนาดใหญ่ที่มีการส่งออก 4 แหล่ง ในเขตพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ โรงสีละ 10 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 40 ตัวอย่างต่อรูปแบบข้าว มาชั่งด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง ให้ได้น้ำหนัก 100 กรัมต่อตัวอย่างทดสอบ และนำตัวอย่างบรรจุภัณฑ์ข้าว 3 ชนิด ได้แก่ กระสอบป่าน (Hemp sack) (ภาพที่ 3.5) กระสอบพลาสติกสานชนิด PP (Polypropylene plastic sack) (ภาพที่ 3.6) และถุงพลาสติกชนิด PE (Polyethylene plastic bag) (ภาพที่ 3.7) ตัดเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.7 เซนติเมตร เพื่อให้ได้พอดีสำหรับการนำบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ และตัวอย่างข้าวทดสอบบรรจุลงในภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกของเครื่องมือ FT-NIR spectrometer เพื่อเก็บข้อมูลการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดของตัวอย่างทดสอบ รวมใช้ตัวอย่างข้าวขาวหอมมะลิ 40 ตัวอย่างและข้าวกล้องหอมมะลิ 40 ตัวอย่าง สำหรับการทดสอบร่วมกับบรรจุภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิด



ภาพที่ 3.5 กระสอบป่าน ภาพที่ 3.6 กระสอบพลาสติก PP ภาพที่ 3.7 ถุงพลาสติก PE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาในขั้นตอนที่สอง คือการตรวจสอบระดับปริมาณการปนของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิที่คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดสามารถส่องผ่านได้ โดยในแต่ละการทดลองนำมอดข้าวสารมาปนในตัวอย่างข้าวเชิงสัดส่วนโดยน้ำหนัก (%) 13 ระดับ ตั้งแต่ระดับการปน 0% (0 ตัว), 0.018% (10 ตัว), 0.037% (20 ตัว), 0.055 (30 ตัว), 0.074% (40 ตัว), 0.093% (50 ตัว), 0.111% (60 ตัว), 0.130% (70 ตัว), 0.148% (80 ตัว), 0.167% (90 ตัว), 0.185% (100 ตัว), 0.204% (110 ตัว) และ 0.222% (120 ตัว) และชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบที่มีมอดข้าวสารปนในแต่ละระดับด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง ตัวอย่างละ 100 กรัม ใช้ตัวอย่างทดสอบจากโรงสีขนาดใหญ่ที่มีการส่งออก 4 แหล่ง แหล่งละ 10 ตัวอย่าง รวม 40 ตัวอย่างในแต่ละระดับการปน และใช้ตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 520 ตัวอย่างต่อการทดลอง (ผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ)

3.3.4 การทวนสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์และมีบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD)

นำมอดข้าวสารมาปนในตัวอย่างข้าวฤดูกาลใหม่เชิงสัดส่วนโดยน้ำหนัก (%) 13 ระดับ ตั้งแต่ระดับการปน 0% (0 ตัว), 0.018% (10 ตัว), 0.037% (20 ตัว), 0.055 (30 ตัว), 0.074% (40 ตัว), 0.093% (50 ตัว), 0.111% (60 ตัว), 0.130% (70 ตัว), 0.148% (80 ตัว), 0.167% (90 ตัว), 0.185% (100 ตัว), 0.204% (110 ตัว) และ 0.222% (120 ตัว) และชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบที่มีมอดข้าวสารปนในแต่ละระดับด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง ตัวอย่างละ 100 กรัม ใช้ตัวอย่างทดสอบจากโรงสีขนาดใหญ่ที่มีการส่งออก 4 แหล่ง แหล่งละ 3 ตัวอย่าง รวม 12 ตัวอย่างในแต่ละระดับการปน และใช้ตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 156 ตัวอย่างต่อการทดลอง

ผลการทดสอบของการศึกษาวิจัยการตรวจสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิและผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิด้วยวิธี Partial Least Squares Regression และวิธี Singular Value Decomposition ทั้ง 4 ขั้นตอนในวิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงไว้ในบทที่ 4

บทที่ 4

ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ PLS Regression และ SVD จากสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด มาใช้ในการประเมินองค์ประกอบของข้าวหอมมะลิและสิ่งปลอมปน โดยองค์ประกอบของข้าวหอมมะลิไทยประเภทข้าวกล้องและข้าวขาว ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต (องค์ประกอบส่วนใหญ่คือแป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก ในขณะที่มอดข้าวสารมีองค์ประกอบหลักคือ โปรตีน ไขมันและอินทรีย์สาร ด้วยความแตกต่างกันในโครงสร้างเหล่านี้ของข้าวและมอดข้าวสาร เป็นสาเหตุทำให้การดูดซับสเปกตรัมของคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดมีความแตกต่างกัน ซึ่งหลักการดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจสอบปริมาณมอดข้าวสารในข้าวพันธุ์หอมมะลิได้ การตรวจสอบปริมาณมอดข้าวสารโดยวิธีที่ไม่ทำลายด้วยวิธี PLS Regression และ SVD เป็นวิธีการที่สำคัญและมีประโยชน์สำหรับการป้องกันและกำจัดมอดข้าวสาร สามารถช่วยลดการใช้สารเคมีในการรมข้าวเกินความจำเป็นและลดสารพิษตกค้างในผลิตภัณฑ์ รวมถึงสามารถใช้ในกระบวนการตรวจสอบเพื่อรับรองคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวที่ขนส่งสู่ผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศได้อีกแนวทางหนึ่ง

4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร และการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ

4.1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร

ในการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าว ใช้ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่จำหน่ายเป็นการค้า โดยมีการรับรองจากกรมการค้าภายในว่าเป็นข้าวหอมมะลิ 100% ชั้น 1 คือชั้นดีเลิศ เมล็ดข้าวที่ใช้ในการศึกษามี 2 รูปแบบ คือข้าวกล้องหอมมะลิ (Brown Hom Mali rice; ภาพที่ 4.1) และข้าวขาวหอมมะลิ (Milled Hom Mali rice; ภาพที่ 4.2) โดยทำการศึกษาวัดขนาดรูปร่างของเมล็ดข้าวทั้ง 3 มิติ เพื่อให้ได้ข้อมูลความยาว ความกว้างและความหนา ด้วยอุปกรณ์ไมโครมิเตอร์ จำนวน 100 เมล็ด และนำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นขนาดต่อเมล็ดข้าว จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของเมล็ดข้าวจำนวน 100 เมล็ด ด้วยอุปกรณ์ตาชั่งน้ำหนักดิจิทัลความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่งและนำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นน้ำหนักต่อเมล็ดข้าวทั้ง 2 รูปแบบ ผลการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ข้าวกล้าง



ภาพที่ 4.2 ข้าวขาว

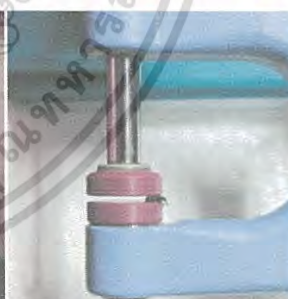
สำหรับการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมอดข้าวสาร ได้ทำการเตรียมมอดข้าวสาร สำหรับการศึกษ โดยเพาะเลี้ยงมอดข้าวสารด้วยข้าวพันธุ์หอมมะลิความชื้นประมาณ 13.5 % ในห้องปฏิบัติการอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 55-60 % เป็นเวลาประมาณ 45 วัน จนกระทั่งได้มอดข้าวสารระยะตัวเต็มวัย (ภาพที่ 4.3) และนำไปทำการทดสอบ วัดขนาดรูปร่างทั้ง 3 มิติ เพื่อให้ได้ข้อมูลความยาว ความกว้างและความหนา ด้วยอุปกรณ์ ไมโครมิเตอร์ (ภาพที่ 4.4 และ 4.5) จำนวน 100 ตัว และนำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นขนาดต่อตัวมอดข้าวสาร จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักของมอดข้าวสารจำนวน 100 ตัว ด้วยอุปกรณ์ตาชั่งน้ำหนักดิจิทัล ความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่งและนำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นน้ำหนักต่อตัวมอดข้าวสาร ผลการศึกษา แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 จากผลการศึกษาพบว่า ขนาดของเมล็ดข้าวทั้ง 3 รูปแบบจะมีขนาดใหญ่กว่ามอดข้าวสารประมาณ 2 เท่าหรือมากกว่าในทุกมิติ และมีน้ำหนักมากกว่าประมาณ 10 เท่าหรือมากกว่า และเมื่อสังเกตด้วยสายตาพบว่า สามารถคัดแยกเมล็ดข้าวออกจากมอดข้าวสารได้อย่างชัดเจน อันเป็นผลจากความแตกต่างของสีค่าของมอดข้าวสารและสีของเมล็ดข้าว



ภาพที่ 4.3 มอดข้าวสาร



ภาพที่ 4.4 ไมโครมิเตอร์



ภาพที่ 4.5 วัดขนาดมอดข้าวสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวและมอดข้าวสาร

ตัวอย่างทดสอบ	หัวข้อทดสอบ			
	ความกว้าง±S.D. (ม.ม.)	ความยาว±S.D. (ม.ม.)	ความหนา±S.D. (ม.ม.)	น้ำหนัก±S.D. (กรัม)
ข้าวกล้อง	2.10±0.07	7.44±0.56	1.70±0.07	0.021±0.002
ข้าวขาว	2.03±0.07	7.10±0.34	1.65±0.04	0.019±0.001
มอดข้าวสาร	1.03±0.03	3.29±0.04	0.74±0.02	0.00185±0.00001

สำหรับคุณสมบัติทางเคมีของข้าวหอมมะลิ จากเอกสารอ้างอิงพบว่าองค์ประกอบหลักของเมล็ดข้าวจะประกอบไปด้วยแป้ง (Starch) ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบย่อยหลัก 2 ชนิด คือ อมิโลเพกทิน (Amylopectin) และอมิโลส (Amylose) โดยปริมาณอมิโลสที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวจะถูกใช้เป็นสารอ้างอิงสำหรับการแยกประเภทของพันธุ์ข้าวไทย พันธุ์ข้าวที่มีปริมาณอมิโลสต่ำเมื่อนำมาหุงสุกจะมีเนื้อสัมผัสที่มีความนุ่มและเหนียวกว่าพันธุ์ข้าวที่มีปริมาณอมิโลสสูง ข้าวหอมมะลิจัดเป็นพันธุ์ข้าวที่มีปริมาณอมิโลสต่ำ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าข้าวหอมมะลิมียปริมาณอมิโลสประมาณ 17% ที่ระดับความชื้น 13% นอกจากแป้งซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเมล็ดข้าวหอมมะลิแล้ว จะประกอบด้วยส่วนประกอบอื่นได้แก่ โปรตีนประมาณ 7% และไขมันประมาณ 0.75% [120] โดยไขมันในเมล็ดข้าวประกอบด้วย ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride; $C_{55}H_{98}O_6$) กรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) กลูโคลิพิด (Glycolipids) และ ฟอสโฟลิพิด (Phospholipids) โดยกรดไขมันอิสระที่พบในเมล็ดข้าวส่วนใหญ่จะเป็นประเภทกรดไขมันไม่อิ่มตัว มีโครงสร้างพันธะคู่อยู่ในรูปแบบ *cis* มีสูตรทั่วไปคือ $C_nH_{2n+1}COOH$

สำหรับมอดข้าวสารในระยะตัวเต็มวัยที่นำมาทำการศึกษา จะประกอบด้วยส่วนของเปลือกแข็งซึ่งมีส่วนประกอบหลักคือสารประกอบอินทรีย์ประเภทไขมันหรือลิพิด (Lipid) และสารประกอบไคติน (Chitin) ลิพิดเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยธาตุหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งพบมากในเนื้อเยื่อและโครงสร้างของสัตว์และพืชบางชนิด ไคตินเป็นโพลิเมอร์ธรรมชาติพบมากในโครงสร้างภายในของสิ่งมีชีวิตที่ไม่มีกระดูกสันหลังและโครงสร้างภายนอกของสัตว์ประเภทเปลือกแข็งและกระดอง ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างป้องกันและสร้างความแข็งแรงให้แก่ผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิต [25] ไคตินมีสูตรโครงสร้างทางเคมีทั่วไปคือ $C_8H_{13}NO_5$ ส่วนโครงสร้างภายในตัวมอดข้าวสารจะประกอบไปด้วยโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก

4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวขาวหอมมะลิ และมอดข้าวสารด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (Bruker Corporation, Germany; ภาพที่ 4.6) ที่จำนวนคลื่นระหว่าง $12500-4000\text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่นระหว่าง 800-2500 nm) พบว่า ข้าวกล้องหอมมะลิเกิด

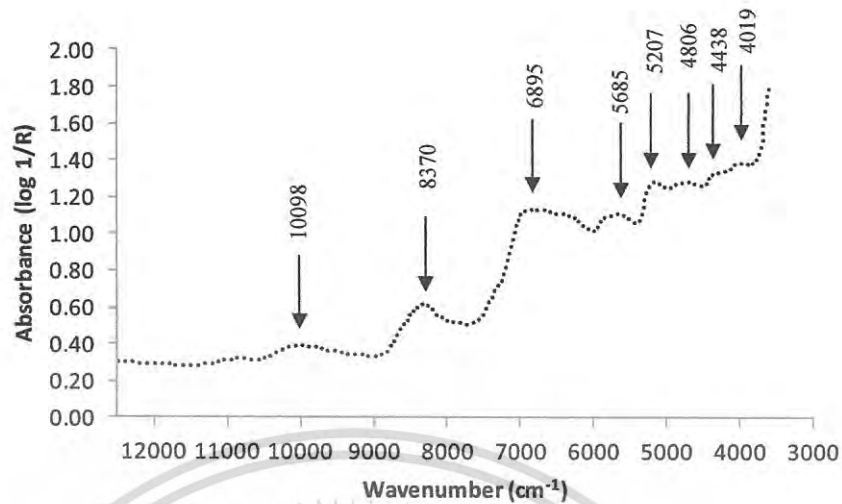
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับคลื่นที่จำนวนคลื่น (Wave number) 10098, 8370, 6895, 5685, 5207, 4806, 4438 และ 4019 cm^{-1} (Wavelength 990, 1195, 1450, 1759, 1920, 2081, 2253 และ 2488 nm) ดังแสดงในภาพที่ 4.7 และสามารถอธิบายโครงสร้างและการสั่นสะเทือนของพันธะได้ดังตารางที่ 4.2 โดยที่ Wavenumber 10098 cm^{-1} เป็นค่าการดูดซับคลื่นของ Starch ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching second overtone , Wavenumber 8370 cm^{-1} เป็นค่าการดูดซับคลื่นของ CH_3 ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C-H stretching second overtone, Wavenumber 6895 cm^{-1} เป็นค่าการดูดซับคลื่นของ Starch, H_2O ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching first overtone, Wavenumber 5685 cm^{-1} เป็นค่าการดูดซับคลื่นของ CH_2 ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C-H stretching first overtone, Wavenumber 5207 cm^{-1} เป็นค่าการดูดซับคลื่นของ CONH ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C=O stretching second overtone, Wavenumber 4806 cm^{-1} เป็นค่าการดูดซับคลื่นของ ROH, Sucrose, Starch ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching + O-H deformation, Wave number 4438 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดูดซับคลื่นของ Starch ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching + O-H deformation และ Wavenumber 4019 cm^{-1} เป็นค่าการดูดซับคลื่นของ Starch ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C-H stretching + C-C stretching [97]



ภาพที่ 4.6 FT-NIR Spectrometer ที่ใช้ทดสอบและเส้นสเปกตรัมของวัสดุที่นำมาศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

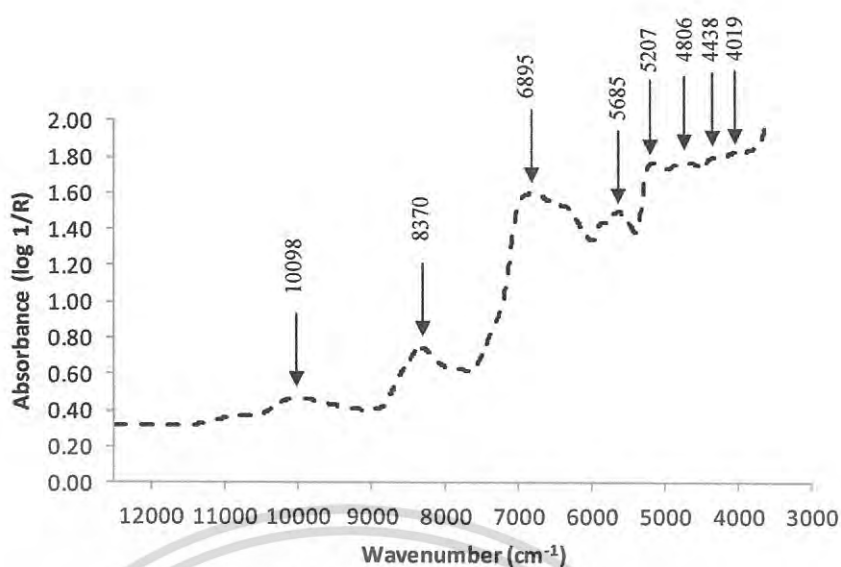


ภาพที่ 4.7 สเปกตรัมเฉื่อยของข้าวกล้องหอมมะลิ

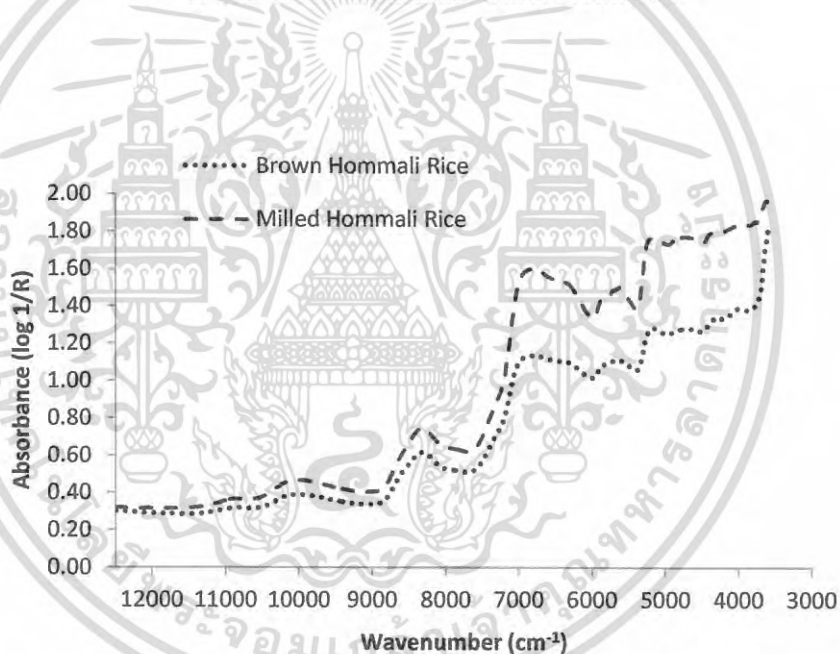
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมเฉื่อยของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิ ที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer

จำนวนคลื่น (cm^{-1})	ความยาวคลื่น (nm)	การสันสะท้อนของพันธะ [97]	โครงสร้างทางเคมี [97]
10098	990	O-H stretching second overtone	Starch
8370	1195	C-H stretching second overtone	CH_3
6895	1450	O-H stretching first overtone	Starch, H_2O
5685	1759	C-H stretching first overtone	CH_2
5207	1920	C=O stretching second overtone	CONH
4806	2081	O-H stretching + O-H deformation	ROH, Sucrose, Starch
4438	2253	O-H stretching + O-H deformation	Starch
4019	2488	C-H stretching + C-C stretching	Starch

สำหรับข้าวขาวหอมมะลิจะเกิดการดูดซับคลื่นที่ Wave number เดียวกับข้าวกล้อง แต่จะมีการดูดซับคลื่นที่สูงกว่าข้าวกล้อง อันเป็นผลมาจากข้าวกล้องจะมีชั้นรำข้าว (Bran) ซึ่งประกอบไปด้วย เยื่อหุ้มผล (Pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (Seed coat) และชั้นอลูโรน (Alurone layer) เป็นอุปสรรคต่อการส่องผ่านของคลื่นแสงเนียร์อินฟราเรดไปที่เนื้อข้าว ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 4.8 และภาพที่ 4.9 แสดงเส้นสเปกตรัมเฉื่อยรวมของข้าวกล้องและข้าวขาวหอมมะลิ



ภาพที่ 4.8 สเปกตรัมเฉลี่ยของข้าวขาวหอมมะลิ

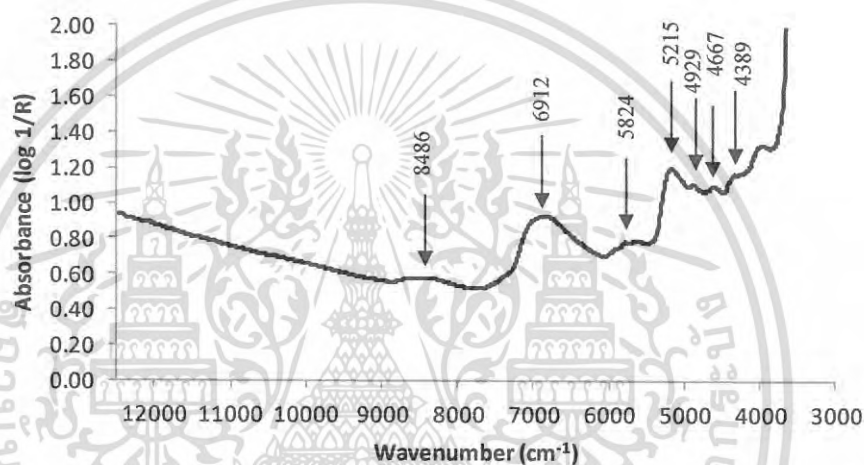


ภาพที่ 4.9 สเปกตรัมเฉลี่ยรวมของข้าวกล้องและข้าวขาวหอมมะลิ

สำหรับมอดข้าวสารจะดูดซับคลื่นช่วงเนียร์อินฟราเรดที่จำนวนคลื่น (Wave number) 8486, 6912, 5824, 5215, 4929, 4667 และ 4389 cm^{-1} (Wavelength 1178, 1447, 1717, 1918, 2029, 2143 และ 2278 nm) ดังแสดงในภาพที่ 4.10 และสามารถอธิบายโครงสร้างและการสั่นสะเทือนของพันธะได้ดังตารางที่ 4.3 โดยที่ Wavenumber 8486 cm^{-1} เป็นค่าการดูดซับคลื่นของ HC=CH ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C-H stretching second overtone, Wavenumber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6912 cm^{-1} เป็นค่าการดูดซับคลื่นของ Aromatic ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ 2 x C-H stretching + C-H deformation, Wavenumber 5824 cm^{-1} เป็นค่าการดูดซับคลื่นของ CH_2 ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C-H stretching first overtone, Wavenumber 5215 cm^{-1} เป็นค่าการดูดซับคลื่นของ CONH ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C=O stretching second overtone, Wavenumber 4929 cm^{-1} เป็นค่าการดูดซับคลื่นของ CONH_2 ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C=O stretching second overtone, Wavenumber 4667 cm^{-1} เป็นค่าการดูดซับคลื่นของ HC=CH ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ =C-H stretching + C=C stretching และ Wavenumber 4389 cm^{-1} เป็นค่าการดูดซับคลื่นของ CH_3 ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C-H stretching + C-H deformation [97] สเปกตรัมเฉลี่ยรวมของข้าวหอมมะลิทั้ง 3 รูปแบบ และมอดข้าวสารแสดงในภาพที่ 4.11

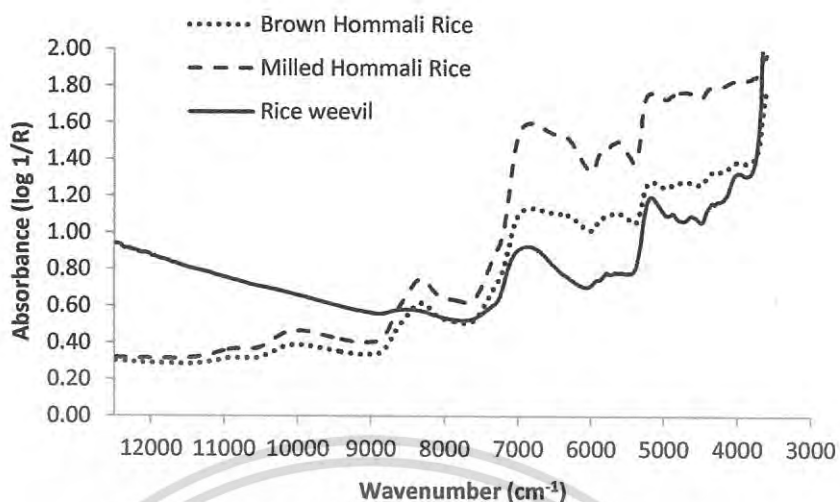


ภาพที่ 4.10 สเปกตรัมเฉลี่ยของมอดข้าวสาร

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างมอดข้าวสารที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer

จำนวนคลื่น (cm^{-1})	ความยาวคลื่น (nm)	การสั่นสะเทือนของพันธะ [97]	โครงสร้างทางเคมี [97]
8486	1178	C-H stretching second overtone	HC=CH
6912	1447	2 x C-H stretching + C-H deformation	Aromatic
5824	1717	C-H stretching first overtone	CH_2
5215	1918	C=O stretching second overtone	CONH
4929	2029	C=O stretching second overtone	CONH_2
4667	2143	C-H stretching + C=C stretching	HC=CH
4389	2278	C-H stretching + C-H deformation	CH_3

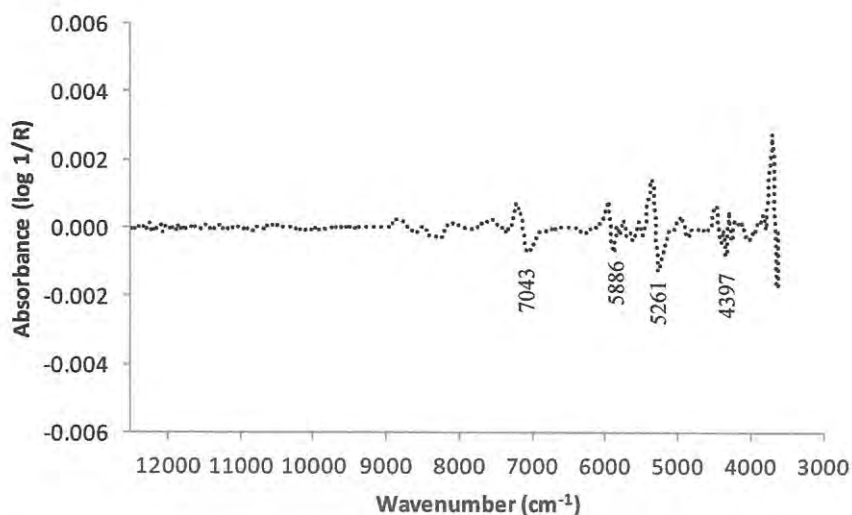
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 สเปกตรัมเฉลี่ยรวมของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสาร

อย่างไรก็ตามในการทดสอบ จะมีปัจจัยต่างๆทั้งจากสภาพแวดล้อมเช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม และลักษณะขนาดของตัวอย่างทดสอบข้าวและมอดข้าวสารที่เป็นอนุภาค (Particle size) และความชื้นในตัวอย่าง (Moisture Content) เป็นต้น ทำให้สเปกตรัมเฉลี่ยของวัสดุทดสอบอาจเกิดการขยับขึ้น (Baseline shift) และการที่ค่าการดูดกลืนคลื่นสูงสุด (Peak) ของสเปกตรัมเกิดการซ้อนทับกัน (Overlapping band) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์คือ วิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง (Second derivative) เพื่อช่วยในการกำจัดปัญหาดังกล่าวทำให้สเปกตรัมดั้งเดิมชัดเจนขึ้น เพียงแต่ค่าการดูดกลืนแสงมีการลบจากค่าลบเป็นค่าบวกและค่าบวกเป็นค่าลบเท่านั้น

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savitzky-Golay ของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิพบว่า มีการดูดซับชัดเจนที่ Wave number 7043, 5886, 5261 และ 4397 cm^{-1} (1420, 1699, 1900 และ 2307 nm) ดังแสดงในภาพที่ 4.12 ซึ่งสามารถอธิบายโครงสร้างและการสั่นสะเทือนของพันธะได้ดังตารางที่ 4.4 โดยจะพบการดูดซับคลื่นที่เป็นโครงสร้างทางเคมีของ Starch, Phenolic O-H, ArOH (aryl alcohol) และ CH_3 ซึ่ง Starch จะเป็นโครงสร้างหลักที่มีการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรด

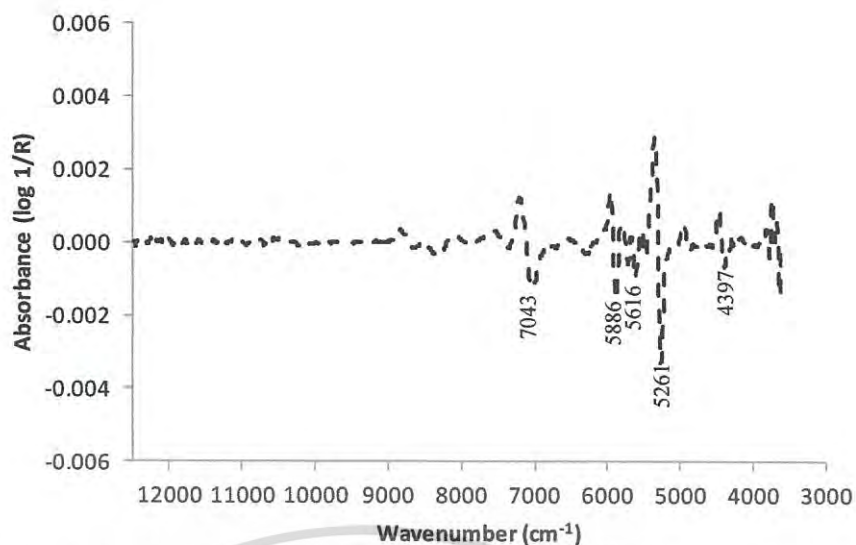


ภาพที่ 4.12 สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savizky-Golay ตัวอย่างข้าวกลิ้งหอมมะลิ

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับที่สองแบบ Savizky-Golay ของตัวอย่างข้าวกลิ้งหอมมะลิ ที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer

จำนวนคลื่น (cm^{-1})	ความยาวคลื่น (nm)	การสั่นสะเทือนของพันธะ [97]	โครงสร้างทางเคมี [97]
7043	1420	O-H stretching first overtone	Phenolic, ArOH
5886	1699	C-H stretching first overtone.	CH_3
5261	1900	O-H stretching +2xC-O stretching	Starch
4397	2274	O-H stretching +C-C stretching	Starch

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savizky-Golay ของตัวอย่างข้าวขาวหอมมะลิพบว่า มีการดูดซับชัดเจนส่วนใหญ่เช่นเดียวกับข้าวกลิ้งหอมมะลิแต่มีการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดสูงกว่าที่ Wave number 7043, 5886, 5616, 5261 และ 4397 cm^{-1} (1420, 1699, 1781, 1900 และ 2307 nm) ดังแสดงในภาพที่ 4.13 ซึ่งสามารถอธิบายโครงสร้างและการสั่นสะเทือนของพันธะได้ดังตารางที่ 4.5 โดยจะพบการดูดซับคลื่นที่เป็นโครงสร้างทางเคมีของ Starch, Phenolic O-H, ArOH (aryl alcohol), CH_3 และ Cellulose ซึ่ง Starch จะเป็นโครงสร้างหลักที่มีการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดเช่นเดียวกับข้าวกลิ้งหอมมะลิ และภาพที่ 4.14 แสดงเส้นสเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savizky-Golay รวมของตัวอย่างข้าวกลิ้งและข้าวขาวหอมมะลิ

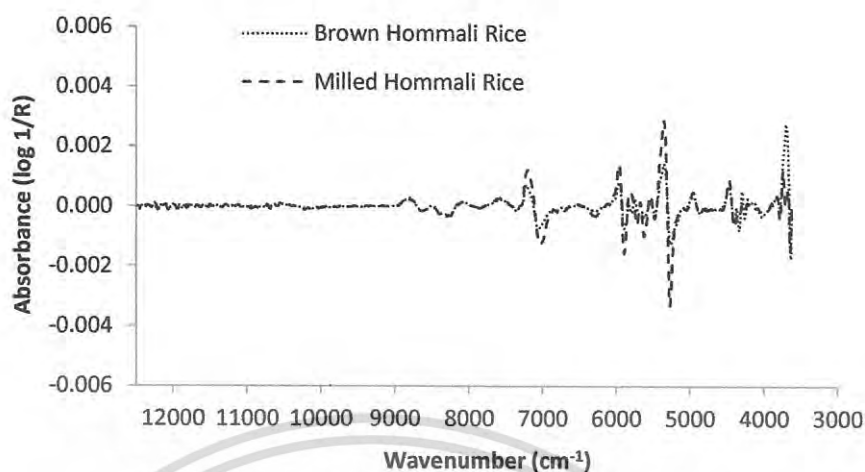


ภาพที่ 4.13 สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savitzky-Golay ตัวอย่างข้าวหอมมะลิ

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับที่สองแบบ Savitzky-Golay ของตัวอย่างข้าวหอมมะลิ ที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer

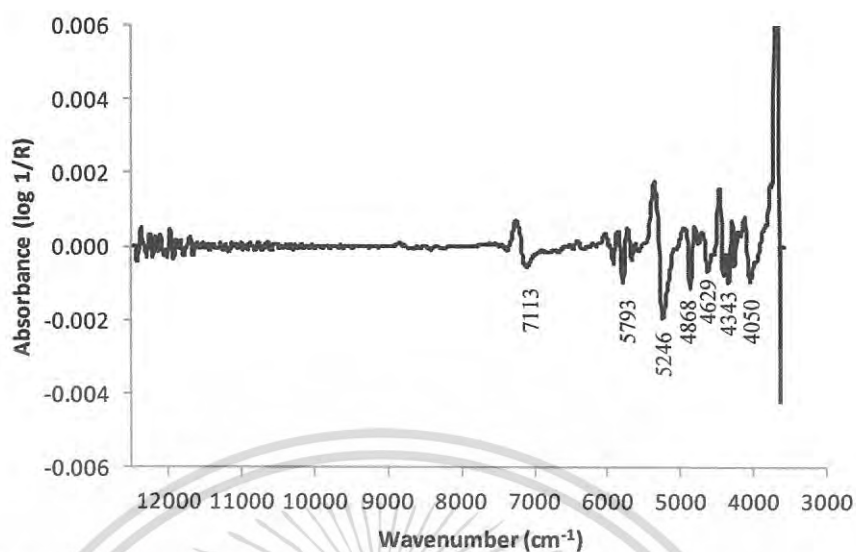
จำนวนคลื่น (cm^{-1})	ความยาวคลื่น (nm)	การสั่นสะเทือนของพันธะ [97]	โครงสร้างทางเคมี [97]
7043	1420	O-H stretching first overtone	Phenolic, ArOH
5886	1699	C-H stretching first overtone	CH_3
5616	1781	C-H stretching first overtone	Cellulose
5261	1900	O-H stretching +2xC-O stretching	Starch
4397	2274	O-H stretching +C-C stretching	Starch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.14 สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savitzky-Golay รวมของข้าวกล้องและข้าวขาวหอมมะลิ

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savitzky-Golay ของตัวอย่างมอดข้าวสารพบว่า มีการดูดซับชัดเจนที่ Wave number 7113, 5793, 5246, 4868, 4629, 4343 และ 4050 cm^{-1} (1406, 1726, 1906, 2054, 2160, 2303 และ 2469 nm) ดังแสดงในภาพที่ 4.15 ซึ่งสามารถอธิบายโครงสร้างและการสั่นสะเทือนของพันธะได้ดังตารางที่ 4.6 โดยจะพบการดูดซับคลื่นที่เป็นโครงสร้างทางเคมีของ Phosphate, Protein, CONHR, CH_2 , CH_3 และ ROH (alcohol) ซึ่ง Phosphate จะเป็นโครงสร้างหลักที่มีการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรด และพบโครงสร้างของ CH_2 , CH_3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างทางเคมีของอินทรีย์สารประเภทลิปิด CONHR ซึ่งเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างทางเคมีของโคติน และ Protein ซึ่งโครงสร้างทั้งหมดจะพบในส่วนของเปลือกแข็งและภายในลำตัวของตัวงวงข้าว โดยสเปกตรัมเฉลี่ยรวมของข้าวหอมมะลิทั้ง 3 รูปแบบและมอดข้าวสารแสดงในภาพที่ 4.16

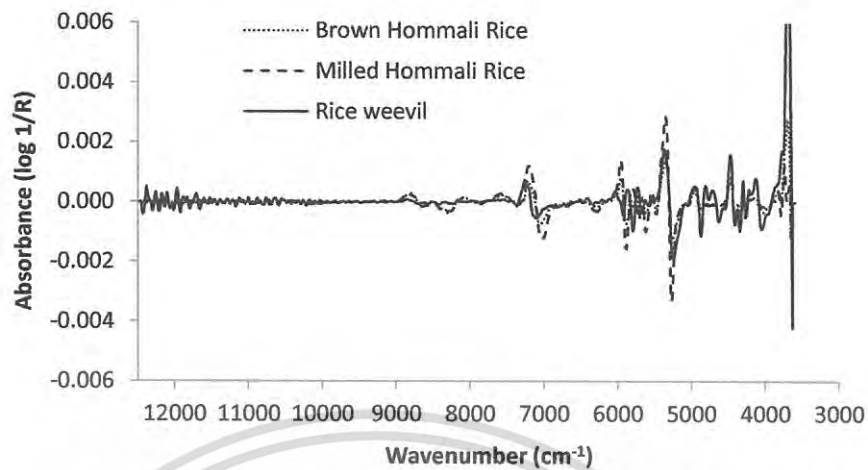


ภาพที่ 4.15 สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savitzky-Golay ตัวอย่างมอดข้าวสาร

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับที่สองแบบ Savitzky-Golay ของตัวอย่างมอดข้าวสาร ที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer

จำนวนคลื่น (cm^{-1})	ความยาวคลื่น (nm)	การสั่นสะเทือนของพันธะ [97]	โครงสร้างทางเคมี [97]
7113	1406	O-H stretching first overtone	ROH
5793	1726	C-H stretching first overtone	CH_2
5246	1906	O-H stretching first overtone	POH (Phosphate)
4868	2054	N-H sym. stretching.+ amide II	Protein
4629	2160	2 x amide I + amide III	CONHR
4343	2303	C-H stretching +C-H deformation	CH_2
4050	2469	C-H stretching +C-H deformation	CH_3

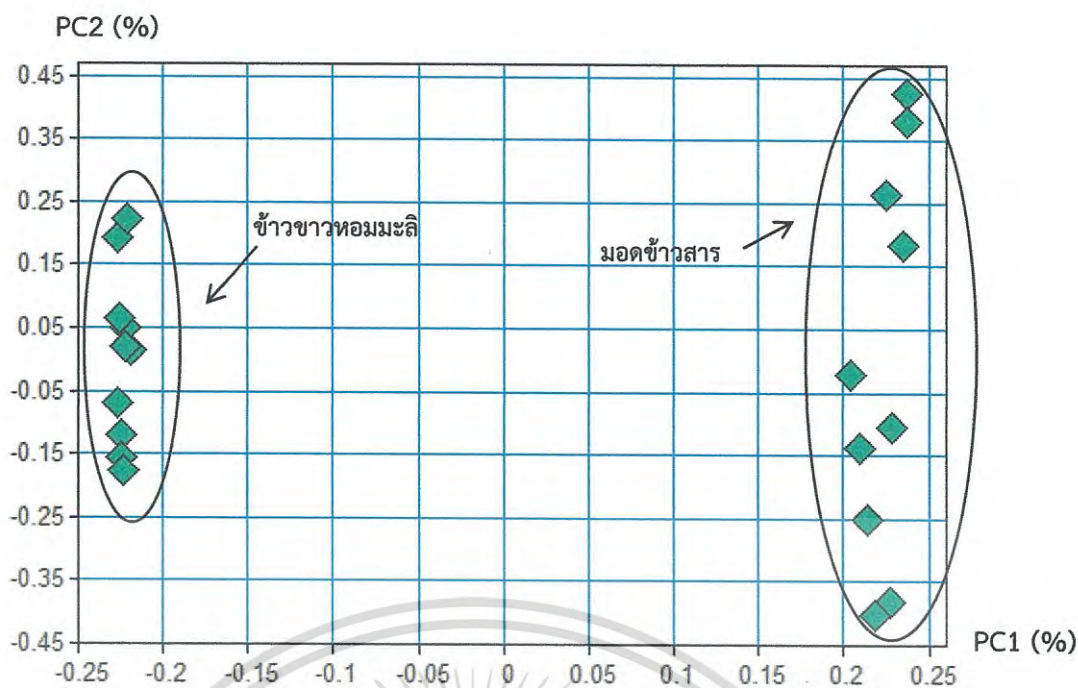
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



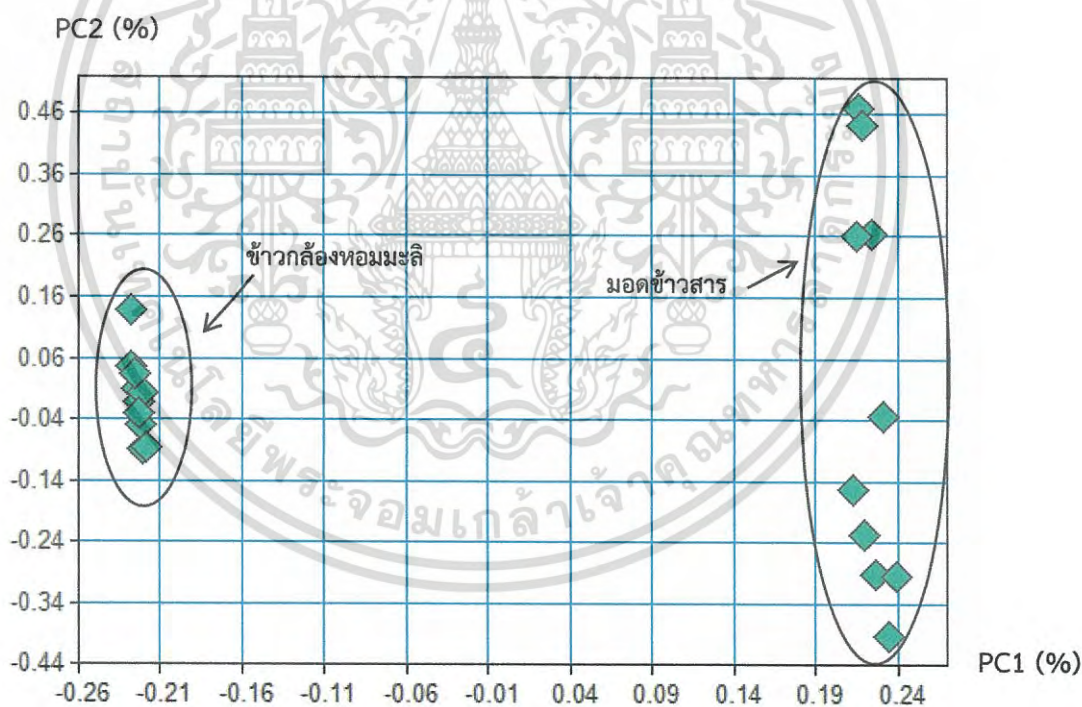
ภาพที่ 4.16 สเปกตรัมเฉลี่ยอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savitzky-Golay รวมของข้าวหอมมะลิ ทั้ง 2 รูปแบบและมอดข้าวสาร

4.1.3 การศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ

จากการนำตัวอย่างของมอดข้าวสาร ข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ มาทำการสแกนด้วยเครื่อง A Multi Purpose Analyzer FT-NIR Spectrometer (Bruker Corporation, Germany) เพื่อให้ได้เส้นสเปกตรัมของตัวอย่างเหล่านี้ดังแสดงในภาพที่ 4.11 และนำเทคนิค Principal Components Analysis (PCA) มาทำการวิเคราะห์ผล โดยทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระหรือตัวแปรที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย NIR spectroscopy ด้วยการแบ่งกลุ่มตัวแปรอิสระเดิมที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรใหม่หรือองค์ประกอบที่เรียกว่า Principal Component (PC) โดยใช้ข้อมูลทั้งสเปกตรัม (Full spectrum) พบว่า สเปกตรัมของมอดข้าวสารและข้าวขาวหอมมะลิ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มอย่างเห็นชัดเจน นอกจากนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์คัดแยกข้าวกล้องหอมมะลิและมอดข้าวสาร พบว่าสเปกตรัมของวัสดุทั้งสองชนิด สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มอย่างเห็นชัดเจนด้วยเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.17 และภาพที่ 4.18 ตามลำดับ



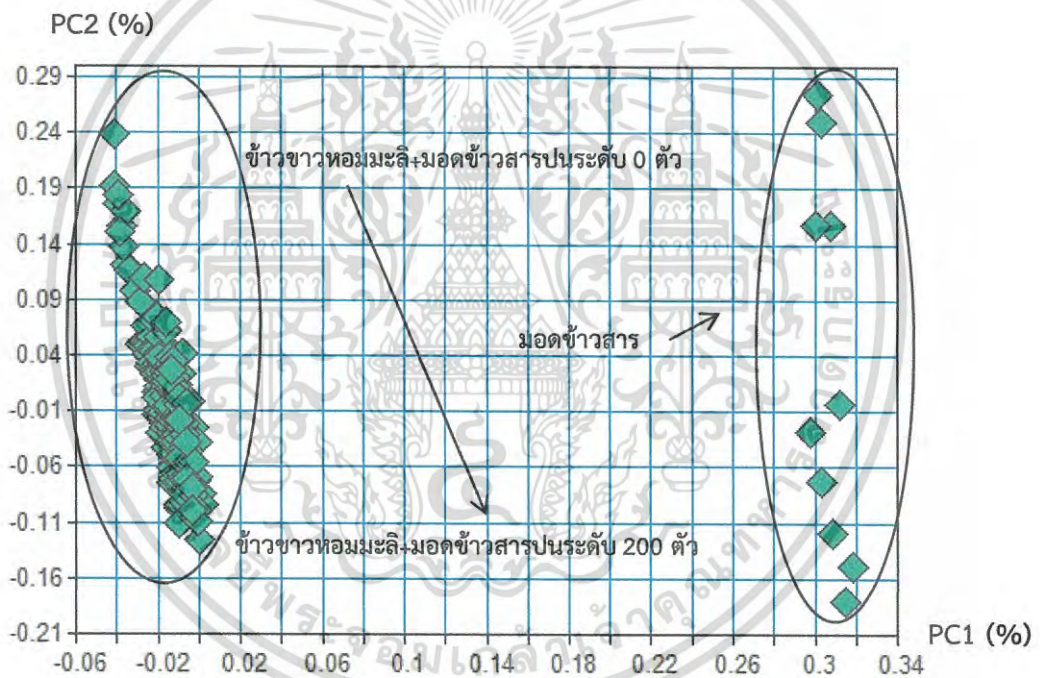
ภาพที่ 4.17 การใช้เทคนิค PCA ในการคัดแยกข้าวขาวหอมมะลิและมอดข้าวสาร



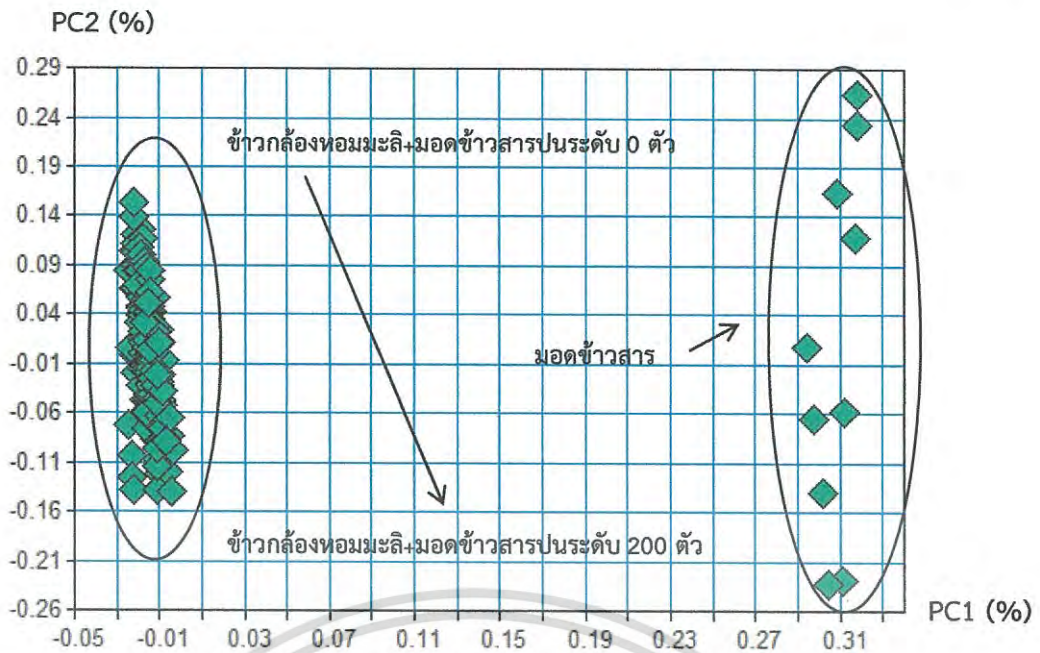
ภาพที่ 4.18 การใช้เทคนิค PCA ในการคัดแยกข้าวกล้องหอมมะลิและมอดข้าวสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำเทคนิค PCA มาทำการวิเคราะห์ผลการคัดแยกแบ่งกลุ่มมอดข้าวสารบริสุทธิ์ 100% และตัวอย่างทดสอบที่มีมอดข้าวสารปนในข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิ ตั้งแต่ระดับการปน 0 ตัว (สเปกตรัมของข้าวหอมมะลิ 100%) และเพิ่มขึ้นระดับละ 10 ตัว จนกระทั่งถึงระดับการปน สูงสุด 200 ตัว พบว่าสามารถแบ่งกลุ่มสเปกตรัมของตัวอย่างทดสอบได้เป็น 2 กลุ่มแยกกันได้อย่าง ชัดเจน โดยกลุ่มแรกเป็นกลุ่มของข้าวที่มีระดับการปนของมอดข้าวสารตั้งแต่ 0 ตัว ถึงระดับการปน 200 ตัว และกลุ่มที่สองเป็นมอดข้าวสารบริสุทธิ์ 100% ซึ่งผลการวิเคราะห์จะเป็นไปในแนวทาง เดียวกันทั้งข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิ แต่การวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิค PCA ไม่ สามารถคัดแยกตัวอย่างทดสอบข้าวหอมมะลิที่มีการปนของมอดข้าวสารในระดับต่างๆ ได้อย่างชัดเจน โดยความสามารถการคัดแยกในตัวอย่างทดสอบข้าวกล้องหอมมะลิจะทำได้ต่ำกว่าตัวอย่างทดสอบ ข้าวขาวหอมมะลิ ซึ่งสังเกตได้จากตัวอย่างทดสอบข้าวกล้องหอมมะลิที่มีมอดข้าวสารปนอยู่ในระดับ ต่างๆ จะเกาะกลุ่มกันหนาแน่นกว่าชุดตัวอย่างทดสอบข้าวขาวหอมมะลิ ผลการวิเคราะห์แสดงในภาพ ที่ 4.19 และภาพที่ 4.20 ตามลำดับ

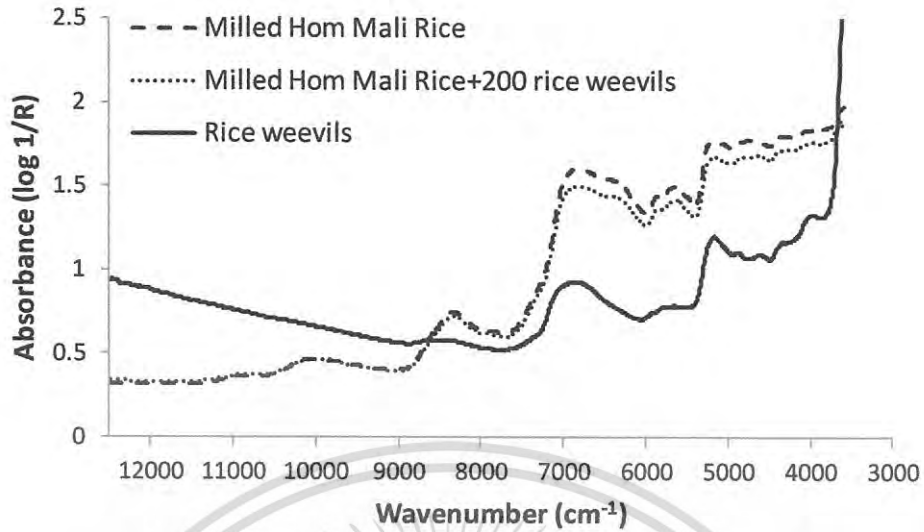


ภาพที่ 4.19 การใช้เทคนิค PCA ในการคัดแยกตัวอย่างทดสอบมอดข้าวสารบริสุทธิ์ และข้าวขาวหอมมะลิที่มีมอดข้าวสารปนในระดับตั้งแต่ 0-200 ตัว

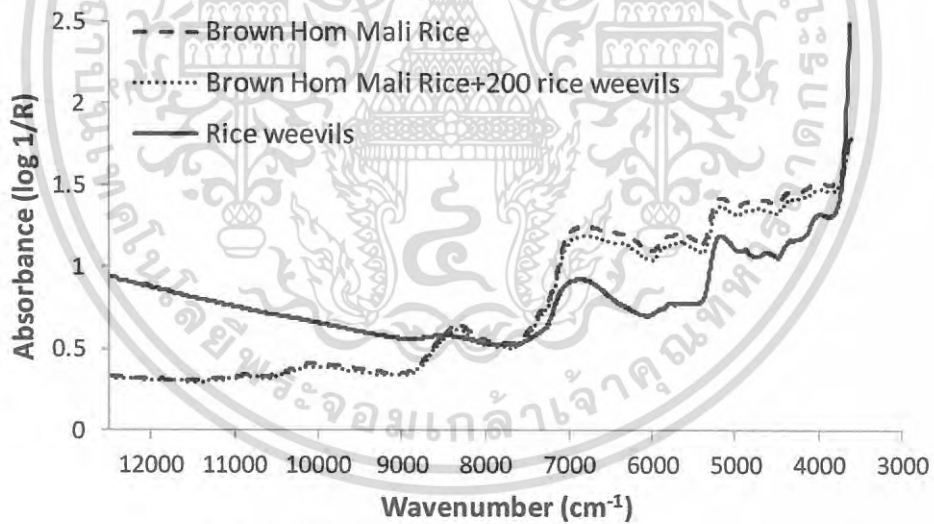


ภาพที่ 4.20 การใช้เทคนิค PCA ในการคัดแยกตัวอย่างทดสอบมอดข้าวสารบริสุทธิ์ และข้าวกล้องหอมมะลิที่มีมอดข้าวสารปนในระดับตั้งแต่ 0-200 ตัว

จากนั้นได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้วิธี Partial Least Squares (PLS) Regression ซึ่งเป็นอีกวิธีการหนึ่งในการนำข้อมูลของสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด มาทำการวิเคราะห์ผลและสร้างแบบจำลองทำนาย ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการทำนายระดับปริมาณการปนของมอดข้าวสารในตัวอย่างทดสอบข้าวหอมมะลิตั้งแต่ระดับ 0-200 ตัว พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากทดลองแสดงถึงค่าความแตกต่างของการดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรด (780-2,500 นาโนเมตร) ของตัวอย่างข้าวหอมมะลิบริสุทธิ์และข้าวหอมมะลิที่มีมอดข้าวสารปนในระดับต่างๆ โดยความแตกต่างจะชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อระดับการปนของมอดข้าวสารเพิ่มมากขึ้น ทั้งในรูปแบบของตัวอย่างทดสอบที่เป็นข้าวขาวและข้าวกล้อง ภาพที่ 4.21 และ ภาพที่ 4.22 แสดงเส้นสเปกตรัมที่แตกต่างกันของตัวอย่างข้าวหอมมะลิบริสุทธิ์ มอดข้าวสารบริสุทธิ์ และตัวอย่างข้าวหอมมะลิที่มีมอดข้าวสารปนที่ระดับ 200 ตัว



ภาพที่ 4.21 เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยของข้าวขาวหอมมะลิบริสุทธิ์ มอดข้าวสารและข้าวขาวหอมมะลิที่มีมอดข้าวสารปนระดับ 200 ตัว



ภาพที่ 4.22 เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยของข้าวกล้องหอมมะลิ มอดข้าวสารและข้าวกล้องหอมมะลิที่มีมอดข้าวสารปนระดับ 200 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามการเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างทดสอบ จะต้องพิจารณาจากวิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัม (The specific math treatment) และการเลือกจำนวน PLS factor ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองการทำนาย เพื่อให้ได้ค่าทางสถิติของชุดทดสอบแบบจำลองทำนายที่ดีที่สุดได้แก่ค่า Coefficient of determination of validation set (r^2) สูง, ค่า Root mean square error of prediction (RMSEP) ต่ำ, ค่า Ratio of standard error of prediction to the standard deviation (RPD) สูง และค่า Average of difference between actual value and NIR value (Bias) ต่ำ โดยจากผลการวิเคราะห์ในการทดลองของข้าวหอมมะลิ (Milled Hom Mali rice; MHR) พบว่าช่วงความยาวคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการทำนายตรวจสอบปริมาณแมลงมอดข้าวสารที่ปนในข้าวหอมมะลียู่ในช่วงจำนวนคลื่น $9434-5435\text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่น $1,060-1,840\text{ nm}$) และช่วงจำนวนคลื่น $4608-4237\text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่น $2,170-2,360\text{ nm}$) โดยจำนวน PLS factor ที่เหมาะสมเท่ากับ 9 ค่าทางสถิติของแบบจำลองการทำนายที่สร้างขึ้นจะมีค่า Coefficient of determination of calibration set (R^2) เท่ากับ 0.97, ค่า Root mean square error of estimation (RMSEE) เท่ากับ 9.66 weevils/100 g-rice และสำหรับชุดทดสอบแบบจำลองทำนายจะมีค่า Coefficient of determination of validation set (r^2) เท่ากับ 0.96, ค่า Root mean square error of prediction (RMSEP) เท่ากับ 10.4 weevils/100 g-rice, ค่า Ratio of standard error of prediction to the standard deviation (RPD) เท่ากับ 6.07 และค่า Average of difference between actual value and NIR value (Bias) เท่ากับ 2.93 weevils/100 g-rice วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือวิธี Min-Max normalization ผลการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

สำหรับกรณีตัวอย่างของข้าวกล้องหอมมะลิ (Brown Hom Mali rice; BHR) ผลการวิเคราะห์พบว่า ช่วงความยาวคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายอยู่ในช่วงจำนวนคลื่น $9434-6098\text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่น $1,060-1,640\text{ nm}$) และช่วงจำนวนคลื่น $5465-4237\text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่น $1,830-2,360\text{ nm}$) จำนวน PLS factor ที่เหมาะสมเท่ากับ 7 โดยแบบจำลองทำนายที่สร้างขึ้นจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.90, ค่า RMSEE เท่ากับ 19.6 weevils/100 g-rice และสำหรับชุดทดสอบแบบจำลองทำนายจะมีค่า r^2 เท่ากับ 0.90, ค่า RMSEP เท่ากับ 18.7 weevils/100 g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 3.26 และค่า Bias เท่ากับ 2.94 weevils/100 g-rice วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือวิธี Straight line subtraction ผลการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าทางสถิติของการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ โดยวิธี Partial Least Squares Regression

Type of rice	Wave number ranges	Pre-treatment	PLS Factors	R ²	r ²	RMSEE	RMSEP	RPD	Bias
MHR	9434-5435 cm ⁻¹ (1,060-1,840 nm)	Min-Max normalization	9	0.97	0.96	9.66	10.4	6.07	2.93
	4608-4237 cm ⁻¹ (2,170-2,360 nm)								
BHR	9434-6098 cm ⁻¹ (1,060-1,640 nm)	Straight line subtraction	7	0.90	0.90	19.6	18.7	3.26	2.94
	5465-4237 cm ⁻¹ (1,830-2,360 nm)								

หมายเหตุ :

MHR = Milled Hom Mali rice, BHR = Brown Hom Mali rice,

R² = Coefficient of determination of calibration set,

r² = Coefficient of determination of validation set

RMSEE = Root mean square error of estimation, RMSEP = Root mean square error of prediction

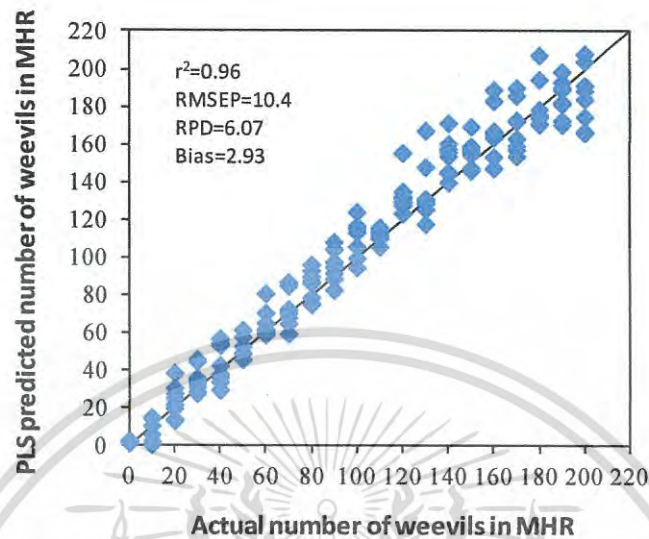
RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

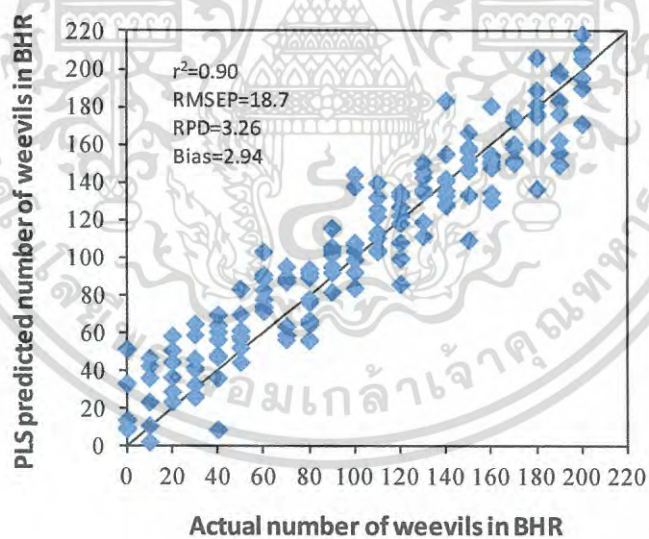
และจากการนำค่าการทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิที่ได้จากชุดทดสอบแบบจำลองการทำนายที่พัฒนาจากค่าการดูดซับสเปกตรัมของคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรด มาหาความสัมพันธ์กับค่าการนับจริงของจำนวนแมลงมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวทดสอบ ผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 4.23 และภาพที่ 4.24 ซึ่งเป็นรูปแบบแผนภูมิ 1:1 (One per one line) โดยพบว่าค่าการทำนายมีความสัมพันธ์ที่ดีต่อค่าการนับแมลงมอดข้าวสารจริง ทั้งแบบจำลองทำนายของข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ โดยค่าการทำนายมีทั้งปริมาณที่น้อยกว่า (Underestimated prediction), มากกว่า (Overestimated prediction) และเท่ากับค่าการนับจำนวนมอดข้าวสารจริง (Perfectly estimated prediction) ของทุกระดับการปนในแต่ละการทดลองที่ได้ทำการศึกษา ภาพที่ 4.25 และภาพที่ 4.26 แสดงค่าเฉลี่ยของการทำนายในแต่ละระดับการปนของมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวทดสอบทั้งสองชนิดสัมพันธ์กับค่าการนับจริงของมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวทดสอบ ซึ่งจะทำการแสดงผลของการวิเคราะห์พิจารณาได้ง่ายขึ้น ซึ่งจากแผนภูมิที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทำนายที่พัฒนาขึ้นให้ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกต้องแม่นยำในการทำนายสูง โดยพิจารณาจากค่าการทำนายอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียง 1:1 (One per one line) หรือใกล้เคียงกับค่าการนับจริง โดยแบบจำลองของข้าวขาวหอมมะลิจะมีการกระจายตัวที่น้อยกว่าแบบจำลองของข้าวกล้องหอมมะลิ ซึ่งทำให้สรุปได้ว่ามีความแม่นยำกว่าและเป็นไปตามค่าทางสถิติที่แสดงไว้

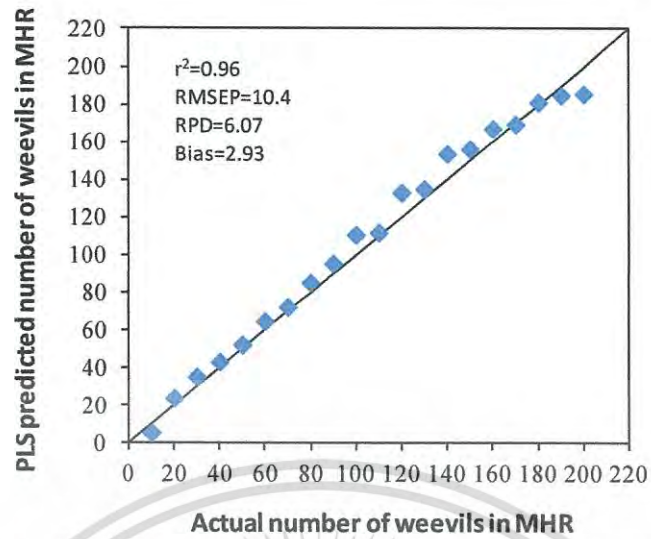


ภาพที่ 4.23 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมอดข้าวสารจากการนับจริงและจากการทำนายในข้าวขาวหอมมะลิโดยวิธี PLS Regression

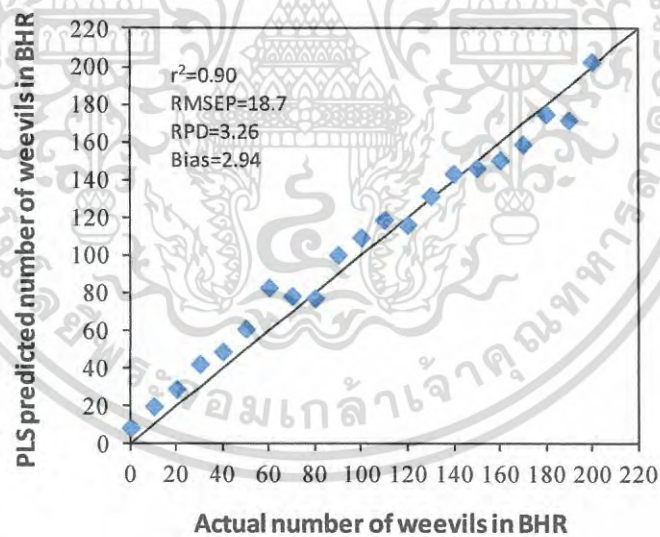


ภาพที่ 4.24 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมอดข้าวสารจากการนับจริงและจากการทำนายในข้าวกล้องหอมมะลิโดยวิธี PLS Regression

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.25 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในข้าวขาวหอมมะลิโดยวิธี PLS Regression

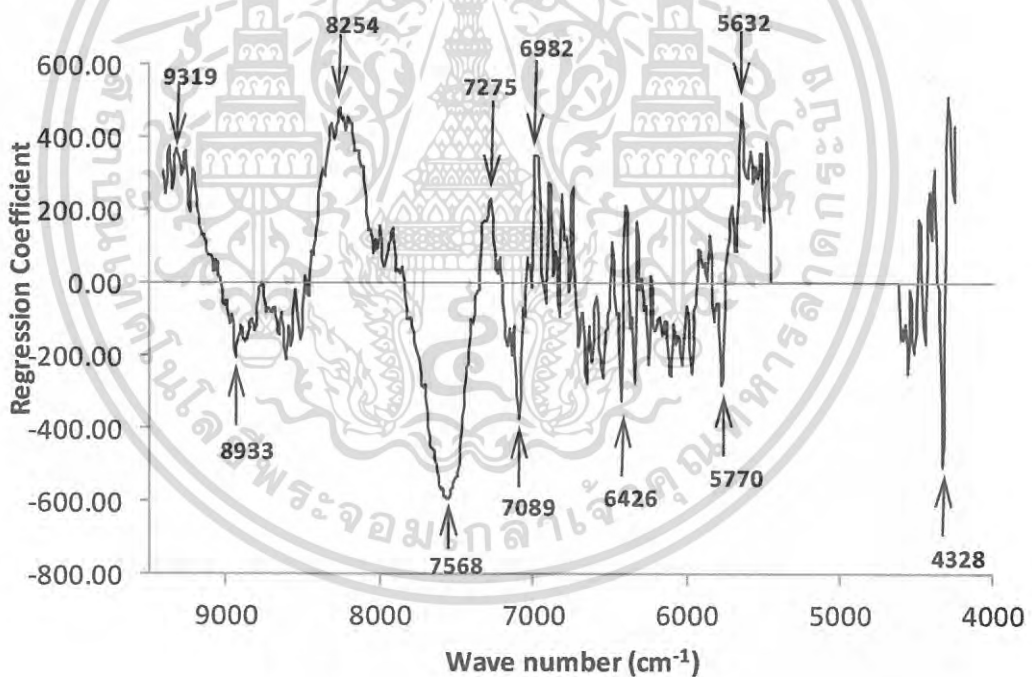


ภาพที่ 4.26 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในข้าวกล้องหอมมะลิโดยวิธี PLS Regression

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

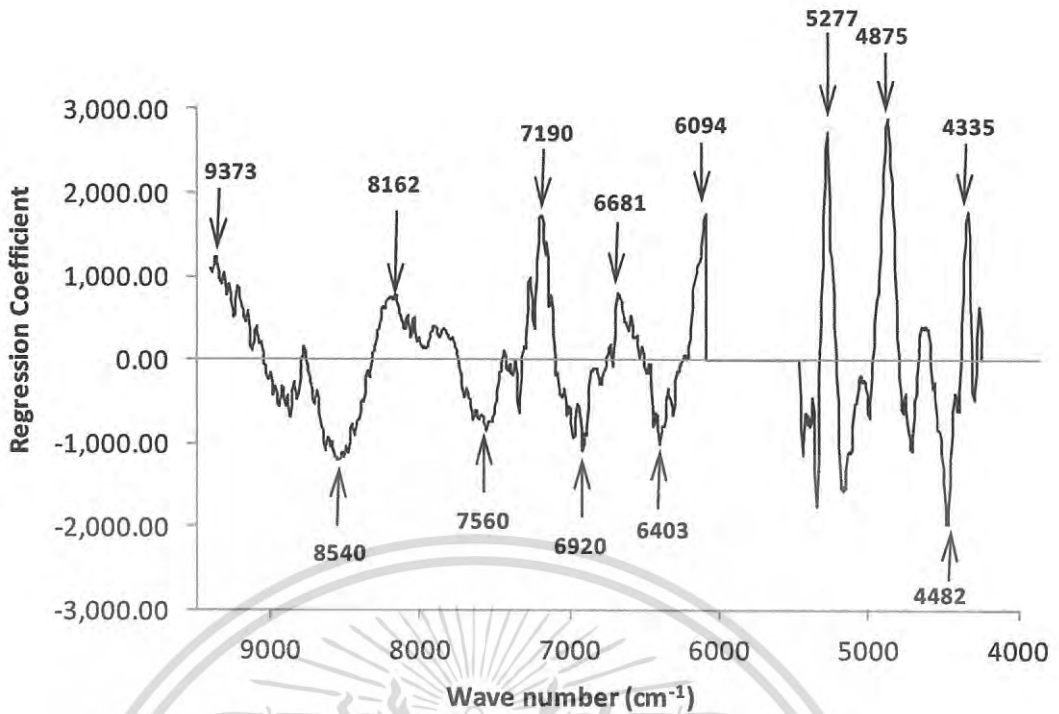
ค่า Regression coefficient ถูกใช้เป็นพื้นฐานแรกในการตรวจผลกระทบของความยาวคลื่นต่างๆ (X-variable) ในการทำนายตัวแปรตาม (Y) และค่าสัมบูรณ์ของ Regression coefficient ที่มีค่าสูงชี้ได้ถึงถึงความสำคัญของอิทธิพลของความยาวคลื่นนั้นต่อแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการวิเคราะห์จำนวนคลื่นหรือความยาวคลื่นที่สำคัญสำหรับสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณแมลงมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิ ซึ่งใช้ค่าสัมบูรณ์ของ Regression coefficient เป็นตัวชี้วัด ได้ปรากฏที่จำนวนคลื่น 9319, 8933, 8254, 7568, 7275, 7089, 6982, 6426, 5770, 5632 และ 4328 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 1073, 1119, 1211, 1321, 1375, 1410, 1432, 1556, 1733, 1776 และ 2310 nm) และจำนวนคลื่นสำคัญสำหรับข้าวกล้องหอมมะลิได้แก่ 9373, 8540, 8162, 7560, 7190, 6920, 6681, 6403, 6094, 5277, 4875, 4482 และ 4335 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 1067, 1170, 1225, 1323, 1390, 1445, 1497, 1562, 1640, 1895, 2050, 2230 และ 2307 nm) ซึ่งช่วงคลื่นเหล่านี้ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นโครงสร้างของพันธะไฮโดรคาร์บอน (C-H) และมีบางช่วงความยาวคลื่นที่เป็นลักษณะโครงสร้างของโปรตีนและกรดอะมิโน (N-H structure; 9373, 6982, 6681, 6403, 4482 cm^{-1}) โครงสร้างของแป้งและน้ำตาลกลูโคส (O-H structure; 7089, 6920, 5277 cm^{-1}) [97] ดังแสดงในภาพที่ 4.27 และภาพที่ 4.28



ภาพที่ 4.27 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของข้าวขาวหอมมะลิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.28 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของข้าวกล้องหอมมะลิ

ได้มีรายงานของนักวิจัยหลายท่านที่ได้ทำการศึกษามาก่อนหน้านี้ [21]-[25] ถึงการตรวจสอบคัดแยกแมลงที่อาศัยภายในและภายนอกข้าวสาลีและปริมาณการปนเศษชั้นแมลงในผลิตภัณฑ์แป้งข้าวสาลีด้วยการใช้วิธี NIR spectroscopy โดยการดูดซับสเปกตรัมที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างทดสอบจะขึ้นอยู่กับมืออยู่ของเปลือกแข็งแมลง โดยส่วนประกอบหลักในเปลือกแข็งของแมลงจะประกอบด้วย ไคติน (Chitin) และ ลิพิด (Lipid) ซึ่งมีอิทธิพลต่อการดูดซับสเปกตรัมในโครงสร้าง C-H

ไคตินเป็นโครงสร้างของโพลีแซคคาไรด์ที่ถูพบในเปลือกนอกของแมลง ปู กุ้งและกุ้งทะเลขนาดใหญ่ รวมถึงถูพบในโครงสร้างภายในของสัตว์จำพวกไม่มีกระดูกสันหลัง ไคตินประกอบไปด้วย β (1-4) linked units of the amino sugar N-acetyl-D-glucosamine โดยได้มีการการศึกษามาก่อนหน้านี้พบว่าเส้นสเปกตรัมของ β (1-4)-linked hexasaccharide of 2-acetamido-2-deoxy-D-glucopyranoside ที่ได้จาก Chitin จะแสดงค่าการดูดซับสูงสุดที่ประมาณช่วงความยาวคลื่น 1178 และ 1500 [23], [25] ซึ่งทั้งสองช่วงความยาวคลื่นเป็นชั้นแบ่งกลุ่มที่สำคัญของโมเดลที่ทำการศึกษา

สำหรับลิพิดในเปลือกนอกของแมลงจะประกอบไปด้วย Hydrocarbons, Esters, Ketones, Epoxides, Alcohols, Fatty acids, Sterols และ Triacylglycerols [25], [54], [55] ลิพิดใน

เปลือกนอกจะเป็นส่วนประกอบประมาณ 0.08% ของน้ำหนักสดมอดข้าวสาร และประกอบด้วย N-alkanes และ N-alkadienes [25], [56] กลุ่มพันธะ CH_3 และ CH_2 เป็นโครงสร้างทางเคมีทั่วไปที่มีอยู่ในลิวทินมากที่สุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งพันธะ Long-chain hydrocarbon สเปกตรัมของลิวทินในเปลือกของมอดข้าวสารจะดูดซับคลื่นสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 1130 และ 1670 นาโนเมตร โดยค่าสูงสุดเหล่านี้จะตรงกับโอเวอร์โทนที่ 1 และ 2 ของ CH_3 [25] ซึ่งทั้งสองความยาวคลื่นจะอยู่ในช่วงของความยาวคลื่นที่สำคัญสำหรับตรวจสอบปริมาณแมลงมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิของโมเดลที่ทำการศึกษาร่วมกัน ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าเทคนิค NIR spectroscopy มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้สำหรับศึกษาการตรวจวัดปริมาณมอดข้าวสารในข้าวพันธุ์หอมมะลิในรูปแบบของข้าวขาวและข้าวกล้อง อย่างไรก็ตามการศึกษาระดับการปนของมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิทั้งสองชนิดยังเป็นระดับที่สูงเกินกว่ามาตรฐานการส่งออกข้าวระหว่างประเทศ ซึ่งประกาศโดยองค์การอาหารโลก (FAO) และองค์การอนามัยโลก (WHO) ภายใต้ชื่อมาตรฐาน CODEX ALIMENTARIUS ; CODEX STAN 198-1995 ซึ่งได้กำหนดปริมาณการปนของสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์ข้าวไว้ที่ 0.1% โดยน้ำหนัก [121] และมาตรฐานการส่งออกข้าวไทยโดยกระทรวงพาณิชย์ ที่ได้กำหนดระดับการปนของสิ่งแปลกปลอมในข้าวไว้ที่ 0.2% โดยน้ำหนัก [122] ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษากำหนดปริมาณการปนของมอดข้าวสารเชิงสัดส่วนโดยน้ำหนักในข้าวหอมมะลิ ทั้งที่ไม่มีบรรจุกัญท์และมีบรรจุกัญท์ชนิดต่างๆในหัวข้อต่อไป

4.2 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุกัญท์ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD)

4.2.1 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุกัญท์ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression

ผลการสร้างแบบจำลองการทำนายพบว่าช่วงความยาวคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทำนายตรวจสอบปริมาณแมลงมอดข้าวสารที่ปนในข้าวขาวหอมมะลิในสัดส่วนโดยน้ำหนักที่ 0% (0 ตัว), 0.018% (10 ตัว), 0.037% (20 ตัว), 0.055% (30 ตัว), 0.074% (40 ตัว), 0.093% (50 ตัว), 0.111% (60 ตัว), 0.130% (70 ตัว), 0.148% (80 ตัว), 0.167% (90 ตัว), 0.185% (100 ตัว), 0.204% (110 ตัว) และ 0.222% (120 ตัว) อยู่ในช่วงจำนวนคลื่น $9407\text{-}5447\text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่น 1,063-1,836 nm) และช่วงจำนวนคลื่น $4746\text{-}4421\text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่น 2,170-2,262 nm) โดยจำนวน PLS factors ที่เหมาะสมเท่ากับ 9 แบบจำลองการทำนายที่สร้างขึ้นจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.96, ค่า RMSEE เท่ากับ 0.012 g-weevils/100g-rice และสำหรับชุดทดสอบแบบจำลองจะมีค่า r^2 เท่ากับ 0.95, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.014 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 4.79 และค่า Bias เท่ากับ -0.007 g-weevils/100g-rice วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือวิธี Standard normal variate (SNV) ผลการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีตัวอย่างของข้าวกล้องหอมมะลิ ผลการวิเคราะห์พบว่า ช่วงความยาวคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองการทำนายอยู่ในช่วงจำนวนคลื่น 9407-4244 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 1,063-2,356 nm) จำนวน PLS factors ที่เหมาะสมเท่ากับ 10 โดยแบบจำลองการทำนายที่สร้างขึ้นจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.90, ค่า RMSEE เท่ากับ 0.019 g-weevils/100g-rice และสำหรับชุดทดสอบแบบจำลองการทำนายจะมีค่า r^2 เท่ากับ 0.90, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.019 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 3.11 และค่า Bias เท่ากับ -0.008 g-weevils/100g-rice วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือวิธี Straight line subtraction ผลการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าทางสถิติของการสร้างแบบจำลองทำนายสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Partial Least Squares Regression

Type of rice	Wave number Ranges	Pre-treatment	PLS Factors	R^2	r^2	RMSEE	RMSEP	RPD	Bias
MHR	9407-5447 cm^{-1} (1063-1836 nm)	SNV	9	0.96	0.95	0.012	0.014	4.79	-0.007
	4746-4421 cm^{-1} (2170-2262 nm)								
BHR	9407-4244 cm^{-1} (1063-2356 nm)	Straight line subtraction	10	0.90	0.90	0.019	0.019	3.11	-0.008

หมายเหตุ :

MHR = Milled Hom Mali rice, BHR = Brown Hom Mali rice, SNV = Standard normal variate

R^2 = Coefficient of determination of calibration set,

r^2 = Coefficient of determination of validation set

RMSEE = Root mean square error of estimation, RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

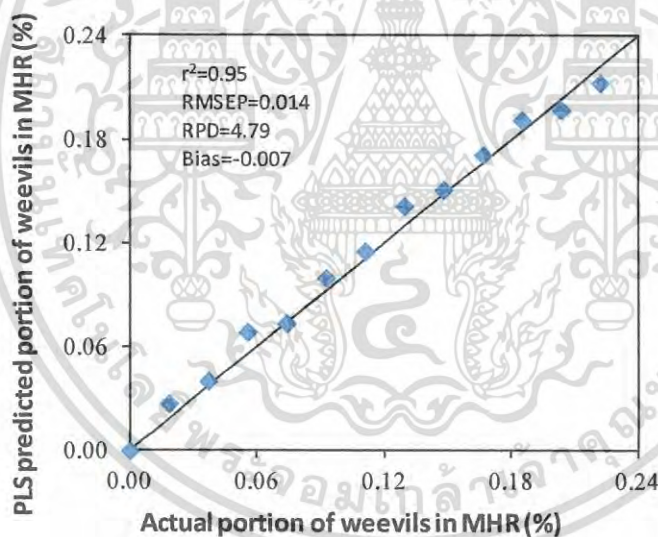
Bias = Average of difference between actual value and NIR value

ภาพที่ 4.29 และภาพที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทำนายและค่าการนับจริงเฉลี่ยของปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของแมลงมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของตัวอย่างข้าวขาวหอมมะลิมีการกระจายตัวของข้อมูลในวงแคบกว่าแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิ สอดคล้องกับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

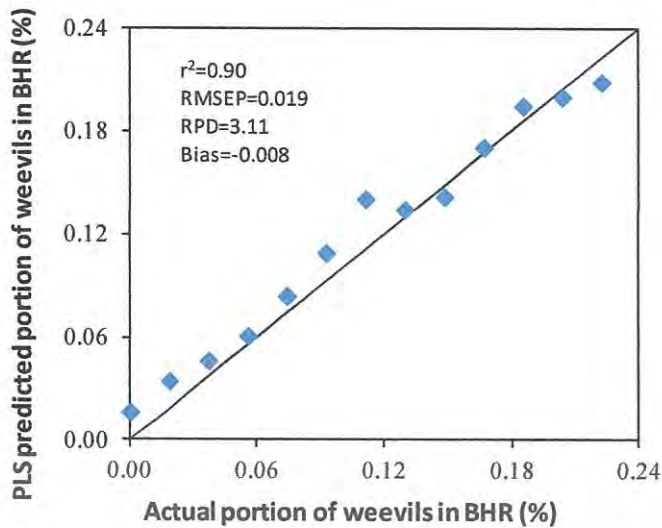
ทางสถิติซึ่งแสดงอยู่ในแผนภูมิที่ดีกว่า ทำให้แปลความหมายได้ว่าแบบจำลองการทำนายปริมาณ สัตว์ส่วนโดยน้ำหนักของแมลงมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิมีความแม่นยำมากกว่า ซึ่งเป็นผลจาก ชั้นรำข้าว (Bran) ของข้าวกล้องมีองค์ประกอบทางเคมีส่วนหนึ่งเป็นไขมัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มอด ข้าวสารมีเช่นเดียวกัน ดังที่ได้มีการกล่าวถึงไว้ในหัวข้อ 4.1.1 ทำให้แบบจำลองที่ได้มีความแม่นยำ น้อยกว่า

เมื่ออ้างอิงตามเอกสารของ Williams (2007) [100] ตามตารางที่ 2.3 และ 2.4 ของบทที่ 2 ซึ่งได้กำหนดระดับการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้งานโดยพิจารณาจากค่า r^2 และค่า RPD ทำให้สรุปได้ว่า การทำนายตรวจสอบปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Partial Least Squares Regression มีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบปริมาณ มอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิ เพื่อกำหนดปริมาณสารรมฆ่าแมลง การประกันคุณภาพข้าวและการ คัดแยกข้าวที่มีมอดข้าวสารอาศัยออกจากข้าวที่สะอาด สำหรับข้าวกล้องหอมมะลิ การใช้เทคนิคนี้ในการตรวจสอบ มีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในระดับงานวิจัยและกระบวนการคัดแยกข้าวที่มี มอดข้าวสารอาศัยออกจากข้าวที่สะอาด ซึ่งข้าวที่มีมอดอาศัยอยู่อาจนำไปทำความสะอาดและ นำไปใช้ประโยชน์ต่อไป



ภาพที่ 4.29 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัตว์ส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในข้าวขาวหอมมะลิโดยวิธี PLS Regression

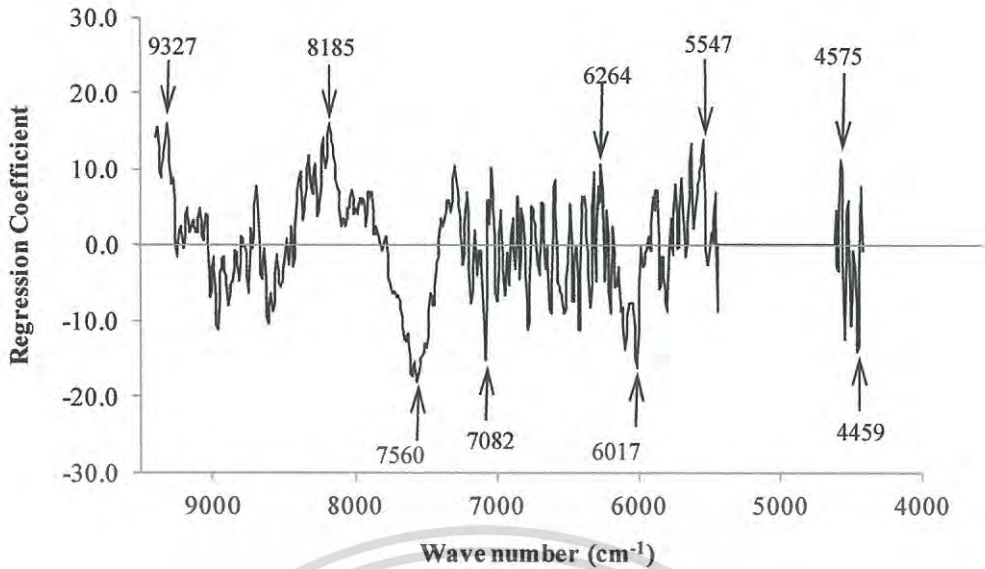
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



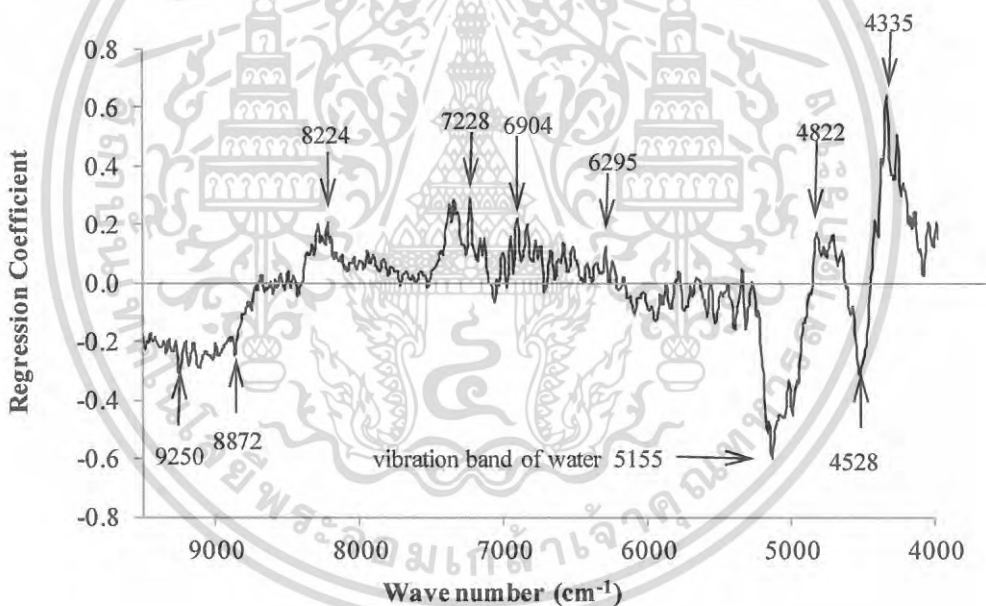
ภาพที่ 4.30 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในข้าวกล้องหอมมะลิโดยวิธี PLS Regression

ค่า Regression coefficient ถูกใช้เป็นพื้นฐานแรกในการตรวจผลกระทบของความยาวคลื่นต่างๆ (X-variable) ในการทำนายตัวแปรตาม (Y) และค่าสัมบูรณ์ของ Regression coefficient ที่มีค่าสูงชี้ได้ถึงถึงความสำคัญของอิทธิพลของจำนวนคลื่นหรือความยาวคลื่นนั้นต่อแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ช่วงจำนวนคลื่นที่สำคัญสำหรับการตรวจสอบปริมาณสัดส่วนของมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ ซึ่งใช้ค่าสัมบูรณ์ของ Regression coefficient เป็นตัวชี้วัด ได้ปรากฏที่จำนวนคลื่น 9327, 8185, 7560, 7082, 6264, 6017, 5547, 4575 และ 4459 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 1072, 1222, 1323, 1412, 1596, 1662, 1803, 2186 และ 2243 nm) และช่วงจำนวนคลื่นที่สำคัญสำหรับข้าวกล้องหอมมะลิได้แก่ 9250, 8872, 8224, 7228, 6904, 6295, 4822, 4528 และ 4335 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 1081, 1127, 1216, 1383, 1448, 1589, 2074, 2208 และ 2307 nm) ซึ่งช่วงคลื่นเหล่านี้ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นโครงสร้างของพันธะไฮโดรคาร์บอน (C-H) และมีบางช่วงจำนวนคลื่นที่เป็นลักษณะโครงสร้างของโปรตีนและกรดอะมิโน (N-H structure; 4528, 4459 cm^{-1}) และโครงสร้างของแป้งและน้ำตาลกลูโคส (O-H structure; 7082, 6295, 6264, 5547 และ 4822 cm^{-1}) นอกจากนั้นได้ปรากฏจำนวนคลื่น 5155 cm^{-1} (1940 nm) ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของน้ำ ซึ่งไม่ถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองที่ทำการศึกษาเนื่องจากโครงสร้างของน้ำจะมีอิทธิพลทำให้เกิดความแปรปรวนต่อแบบจำลองและการทำนายที่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.31 และภาพที่ 4.32 ตารางที่ 4.9 และ ตารางที่ 4.10 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.31 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบข้าวขาวหอมมะลิ

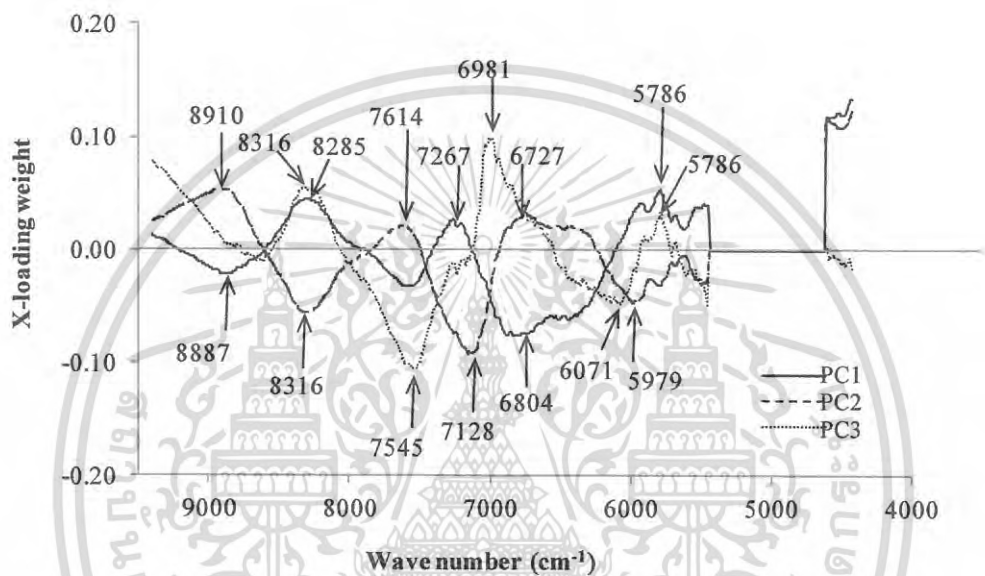


ภาพที่ 4.32 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบข้าวกล้องหอมมะลิ

สำหรับค่า X-loading weight plot นั้น ถ้าจำนวนคลื่นที่มีค่า X-loading weight มาก แสดงว่ามีความสำคัญต่อการทำนายตัวแปรตาม สำหรับการทำนายในที่นี้แสดง plot ของ X-loading weight เพียง 3 factor แรก ซึ่งมีอิทธิพลต่อแบบจำลองการทำนายมากตามลำดับ กรณีการทำนาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

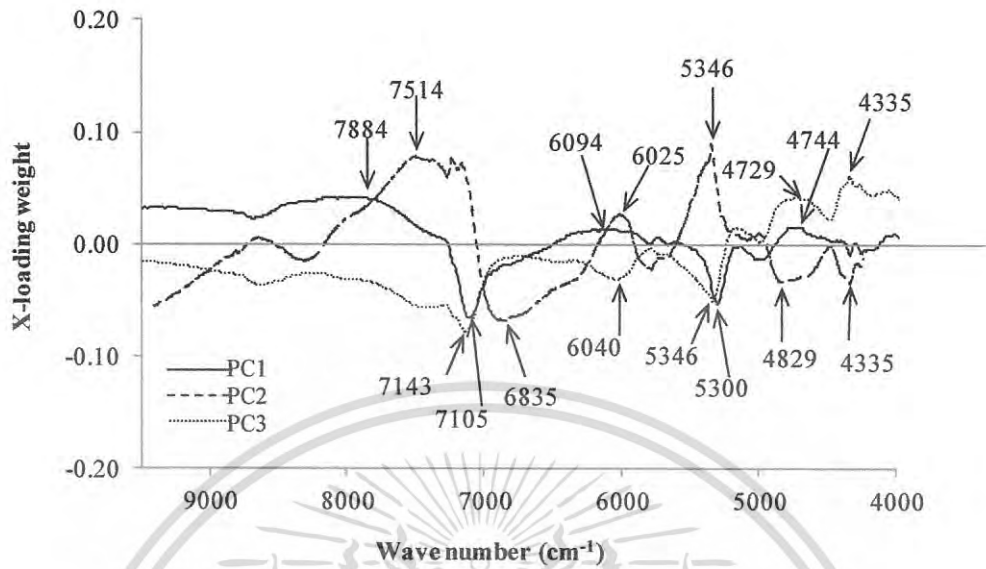
ปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของข้าวขาวหอมมะลิ factor ที่ 1 พบพีคที่สำคัญต่อแบบจำลองที่จำนวนคลื่น 8887, 8285, 7267, 6804 และ 5786 cm^{-1} (1125, 1207, 1376, 1470 และ 1728 nm) factor ที่ 2 ที่จำนวนคลื่น 8910, 8316, 7614, 7128, 6727 และ 5979 cm^{-1} (1122, 1202, 1313, 1403, 1487 และ 1673 nm) และ factor ที่ 3 ที่จำนวนคลื่น 8316, 7545, 6981, 6071 และ 5786 cm^{-1} (1202, 1325, 1432, 1647 และ 1728 nm) ภาพที่ 4.33 แสดงค่า X-loading weight ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของข้าวขาวหอมมะลิ และตารางที่ 4.9 แสดงโครงสร้างพันธะโมเลกุลของจำนวนคลื่นหรือความยาวคลื่นที่มีค่า X-loading weight สูงใน X-loading weight plot ของข้าวขาวหอมมะลิ



ภาพที่ 4.33 X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบข้าวขาวหอมมะลิ

ค่า X-loading weight ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของข้าวกล้องหอมมะลิแสดงในภาพที่ 4.34 ซึ่งแสดง plot ของ X-loading weight เพียง 3 factor แรก ที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองการทำนายมากตามลำดับเช่นเดียวกัน โดย factor ที่ 1 พบพีคที่สำคัญต่อแบบจำลองที่จำนวนคลื่น 7884, 7105, 6094, 5300 และ 4744 cm^{-1} (1268, 1407, 1641, 1887 และ 2108 nm) factor ที่ 2 ที่จำนวนคลื่น 7514, 6835, 6025, 5346, 4829 และ 4335 cm^{-1} (1331, 1463, 1660, 1870, 2071 และ 2307 nm) และ factor ที่ 3 ที่จำนวนคลื่น 7143, 6040, 5346, 4729 และ 4335 cm^{-1} (1440, 1655, 1870, 2115 และ 2307 nm) และ


ตารางที่ 4.10 แสดงโครงสร้างพันธะโมเลกุลของจำนวนคลื่นหรือความยาวคลื่นที่มีค่า X-loading weight สูงใน X-loading weight plot ของข้าวกล้องหอมมะลิ



ภาพที่ 4.34 X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบข้าวกล้องหอมมะลิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ตารางที่ 4.9 การดูดัขบคลื่นที่มีค่า Regression coefficient สูง และ X-loading weight สูง ใน Regression coefficient plot และ X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณ สัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบข้าวขาวหอมมะลิ

จำนวนคลื่น (cm^{-1})	ความยาว คลื่น (nm)	Plot	การสั่นสะเทือนของพันธะ [93]	โครงสร้างทางเคมี [93]
9327	1072	RC	2 x C-H stretching + 2 x C-C stretching	Benzene
8910-8887	1122-1125	PC1,PC2	C-H stretching second overtone	Aromatic
8316-8285	1202-1207	PC1,PC2,PC3	C-H stretching second overtone	CH ₂
8185	1222	RC	C-H stretching second overtone	CH
7614-7545	1313-1325	PC2,RC,PC3	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH ₃
7267	1376	PC1	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH ₂
7128-7082	1403-1412	PC2,RC	O-H stretching first overtone	ROH
6981	1432	PC3	N-H stretching first overtone	CONH ₂
6804	1470	PC1	N-H stretching first overtone	CONHR
6727	1487	PC2	N-H stretching first overtone	CONH ₂
6264	1596	RC	O-H stretching first overtone	Starch, glucose
6071	1647	PC3	C-H stretching first overtone	
6017	1662	RC	C-H stretching first overtone	cis-RCH=CHR
5979	1673	PC2	C-H stretching first overtone	Aromatic
5786	1728	PC1,PC3	C-H stretching first overtone	CH ₂
5547	1803	RC	O-H stretching+ 2 x C-O stretching	Cellulose
4575	2186	RC	CH ₂ asym. stretching+C= stretching	HC=CH
4459	2243	RC	N-H stretching + NH ₃ ⁺ deformation	Amino acid

หมายเหตุ : RC = Regression coefficient, PC1 = PLS factor1, PC2 = PLS factor2, PC3 = PLS factor3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 การดูดูดซับคลื่นที่มีค่า Regression coefficient สูง และ X-loading weight สูง ใน Regression coefficient plot และ X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณ สัตว์ส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบข้าวกล้องหอมมะลิ

จำนวนคลื่น (cm^{-1})	ความยาว คลื่น (nm)	Plot	การสั่นสะเทือนของพันธะ [93]	โครงสร้างทางเคมี [93]
9250	1081	RC	2 x C-H stretching + 2 x C-C stretching	Benzene
8872	1127	RC	C-H stretching second overtone	Aromatic
8224	1216	RC	C-H stretching second overtone	CH_2
7884-7514	1268-1331	PC1,PC2	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH_3
7228	1383	RC	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH_2
7143-7105	1400-1407	PC3,PC1	O-H stretching first overtone	ROH
6904	1448	RC	2 x C-H stretching + C-H deformation	Aromatic
6835	1463	PC2	N-H stretching first overtone	CONH_2
6295	1589	RC	O-H stretching first overtone	Starch, Glucose
6094	1641	PC1	C-H stretching first overtone	$\text{R}-\text{CH}-\text{CH}$ 
6040-6025	1655-1660	PC3,PC2	C-H stretching first overtone	<i>cis</i> - $\text{RCH}=\text{CHR}$
5346-5300	1870-1887	PC2,PC3,PC1	O-H stretching+ 2 x C-O stretching	Starch
4829-4822	2071-2074	PC2,RC	O-H stretching+O-H deformation	ROH,Sucrose,Starch
4744-4729	2108-2115	PC1,PC3	N-H sym. stretching+amide III	CONH_2 , CONHR
4528	2208	RC	N-H stretching+C=O stretching	CONH_2 , Protein
4335	2307	RC,PC2,PC3	C-H stretching + C-H deformation	CH_2

หมายเหตุ : RC = Regression coefficient, PC1 = PLS factor1, PC2 = PLS factor2, PC3 = PLS factor3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ ด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD)

แม้ว่าวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression จะเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีในการทำนายปริมาณสัดส่วนของแมลงที่ปนอยู่ในข้าวหอมมะลิทั้งสองชนิด แต่วิธีนี้ใช้ข้อมูลการดูดซับสเปกตรัมของคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดตลอดทั้งช่วงความยาวคลื่น 800-2500 นาโนเมตร ซึ่งข้อมูลที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทำนายจะรวมข้อมูลความยาวคลื่นที่มีอิทธิพลต่อความแปรปรวนของการทำนายของแบบจำลองและข้อมูลความยาวคลื่นอื่นๆที่ไม่เกี่ยวข้องด้วย ซึ่งหากมีวิธีการที่นำข้อมูลเฉพาะความยาวคลื่นที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างทางเคมีพื้นฐานของข้าวและแมลงมอดข้าวสารมาใช้ น่าจะทำให้แบบจำลองการทำนายมีความแม่นยำและมีเสถียรภาพมากขึ้น รวมถึงเมื่อนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้และการสร้างเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบ จะช่วยลดต้นทุนได้มากเนื่องจากนำเฉพาะความยาวคลื่นที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างทางเคมีพื้นฐานของข้าวและแมลงมอดข้าวสารไปใช้ในการสร้างมือตรวจสอบแทนการใช้ข้อมูลตลอดช่วงความยาวคลื่นของย่านเนียร์อินฟราเรด ซึ่งวิธี Singular Value Decomposition (SVD) เป็นวิธีหนึ่งที่จะนำมาศึกษาความเป็นไปได้ในการตอบสนองมูติฐานดังกล่าว

ขนาดเมทริกซ์ของวิธี SVD ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิทั้งสองชนิดที่ระดับการปนเช่นเดียวกับวิธี PLS Regression เป็นขนาด 6x2 จากผลการวิเคราะห์พบว่าจำนวนคลื่นย่านเนียร์อินฟราเรดที่ดูดซับโครงสร้างหลักของข้าวหอมมะลิ (Starch) ได้แก่ 5263, 5000 และ 4808 cm^{-1} (1900, 2000 และ 2080 nm) และจำนวนคลื่นย่านเนียร์อินฟราเรดที่ดูดซับโครงสร้างหลักของมอดข้าวสาร (Lipid และ Chitin) ได้แก่ 8850, 8489 และ 5988 cm^{-1} (1130, 1178 และ 1670 nm) วิธีการปรับแต่งสเปกตรัมที่เหมาะสมและให้ผลการวิเคราะห์ทำนายที่ดีที่สุดได้แก่วิธี Base line offset โดยมีค่า Coefficient of determination of validation set (r^2) เท่ากับ 0.97, ค่า Root mean square error of prediction (RMSEP) 0.012 g-weevils/100g-rice, ค่า Ratio of standard error of prediction to the standard deviation (RPD) เท่ากับ 5.71 และค่า Average of difference between actual value and NIR value (Bias) เท่ากับ -0.003 g-weevils/100g-rice ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.11

ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ทำนายปริมาณสัดส่วนของมอดข้าวสารในข้าวกล้องหอมมะลิพบว่าจำนวนคลื่นที่ดูดซับโครงสร้างหลักของข้าวหอมมะลิ (Starch) จะสามารถใช้ชุดเดียวกับข้าวขาวหอมมะลิได้ ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องมือตรวจวิเคราะห์ต่อไป สำหรับชุดจำนวนคลื่นที่ดูดซับโครงสร้างหลักของด้วงงวงข้าว (Lipid และ Chitin) จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยได้แก่จำนวนคลื่น 8850, 8489 และ 6667 cm^{-1} (1130, 1178 และ 1500 nm) แบบจำลองทำนายที่ได้จะมีความแม่นยำต่ำกว่าข้าวขาวหอมมะลิเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยมีค่า r^2 เท่ากับ 0.96, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.013 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 5.39 และค่า Bias เท่ากับ 0.002 g-weevils/100g-rice โดยวิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่เหมาะสมและให้ผลการวิเคราะห์ทำนายที่ดีที่สุดได้แก่คือวิธี Standard Normal Variate (SNV) ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าทางสถิติของการสร้างแบบจำลองทำนายสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Singular Value Decomposition

Type of rice	Wave number (rice : rice weevil)	Pre-treatment	r^2	RMSEP	RPD	Bias
MHR	5263,5000,4808:8850,8489,5988 cm^{-1} (1900,2000,2080:1130,1178,1670 nm)	Base line offset	0.97	0.012	5.71	-0.003
BHR	5263,5000,4808:8850,8489,6667 cm^{-1} (1900,2000,2080:1130,1178,1500 nm)	SNV	0.96	0.013	5.39	0.002

หมายเหตุ :

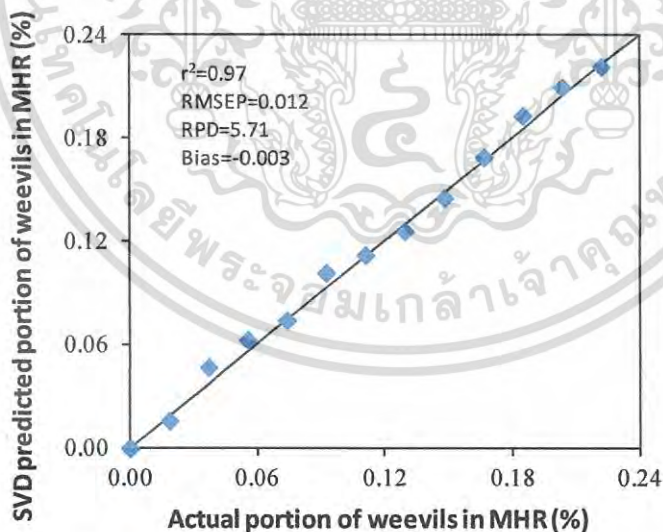
MHR = Milled Hom Mali rice, BHR = Brown Hom Mali rice, SNV = Standard normal variate

r^2 = Coefficient of determination of validation set, RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

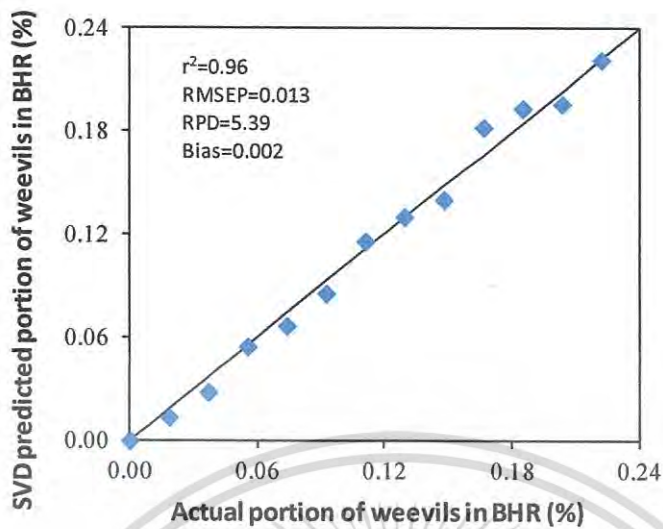
Bias = Average of difference between actual value and NIR value

ภาพที่ 4.35 และภาพที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทำนายและค่าการนับจริงของปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของแมลงมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของตัวอย่างข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิ มีการกระจายตัวของข้อมูลในวงแคบและมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของการทำนายด้วยแบบจำลองทั้งสองแบบที่ได้



ภาพที่ 4.35 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในข้าวขาวหอมมะลิโดยวิธี Singular Value Decomposition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.36 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในข้าวกล้องหอมมะลิโดยวิธี Singular Value Decomposition

เมื่ออ้างอิงตามเอกสารของ Williams (2007) [100] ตามตารางที่ 2.3 และ 2.4 ของบทที่ 2 ซึ่งได้กำหนดระดับการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้งานโดยพิจารณาจากค่า r^2 และค่า RPD ทำให้สรุปได้ว่าการใช้วิธี Singular Value Decomposition มีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบปริมาณมอดข้าวสารทั้งในข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ เพื่อกำหนดปริมาณสารรมฆ่าแมลง การประกันคุณภาพข้าว การตรวจสอบเพื่อควบคุมและรับรองคุณภาพสินค้าข้าวที่มีการนำเข้าและส่งออกได้

4.3 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD)

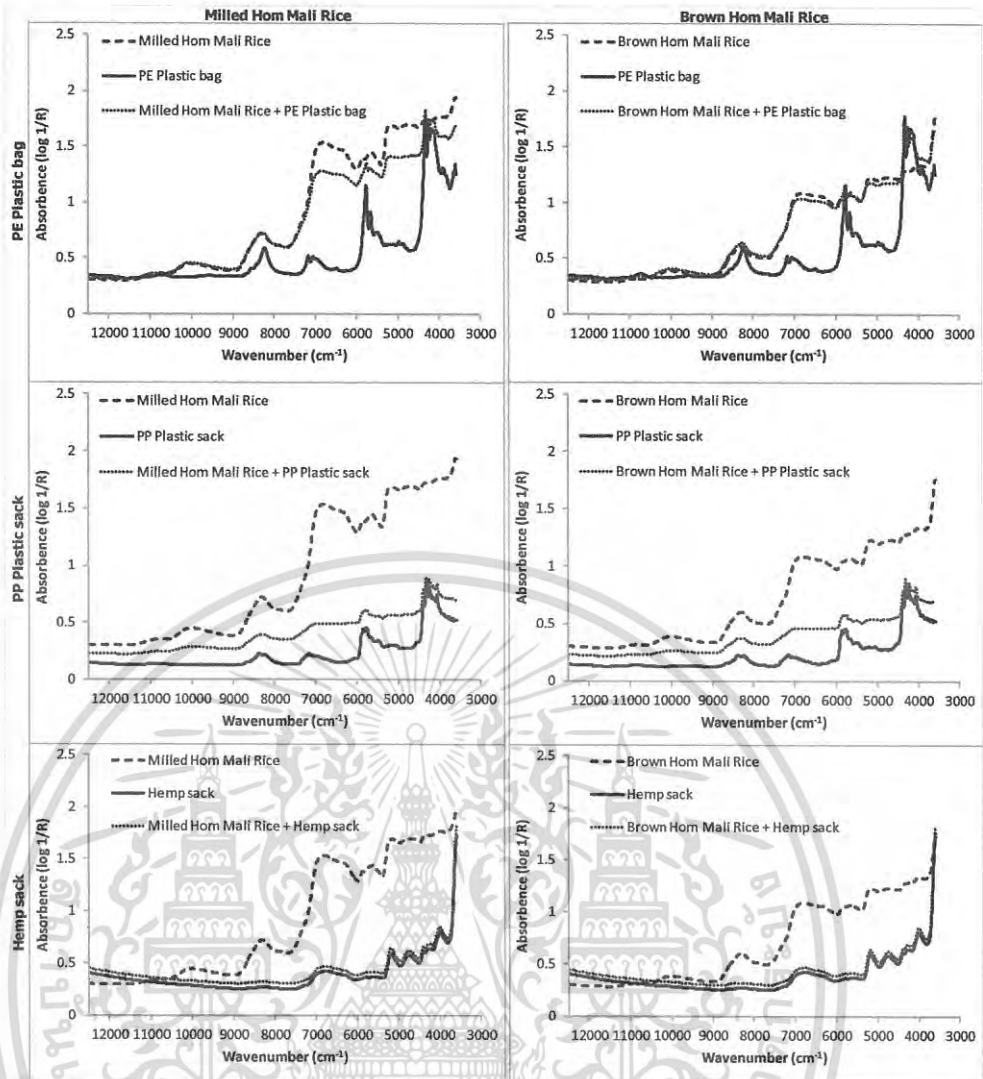
4.3.1 การศึกษาอิทธิพลของวัสดุบรรจุภัณฑ์ข้าวต่อการส่องผ่านของคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรด

ผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิที่มีการส่งจำหน่ายทั้งตลาดในประเทศและตลาดต่างประเทศ มีทั้งหมด 3 ชนิดได้แก่ ผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิชนิดชนิดถุงพลาสติก PE ชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP และชนิดกระสอบป่าน ผลการทดลองในส่วนแรกคือการศึกษาความสามารถในการส่องผ่านของคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดสู่ตัวอย่างข้าวในบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ โดยจากการทดลองทำให้ได้เส้นสเปกตรัมของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบที่ผ่านการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมเพื่อลดความแปรปรวนอันเกิดจากผลกระทบที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมและปัจจัยต่างๆ ซึ่งทุกวิธีการปรับแต่งให้ลักษณะเส้นสเปกตรัมในแนวทางเดียวกัน โดยผลลัพธ์ที่ได้พบว่าตัวอย่างทดสอบของข้าวทั้งสองชนิดที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด Polyethylene (PE plastic bag) มีแนวโน้มที่สามารถดูดซับคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดได้ดี โดยเส้นสเปกตรัมมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับเส้นสเปกตรัมของตัวอย่างข้าวบริสุทธิ์ที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ สำหรับตัวอย่างข้าวทั้งสองชนิดที่บรรจุในกระสอบพลาสติกชนิด Polypropylene (PP plastic sack) คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดสามารถส่องผ่านได้แต่น้อยกว่าตัวอย่างข้าวที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด PE โดยเส้นสเปกตรัมมีแนวโน้มที่ต่างจากเส้นสเปกตรัมของตัวอย่างข้าวบริสุทธิ์ที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์มากขึ้น ในขณะที่คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดสามารถส่องผ่านไปที่ตัวอย่างข้าวในบรรจุภัณฑ์ชนิดกระสอบป่าน (Hemp sack) ได้น้อยมาก โดยพิจารณาได้จากรูปแบบของเส้นสเปกตรัมที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นสเปกตรัมของวัสดุกระสอบป่าน ผลการทดลองทั้งหมดแสดงในภาพที่ 4.37 ซึ่งเป็นเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี Multiplicative Scatter Correction (MSC) จากผลการทดลองในส่วนแรกทำให้สามารถสรุปได้ว่าการนำเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมาใช้ในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ข้าวมีแนวโน้มที่สามารถใช้ได้ เฉพาะผลิตภัณฑ์ข้าวชนิดถุงพลาสติก PE และกระสอบพลาสติก PP เท่านั้น สำหรับผลิตภัณฑ์ข้าวชนิดกระสอบป่านไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดมีความสามารถทะลุผ่านชั้นวัสดุกระสอบไปที่ข้าวหอมมะลิได้ต่ำ โดยตัวอย่างทดสอบข้าวที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด PE และกระสอบพลาสติกชนิด PP จะนำไปทดสอบการทำนายตรวจสอบระดับปริมาณการปนของมอดข้าวสารในการทดลองส่วนที่สองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.37 แผนภูมิแสดงเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี MSC ของข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิบริสุทธิ์, เส้นสเปกตรัมของข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ และเส้นสเปกตรัมของวัสดุบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ

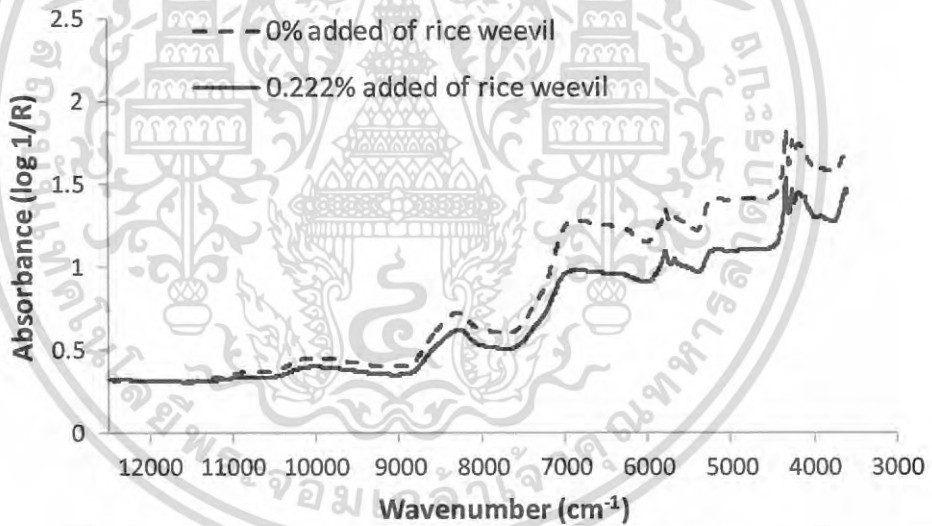
4.3.2 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิ

สำหรับการทดลองในส่วนที่สองคือการทำนายตรวจสอบปริมาณสัดส่วนของแผลงมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE และกระสอบพลาสติกสาน PP ที่สามารถตรวจสอบได้ตามการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 โดยการทำนายตรวจสอบได้ทำการศึกษา 2 วิธี คือวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD) ผลการศึกษามีดังนี้

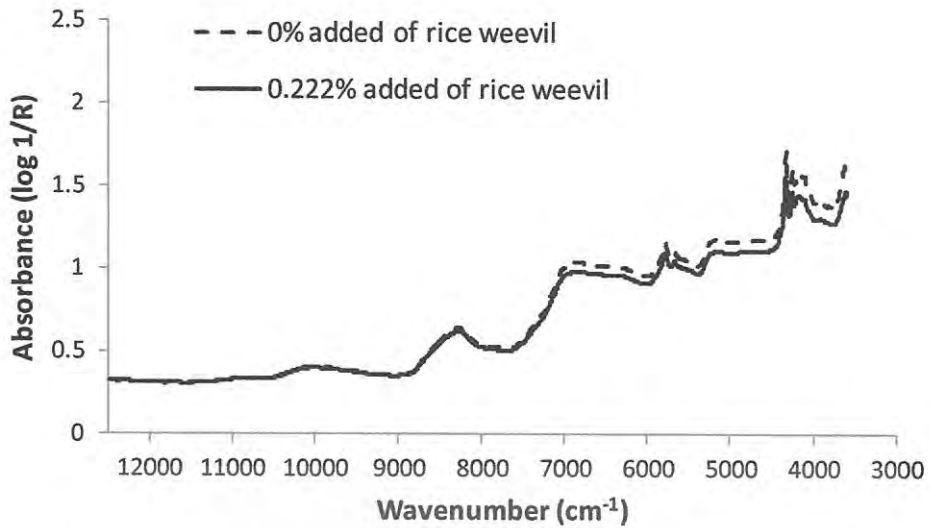
4.3.2.1 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

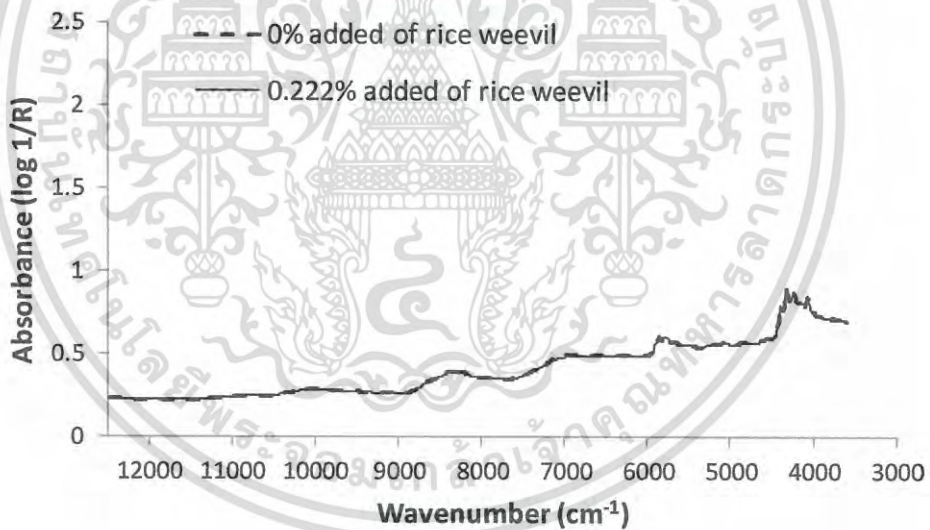
ผลการทดลองในการตรวจสอบทำนายปริมาณสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักของแมลงมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิ พบว่าเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งเพื่อลดความแปรปรวน อันเกิดจากผลกระทบที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมและปัจจัยต่างๆ ของตัวอย่างข้าวหอมมะลิทั้งสองชนิดที่บรรจุอยู่ในถุงพลาสติก PE ที่มีมอดข้าวสารปน จะแตกต่างจากเส้นสเปกตรัมของตัวอย่างข้าวหอมมะลิบริสุทธิ์ที่ไม่มีมอดข้าวสารปน และจะชัดเจนมากขึ้นเมื่อระดับการปนของมอดข้าวสารมากขึ้น ในขณะที่เมื่อพิจารณาเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งของตัวอย่างข้าวหอมมะลิทั้งสองชนิดที่บรรจุอยู่ในกระสอบพลาสติก PP ที่มีมอดข้าวสารปน จะแตกต่างเพียงเล็กน้อยจากเส้นสเปกตรัมของตัวอย่างข้าวหอมมะลิบริสุทธิ์ที่ไม่มีมอดข้าวสารปนในทุกะดับการปน ซึ่งเป็นผลจากอิทธิพลของคุณสมบัติการไม่โปร่งแสงของวัสดุกระสอบพลาสติกสานชนิด PP ที่ยอมให้แสงผ่านไปที่ตัวอย่างข้าวทดสอบที่น้อยกว่าวัสดุชนิดถุงพลาสติก PE โดยผลการทดลองเปรียบเทียบเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการต่างๆ จะให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน การปรับแต่งเส้นสเปกตรัมด้วยวิธี MSC เป็นวิธีการหนึ่ง que แสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนของเส้นสเปกตรัมตัวอย่างข้าวทั้งสองชนิดที่ไม่มีมอดข้าวสารปนและมีมอดข้าวสารปนที่สัดส่วนโดยน้ำหนักระดับ 0.222 % ในบรรจุภัณฑ์ทั้งสองชนิด ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.38-ภาพที่ 4.41



ภาพที่ 4.38 แผนภูมิแสดงเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี MSC ของตัวอย่างข้าวขาวหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติก PE ที่ไม่มีมอดข้าวสารปนและมีมอดข้าวสารปนในระดับสัดส่วน 0.222% โดยน้ำหนัก

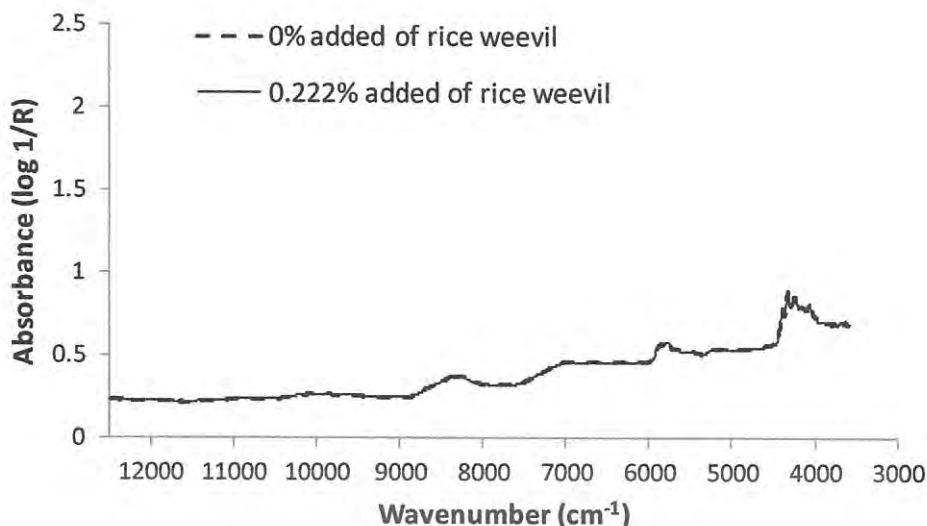


ภาพที่ 4.39 แผนภูมิแสดงเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี MSC ของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติก PE ที่ไม่มีแมลงมอดข้าวสารปนและที่มีแมลงมอดข้าวสารปนในระดับสัดส่วน 0.222% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.40 แผนภูมิแสดงเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี MSC ของตัวอย่างข้าวขาวหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์กระสอบพลาสติกสาน PP ที่ไม่มีแมลงมอดข้าวสารปนและที่มีแมลงมอดข้าวสารปนในระดับสัดส่วน 0.222% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.41 แผนภูมิแสดงเส้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี MSC ของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์กระสอบพลาสติกชนิด PP ที่ไม่มีแมลงมอดข้าวสารปนและที่มีแมลงมอดข้าวสารปนในระดับสัดส่วน 0.222% โดยน้ำหนัก

ผลการวิเคราะห์สร้างแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนของมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติกชนิด PE พบว่าช่วงความยาวคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายอยู่ในช่วงจำนวนคลื่น $9404-5446 \text{ cm}^{-1}$ (1,063-1,836 นาโนเมตร) และโดยจำนวน PLS factors ที่เหมาะสมเท่ากับ 9 แบบจำลองทำนายที่สร้างขึ้นมีค่า R^2 เท่ากับ 0.94, ค่า RMSEE เท่ากับ 0.014 g-weevils/100g-rice และสำหรับชุดทดสอบแบบจำลองทำนายจะมีค่า r^2 เท่ากับ 0.93, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.016 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 3.92 และค่า Bias เท่ากับ 0.005 g-weevils/100g-rice วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือวิธี SNV ผลการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.12

ในขณะที่ผลการวิเคราะห์สร้างแบบจำลองทำนายปริมาณมอดข้าวสารของข้าวกล้องหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์ถุงพลาสติกชนิด PE พบว่าช่วงความยาวคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายอยู่ในช่วงจำนวนคลื่น $9404-7498 \text{ cm}^{-1}$ (1,063-1,334 นาโนเมตร) และในช่วงจำนวนคลื่น $6102-4243 \text{ cm}^{-1}$ (1,639-2,357 นาโนเมตร) โดยจำนวน PLS factors ที่เหมาะสมเท่ากับ 8 แบบจำลองทำนายที่สร้างขึ้นจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.86, ค่า RMSEE เท่ากับ 0.022 g-weevils/100g-rice และสำหรับชุดทดสอบแบบจำลองทำนายจะมีค่า r^2 เท่ากับ 0.86, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.022 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 3.00 และค่า Bias เท่ากับ 0.008 g-weevils/100g-rice วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือวิธี MSC ผลการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์สร้างแบบจำลองทำนายปริมาณมอดข้าวสารของข้าวขาวหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์กระสอบพลาสติกชนิด PP พบว่าช่วงความยาวคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายอยู่ในช่วงจำนวนคลื่น $9404\text{-}4243\text{ cm}^{-1}$ ($1,063\text{-}2,357$ นาโนเมตร) โดยจำนวน PLS factors ที่เหมาะสมเท่ากับ 8 แบบจำลองทำนายที่สร้างขึ้นจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.88, ค่า RMSEE เท่ากับ 0.020 g-weevils/100g-rice และสำหรับชุดทดสอบแบบจำลองทำนายจะมีค่า r^2 เท่ากับ 0.87, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.021 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 3.05 และค่า Bias เท่ากับ 0.006 วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือวิธี SNV ผลการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.12

และผลการวิเคราะห์สร้างแบบจำลองทำนายปริมาณแมลงมอดข้าวสารของข้าวกล้องหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์กระสอบพลาสติกชนิด PP พบว่าช่วงความยาวคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายอยู่ในช่วงจำนวนคลื่น $9404\text{-}7498\text{ cm}^{-1}$ ($1,064\text{-}1,334$ นาโนเมตร) และในช่วงจำนวนคลื่น $5454\text{-}4598\text{ cm}^{-1}$ ($1,834\text{-}2,175$ นาโนเมตร) โดยจำนวน PLS factors ที่เหมาะสมเท่ากับ 8 แบบจำลองทำนายที่สร้างขึ้นจะมีค่า R^2 เท่ากับ 0.77, ค่า RMSEE เท่ากับ 0.028 g-weevils/100g-rice และสำหรับชุดทดสอบแบบจำลองทำนายจะมีค่า r^2 เท่ากับ 0.75, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.029 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 2.04 และค่า Bias เท่ากับ 0.009 วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือวิธี MSC ผลการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าทางสถิติของการสร้างแบบจำลองทำนายสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ โดยวิธี Partial Least Squares Regression

Type of rice	Type of packaging	Wave number Ranges	Pre-treatment	PLS Factors	R ²	r ²	RMSEE	RMSEP	RPD	Bias
MHR	PE	9404-5446 cm ⁻¹ (1063-1836 nm)	SNV	9	0.94	0.93	0.014	0.016	3.92	0.005
	PP	9404-4243 cm ⁻¹ (1063-2357 nm)	SNV	8	0.88	0.87	0.020	0.021	3.05	0.006
BHR	PE	9404-7498 cm ⁻¹ (1063-1334 nm)	MSC	8	0.86	0.86	0.022	0.022	3.00	0.008
		6102-4243 cm ⁻¹ (1639-2357 nm)								
	PP	9404-7498 cm ⁻¹ (1064-1334 nm)	MSC	8	0.77	0.75	0.028	0.029	2.04	0.009
		5454-4598 cm ⁻¹ (1834-2175 nm)								

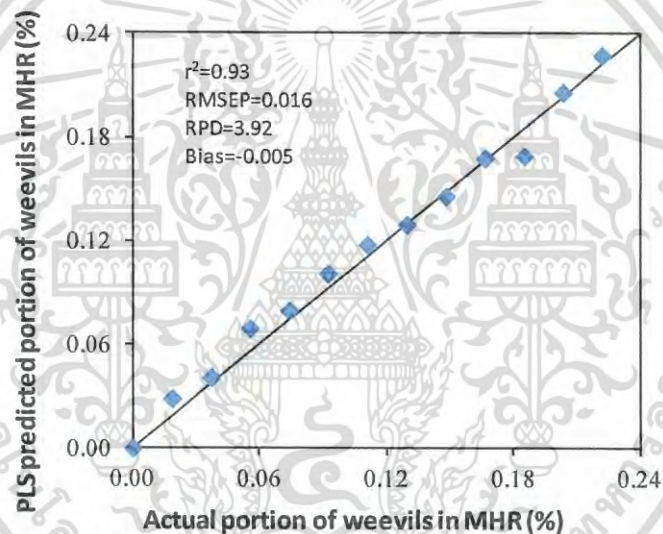
หมายเหตุ :

MHR = Milled Hom Mali rice, BHR = Brown Hom Mali rice, SNV = Standard normal variate
 MSC = Multiplicative Scatter Correction, R² = Coefficient of determination of calibration set
 r² = Coefficient of determination of validation set, RMSEE = Root mean square error of estimation
 RMSEP = Root mean square error of prediction
 RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation
 Bias = Average of difference between actual value and NIR value

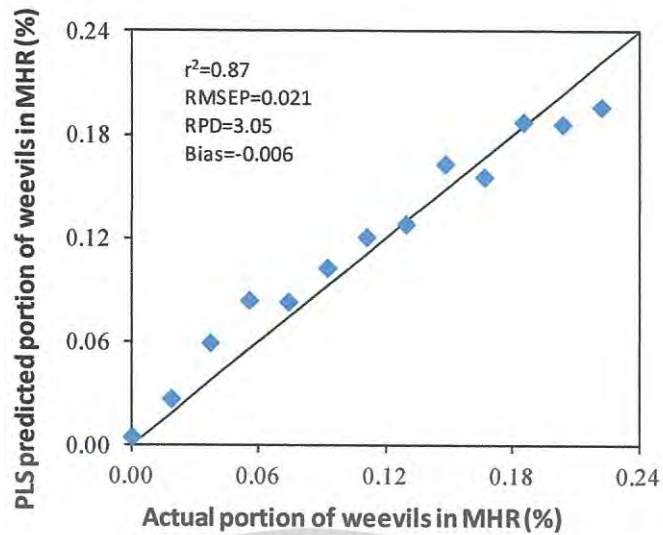
และจากการนำค่าการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิที่ได้จากชุดทดสอบแบบจำลองทำนาย มาหาความสัมพันธ์กับสัดส่วนโดยน้ำหนักของค่าการนับจริงของจำนวนแมลงมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวทดสอบที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์ทั้งสองชนิด ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปแบบแผนภูมิ 1:1 (One per one line) ระหว่างค่าการนับจริงกับค่าทำนาย ซึ่งพบว่าตัวอย่างทดสอบข้าวขาวหอมมะลิในผลิตภัณฑ์ถุงพลาสติก PE ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดโดยแผนภูมิแสดงข้อมูลที่มีการกระจายตัวน้อยที่สุด และตัวอย่างทดสอบข้าวกล้องหอมมะลิในผลิตภัณฑ์กระสอบพลาสติก PP ให้ความสัมพันธ์ที่ต่ำที่สุดโดยแผนภูมิแสดงข้อมูลที่มีการกระจายตัวมากที่สุด สำหรับตัวอย่างทดสอบข้าวขาวหอมมะลิในผลิตภัณฑ์กระสอบพลาสติก PP และตัวอย่างทดสอบข้าวกล้องหอมมะลิใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

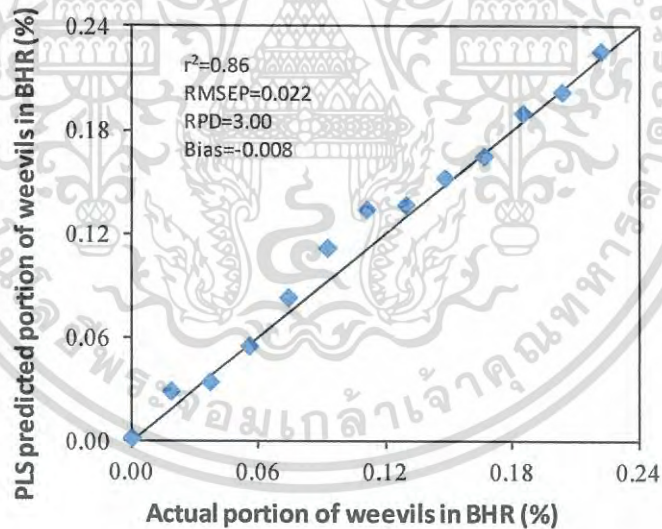
ผลิตภัณฑ์ถุงพลาสติก PE จะให้ค่าความสัมพันธ์ของค่าการนับจริงและค่าการทำนายที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.42-4.45 และเมื่ออ้างอิงตามเอกสารของ Williams (2007) [100] ตามตารางที่ 2.3 และ 2.4 ของบทที่ 2 ซึ่งได้กำหนดระดับการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้งาน โดยพิจารณาจากค่า r^2 และค่า RPD ทำให้สรุปได้ว่าการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบปริมาณมอดข้าวสารเพื่อกำหนดปริมาณสารร่ฆ่าแมลง การประกันคุณภาพข้าวและการคัดแยกผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีมอดข้าวสารอาศัยออกจากผลิตภัณฑ์ข้าวที่สะอาด ในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE และมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในระดับงานวิจัย และในการคัดแยกผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีมอดข้าวสารอาศัยออกจากผลิตภัณฑ์ข้าวที่สะอาด ในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE และผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP ได้เบื้องต้นแบบหยาบเท่านั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบด้วยแรงงานหรือวิธีการอื่นอีกครั้ง หากต้องการผลการตรวจสอบที่ละเอียดต่อไป แต่ไม่แนะนำเทคนิคนี้ในการประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP เนื่องจากแบบจำลองทำนายที่พัฒนาขึ้น มีผลการทำนายตรวจสอบตัวอย่างทดสอบที่ต่ำกว่าการนำไปประยุกต์ใช้งาน



ภาพที่ 4.42 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE โดยวิธี PLS regression

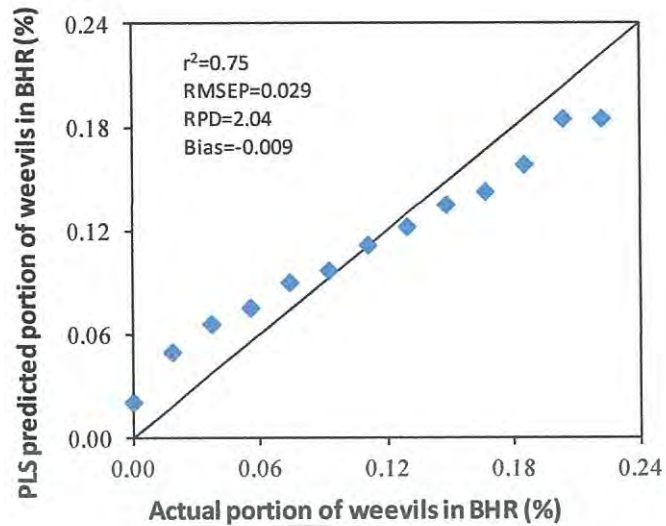


ภาพที่ 4.43 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิกระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี PLS regression



ภาพที่ 4.44 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิถุงพลาสติก PE โดยวิธี PLS regression

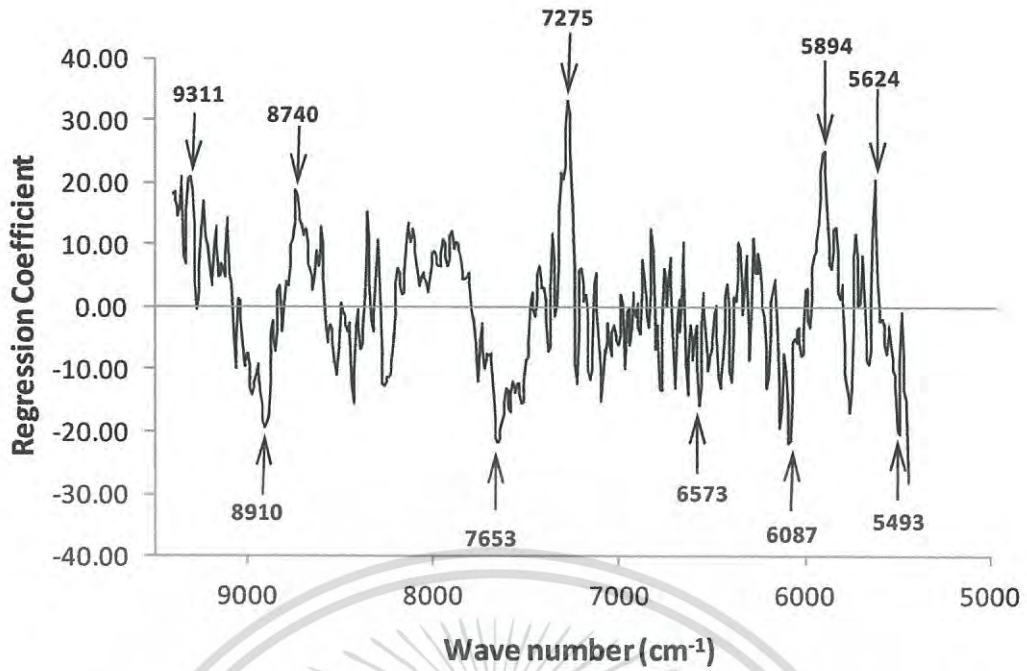
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.45 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิกระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี PLS regression

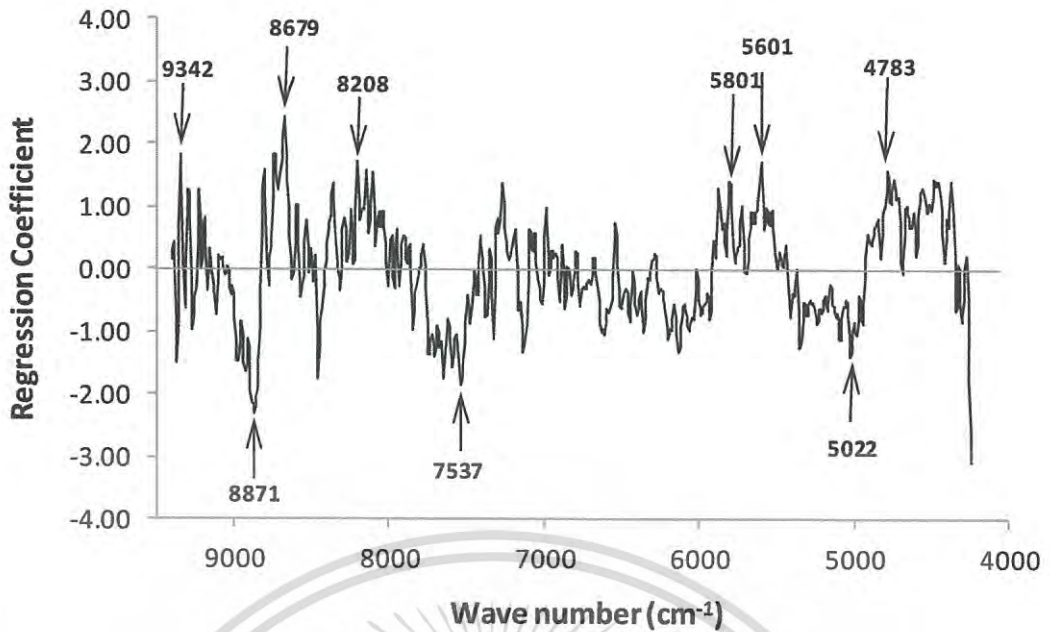
จากผลการวิเคราะห์ซึ่งใช้ค่าสัมบูรณ์ของค่า Regression coefficient ในแผนภูมิ Regression coefficient plot เป็นตัวชี้วัด สำหรับการตรวจสอบปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารโดยน้ำหนักในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลินิดสูงพลาสติก PE พบว่าได้ปรากฏช่วงคลื่นที่สำคัญของแบบจำลองทำนายที่จำนวนคลื่น 9311, 8910, 8740, 7653, 7275, 6573, 6087, 5894, 5624 และ 5493 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 1074, 1122, 1144, 1307, 1375, 1522, 1643, 1697, 1778 และ 1820 nm) ดังแสดงในภาพที่ 4.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.46 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE

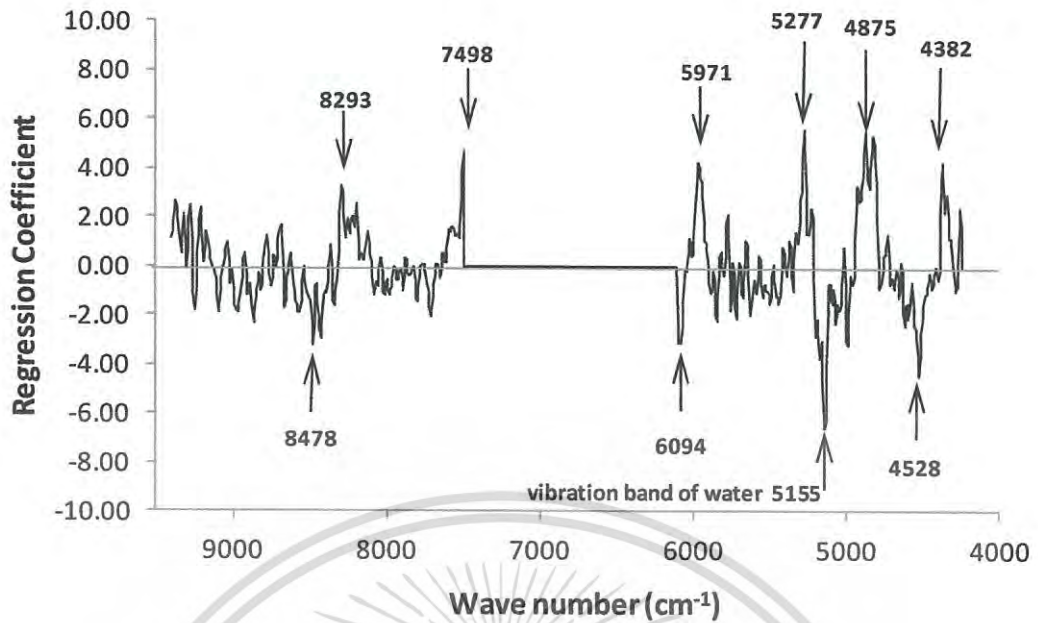
ช่วงความยาวคลื่นที่สำคัญสำหรับการคัดแยกมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP ปรากฏที่จำนวนคลื่น 9342, 8871, 8679, 8208, 7537, 5801, 5601, 5022 และ 4783 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 1070, 1127, 1152, 1218, 1327, 1724, 1786, 1991 และ 2091 nm) ดังแสดงในภาพที่ 4.47



ภาพที่ 4.47 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนัก มอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP

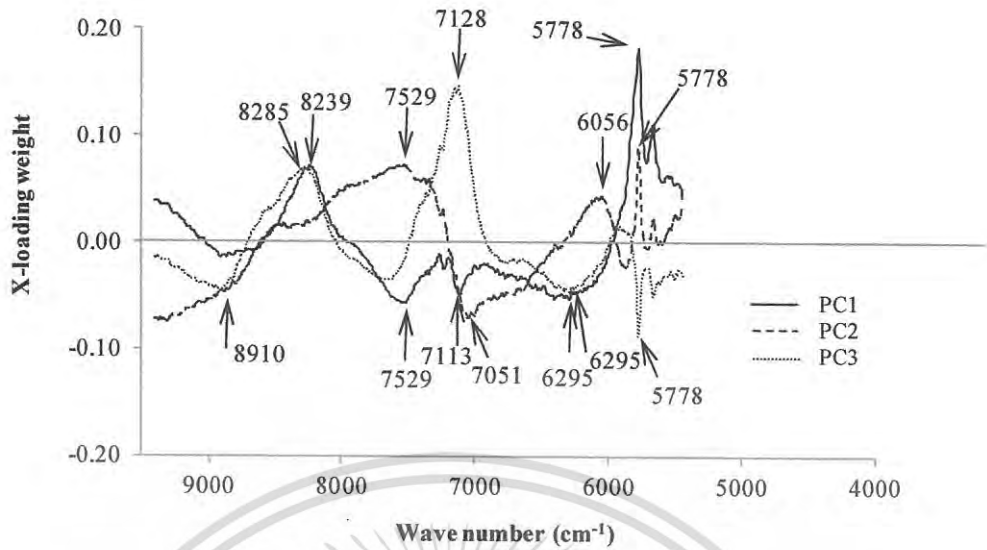
ช่วงคลื่นที่สำคัญสำหรับการคัดแยกมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิด ถุงพลาสติก PE ปรากฏที่จำนวนคลื่น 8478, 8293, 7498, 6094, 5971, 5277, 4875, 4528 และ 4382 cm⁻¹ (ความยาวคลื่น 1180, 1205, 1334, 1640, 1675, 1895, 2050, 2208 และ 2282 nm) นอกจากนั้นได้ปรากฏจำนวนคลื่น 5155 cm⁻¹ (1940 nm) ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของน้ำ ซึ่งไม่ถูก ใช้ในการสร้างแบบจำลองที่ทำการศึกษานี้เช่นกันดังแสดงในภาพที่ 4.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



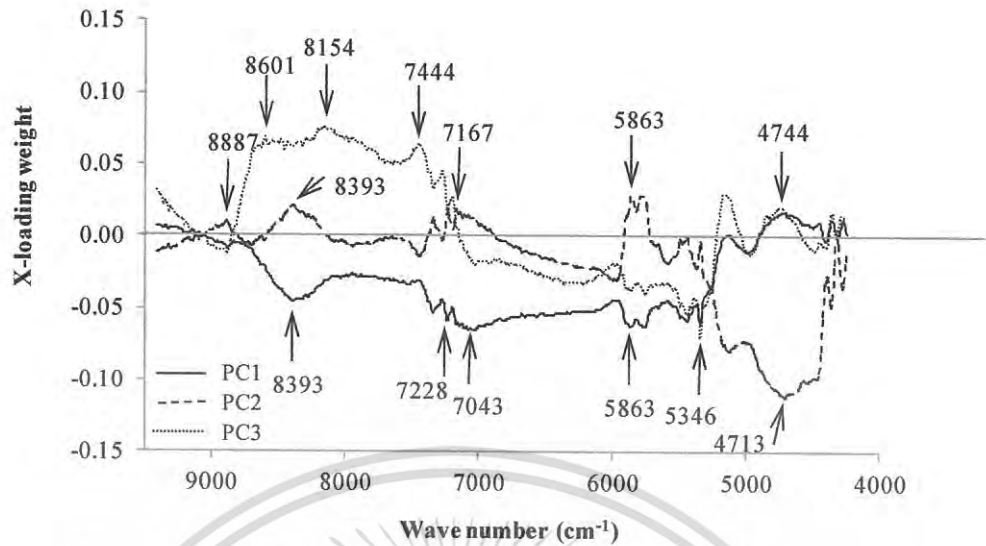
ภาพที่ 4.48 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนัก มอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE

ผลการวิเคราะห์ช่วงคลื่นที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองการทำนายกรณีปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารโดยน้ำหนักในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE ตามค่า X-loading weight ใน X-loading weight plot 3 factor แรก โดย factor ที่ 1 พบพีคที่สำคัญปรากฏที่จำนวนคลื่น 8239, 7529, 7113, 6295 และ 5778 cm^{-1} (1214, 1328, 1406, 1589, และ 1731 nm) factor ที่ 2 พบพีคที่สำคัญปรากฏที่จำนวนคลื่น 7529, 7051, 6056 และ 5778 cm^{-1} (1328, 1418, 1651, และ 1731 nm) และ factor ที่ 3 พบพีคที่สำคัญปรากฏที่จำนวนคลื่น 8910, 8285, 7128, 6295 และ 5778 cm^{-1} (1122, 1207, 1403, 1589 และ 1731 nm) ดังแสดงในภาพ 4.49



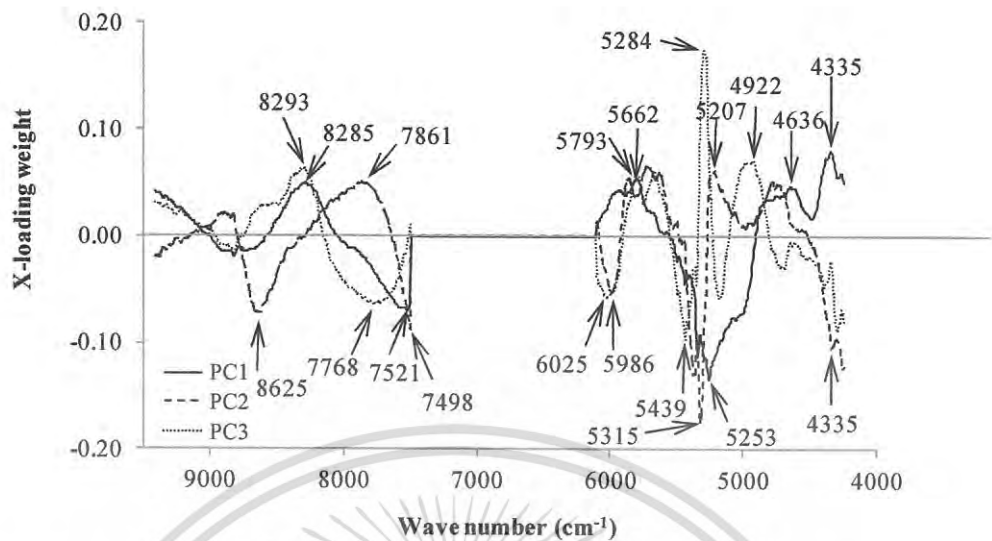
ภาพที่ 4.49 X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE

และผลการวิเคราะห์ช่วงคลื่นที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารโดยน้ำหนักในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสถาน PP ตามค่า X-loading weight ใน X-loading weight plot 3 factor แรก โดย factor ที่ 1 พบพีคที่สำคัญปรากฏที่จำนวนคลื่น 8393, 7043, 7228 และ 5863 cm^{-1} (1191, 1420, 1383 และ 1706 nm) factor ที่ 2 พบพีคที่สำคัญปรากฏที่จำนวนคลื่น 8887, 8393, 7167, 5863 และ 4713 cm^{-1} (1125, 1191, 1395, 1706 และ 2122 nm) และ factor ที่ 3 พบพีคที่สำคัญปรากฏที่จำนวนคลื่น 8601, 8154, 7444, 5346 และ 4744 cm^{-1} (1163, 1226, 1343, 1870 และ 2108 nm) ดังแสดงในภาพ 4.50



ภาพที่ 4.50 X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP

ผลการวิเคราะห์ช่วงคลื่นที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารโดยน้ำหนักในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE ตามค่า X-loading weight ใน X-loading weight plot 3 factor แรก โดย factor ที่ 1 พบพีคที่สำคัญปรากฏที่จำนวนคลื่น 8285, 7521, 5793, 5253, 4636 และ 4335 cm^{-1} (1207, 1330, 1726, 1903, 2157 และ 2307 nm) factor ที่ 2 พบพีคที่สำคัญปรากฏที่จำนวนคลื่น 8625, 7861, 7498, 5986, 5315, 5207 และ 4335 cm^{-1} (1160, 1272, 1334, 1670, 1881, 1920 และ 2307 nm) และ factor ที่ 3 พบพีคที่สำคัญปรากฏที่จำนวนคลื่น 8293, 7768, 6025, 5662, 5439, 5284 และ 4922 cm^{-1} (1205, 1287, 1660, 1766, 1839, 1892 และ 2032 nm) ดังแสดงในภาพ 4.51




ภาพที่ 4.51 X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE

ช่วงคลื่นที่พบในค่า Regression coefficient และค่า X-loading weight ที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับช่วงคลื่นที่พบในค่า Regression coefficient และค่า X-loading weight ที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ที่ได้มีการศึกษาในหัวข้อ 4.2.1 พบว่ามีลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่ใกล้เคียงเช่นเดียวกัน โดยสามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ โครงสร้างที่เป็นพันธะไฮโดรคาร์บอน (C-H) ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีจำนวนมากสุด โดยเปลือกแข็งของเมล็ดมอดข้าวสารจะพบโครงสร้างของพันธะไฮโดรคาร์บอนประเภท CH_2 และ CH_3 อยู่เป็นส่วนใหญ่ และโครงสร้างประเภท Aromatic, Benzene และ Cellulose กลุ่มพันธะ C-H จะพบในโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตทั่วไป นอกจากนั้นจะพบโครงสร้างทางเคมีกลุ่ม O-H จำพวก Starch, ROH และ Cellulose กลุ่มพันธะ O-H ซึ่งพบในโครงสร้างส่วนประกอบของเมล็ดข้าว และโครงสร้างทางเคมีกลุ่ม N-H เช่น CONH , CONH_2 , CONHR ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้เป็นโครงสร้างของประเภทกลุ่มโปรตีนและกรดอะมิโนที่พบได้ทั่วไปในโครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์ รวมถึงพบในสารประกอบโคตินในเมล็ดมอดข้าวสารด้วยเช่นกัน โดยโครงสร้างต่างๆที่พบและมีอิทธิพลต่อแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวทั้ง 3 ชนิด แสดงไว้ในตารางที่ 4.13-4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 การดูดัชนีคลื่นที่มีค่า Regression coefficient สูง และ X-loading weight สูง ใน Regression coefficient plot และ X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณ สัดส่วนมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE

จำนวนคลื่น (cm^{-1})	ความยาว คลื่น (nm)	Plot	การสั่นสะเทือนของพันธะ [97]	โครงสร้างทางเคมี [97]
9311	1074	RC	2 x C-H stretching + 2 x C-C stretching	Benzene
8910-8740	1122-1144	RC,PC3	C-H stretching second overtone	Aromatic
8285-8239	1207-1214	PC1,PC3	C-H stretching second overtone	CH_2
7653-7529	1307-1328	RC,PC1,PC2	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH_3
7275	1375	RC	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH_2
7128-7113	1403-1406	PC3,PC1	O-H stretching first overtone	ROH
7051	1418	PC2	2 x C-H stretching + C-H deformation	Aromatic
6573	1522	RC	N-H stretching first overtone	CONH_2
6295	1589	PC1,PC3	O-H stretching first overtone	Starch, Glucose
6087-6056	1643-1651	RC,PC2	C-H stretching first overtone	R-CH-CH 
5894	1697	RC	C-H stretching first overtone	CH_3
5778	1731	PC1,PC2,PC3	C-H stretching first overtone	CH_2
5624	1778	RC	C-H stretching first overtone	Cellulose
5493	1820	RC	O-H stretching+ 2 x C-O stretching	Cellulose

หมายเหตุ : RC = Regression coefficient, PC1 = PLS factor1, PC2 = PLS factor2, PC3 = PLS factor3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

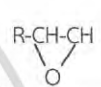
ตารางที่ 4.14 การดูซับคลื่นที่มีค่า Regression coefficient สูง และ X-loading weight สูง ใน Regression coefficient plot และ X-loading weight plot ของแบบจำลองทำนายปริมาณ สัตส่วนมอดข้าวสารปนในตัวอย่างทดสอบผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP

จำนวนคลื่น (cm^{-1})	ความยาว คลื่น (nm)	Plot	การสั่นสะเทือนของพันธะ [97]	โครงสร้างทางเคมี [97]
9342	1070	RC	2 x C-H stretching + 2 x C-C stretching	Benzene
8887-8871	1125-1127	PC2,RC	C-H stretching second overtone	Aromatic
8679	1152	RC	C-H stretching second overtone	CH_3
8601	1163	PC3	C-H stretching second overtone	$\text{HC}=\text{CH}$
8393	1191	PC1,PC2	C-H stretching second overtone	CH_3
8208	1218	RC	C-H stretching second overtone	CH_2
8154	1226	PC3	C-H stretching second overtone	CH
7537-7444	1327-1343	RC,PC3	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH_3
7228-7167	1383-1395	PC1,PC2	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH_2
7043	1420	PC1	O-H stretching first overtone	ArOH
5863	1706	PC1,PC2	C-H stretching first overtone	CH_3
5801	1724	RC	C-H stretching first overtone	CH_2
5601	1786	RC	C-H stretching first overtone	Cellulose
5346	1870	PC3	O-H stretching+ 2 x C-O stretching	Starch
5022	1991	RC	2 x O-H deformation + C-O deformation	Starch
4783	2091	RC	2 x O-H deformation + 2 x C-O stretching	Starch
4744	2108	PC3	N-H sym. stretching+amide III N-H stretching + C=O	CONH_2 , CONHR
4713	2122	PC2	stretching	Amino acid

หมายเหตุ : RC = Regression coefficient, PC1 = PLS factor1, PC2 = PLS factor2, PC3 = PLS factor3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 การดูจุดขับเคลื่อนที่มีค่า Regression coefficient สูง และ X-loading weight สูง ใน Regression coefficient plot และ X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณ สัดส่วนมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างทดสอบของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE

จำนวนคลื่น (cm^{-1})	ความยาว คลื่น (nm)	Plot	การสั่นสะท้อนของพันธะ [97]	โครงสร้างทางเคมี [97]
8625	1160	PC2	C-H stretching second overtone	CH_3
8478	1180	RC	C-H stretching second overtone	$\text{HC}=\text{CH}$
8293-8285	1205-1207	RC,PC1,PC3	C-H stretching second overtone	CH_2
7861	1272	PC2	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH_3
7768	1287	PC3	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH_2
7521-7498	1330-1334	PC1,RC,PC2	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH_3
6094	1640	RC	C-H stretching first overtone	$\text{R}-\text{CH}-\text{CH}$ 
6025-5986	1660-1670	PC3,PC2	C-H stretching first overtone	<i>cis</i> - $\text{RCH}=\text{CHR}$
5971	1675	RC	C-H stretching first overtone	Aromatic
5793	1726	PC1	C-H stretching first overtone	CH_2
5662	1766	PC3	C-H stretching first overtone	CH_2
5439	1839	PC3	O-H stretching+ 2 x C-O stretching	Cellulose
5315-5253	1881-1903	PC2,PC3,RC,PC1	O-H stretching+ 2 x C-O stretching	Starch
5207	1920	PC2	C=O stretching second overtone	CONH
4922	2032	PC3	C=O stretching second overtone	CONH ₂
4875	2050	RC	N-H sym. stretching+amide II 2xamide I + amide III	Protein
4636	2157	PC1	C-H stretching + C=O stretching	CONHR
4528	2208	RC	C-H stretching + C-H deformation	-CHO
4382	2282	RC	C-H stretching + C-H deformation	CH_3
4335	2307	PC1,PC2		CH_2

หมายเหตุ : RC = Regression coefficient, PC1 = PLS factor1, PC2 = PLS factor2, PC3 = PLS factor3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.2 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิ ด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD)

การสร้างแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิจะใช้เมทริกซ์ขนาด 6×2 เช่นเดียวกับการทำนายในข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ในหัวข้อ 4.2.2 ซึ่งทำการศึกษาทดสอบกับผลิตภัณฑ์ข้าว 2 ชนิด คือข้าวหอมมะลิที่บรรจุในถุงพลาสติก PE ทั้งชนิดข้าวขาวและข้าวกล้อง และข้าวหอมมะลิที่บรรจุในกระสอบพลาสติกสาน PP ทั้งชนิดข้าวขาวและข้าวกล้อง รวมเป็น 4 การทดลอง สำหรับผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิที่บรรจุอยู่ในกระสอบป่านทั้งชนิดข้าวขาวและข้าวกล้อง ไม่ได้นำมาทดสอบเนื่องจากผลการดำเนินงานในหัวข้อ 4.3.1 สัญญาณคลื่นแสงในช่วงเนียร์อินฟราเรดไม่สามารถทะลุผ่านชั้นของกระสอบป่านได้ การทดลองจะใช้จำนวนคลื่นย่านเนียร์อินฟราเรด 3 จำนวนคลื่น ที่ดูดซับโครงสร้างหลักของข้าวหอมมะลิ ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.1.1 องค์ประกอบของเมล็ดข้าว ซึ่งเมล็ดข้าวจะมีองค์ประกอบทางเคมีจำพวกแป้ง (Starch) เป็นโครงสร้างหลัก และใช้จำนวนคลื่นย่านเนียร์อินฟราเรด 3 จำนวนคลื่น ที่ดูดซับโครงสร้างหลักของมอดข้าวสาร ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2.1 แมลงศัตรูข้าวชนิดมอดข้าวสาร ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างจากเมล็ดข้าวจำพวก ไคติน (Chitin) และอินทรีย์สารประเภทไขมัน (Lipid) อยู่ในส่วนเปลือกแข็งของมอดข้าวสาร และนำจำนวนคลื่นเหล่านี้มาใช้ในสมการเมทริกซ์ขนาด 6×2 เพื่อสร้างแบบจำลองการทำนาย โดยผลการทดลองมีดังนี้

การทดลองที่ 1 ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE พบว่าจำนวนคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายที่ให้ค่าการทำนายที่แม่นยำที่สุดได้แก่ 6945, 6329 และ 5263 cm^{-1} (1440, 1580 และ 1900 nm) สำหรับโครงสร้างหลักของข้าวหอมมะลิ (Starch) และ 8850, 6667 และ 5988 cm^{-1} (1130, 1500 และ 1670 nm) สำหรับโครงสร้างหลักของมอดข้าวสาร (Lipid และ Chitin) วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่เหมาะสมคือวิธี Base line offset โดยความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองให้ค่า r^2 เท่ากับ 0.91, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.021 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 3.39 และค่า Bias เท่ากับ 0.004 g-weevils/100g-rice

การทดลองที่ 2 ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP พบว่าจำนวนคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายที่ให้ค่าการทำนายที่แม่นยำที่สุดได้แก่ 5000, 4808 และ 4762 cm^{-1} (2000, 2080 และ 2100 nm) สำหรับโครงสร้างหลักของข้าวหอมมะลิ (Starch) และ 8850, 8489 และ 5988 cm^{-1} (1130, 1178 และ 1670 nm) สำหรับโครงสร้างหลักของมอดข้าวสาร (Lipid และ Chitin) วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่เหมาะสมคือวิธี Smoothing (moving average) โดยความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองให้ค่า r^2 เท่ากับ 0.76, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.034 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 2.67 และค่า Bias เท่ากับ 0.010 g-weevils/100g-rice

การทดลองที่ 3 ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE พบว่าจำนวนคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายที่ให้ค่าการทำนายที่แม่นยำที่สุดได้แก่ 6945, 5263 และ 4762 cm^{-1} (1440, 1900 และ 2100 nm) สำหรับโครงสร้างหลักของข้าวหอมมะลิ (Starch) และ 8850, 8489 และ 6667 cm^{-1} (1130, 1178 และ 1500 nm) สำหรับโครงสร้างหลักของมอดข้าวสาร (Lipid และ Chitin) วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่เหมาะสมคือวิธี Base line offset โดยความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองให้ค่า r^2 เท่ากับ 0.87, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.025 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 3.04 และค่า Bias เท่ากับ 0.003 g-weevils/100g-rice

การทดลองที่ 4 ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP พบว่าจำนวนคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายที่ให้ค่าการทำนายที่แม่นยำที่สุดได้แก่ 6945, 6329 และ 5000 cm^{-1} (1440, 1580 และ 2000 nm) สำหรับโครงสร้างหลักของข้าวหอมมะลิ (Starch) และ 8850, 8489 และ 6667 cm^{-1} (1130, 1178 และ 1500 nm) สำหรับโครงสร้างหลักของมอดข้าวสาร (Lipid และ Chitin) วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่เหมาะสมคือวิธี Base line offset โดยความแม่นยำในการทำนายของแบบจำลองให้ค่า r^2 เท่ากับ 0.71, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.037 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 2.06 และค่า Bias เท่ากับ -0.027 g-weevils/100g-rice

จากผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิทั้งชนิดถุงพลาสติก PE และชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP ใช้จำนวนคลื่นในการสร้างแบบจำลองทำนายโดยส่วนใหญ่ตำแหน่งเดียวกับที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทำนายในข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ในการศึกษาหัวข้อที่ 4.2.2 ซึ่งเป็นข้อดีของการนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้งานจริงและการสร้างเครื่องมือสำหรับตรวจวิเคราะห์ต่อไป ผลการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ค่าทางสถิติของการสร้างแบบจำลองทำนายสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ โดยวิธี Singular Value Decomposition

Type of rice	Type of packaging	Wave number (rice : rice weevil)	Pre-treatment	r^2	RMSEP	RPD	Bias
MHR	PE	6945,6329,5263:8850,6667,5988 cm^{-1} (1440,1580,1900:1130,1500,1670 nm)	Base line offset	0.91	0.021	3.39	0.004
	PP	5000,4808,4762:8850,8489,5988 cm^{-1} (2000,2080,2100:1130,1178,1670 nm)	Smoothing (moving average)	0.76	0.034	2.67	0.010
BHR	PE	6945,5263,4762:8850,8489,6667 cm^{-1} (1440,1900,2100:1130,1178,1500 nm)	Base line offset	0.87	0.025	3.04	0.003
	PP	6945,6329,5000:8850,8489,6667 cm^{-1} (1440,1580,2000:1130,1178,1500 nm)	Base line offset	0.71	0.037	2.06	-0.027

หมายเหตุ :

MHR = Milled Hom Mali rice, BHR = Brown Hom Mali rice, PE = Polyethylene plastic bag

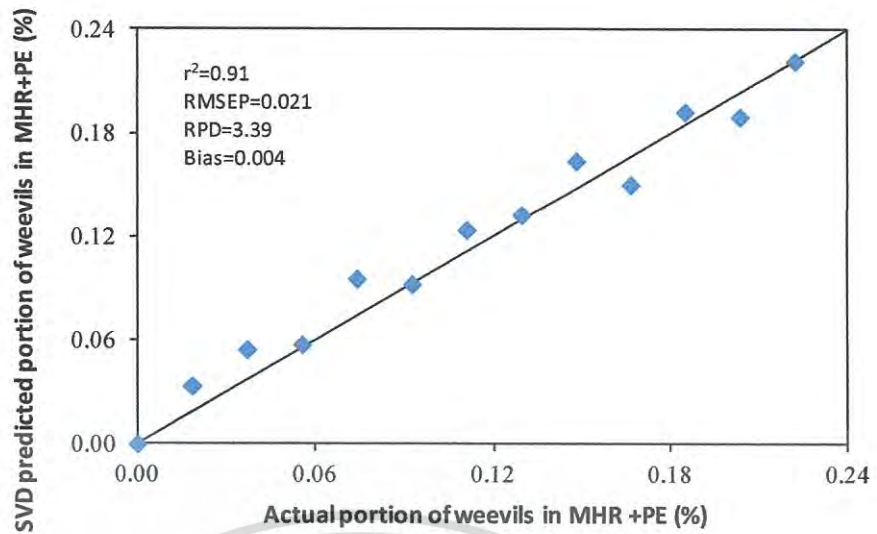
PP = Polypropylene plastic sack, r^2 = Coefficient of determination of validation set

RMSEP = Root mean square error of prediction

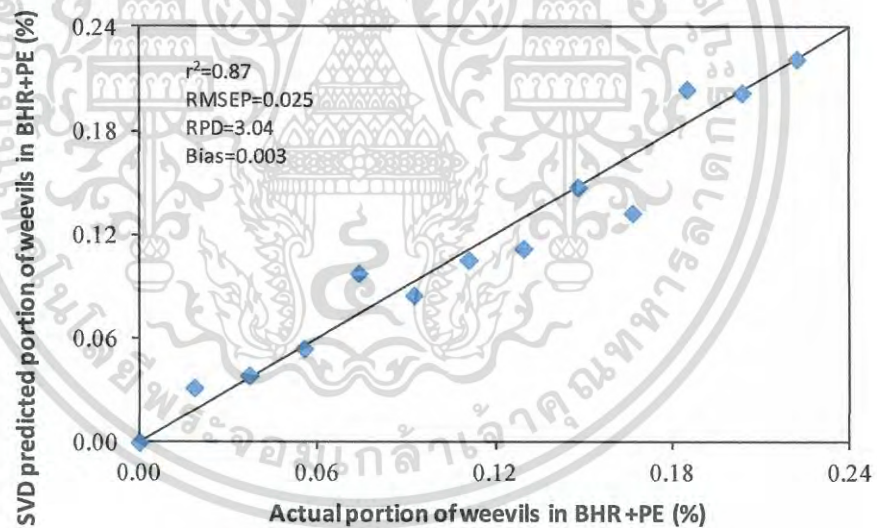
RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

ภาพที่ 4.52 และ 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทำนายและค่าการนับจริงเฉลี่ยของปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของแมลงมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลินิตฤงพลาสติก PE ตามลำดับ ซึ่งพบว่าแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของตัวอย่างข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิมีการกระจายตัวของข้อมูลในวงแคบ โดยข้อมูลบนแผนภูมิของข้าวขาวหอมมะลิจะกระจายตัวแคบกว่าเมื่ออ้างอิงเส้น 1:1 (One per one line) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของการทำนายด้วยแบบจำลองที่ดีกว่า



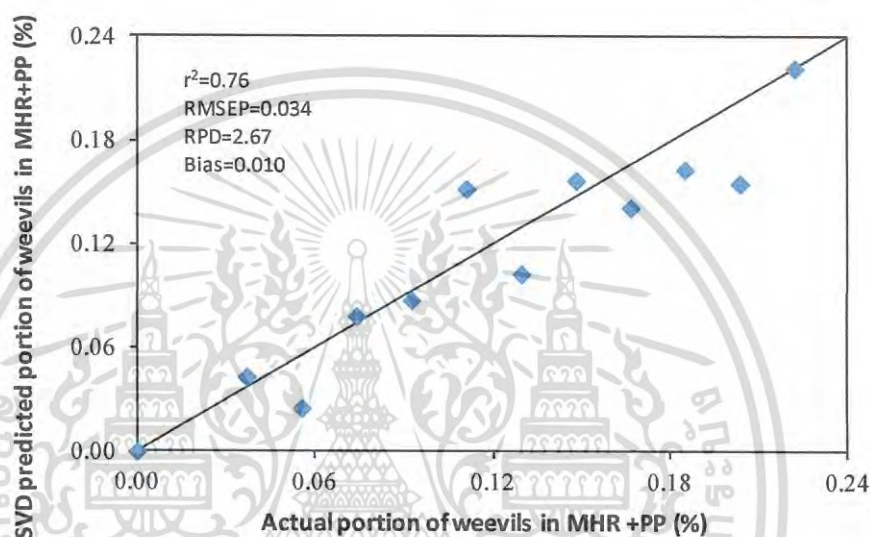
ภาพที่ 4.52 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิถุงพลาสติก PE โดยวิธี Singular Value Decomposition



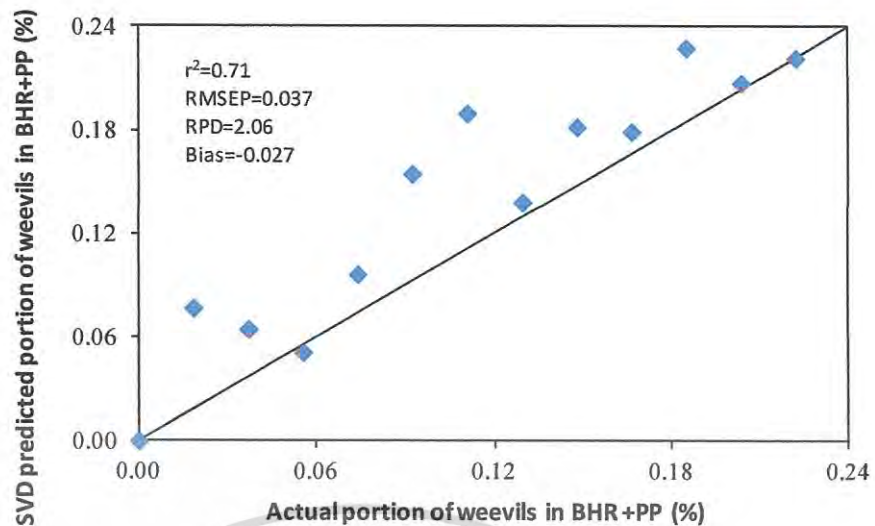
ภาพที่ 4.53 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิถุงพลาสติก PE โดยวิธี Singular Value Decomposition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.54 และ 4.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทำนายและค่าการนับจริงเฉลี่ยของปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของแมลงมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP ตามลำดับ ซึ่งพบว่าแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของตัวอย่างข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิมีการกระจายตัวของข้อมูลในวงกว้างและมีความแตกต่างกันมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างผลิตภัณฑ์ข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำที่ลดลงของการทำนาย ซึ่งมีผลจากอิทธิพลของชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP ที่คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดสามารถทะลุผ่านไปที่ชั้นข้าวได้ต่ำกว่า



ภาพที่ 4.54 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิกระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี Singular Value Decomposition



ภาพที่ 4.55 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิกระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี Singular Value Decomposition

จากการอ้างอิงตามเอกสารของ William (2007) [100] ตามตารางที่ 2.3 และ 2.4 ของบทที่ 2 ที่ได้กำหนดระดับการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้งาน โดยพิจารณาจากค่า r^2 และ RPD พบว่าการใช้เทคนิค Singular Value Decomposition มีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบปริมาณมอดข้าวสารเพื่อกำหนดปริมาณสารรมฆ่าแมลง การประกันคุณภาพข้าวและการคัดแยกผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีมอดข้าวสารอาศัยออกจากผลิตภัณฑ์ข้าวที่สะอาด ในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลินิดถุงพลาสติก PE และมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในระดับงานวิจัยและการคัดแยกผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีมอดข้าวสารอาศัยออกจากผลิตภัณฑ์ข้าวที่สะอาด ในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลินิดถุงพลาสติก PE ได้เบื้องต้นแบบหยาบเท่านั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบด้วยแรงงานหรือวิธีการอื่นอีกครั้ง หากต้องการผลการตรวจสอบที่ละเอียดต่อไป แต่ไม่แนะนำเทคนิคนี้ในการประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลินิดกระสอบพลาสติกสาน PP เนื่องจากแบบจำลองทำนายที่พัฒนาขึ้นมีผลการทำนายตรวจสอบตัวอย่างทดสอบที่ต่ำเกินกว่าการนำไปประยุกต์ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทวนสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์และที่มีบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression และวิธี Singular Value Decomposition (SVD)

4.4.1 ผลการทวนสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression

แบบจำลองการทำนายที่ให้ค่าทางสถิติที่ดีที่สุด โดยเฉพาะค่า R^2 และค่า RPD สูงที่สุด จะถูกนำมาใช้ในการทดสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิ ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิให้ค่า Coefficient of correlation (R) เท่ากับ 0.94, RMSEP เท่ากับ 0.016 g-weevils/100g-rice, RPD เท่ากับ 4.48 และ Bias เท่ากับ -0.006 g-weevils/100g-rice และผลการทดสอบแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวกล้องหอมมะลิได้ว่า ค่า R เท่ากับ 0.90, RMSEP เท่ากับ 0.029 g-weevils/100g-rice, RPD เท่ากับ 2.47 และ Bias เท่ากับ -0.008 g-weevils/100g-rice ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ให้ค่า R อยู่ในช่วง 0.91-0.95 และค่า RPD อยู่ในช่วง 3.1-4.9 แปลความหมายได้ว่าแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ขั้นตอนการตรวจสอบแมลงเพื่อกำหนดปริมาณสารรมฆ่าแมลง ใช้ในกระบวนการระดับงานวิจัย และในขั้นตอนของการตรวจสอบเพื่อคัดแยกข้าวที่มีมอดข้าวสารปนออกจากข้าวสะอาดได้ในกระบวนการตรวจสอบสินค้าข้าวที่การนำเข้าและส่งออก ข้าวที่มีมอดข้าวสารปนสามารถนำไปทำการคัดแยกมอดข้าวสารออกเพื่อจำหน่ายในประเทศหรือส่งออกได้อีกครั้ง

สำหรับแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวกล้องหอมมะลิ ผลการวิเคราะห์ให้ค่า R อยู่ในช่วง 0.81-0.90 และค่า RPD อยู่ในช่วง 2.4-3.0 แปลความหมายได้ว่าแบบจำลองสามารถนำไปใช้ได้เฉพาะในส่วนของการคัดแยกสิ่งปลอมปนชนิดมอดข้าวสารออกจากข้าวได้เบื้องต้นแบบหยาบเท่านั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบด้วยแรงงานหรือวิธีการอื่นอีกครั้งหากต้องการผลการตรวจสอบที่ละเอียดต่อไป ซึ่งจากค่าสถิติเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวขาวหอมมะลิที่สูงกว่าในตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิ ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.17, ภาพที่ 4.56 และ ภาพที่ 4.57 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.17 ค่าทางสถิติของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ ของข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Partial Least Squares Regression

Type of rice	No.	R	RMSEP	RPD	Bias
MHR	156	0.94	0.016	4.48	-0.006
BHR	156	0.90	0.029	2.47	-0.008

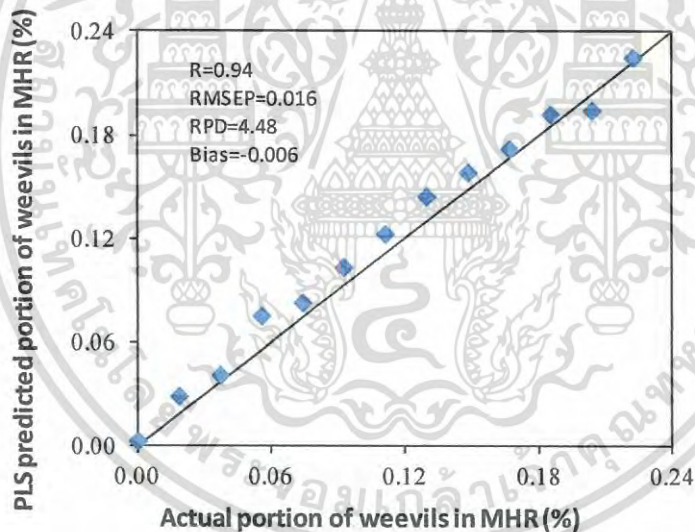
หมายเหตุ :

MHR = Milled Hom Mali rice, BHR = Brown Hom Mali rice, R = Coefficient of correlation

RMSEP = Root mean square error of prediction

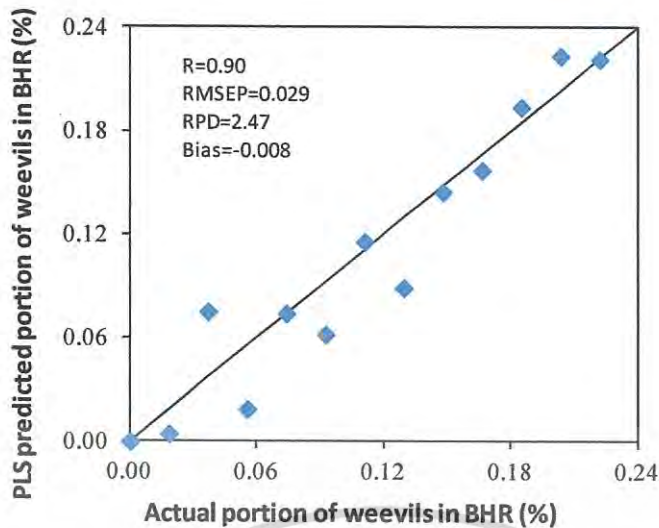
RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value



ภาพที่ 4.56 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์โดยวิธี PLS regression

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.57 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์โดยวิธี PLS regression

4.4.2 ผลการทวนสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD)

แบบจำลองการทำนายที่ให้ค่าทางสถิติที่ดีที่สุด โดยเฉพาะค่า R^2 และค่า RPD สูงที่สุด จะถูกนำมาใช้ในการทดสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารที่ปนในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิเช่นกัน ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวหอมมะลิให้ค่า Coefficient of correlation (R) เท่ากับ 0.92, RMSEP เท่ากับ 0.017 g-weevils/100g-rice, RPD เท่ากับ 4.37 และ Bias เท่ากับ -0.003 g-weevils/100g-rice ในขณะที่ผลการทดสอบแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวกล้องหอมมะลิได้ค่า R เท่ากับ 0.91, RMSEP เท่ากับ 0.022 g-weevils/100g-rice, RPD เท่ากับ 3.25 และ Bias เท่ากับ 0.005 g-weevils/100g-rice ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ให้ค่า R อยู่ในช่วง 0.91-0.95 และค่า RPD อยู่ในช่วง 3.1-4.9 แปลความหมายได้ว่าแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิด้วยวิธี SVD สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการตรวจสอบแมลงเพื่อกำหนดปริมาณสารรมฆ่าแมลง ใช้ในกระบวนการระดับงานวิจัย และในขั้นตอนของการตรวจสอบเพื่อคัดแยกข้าวที่มีมอดข้าวสารปนออกจากข้าวสะอาดได้ในกระบวนการตรวจสอบสินค้าข้าวที่การนำเข้าและส่งออก ข้าวที่มีมอดข้าวสารปนสามารถนำไปทำการคัดแยกมอดข้าวสารออกเพื่อจำหน่ายในประเทศหรือส่งออกได้อีกครั้งเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 4.4.1 โดยแบบจำลองการทำนายในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวหอม

มะลิจะมีความแม่นยำสูงกว่าแบบจำลองทำนายในตัวอย่างใหม่ของข้าวกล้องหอมมะลิเช่นเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.18, ภาพที่ 4.58 และภาพที่ 4.59 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.18 ค่าทางสถิติของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ ของข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Singular Value Decomposition

Type of rice	No.	R	RMSEP	RPD	Bias
MHR	156	0.92	0.017	4.37	-0.003
BHR	156	0.91	0.022	3.25	0.005

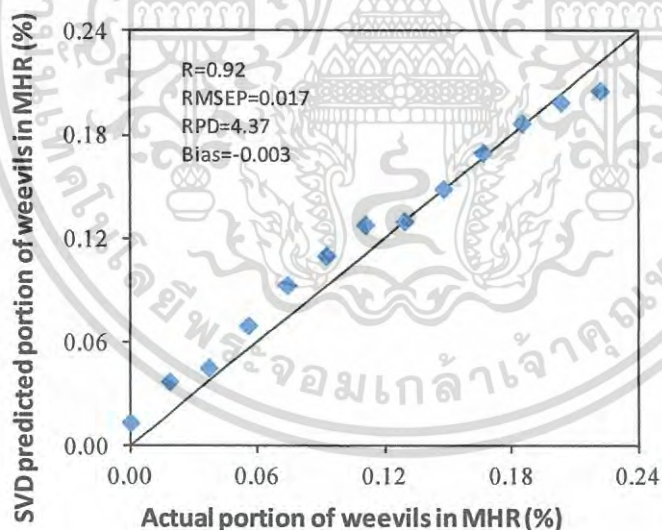
หมายเหตุ :

MHR = Milled Hom Mali rice, BHR = Brown Hom Mali rice, R = Coefficient of correlation

RMSEP = Root mean square error of prediction

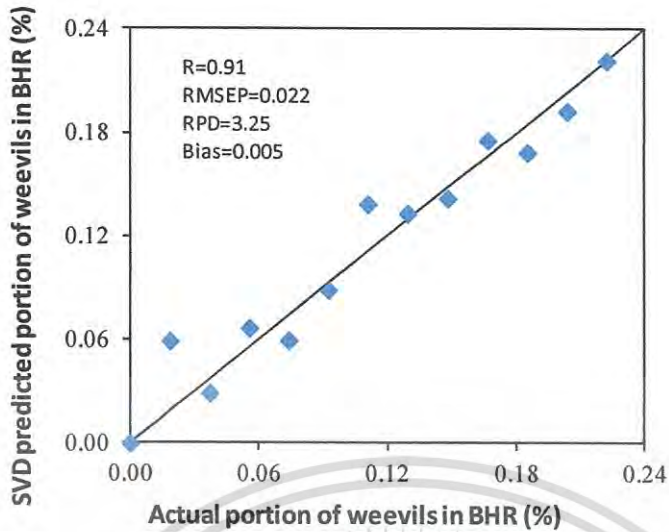
RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value



ภาพที่ 4.58 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์โดยวิธี Singular Value Decomposition

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.59 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์โดยวิธี Singular Value Decomposition

4.4.3 ผลการทวนสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่มีบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression

ตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่มีบรรจุภัณฑ์จะทำการทดสอบในส่วนของแบบจำลองทำนายสำหรับข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิที่บรรจุในถุงพลาสติก PE และข้าวขาวหอมมะลิที่บรรจุในกระสอบพลาสติกสาน PP เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ตามที่ได้ศึกษาในหัวข้อ 4.3.2.1

ผลการวิเคราะห์ทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวหอมมะลิที่บรรจุในถุงพลาสติก PE พบว่ามีค่า R เท่ากับ 0.93, RMSEP เท่ากับ 0.026 g-weevils/100g-rice, RPD เท่ากับ 2.75 และ Bias เท่ากับ -0.007 g-weevils/100g-rice แบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิที่บรรจุในกระสอบพลาสติกสานชนิด PP ให้ผลการวิเคราะห์ค่า R เท่ากับ 0.90, RMSEP เท่ากับ 0.030 g-weevils/100g-rice, RPD เท่ากับ 2.30 และ Bias เท่ากับ 0.0006 g-weevils/100g-rice และแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิถุงพลาสติกชนิด PE ให้ผลการวิเคราะห์ค่า R เท่ากับ 0.87, RMSEP เท่ากับ 0.071% g-

weevils/100g-rice, RPD เท่ากับ 1.85 และ Bias เท่ากับ -0.06 g-weevils/100g-rice ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.19

ผลการวิเคราะห์ที่ให้ค่า R อยู่ในช่วง 0.91-0.95 และค่า RPD อยู่ในช่วง 2.4-3.0 ของการทดสอบแบบจำลองสำหรับทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวหอมมะลิที่บรรจุในถุงพลาสติก PE แปลความหมายได้ว่าแบบจำลองทำนายสามารถนำไปประยุกต์ใช้ขั้นตอนการตรวจสอบแมลงเพื่อกำหนดปริมาณสารรมฆ่าแมลง ใช้ในกระบวนการระดับงานวิจัย และใช้ได้เฉพาะในส่วนของการคัดแยกสิ่งปลอมปนชนิดมอดข้าวสารออกจากผลิตภัณฑ์ข้าวเบื้องต้นแบบหยาบได้เท่านั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบด้วยแรงงานหรือวิธีการอื่นอีกครั้ง หากต้องการผลการตรวจสอบที่ละเอียดต่อไป ผลการวิเคราะห์ที่ให้ค่า R อยู่ในช่วง 0.81-0.90 และค่า RPD อยู่ในช่วง 0.0-2.3 ของการทดสอบแบบจำลองสำหรับทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวหอมมะลิที่บรรจุในกระสอบพลาสติกสาน PP และข้าวกล้องหอมมะลิที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด PE แปลความหมายได้ว่าแบบจำลองทำนายทั้งสองยังไม่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบสินค้าข้าวที่การนำเข้าและส่งออก จำเป็นต้องมีการพัฒนาปรับปรุงแบบจำลองทำนายให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นโดยครอบคลุมตัวอย่างใหม่ของวัสดุทดสอบมากขึ้น [100] ซึ่งความสัมพันธ์ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่บรรจุในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เมื่อเทียบกับค่าการนับจริงของแบบจำลองทั้งสามแสดงในภาพที่ 4.60-4.62

ตารางที่ 4.19 ค่าทางสถิติของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ โดยวิธี Partial Least Squares Regression

Type of rice	Type of packaging	No.	R	RMSEP	RPD	Bias
MHR	PE	156	0.93	0.026	2.75	-0.007
	PP	156	0.90	0.030	2.30	0.0006
BHR	PE	156	0.87	0.071	1.85	-0.06

หมายเหตุ :

MHR = Milled Hom Mali rice, BHR = Brown Hom Mali rice, PE = Polyethylene plastic bag

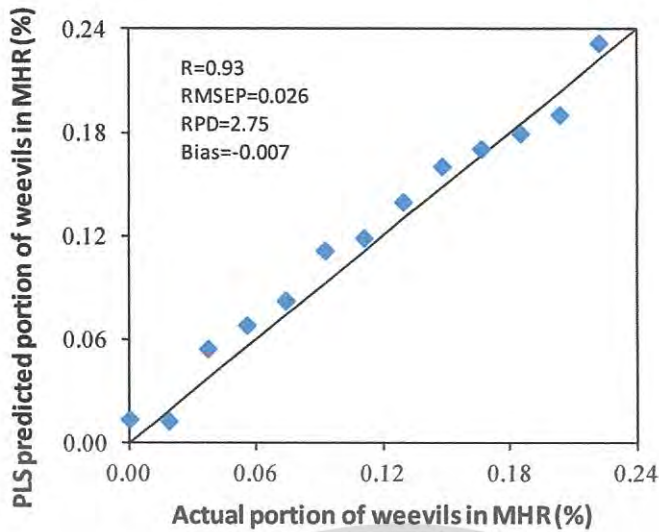
PP = Polypropylene plastic sack, R = Coefficient of correlation

RMSEP = Root mean square error of prediction

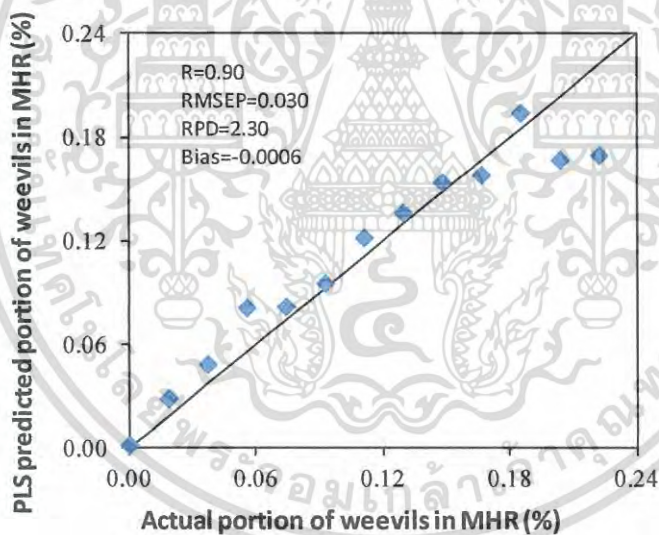
RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

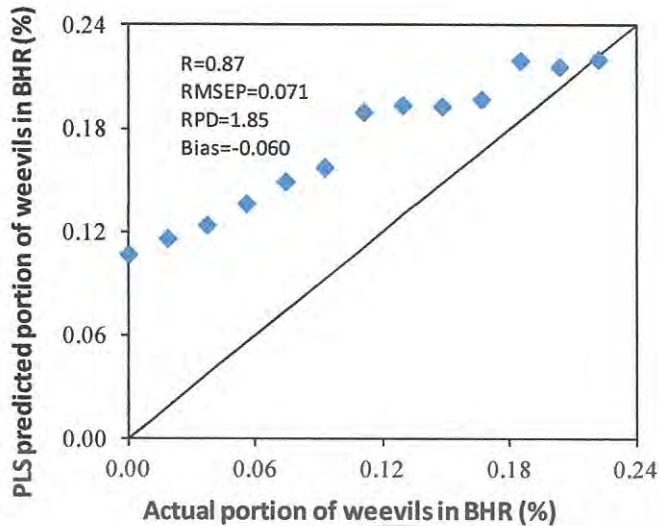


ภาพที่ 4.60 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิถุงพลาสติก PE โดยวิธี PLS regression



ภาพที่ 4.61 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิกระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี PLS regression

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.62 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิถุงพลาสติก PE โดยวิธี PLS regression

4.4.4 ผลการทดสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่มีบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD)

ตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิที่มีบรรจุภัณฑ์จะทำการทดสอบในส่วนของแบบจำลองทำนายสำหรับข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิที่บรรจุในถุงพลาสติก PE ที่วิธี SVD สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้เช่นกันตามการศึกษาในหัวข้อ 4.3.2.2

ผลการวิเคราะห์ทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวหอมมะลิที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด PE ให้ผลการวิเคราะห์ค่า R เท่ากับ 0.91, RMSEP เท่ากับ 0.030 g-weevils/100g-rice, RPD เท่ากับ 2.60 และ Bias เท่ากับ -0.009 g-weevils/100g-rice ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะให้ค่าทางสถิติในระดับเดียวกับผลการทดสอบแบบจำลองทำนายของวิธี PLS regression โดยให้ค่า R อยู่ในช่วง 0.91-0.95 และค่า RPD อยู่ในช่วง 2.4-3.0 แปลความหมายได้ว่าแบบจำลองทำนายสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการตรวจสอบแมลงเพื่อกำหนดปริมาณสารรมฆ่าแมลง ใช้ในกระบวนการระดับงานวิจัย และใช้ได้เฉพาะในส่วนของการคัดแยกสิ่งปลอมปนชนิดมอดข้าวสารออกจากผลิตภัณฑ์ข้าวเบื้องต้นแบบหยาบได้เท่านั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบด้วยแรงงานหรือวิธีการอื่นอีกครั้ง หากต้องการผลการตรวจสอบที่ละเอียดต่อไป สำหรับผลการวิเคราะห์ทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวกล้องหอมมะลิที่บรรจุในถุงพลาสติก PE ให้ผลการวิเคราะห์ค่า R เท่ากับ 0.90, RMSEP เท่ากับ 0.033 g-weevils/100g-rice, RPD เท่ากับ 2.33 และ Bias เท่ากับ -0.016 g-weevils/100g-rice ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะให้ค่าทางสถิติใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับเดียวกับผลการทดสอบแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ ของข้าวขาวหอมมะลิที่บรรจุในกระสอบพลาสติกสานชนิด PP ของวิธี PLS Regression โดยให้ค่า R อยู่ในช่วง 0.81-0.90 และค่า RPD อยู่ในช่วง 0.0-2.3 ซึ่งแปลความหมายได้ว่าแบบจำลองทำนายยังไม่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบสินค้าข้าวที่การนำเข้าและส่งออก จำเป็นต้องมีการพัฒนาปรับปรุงแบบจำลองทำนายให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นโดยครอบคลุมตัวอย่างใหม่ของวัสดุทดสอบมากขึ้น [100] ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4.20 และความสัมพันธ์ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิในบรรจุภัณฑ์เมื่อเทียบกับค่าการนับจริงแสดงในภาพที่ 4.63-4.64

ตารางที่ 4.20 ค่าทางสถิติของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ ของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิ โดยวิธี Singular Value Decomposition

Type of rice	Type of packaging	No.	R	RMSEP	RPD	Bias
MHR	PE	156	0.91	0.030	2.60	-0.009
BHR	PE	156	0.90	0.033	2.33	-0.016

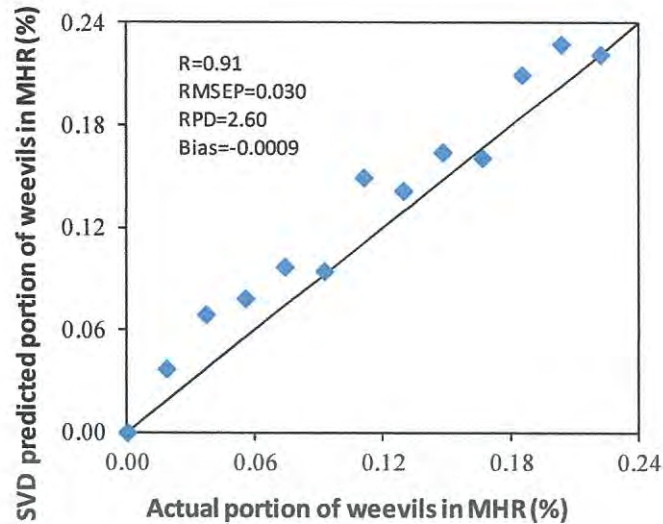
หมายเหตุ :

MHR = Milled Hom Mali rice, BHR = Brown Hom Mali rice, PE = Polyethylene plastic bag

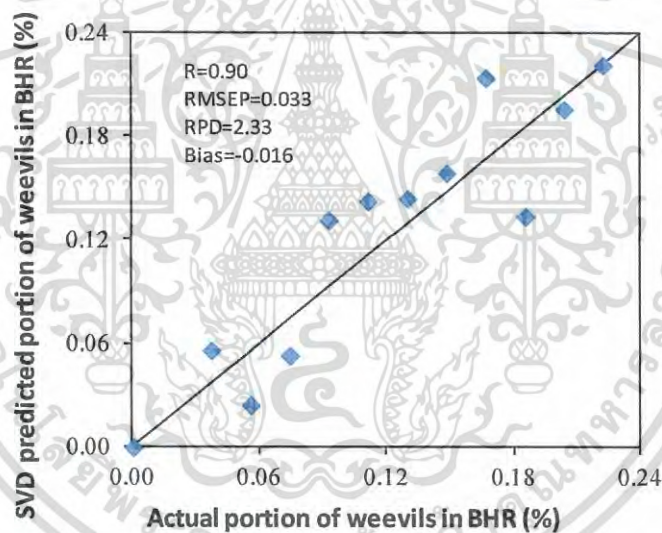
R = Coefficient of correlation, RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value



ภาพที่ 4.63 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิถุงพลาสติก PE โดยวิธี Singular Value Decomposition



ภาพที่ 4.64 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารเฉลี่ยจากการนับจริงและจากการทำนายในตัวอย่างใหม่ของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิถุงพลาสติก PE โดยวิธี Singular Value Decomposition

การสรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ ของการตรวจสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิและผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิด้วยวิธี Partial Least Squares Regression และวิธี Singular Value Decomposition ของวิทยานิพนธ์นี้ ได้แสดงไว้ในบทที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 ความเป็นไปได้ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ

5.1.1 สามารถใช้วิธี Principal Components Analysis (PCA) ในการแบ่งกลุ่มระหว่างข้าวหอมมะลิชนิดข้าวขาวและข้าวกล้องกับแมลงศัตรูชนิดมอดข้าวสารได้ โดยข้อมูลเส้นสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FT-NIR Spectrometer จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี PCA และแสดงผลการแบ่งกลุ่มของข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสารอย่างชัดเจน เนื่องจากข้าวหอมมะลิและมอดข้าวสารมีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยข้าวหอมมะลิจะมีโครงสร้างหลักคือ คาร์โบไฮเดรต ซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่คือแป้ง ในขณะที่มอดข้าวสารมีโครงสร้างหลักที่แตกต่างจากข้าวหอมมะลิคือ ไคตินและอินทรีย์สารประเภทลิปิด โดยเฉพาะในเปลือกนอกและส่วนลำตัวของมอดข้าวสาร ด้วยความแตกต่างเหล่านี้ทำให้การดูดซับสเปกตรัมคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดของวัสดุทดสอบมีความแตกต่างกัน และสามารถนำผลที่ได้นี้มาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อคัดแยกหรือแบ่งกลุ่มของตัวอย่างทดสอบได้ นอกจากนี้การคัดแยกแบ่งกลุ่มระหว่างตัวอย่างข้าวหอมมะลิทั้งชนิดข้าวขาวและข้าวกล้องที่มีมอดข้าวสารปนในระดับตั้งแต่ 0-200 ตัว (เพิ่มขึ้นระดับละ 10 ตัว) กับตัวอย่างมอดข้าวสารบริสุทธิ์ 100% ก็สามารถแบ่งกลุ่มได้อย่างชัดเจนเช่นกัน ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น แต่การวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี PCA ไม่สามารถคัดแยกตัวอย่างทดสอบข้าวหอมมะลิที่มีการปนของมอดข้าวสารในแต่ละระดับต่างๆ ได้อย่างชัดเจน และความสามารถในการคัดแยกของตัวอย่างข้าวกล้องหอมมะลิในระดับการปนของมอดข้าวสารต่างๆ จะต่ำกว่าตัวอย่างทดสอบที่เป็นข้าวขาวหอมมะลิ เนื่องจากเหตุผลที่ข้าวกล้องหอมมะลิจะมีชั้นรำข้าว (Bran) ซึ่งประกอบไปด้วย เยื่อหุ้มผล (Pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (Seed coat) และชั้นอัลลูโรน (Alurone layer) เป็นอุปสรรคต่อการส่องผ่านของคลื่นแสงเนียร์อินฟราเรดไปที่เนื้อข้าว นอกจากนี้ด้วยโครงสร้างทางเคมีของชั้นรำข้าวจะมีไขมันเป็นส่วนประกอบเช่นเดียวกับมอดข้าวสาร ทำให้ความสามารถในการคัดแยกต่ำลง

5.1.2 ความเป็นไปได้ในการใช้วิธี Partial Least Squares (PLS) Regression สำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณระดับการปนของมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิทั้งชนิดข้าวขาวและข้าวกล้อง โดยข้อมูลเส้นสเปกตรัมที่ได้จากตัวอย่างทดสอบที่มีมอดข้าวสารปนในระดับปริมาณตั้งแต่ 0-200 ตัว ซึ่งมีการเพิ่มจำนวนมอดข้าวสารทีละ 10 ตัว ในแต่ละระดับที่สูงขึ้น จะถูกนำไปวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองทำนาย และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองทำนายกับค่าการนับปริมาณมอดจริงในแต่ละระดับการปน โดยมีค่าชี้วัดผลทางสถิติที่แสดงถึงความแม่นยำของการทำนายด้วยแบบจำลองคือค่า Coefficient of determination of validation set (r^2), ค่า Root mean square error of prediction (RMSEP), ค่า Ratio of standard error of prediction to the standard deviation (RPD) และค่า Average of difference between actual value and NIR value (Bias) โดยแบบจำลองทำนายของวัสดุตัวอย่าง

ทดสอบชนิดข้าวขาวหอมมะลิจะมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบทำนายที่สูงกว่าแบบจำลองทำนายของวัสดุตัวอย่างชนิดข้าวกล้องหอมมะลิ

5.2 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์

5.2.1 แบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารที่สัดส่วนการปน 0% (0 ตัว), 0.018% (10 ตัว), 0.037% (20 ตัว), 0.055% (30 ตัว), 0.074% (40 ตัว), 0.093% (50 ตัว), 0.111% (60 ตัว), 0.130% (70 ตัว), 0.148% (80 ตัว), 0.167% (90 ตัว), 0.185% (100 ตัว), 0.204% (110 ตัว) และ 0.222% (120 ตัว) ในตัวอย่างข้าวชนิดขาวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression พบว่าให้ประสิทธิภาพการทำนายที่แม่นยำ โดยมีค่าทางสถิติ r^2 เท่ากับ 0.95, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.014 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 4.79 และค่า Bias เท่ากับ -0.007 g-weevils/100g-rice วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือวิธี Standard normal variate (SNV) ช่วงความยาวคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายอยู่ในช่วงจำนวนคลื่น 9407-5447 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 1,063-1,836 nm) และช่วงจำนวนคลื่น 4746-4421 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 2,170-2,262 nm) และจำนวน PLS factors ที่เหมาะสมเท่ากับ 9 ในขณะที่แบบจำลองทำนายของตัวอย่างทดสอบข้าวชนิดกล้องหอมมะลิให้ความแม่นยำในการทำนายที่ต่ำกว่า โดยมีค่า r^2 เท่ากับ 0.90, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.019 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 3.11 และค่า Bias เท่ากับ -0.008 g-weevils/100g-rice ช่วงความยาวคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายอยู่ในช่วงจำนวนคลื่น 9407-4244 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 1,063-2,356 nm) จำนวน PLS factors ที่เหมาะสมเท่ากับ 10 และวิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือวิธี Straight line subtraction ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าทางสถิติของผลการทดสอบแบบจำลองทำนาย โดยเฉพาะค่า r^2 และค่า RPD โดยอ้างอิงตามเอกสารของ Williams (2007) [100] ในตารางที่ 2.3 และ 2.4 ของบทที่ 2 พบว่าแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ มีความเป็นไปได้ในกระบวนการตรวจสอบปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่มีการเก็บรักษาเพื่อกำหนดปริมาณสารรมฆ่าแมลงศัตรูที่เข้าทำลายข้าวโดยเฉพาะมอดข้าวสารซึ่งเป็นศัตรูหลักของข้าวระหว่างรอการจำหน่ายสู่ผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศ การประกันคุณภาพข้าวและการคัดแยกข้าวที่มีมอดข้าวสารอาศัยออกจากข้าวที่สะอาด สำหรับแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในข้าวกล้องหอมมะลิ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการระดับงานวิจัย และในขั้นตอนของการตรวจสอบเพื่อคัดแยกข้าวที่มีมอดข้าวสารปนออกจากข้าวสะอาดได้ในกระบวนการตรวจสอบสินค้าข้าวที่การนำเข้าและส่งออก ข้าวที่มีมอดข้าวสารปนสามารถนำไปทำการคัดแยกมอดข้าวสารออกเพื่อจำหน่ายในประเทศหรือส่งออกได้อีกครั้ง

5.2.2 แบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารที่ปริมาณสัดส่วนการปนเดียวกับหัวข้อ 5.2.1 ในตัวอย่างข้าวชนิดขาวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ ด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD) พบว่าให้ประสิทธิภาพการทำนายที่แม่นยำกว่าแบบจำลองทำนายที่ได้จาก วิธี Partial Least

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Squares (PLS) Regression ในข้าวชนิดเดียวกันทั้งข้าวหอมมะลิและกล้องหอมมะลิ โดยผลการทดสอบแบบจำลองทำนายในข้าวชนิดข้าวหอมมะลิให้ค่าทางสถิติ r^2 เท่ากับ 0.97, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.012 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 5.71 และค่า Bias เท่ากับ -0.003 g-weevils/100g-rice จำนวนคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาแบบจำลองทำนายที่คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดดูดซับโครงสร้างหลักทางเคมีของข้าว (Starch) คือ 5263, 5000 และ 4808 cm^{-1} (1900, 2000 และ 2080 nm) และจำนวนคลื่นที่เหมาะสมที่คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดดูดซับโครงสร้างหลักทางเคมีของมอดข้าวสาร (Lipid และ Chitin) คือ 8850, 8489 และ 5988 cm^{-1} (1130, 1178 และ 1670 nm) วิธีการปรับแต่งสเปกตรัมที่เหมาะสมและให้ผลการวิเคราะห์ทำนายดีที่สุดได้แก่วิธี Base line offset ในขณะที่แบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างข้าวชนิดกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ พบว่าให้ผลการทดสอบแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยแสดงเป็นค่าทางสถิติ r^2 เท่ากับ 0.96, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.013 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 5.39 และค่า Bias เท่ากับ -0.002 g-weevils/100g-rice วิธีการปรับแต่งสเปกตรัมที่เหมาะสมและให้ผลการวิเคราะห์ทำนายดีที่สุดได้แก่วิธี SNV จำนวนคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาแบบจำลองทำนายที่ดูดซับโครงสร้างหลักทางเคมีของข้าว (Starch) พบว่าสามารถใช้ชุดเดียวกับตัวอย่างทดสอบข้าวชนิดข้าวหอมมะลิได้ที่จำนวนคลื่น 5263, 5000 และ 4808 cm^{-1} (1900, 2000 และ 2080 nm) ซึ่งจะส่งผลดีต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องมือตรวจวิเคราะห์ต่อไป ในขณะที่จำนวนคลื่นที่เหมาะสมที่ดูดซับโครงสร้างหลักทางเคมีของมอดข้าวสาร (Lipid และ Chitin) จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยคือที่จำนวนคลื่น 8850, 8489 และ 6667 cm^{-1} (1130, 1178 และ 1500 nm) ซึ่งจะส่งผลดีต่อการประยุกต์ใช้เช่นกัน และเมื่อพิจารณาจากค่าทางสถิติของผลการทดสอบแบบจำลองทำนายโดยเฉพาะค่า r^2 และค่า RPD โดยอ้างอิงตามเอกสารของ Williams (2007) [100] พบว่าแบบจำลองทำนายที่พัฒนาด้วยเทคนิคนี้ของข้าวทั้งสองชนิด มีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่มีการเก็บรักษาเพื่อกำหนดปริมาณสารรมฆ่าแมลง การประกันคุณภาพข้าว และสามารถประยุกต์ใช้ได้ในการบวนการตรวจสอบเพื่อควบคุมและรับรองคุณภาพสินค้าข้าวที่มีการนำเข้าและส่งออกได้

5.3 การทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิ

5.3.1 อิทธิพลของวัสดุบรรจุภัณฑ์ข้าวต่อการส่องผ่านของคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรด จากการทดสอบสรุปได้ว่าคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดมีความสามารถในการส่องผ่านชั้นวัสดุกระสอบป่าน (Hemp sack) ไปที่ข้าวหอมมะลิได้ต่ำ แต่สามารถส่องผ่านชั้นวัสดุบรรจุภัณฑ์ข้าวชนิดถุงพลาสติก PE (Polyethylene plastic bag) และ กระสอบพลาสติกสานชนิด PP (Polypropylene plastic sack) ได้ดีตามลำดับ ทำให้สามารถนำสเปกตรัมของตัวอย่างวัสดุทดสอบผลิตภัณฑ์ข้าวชนิดถุงพลาสติก PE และ กระสอบพลาสติกสานชนิด PP ไปทำการศึกษาทำนายปริมาณสัดส่วนการปนของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวได้เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 แบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารที่สัดส่วนการปนเดียวกับหัวข้อ 5.2.1 ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression พบว่าให้ประสิทธิภาพการทำนายที่แม่นยำ โดยมีค่าทางสถิติ r^2 เท่ากับ 0.93, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.016 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 3.92 และค่า Bias เท่ากับ 0.005 g-weevils/100g-rice วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือวิธี SNV ช่วงความยาวคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายอยู่ในช่วงจำนวนคลื่น 9404-5446 cm^{-1} (1,063-1,836 นาโนเมตร) และจำนวน PLS factors ที่เหมาะสมเท่ากับ 9 ในขณะที่แบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP จะให้ผลการทดสอบที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่า อันเนื่องมาจากความสามารถในการส่องผ่านของคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดไปที่วัสดุทดสอบข้าวภายในต่ำกว่า โดยมีค่าทางสถิติ r^2 เท่ากับ 0.87, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.021 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 3.05 และค่า Bias เท่ากับ 0.006 g-weevils/100g-rice วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือวิธี SNV ช่วงความยาวคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายอยู่ในช่วงจำนวนคลื่น 9404-4243 cm^{-1} (1,063-2,357 นาโนเมตร) และจำนวน PLS factors ที่เหมาะสมเท่ากับ 8

แบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE ให้ผลการทดสอบที่มีประสิทธิภาพการทำนายที่แม่นยำต่ำกว่าในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE และใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP โดยมีค่าทางสถิติ r^2 เท่ากับ 0.86, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.022 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 3.00 และค่า Bias เท่ากับ 0.008 g-weevils/100g-rice ช่วงความยาวคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายอยู่ในช่วงจำนวน 9404-7498 cm^{-1} (1,063-1,334 นาโนเมตร) และในช่วงจำนวนคลื่น 6102-4243 cm^{-1} (1,639-2,357 นาโนเมตร) โดยจำนวน PLS factors ที่เหมาะสมเท่ากับ 8 และวิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือวิธี Multiplicative Scatter Correction (MSC) ในขณะที่แบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP จะให้ผลการทดสอบความแม่นยำในการทำนายที่ต่ำสุด โดยมีค่าทางสถิติ r^2 เท่ากับ 0.75, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.029 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 2.04 และค่า Bias เท่ากับ 0.009 g-weevils/100g-rice วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือวิธี MSC ช่วงความยาวคลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายอยู่ในช่วงจำนวนคลื่น 9404- 7498 cm^{-1} (1,064-1,334 นาโนเมตร) และในช่วงจำนวนคลื่น 5454-4598 cm^{-1} (1,834-2,175 นาโนเมตร) และจำนวน PLS factors ที่เหมาะสมเท่ากับ 8

เมื่อพิจารณาตามเอกสารของ Williams (2007) [100] ในตารางที่ 2.3 และ 2.4 ของบทที่ 2 พบว่าแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE มีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ได้ในระบบการตรวจสอบปริมาณมอดข้าวสารเพื่อกำหนดปริมาณสารรมฆ่าแมลง การประกันคุณภาพข้าวและการคัดแยกผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีมอดข้าวสารอาศัย

นอกจากผลิตภัณฑ์ข้าวที่สะอาดที่มีการส่งจำหน่ายสู่ผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศ สำหรับแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP และผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE มีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในระดับงานวิจัยและใช้ในกระบวนการคัดแยกผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีมอดข้าวสารอาศัยอยู่ออกจากผลิตภัณฑ์ข้าวที่สะอาดได้เบื้องต้นแบบหยาบเท่านั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบด้วยแรงงานหรือวิธีการอื่นอีกครั้ง หากต้องการผลการตรวจสอบที่ละเอียดต่อไป ส่วนแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้

5.3.3 แบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารที่สัดส่วนการปนเดียวกับหัวข้อ

5.2.1 ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE ด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD) พบว่าให้ประสิทธิภาพการทำนายที่แม่นยำต่ำกว่าแบบจำลองที่พัฒนาโดยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression เล็กน้อย ในชนิดของผลิตภัณฑ์ข้าวเดียวกัน โดยให้ค่าทางสถิติของผลการทดสอบ r^2 เท่ากับ 0.91, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.021 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 3.39 และค่า Bias เท่ากับ 0.004 g-weevils/100g-rice จำนวนคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายที่ให้ค่าการทำนายที่แม่นยำที่สุดได้แก่ 6945, 6329 และ 5263 cm^{-1} (1440, 1580 และ 1900 nm) สำหรับโครงสร้างหลักของข้าวหอมมะลิ (Starch) และ 8850, 6667 และ 5988 cm^{-1} (1130, 1500 และ 1670 nm) สำหรับโครงสร้างหลักของมอดข้าวสาร (Lipid และ Chitin) วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่เหมาะสมคือวิธี Base line offset สำหรับแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE ด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD) พบว่าให้ผลการทดสอบแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพการทำนายใกล้เคียงกับแบบจำลองที่พัฒนาโดยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression ในชนิดของผลิตภัณฑ์ข้าวเดียวกัน โดยให้ค่าทางสถิติของผลการทดสอบแบบจำลอง r^2 เท่ากับ 0.87, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.025 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 3.04 และค่า Bias เท่ากับ 0.003 g-weevils/100g-rice จำนวนคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาแบบจำลองทำนาย ที่คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดดูดซับโครงสร้างหลักทางเคมีของข้าว (Starch) คือ 6945, 5263 และ 4762 cm^{-1} (1440, 1900 และ 2100 nm) และจำนวนคลื่นที่เหมาะสมที่คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดดูดซับโครงสร้างหลักทางเคมีของมอดข้าวสาร (Lipid และ Chitin) คือ 8850, 8489 และ 6667 cm^{-1} (1130, 1178 และ 1500 nm) วิธีการปรับแต่งสเปกตรัมที่เหมาะสมและให้ผลการวิเคราะห์ทำนายดีที่สุดได้แก่วิธี Base line offset

แบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP ที่สัดส่วนการปนเดียวกับหัวข้อ 5.2.1 ด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD) พบว่าให้ประสิทธิภาพการทำนายที่แม่นยำต่ำกว่าแบบจำลองที่พัฒนาโดยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression ในชนิดของผลิตภัณฑ์ข้าวเดียวกัน โดยให้ค่าทางสถิติ r^2 เท่ากับ 0.76, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.034 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 2.67 และค่า Bias เท่ากับ 0.010 g-weevils/100g-rice จำนวนคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองทำนายที่ให้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำนายที่แม่นยำที่สุดได้แก่ 5000, 4808 และ 4762 cm^{-1} (2000, 2080 และ 2100 nm) สำหรับโครงสร้างหลักของข้าวหอมมะลิ (Starch) และ 8850, 8489 และ 5988 cm^{-1} (1130, 1178 และ 1670 nm) สำหรับโครงสร้างหลักของมอดข้าวสาร (Lipid และ Chitin) วิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่เหมาะสมคือวิธี Smoothing (moving average) ในขณะที่แบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลินิตินดกระสอบพลาสติกสาน PP ด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD) พบว่าให้ผลการทดสอบแบบจำลองทำนายที่ต่ำกว่าแบบจำลองที่พัฒนาโดยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression ในชนิดของผลิตภัณฑ์ข้าวเดียวกันเช่นกัน โดยแสดงผลค่าทางสถิติ r^2 เท่ากับ 0.71, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.037 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 2.06 และค่า Bias เท่ากับ -0.027 g-weevils/100g-rice จำนวนคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาแบบจำลองทำนาย ที่คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดดูดซับโครงสร้างหลักทางเคมีของข้าว (Starch) คือ 6945, 6329 และ 5000 cm^{-1} (1440, 1580 และ 2000 nm) และจำนวนคลื่นที่เหมาะสมที่คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรดดูดซับโครงสร้างหลักทางเคมีของมอดข้าวสาร (Lipid และ Chitin) คือ 8850, 8489 และ 6667 cm^{-1} (1130, 1178 และ 1500 nm) วิธีการปรับแต่งสเปกตรัมที่เหมาะสมและให้ผลการวิเคราะห์ทำนายดีที่สุดได้แก่วิธี Base line offset

เมื่อพิจารณาตามเอกสารของ Williams (2007) [100] ในตารางที่ 2.3 และ 2.4 ของบทที่ 2 พบว่าแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลินิตินดถุงพลาสติก PE ด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD) มีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบปริมาณมอดข้าวสารเพื่อกำหนดปริมาณสารรบกวน การประกันคุณภาพข้าว และการคัดแยกผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีมอดข้าวสารอาศัยออกจากผลิตภัณฑ์ข้าวที่สะอาด ที่มีการส่งจำหน่ายสู่ผู้บริโภคทั้งในและต่างประเทศ สำหรับแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลินิตินดถุงพลาสติก PE มีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในระดับงานวิจัย และในกระบวนการคัดแยกผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีมอดข้าวสารอาศัยออกจากผลิตภัณฑ์ข้าวที่สะอาดเบื้องต้นแบบหยาบได้ และจำเป็นต้องมีการตรวจสอบด้วยแรงงานหรือวิธีการอื่นอีกครั้ง หากต้องการผลการตรวจสอบที่ละเอียด ส่วนแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลินิตินดกระสอบพลาสติกสาน PP ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลินิตินดถุงพลาสติก PE จะใช้จำนวนคลื่นในการสร้างแบบจำลองทำนายโดยส่วนใหญ่ตำแหน่งเดียวกับที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทำนายในข้าวขาวและข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ในบทรูปหัวข้อที่ 5.2.2 ซึ่งเป็นข้อดีของการนำวิธีนี้ไปประยุกต์ใช้งานจริงและการสร้างเครื่องมือแบบ Online สำหรับตรวจสอบวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การทวนสอบทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวหอมมะลิ

5.4.1 ผลการทวนสอบแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวหอมมะลิด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression พบว่าแบบจำลองทำนายให้ค่าทางสถิติ R (Coefficient of correlation) เท่ากับ 0.94, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.016 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 4.48 และค่า Bias เท่ากับ -0.006 g-weevils/100g-rice ในขณะที่ผลการทวนสอบแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวกล้องหอมมะลิ ให้ค่าทางสถิติที่ต่ำกว่าโดยค่า R เท่ากับ 0.90, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.029 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 2.47 และค่า Bias เท่ากับ -0.008 g-weevils/100g-rice เมื่อพิจารณาตามเอกสารของ Williams (2007) [100] ตารางที่ 2.3 และ 2.4 ของบทที่ 2 แปลความหมายได้ว่า แบบจำลองทำนายของข้าวขาวหอมมะลิสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในช่วงตอนการตรวจสอบแมลงเพื่อกำหนดปริมาณสารรมฆ่าแมลง ใช้ในกระบวนการระดับงานวิจัย และในช่วงตอนของการตรวจสอบเพื่อคัดแยกข้าวที่มีมอดข้าวสารปนออกจากข้าวสะอาดได้ในกระบวนการตรวจสอบสินค้าข้าวที่การนำเข้าและส่งออก โดยข้าวที่มีมอดข้าวสารปนสามารถนำไปทำการคัดแยกมอดข้าวสารออกเพื่อจำหน่ายในประเทศหรือส่งออกได้อีกครั้ง และแบบจำลองทำนายของข้าวกล้องหอมมะลิ สามารถประยุกต์ใช้ได้เฉพาะในส่วนของการคัดแยกสิ่งปลอมปนชนิดมอดข้าวสารออกจากข้าวกล้องหอมมะลิได้เบื้องต้นแบบหยาบเท่านั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบอย่างละเอียดด้วยแรงงานหรือวิธีการอื่นอีกครั้ง หากต้องการผลการตรวจสอบที่ละเอียดต่อไป

5.4.2 ผลการทวนสอบแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสาร ในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวหอมมะลิด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD) พบว่าแบบจำลองทำนายให้ค่าทางสถิติที่ต่ำกว่ากับแบบจำลองที่พัฒนาด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression เพียงเล็กน้อย โดยค่า R เท่ากับ 0.92, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.017 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 4.37 และค่า Bias เท่ากับ -0.003 g-weevils/100g-rice ในขณะที่ผลการทวนสอบแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวกล้องหอมมะลิ จะให้ค่าทางสถิติที่สูงกว่าแบบจำลองที่พัฒนาด้วยวิธี Partial Least Square (PLS) Regression ในตัวอย่างข้าวทดสอบชนิดเดียวกัน โดยค่า R เท่ากับ 0.91, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.022 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 3.25 และค่า Bias เท่ากับ 0.005 g-weevils/100g-rice ซึ่งแปลความหมายได้ว่าแบบจำลองการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของข้าวขาวหอมมะลิและข้าวกล้องหอมมะลิด้วยวิธี SVD สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในช่วงตอนการตรวจสอบแมลงเพื่อกำหนดปริมาณสารรมฆ่าแมลง ใช้ในกระบวนการระดับงานวิจัย และในช่วงตอนของการตรวจสอบเพื่อคัดแยกข้าวที่มีมอดข้าวสารปนออกจากข้าวสะอาดได้ในกระบวนการตรวจสอบสินค้าข้าวที่การนำเข้าและส่งออก โดยข้าวที่มีมอดข้าวสารปนสามารถนำไปทำการคัดแยกมอดข้าวสารออกเพื่อจำหน่ายในประเทศหรือส่งออกได้อีกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 ผลการทวนสอบแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักรวมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ ของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE ด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression พบว่าแบบจำลองทำนายให้ค่าทางสถิติ R เท่ากับ 0.93, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.026 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 2.75 และค่า Bias เท่ากับ -0.007 g-weevils/100g-rice ในขณะที่ผลการทวนสอบแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักรวมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP ให้ค่าทางสถิติที่ต่ำกว่าโดยค่า R เท่ากับ 0.90, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.030 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 2.30 และค่า Bias เท่ากับ 0.0006 g-weevils/100g-rice และผลการทวนสอบแบบจำลองทำนายของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE จะให้ค่าทางสถิติต่ำที่สุด โดยมีค่า R เท่ากับ 0.87, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.071 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 1.85 และค่า Bias เท่ากับ -0.06 g-weevils/100g-rice ซึ่งแปลความหมายได้ว่า แบบจำลองทำนายที่พัฒนาโดยวิธี Partial Least Square (PLS) Regression ของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE สามารถนำไปประยุกต์ใช้ขั้นตอนการตรวจสอบแมลงเพื่อกำหนดปริมาณสารรมฆ่าแมลง ใช้ในกระบวนการระดับงานวิจัย และใช้ได้เฉพาะในส่วนของการคัดแยกสิ่งปลอมปนชนิดมอดข้าวสารออกจากผลิตภัณฑ์ข้าวเบื้องต้นแบบหยابได้เท่านั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบด้วยแรงงานหรือวิธีการอื่นอีกครั้ง หากต้องการผลการตรวจสอบที่ละเอียดต่อไป สำหรับแบบจำลองทำนายของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP และผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE ยังไม่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบสินค้าผลิตภัณฑ์ข้าวที่การนำเข้าและส่งออก จำเป็นต้องมีการพัฒนาปรับปรุงแบบจำลองทำนายให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นโดยครอบคลุมตัวอย่างใหม่ของวัสดุทดสอบมากขึ้น

5.4.4 ผลการทวนสอบแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักรวมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ ของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE ด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD) พบว่าแบบจำลองทำนายให้ค่าทางสถิติที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองทำนายที่พัฒนาด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression ในตัวอย่างทดสอบผลิตภัณฑ์ข้าวชนิดเดียวกัน โดยมีค่า R เท่ากับ 0.91, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.030 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 2.60 และค่า Bias เท่ากับ -0.009 g-weevils/100g-rice ในขณะที่ผลการทวนสอบแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักรวมอดข้าวสารในตัวอย่างใหม่ของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE ให้ผลที่อยู่ในระดับเดียวกับแบบจำลองทำนายของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP ที่พัฒนาด้วยวิธี Partial Least Squares (PLS) Regression โดยมีค่า R เท่ากับ 0.90, ค่า RMSEP เท่ากับ 0.033 g-weevils/100g-rice, ค่า RPD เท่ากับ 2.33 และค่า Bias เท่ากับ -0.016 g-weevils/100g-rice ซึ่งแปลความหมายได้ว่าแบบจำลองทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักรวมอดข้าวสารของผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE ด้วยวิธี Singular Value Decomposition (SVD) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการตรวจสอบแมลงเพื่อกำหนดปริมาณสารรมฆ่าแมลง ใช้ในกระบวนการระดับงานวิจัย และใช้ได้เฉพาะในส่วนของการคัดแยกสิ่งปลอมปนชนิดมอดข้าวสารออกจากผลิตภัณฑ์ข้าวเบื้องต้นแบบหยابได้เท่านั้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบด้วยแรงงานหรือวิธีการอื่นอีกครั้ง หากต้องการผลการตรวจสอบที่ละเอียดต่อไป ในขณะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิชนิดถุงพลาสติก PE ยังไม่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบสินค้าผลิตภัณฑ์ข้าวที่การนำเข้าและส่งออก จำเป็นต้องมีการพัฒนาปรับปรุงแบบจำลองทำนายให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นโดยครอบคลุมตัวอย่างใหม่ของวัสดุทดสอบมากขึ้น

5.5 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักมอดข้าวสาร ซึ่งเป็นศัตรูหลักที่เข้าทำลายทั้งในสินค้าข้าวที่เก็บรักษาในโรงเก็บและสินค้าผลิตภัณฑ์ข้าว ระหว่างรอการจำหน่ายและระหว่างการขนส่งผู้ซื้อทั้งในและต่างประเทศ รวมถึงการตรวจสอบรับรองสินค้าข้าวและผลิตภัณฑ์ในการนำเข้าและส่งออกสินค้า ซึ่งควรมีการนำผลการศึกษานี้ไปทำการศึกษาเพิ่มเติมและประยุกต์ใช้ในโรงเก็บรักษาข้าวของผู้ประกอบการและระหว่างการขนส่งสินค้าผู้ซื้อ เพื่อใช้ในการกำหนดปริมาณสารฆ่าแมลงให้ใช้ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการจัดการและเพิ่มความปลอดภัยด้านสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้สามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการตรวจสอบรับรองสินค้าข้าวและผลิตภัณฑ์ข้าว รวมถึงการตรวจสอบคัดแยกข้าวที่มีมอดข้าวสารปนออกจากข้าวสะอาด เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ โดยใช้การวิเคราะห์ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีจากห้องปฏิบัติการของมอดข้าวสารที่ปนในข้าวหอมมะลิในแต่ละระดับการปนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เป็นวิธีการทางเลือกที่มีความแม่นยำในการทำนายปริมาณของมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิได้



เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. “ปริมาณและมูลค่าการส่งออกข้าวไทยประจำปี พ.ศ.2557” [Online]. Available : http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php. 2558.
- [2] Gay F., Maraval I., Roques S., Gunata Z., Boulanger R., Audebert A. and Mestres C. “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**, Vol. 117, 2010. Pp. 154-160
- [3] Araullo, E.V. Padua, D.B.D. and Graham, M. 1976. **Rice Postharvest Technology**. International Development Research Centre, Ottawa, Canada.
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations. “Insect pests of stored products.” [Online]. Available : <http://www.fao.org/docrep/x5036e/x5036e0y.htm>. 1989.
- [5] พูนพัฒน์ พูนน้อย, เบญญทิพย์ มหาเทพ และภิญญาพัชญ์ พุฒตาล. “การทำลายไข่มอดในข้าวด้วยคลื่นไมโครเวฟ.” **วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.**, ปีที่ 33, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม 2553. หน้า 39-48
- [6] Jarruwat P., Choomjaihan P. “Feasibility study on estimation of rice weevil quantity in rice stock using near-infrared spectroscopy technique.” **Journal of Innovative Optical Health Sciences**, vol.7 (4), 2014. 8 Pp
- [7] WMO. **Scientific assessment of ozone depletion: 1991**. World Meteorological Organization Report No. 25, World Meteorological Organization of the United Nations, Geneva. 1991.
- [8] Bell C.H., Wilson S.M. “Phosphine tolerance and resistance in *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae).” **Journal of Stored Products Research**, Vol. 31, 1995. Pp 199-205
- [9] Chaudhry M.Q. “Molecular biological approaches in studying the gene(s) that confer phosphine-resistance in insects.” **J. Cell. Biochem.Suppl.** A 21, 1995. Pp 215
- [10] Byung-Ho L., Won-Sik C., Sung-Eun L. and Byeoung-Soo P. “Fumigant toxicity of essential oils and their constituent compounds towards the rice weevil, *Sitophilus oryzae* (L.).” **Crop Protection**, Vol. 20, 2001. Pp 317-320
- [11] นายแพทย์วิวัฒน์ เอกบูรณะวัฒน์. “พิษของฟอสฟีน”. [Online]. Available :

- <http://www.gotoknow.org/posts/416071>. 2554.
- [12] รังสิมา เก่งการพานิช, พรทิพย์ วิสารทานนท์ และดวงสมร สุทธิสุทธิ. “การใช้สารรมฟอสฟีนในการป้องกันกำจัดแมลงศัตรูข้าวโพดเลี้ยงสัตว์หลังการเก็บเกี่ยว.” *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*, ปีที่ 41, ฉบับที่ 1 (พิเศษ), มกราคม-เมษายน 2553. หน้า 295-298
- [13] Olson K.R. Anderson I.B. Benowitz N.L. Blanc P.D. Clark R.F. Kearney T.E. et al. 2004. **Poisoning & drug overdose**. The California Poison Control System. 5th ed. New.
- [14] Kim S. S., Phyu M. R., Kim J. M. and Lee S. H. “Authentication of rice using near infrared reflectance spectroscopy.” **Cereal Chemistry**, Vol. 80(3), 2003. Pp 346–349
- [15] Panjama, C. 2007. “Use of Near-Infrared Spectroscopy for Qualitative and Quantitative Analyses of Grains and Cereal Products.” *Dissertations & Theses in Food Science and Technology, Food Science and Technology Department, University of Nebraska*. 169 Pp.
- [16] Wehling R.L. 1998. **Infrared Spectroscopy**. Ch.27 In: *Food Analysis*, 2nd ed. Nielson, S.S. (Ed.), Aspen Publishers, Inc., Gaithersburg, MD, 413-424 Pp.
- [17] Osborne B.G. “Review: Applications of near infrared spectroscopy in quality screening of early-generation material in cereal breeding programmes.” **J. Near Infrared Spectrosc.** Vol. 14, 2006. Pp 93-101
- [18] Osborne B.G. 2007. **Flours and breads**. Ch. 8.1. In: *Near-Infrared Spectroscopy in Food Science and Technology*. Ozaki Y., McClure W.F., and Christy A.A., eds., John Wiley & Sons, Inc., NJ, 2007. Pp 281-296.
- [19] Workman, J. Jr. and Shenk, J. 2004. In: **Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture**. Roberts C.A., Workman, J., Jr., and Reeves III, J.B., American Society of Agronomy, Inc., Crop Science society of America, Inc., and Soil Science Society of America, Inc., WI., Pp 3-10.
- [20] Murray, I. and Williams, P.C. 1990. **Chemical principle of near-infrared technology**. In: **Near-infrared technology in the agricultural and food industries**. P.C. Williams and K.H. Norris (Eds.), American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN, Pp 17-34.
- [21] Ridgway C., Chambers J. “Detection of external and internal insect infestation in wheat by near-infrared reflectance spectroscopy.” **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Vol. 71, 1996. Pp 251–264

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] Ghaedian A.R., Wehling R.L. "Discrimination of sound and granary-weevil-larva-infested wheat kernels by near-infrared diffuse reflectance spectroscopy." **Journal of AOAC International**, Vol. 80, 1997. Pp 997-1005
- [23] Dowell F. E., Throne J. E. and Baker J. E. "Automated nondestructive detection of internal insect infestation of wheat kernels using near-infrared reflectance spectroscopy." **Journal of Economic Entomology**, Vol. 91, 1998. Pp 899-904
- [24] Dowell F. E., Throne J. E., Wang D. and Baker J. E. "Identifying stored-grain insects using near-infrared spectroscopy." **Journal of Economic Entomology**, Vol. 92, 1999. Pp 165-169
- [25] Perez-Mendoza J., Throne J. E., Dowell F. E. and Baker J. E. "Detection of insect fragments in wheat flour by near-infrared spectroscopy." **Journal of Stored Products Research**, Vol. 39, 2003. Pp 305-312
- [26] ปานมนัส ศิริสมบุญ. "เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลผลิตเกษตรและอาหาร." [Online]. Available: <http://www.nirsresearch.com>. 2556.
- [27] Koprinarov N., Hitchcock A.P., Mccrory C.T. and Childs R.F. "Quantitative mapping of structure polymeric systems using singular value decomposition analysis of soft X-ray image," **J. Phy. Chem**, Vol. 106 (21), 2002. Pp 5358-5364
- [28] Fistes A., Tanovic G. "Predicting the size and compositional distributions of wheat flour stocks following first break roller milling using the breakage matrix approach". **J. Food Engineering**, Vol. 75(4), 2006. Pp 527-534
- [29] Bekara M., Baan M.V.D. "Local singular value decomposition for signal enhancement of seismic data," **Geophysics**, Vol. 72(2), 2007. Pp V59-V65
- [30] Choomjaihan P. 2008. "Extending the Breakage Equation for First Break milling of wheat to include particle composition," PhD thesis in the Faculty of Engineering and Physical Science, School of Chemical Engineering and Analytical Science, University of Manchester, England.
- [31] Gupta S., Yalavarthy P.K., Roy D., Piao D. and Vasu R.M. "Singular value decomposition based computationally efficient algorithm for rapid dynamic near-infrared diffuse optical tomography". **The International Journal of Medical Physics Research and Practice**, Vol. 36, 2009. Pp 5559
- [32] Fistes A., Rakic D., Takaci A. and Brdar M. "Using the breakage matrix approach to define the optimal particle size distribution of the input material in a milling

- operation”. *J. Chemical Engineering Science*, Vol. 102, 2013. Pp 346-353
- [33] Tang M., Wu X., Cong M. and Guo K. “A method based on SVD for detecting the defect using the magnetostrictive guided wave technique,” *Mechanical System and Signal Processing*. Vol. 70-71, 2016. Pp 601-612
- [34] ประพาส วีระแพทย์. 2517. *ความรู้เรื่องข้าว*. พิมพ์ครั้งที่ 2 แก้ไขเพิ่มเติม. สาขาตัดพันธุ์ด้านทานศัตรูข้าว กองการข้าว กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [35] ไทยวิกิพีเดีย. “ข้าว.” [Online]. Available :
<http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%82%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%A7.2556>.
- [36] งามชื่น คงเสรีและเครือวัลย์ อัดตะวิริยะสุข. 2522. *เมล็ดข้าว*. กรุงเทพมหานคร : สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [37] จำรัส โปร่งศิริวัฒนา. 2534. *ความรู้เรื่องข้าว*. กรุงเทพมหานคร : สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [38] Juliano, B.O. 1985. *Criteria and tests for rice grain qualities*. Edited by Juliano, B.O.. Minnesota : In Rice chemistry and technology. The American Association of Cereal Chemists.
- [39] อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. *ข้าว:วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [40]. กรมวิชาการเกษตร. 2531. *คู่มือการเก็บข้อมูลพันธุ์ข้าว* สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.
- [41]. กระทรวงพาณิชย์. “มาตรฐานสินค้าข้าวไทย.” [Online]. Available :
<http://www.dft.go.th/Portals/0/Legal/41@25540316-1541524951.doc>. 2540.
- [42] งามชื่น คงเสรี, บุศรา จันทร์แก้วมณี, จารุวรรณ บางแวก และกัญญา เชื้อพันธุ์. 2547. *คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย* ISBN 974-436-343-6. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ และสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [43] ไทยวิกิพีเดีย. “ข้าวหอมมะลิ.” [Online]. Available :
<http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%82%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%A7%E0%B8%AB%E0%B8%AD%E0%B8%A1%E0%B8%A1%E0%B8%B0%E0%B8%A5%E0%B8%B4.2556>.
- [44] ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. “ข้าวหอมดอกมะลิ” [Online]. Available :
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1730/jusmine-rice-ข้าวหอมดอกมะลิ.2556>.
- [45] welovelbshop. “คุณสมบัติของข้าวหอมมะลิ” [Online]. Available :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- http://www.welovelbshop.blogspot.com/2012/04/blog-post_9068.html. 2556.
- [46] งามชื่น คงเสรี สุนันทา วงศ์ปิยชน และประนอม มงคลบรรจง. ประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่อง มาตรฐานสินค้าข้าวหอมมะลิไทย พ.ศ. 2544. ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 118 ตอนพิเศษ 109 ง วันที่ 2 พฤศจิกายน 2544.
- [47] ปัทมา สวาท และมณฑิรา นพรัตน์. 2542. “การพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพข้าวสาร เพื่อการส่งออก” ปัญหาพิเศษ ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [48] กระทรวงพาณิชย์. ประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่อง “หลักเกณฑ์และวิธีการการจัดให้มีการตรวจสอบมาตรฐานสินค้าและการตรวจสอบมาตรฐานสินค้าข้าวหอมมะลิไทย พ.ศ. 2545”. ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 119 ตอนพิเศษ 21 ง วันที่ 7 มีนาคม 2545.
- [49] กระทรวงพาณิชย์. ประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่อง “กำหนดให้ข้าวขาวเป็นสินค้ามาตรฐานและมาตรฐานสินค้าข้าวขาว พ.ศ. 2555”. ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 130 ตอนพิเศษ 14 ง วันที่ 30 มกราคม 2556.
- [50] สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว. “องค์ความรู้เรื่องข้าว วิทยาการก่อนและหลังการเก็บเกี่ยวข้าว.” [Online]. Available: <http://www.brrd.in.th/rkb/disease%20and%20insect/index.php-file=content.php&id=34.htm#3>. 2555.
- [51] นุชจรินทร์ สุขกระบวน, นุ่มฤทัย ดำรงพงศ์พันธุ์, อรณี พลศรี, ดวงใจ หัวเพชร, และนันทิดา กุ้งทอง. “เจลไล่มอดจากใบมะกรูด” [Online]. Available: <http://duangjai64daring.blogspot.com>. 2556.
- [52] Jalal A.F., Risheed C.M., Ibrahim B.M. “Optimization of Chitin Extraction from Chicken Feet.” *Journal of Analytical & Bioanalytical Techniques*, Vol. 3:5, 2012. 5 Pp
- [53] ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. “Chitin/ไคติน” [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1188/chitin-ไคติน>. 2556.
- [54] Jackson L.L., Arnold M.T., Regnier F.E. “Cuticular lipids of adult fleshflies, *Sarcophaga Bullata*.” *Journal of Insect Biochemistry*, Vol. 4, 1974. Pp 369–379
- [55] Blomquist G.J., Dillwith J.W. “Cuticular lipids. In: Kerkut, G.A., Gilbert, L.I. (Eds.), *Comprehensive Insect Physiology, Biochemistry, and Pharmacology*.” *Journal of Stored Products Research*, Vol. III. Pergamon Press, New York, 1985. Pp 117–154
- [56] Baker J.E., Woo S.M., Nelson D.R. and Fatland C.L., “Olefins as major components of epicuticular lipids of three Sitophilus weevils.” *Journal of Biochemistry and Physiology*, Vol. 77, 1984. Pp 877–884

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [57] Neethirajan S., Karunakaran C., Jayas D.S. and White N.D.G. "Detection techniques for stored-product insects in grain." **Food Control**, Vol. 18, 2007. Pp 157-162
- [58] Loschiavo S. R., Atkinson J. M. "An improved trap to detect beetles (Coleoptera) in stored grain." **The Canadian Entomologist**, Vol. 99, 1973. Pp 1160-1163
- [59] White N. D. G., Arbogast R. T., Fields P. G., Hillmann R. C., Loschiavo S. R., Subramanyam B., Throne J.E. and Wright, V.F. "The development and use of pitfall and probe traps for capturing insects in stored grain." **Journal of the Kansas Entomological Society**, Vol. 63, 1990. Pp 505-525
- [60] Fargo W. S., Epperley D., Cuperus G. W., Clary B. C. and Noyes R. "Effects of temperature and duration of trapping on four stored grain insect species." **Journal of Economic Entomology**, Vol. 82, 1989. Pp 970-973
- [61] Wright V. F., Mills R. B. "Estimation of stored-product insect populations in small bins using two sampling techniques." In **Proceedings of the 3rd international working conference on stored-product entomology**, Manhattan: KS Kansas State University, 1984. Pp. 672-679
- [62] Vick K. W., Mankin R. W., Cogburn R. R., Mullen M., Throne J. E., Wright V. F. and Cline L.D. "Review of pheromone-baited sticky traps for detection of stored-product insects." **Journal of the Kansas Entomological Society**, Vol. 63, 1990. Pp 526-532
- [63] Williams H. J., Silverstein R. M., Burkholder W. E. and Khorramshahi A. "Dominicalure 1 and 2: Components of aggregation pheromone from male lesser grain borer *Rhyzopertha dominica* (F). (Coleoptera: Bostrichidae)." **Journal of Economic Entomology**, Vol. 74, 1981. pp 759-780
- [64] Suzuki T., Mori K. "(4R, 8R) - (-)-4,8Dimethyldecanal: The natural aggregation pheromone of the red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Coleoptera: tenebrionidae)." **Applied Entomology and Zoology**, Vol. 18, 1983. Pp 134-136
- [65] Cross J. H., Byler B. C., Cassidy F. Jr., Silverstein R. M., Greenblatt R. E., Burkholder W.E., Levinson A.R. and Levinson H.Z. "Porpak-Q collection of pheromone components and isolation of (Z)- and (E)-14-methyl-8-hexadecenal potent sex attractant components, from females of 4 species of *Trogoderma* (Coleoptera: Dermestidae)." **Journal of Chemical Ecology**, Vol. 2, 1976. Pp 457-468
- [66] Fields P. G., Van Loon I., Dolinski N., Harris L. and Burkholder W. E. "The distribution of *Rhyzopertha dominica* in western Canada." **The Canadian**

- Entomologist**, Vol. 125, 1992. Pp 317–328
- [67] Loschiavo S. R., Wong J., White N. D. G., Pierce H. D., Borden J. H. and Oelschlager, A. C. “Field evaluation of a pheromone to detect adult rusty grain beetles, *Cryptolestes ferrugineus* (Coleoptera: Cucujidae), monitored with insect traps in wheat stored in a steel granary.” **The Canadian Entomologist**, Vol. 118, 1986. Pp 1–8
- [68] Gilbert, D. “Insect electrocutor light traps. In F. J. Baur (Ed.), *Insect management for food storage and processing*.” St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists Inc, 1984. Pp. 87–108.
- [69] Hagstrum D. W., Webb J. C. and Vick K. W. “Acoustical detection and estimation of *Rhyzopertha dominica* (F.) larval populations in stored wheat ” **Florida Entomology**, Vol. 71, 1988. Pp 441–447
- [70] Hagstrum D. W., Flinn P. W., and Shuman D. “Automated monitoring using acoustical sensors for insects in farm-stored wheat.” **Journal of Economic Entomology**, Vol. 89(1), 1996. Pp 211–217
- [71] Beranek, L. L. 1988. **Acoustical measurements**. Woodbury, NY: American Institute of Physics.
- [72] Mankin R. W., Shuman D. and Covelt J. A. “Noise shielding of acoustic devices for insect detection.” **Journal of Economic Entomology**, Vol. 43, 1996. Pp 933–935
- [73] Pearson T. C., Brabec D. L. and Schwartz C. R. “Automated detection of internal insect infestations in whole wheat kernels using a PERTEN SKCS 4100.” **Applied Engineering in Agriculture**, Vol. 19(6), 2003. Pp 727–733
- [74] Smith L. B. “Efficiency of Berlese-tullgren funnels for removal of the rusty grain beetle, *Cryptolestes ferrugineus* from wheat samples.” **The Canadian Entomologist**, Vol. 109(4), 1977. Pp 503–509
- [75] Federal Grain Inspection Service. 1997. **Grain grading procedures**. In *Grain inspection handbook II* (Chapter 1). Washington, DC: USDAGIPSA- FGIS.
- [76] Zayas I. Y., Flinn P. W. “Detection of insects in bulk wheat samples with machine vision.” **Transactions of the ASAE**, Vol. 41, 1998. Pp 883–888
- [77] Ridgway C., Davies E. R., Chambers J., Mason D. R. and Bateman M. “Rapid machine vision method for the detection of insects and other particulate biocontaminants of bulk grain in transit.” **Biosystems Engineering**, Vol. 83(1), 2002.

Pp 21–30.

- [78] Barbedo, J.G.A. “Automatic Method for Counting and Measuring Whiteflies in Soybean Leaves Using Digital Image Processing.” [Online]. Available : <http://www.researchgate.net/publication/258093016>. 2013.
- [79] Karunakaran C., Jayas D. S. and White N. D. G. “Soft X-ray inspection of wheat kernels infested by *Sitophilus oryzae*.” **Transactions of the ASAE**, Vol. 46(3), 2003. Pp 739–745
- [80] Baker, J.E., Dowell, F.E., and Throne, J.E. “Detection of parasitized rice weevils in wheat kernels with near-infrared spectroscopy.” **Biol. Control**, Vol. 16, 1999. Pp 88–90
- [81] Ridgway C., Chambers J., and Cowe I.A. “Detection of grain weevils inside single wheat kernels by a very near-infrared two-wavelength model.” **J. Near Infrared Spectrosc**, Vol.7, 1999. Pp 213-221
- [82] Elizabeth B. M., Dowell F. E., Baker J. E. and Throne J. E. “Detecting single wheat kernels containing live or dead insects using near-infrared reflectance spectroscopy.” **ASAE Paper No. 023067**. Chicago, IL: ASAE. 2002
- [83] Maghirang E.B., Dowell F.E., Baker J.E. and Throne J.E. “Automated detection of single wheat kernels containing live or dead insects using nearinfrared reflectance spectroscopy.” **Trans. ASAE**, Vol. 46, 2003. Pp 1277-1282
- [84] Perez-Mendoza J., Throne J. E., Elizabeth B. M., Dowell F. E., Baker J. E. “Insect Fragments in Flour: Relationship to Lesser Grain Borer (Coleoptera: Bostrichidae) Infestation Level in Wheat and Rapid Detection Using Near-Infrared Spectroscopy.” **Journal of Economic Entomology**, Vol. 98 (6), 2005. Pp 2282–2291
- [85] Paliwal J., Wang W., Symons S.J. and Karunakaran C. “Insect species and infestation level determination in stored wheat using near-infrared spectroscopy.” **Can. Bios. Eng.** Vol. 46, 2004. Pp 7.17-7.24
- [86] Tan Z., Chen Y., Xie J. and Shi, S. “Detection of Pests during grain storage by using terahertz time-domain spectroscopy.” **Journal of Chinese Cereals and Oils Association**, Vol. 30(6), 2015. Pp 125-129
- [87] Choo L.N., Randy L.W. and Susan L.C. “Method for Determining Frying Oil Degradation by Near-Infrared Spectroscopy” **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Vol. 55, 2007, Pp 593-597
- [88] Balasubramanian A., Jayas D.S., Fernando W.G.D., Li G., White N.D.G. “Sensitivity

- analysis of DNA fingerprinting technique for detecting insect fragments in wheat flour” *Journal of Canadian Biosystems Engineering*, Vol. 49, 2007, Pp 4.1-4.5
- [89] Raman D.R., Gerhardt R.R. and Wilkerson J.B. “Detecting insect flight sounds in the field: Implications for acoustic counting of mosquitoes” *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 50 (4), 2007, Pp 1481-1485
- [90] Toyoshima S., Tanabe T., Takegami Y., Mizuno T. and Ihara F. “The Ability of a Double-Sensored NIR Device to Detect Apples (‘Fuji’ Cultivar) Injured by the Peach Fruit Moth, *Carposina sasakii* Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae)” *Bull. Natl. Inst. Fruit Tree Sci*, Vol. 7, 2008. Pp 13-20
- [91] Chen M.H., Zhang G.P. and Xia H. “Application of near-infrared image processing in the agricultural engineering”. *Proc. of SPIE*, Vol. 7489, 2009
- [92] Bhuvaneswari K., Fields P.G., White N.D.G., Sarkar A.K., Singh C.B. and Jayas D.S. “Image analysis for detecting insect fragments in semolina”. *Journal of Stored Products Research*, Vol. 47, 2011. Pp 20–24
- [93] Shar, M.A., Khan, A.A. “Imaging techniques for the detection of stored product pests.” [Online]. Available: <http://www.researchgate.net/publication/260779733>. 2014.
- [94] Moschetti R., Haff P., Saranwong S., Monarca D., Cecchini M. and Massantini R. “Nondestructive detection of insect infested chestnuts based on NIR spectroscopy.” *J. Postharvest Biol. Technol.* Vol. 87, 2014. Pp 88–94
- [95] พรรณทิพย์ ท่อศรีสัมพันธ์. “NIR Spectrometer เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์สารอินทรีย์”. [Online]. Available :http://www.thaiscience.com/lab_vol/p31/nir/asp.2004. 2547.
- [96] นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์. 2545. **หลักการพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้สเปคโตรสโกปี**. ใน การอบรมเชิงปฏิบัติการ: ควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [97] Osborne, B.G. Feam, T. and Hindle, P.H. 1993. **Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis**. Longman Scientific and Technical, Pp 227.
- [98] รศ.ดร.วิชัย หุทัยธนาสันต์, วารุณี ณะแพสย์, ดร.ศุมาพร เกษมสำราญ, ดร.ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, รศ.ดร.ธงชัย สุวรรณสิขณณ์, ผศ.ดร. ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, ดร.อนุพันธ์ เท็ดวงค์วรกุล, ผศ.ดร.รณฤทธิ์ ฤทธิธรม ดร.สิรินนภา ศรีณย์วงศ์, ดร.ณัฐภรณ์ สุทธิวิจิตรภักดี. 2555. **เทคโนโลยีอินฟราเรดย่าน**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 211 หน้า.
- [99] Kawano, S. 2002. **Application to agricultural products and foodstuffs.** In H.W. Siesler, Y. Ozaki, S. Kawata, H.M. Heise (Eds.), *Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications*, Weinheim : Wiley-VCH, Pp 269-288.
- [100] Williams, P. 2007. **Near-infrared Technology–Getting the best out of light.** Edition 5.0. A short course in the practical implementation of near-infrared spectroscopy for the user. PDK Grain, Nanaimo, Canada.
- [101] รุ่งนภา ศัสนีวรธรณ์. “การวิเคราะห์หาไขมันและความชื้นในผลิตภัณฑ์เนยแข็งที่มีไขมันและความชื้นสูง โดยวิธี Near-Infrared.” [Online]. Available: www.sithiphorn.com/newweb/newsletter/31-3-2005-1112262363.pdf. 2550.
- [102] Kawano S., Abe H. “Development of a calibration equation with temperature compensation for determining the Brix value in intact peaches.” *J. Near Infrared Spectrosc*, Vol. 3, 1995. Pp 211-218
- [103] Williams, P. and Norris, K. 2001. **Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries**, 2nd edition, American Association of Cereal Chemists, Inc., St.Pual, Minnesota, USA.
- [104] Zhang B., Rong Z. Q., Shi Y., Wu J. G. and Shi C. H. “Prediction of amino acid composition in brown rice using different sample status by near-infrared reflectance spectroscopy.” *Food Chemistry*, Vol. 127, 2011. Pp. 275-281
- [105] Wu G. J., Shi C. and Zhang X. “Estimating the amino acid composition in milled rice by near-infrared reflectance spectroscopy.” *Field Crops Research*, Vol. 75, 2001. Pp. 1-7
- [106] Jianguo G., Wu Shi C. and Zhang X. “Estimating the amino acid composition in milled rice by near-infrared reflectance spectroscopy.” *Field Crops Research*, Vol. 75, 2002. Pp. 1-7
- [107] Bao J. S., Cai Y. Z. and Corke H. “Prediction of rice starch quality parameters by near-infrared reflectance spectroscopy.” *Journal of Food Science*, Vol. 66, 2001. Pp. 936-939
- [108] Li W. S., Shaw J. T. “Determining the fat acidity of rough rice in near-infrared reflectance spectroscopy.” *Cereal Chemistry*, Vol. 75(5), 1997. Pp. 556-560
- [109] Bao J. S., Shen Y. and Jin L. “Determination of thermal and retrogradation properties of rice starch using near-infrared spectroscopy.” *Journal of Cereal*

- Science, Vol. 46, 2007. Pp. 75-81
- [110] Fontaine J., Horr J. and Schirmer B. "Near-infrared spectroscopy enable the fast and accurate prediction of essential amino acid contents in soy, rapeseed meal, sunflower meal, peas, fishmeal, meat meal product, and poultry meal." *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 49, 2001. Pp. 57-66
- [111] รณฤทธิ์ ฤทธิธรม. 2555. การวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [112] อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. 2545. การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์. การอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่อง การควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. หน้า 78 – 96.
- [113] Siesler, H. W., Ozaki, Y., Kawata, S. and Heise H. M. 2002. *Near-Infrared Spectroscopy : Principle, Instruments, Application*. Johnwiley& Sons, Ltd., Germany. Pp. 151.
- [114] ศุภาพร เกษมสำราญ. 2555. หลักพื้นฐานของสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [115] ธงชัย สุวรรณสิขณณ์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช. 2555. การวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [116] Saranwong S., Sornsrivichai J. and Kawano S. "Improvement of PLS calibration for Brix value and dry matter of mango using information from MLR calibration." *J. Near Infrared Spectrosc.*, Vol. 9, 2001. Pp 287-295
- [117] ณัฐกานต์ นวเศรษฐวิสูตร. 2547. "การทำนายคุณภาพข้าวเจ้าไทยด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด." วิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาลัยเกษตรศาสตร์. ก.ท.ม. 225 หน้า
- [118] Cho, J. H. 2556. *Vibration spectroscopy techniques and applications: Chemometrics tools for Multivariate Analysis*. ในโครงการสัมมนาวิชาการเรื่องการควบคุมคุณภาพสินค้าอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิตด้วยระบบอินฟราเรดย่านใกล้แบบ On Line. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [119] Cozen, J. P. 2006. *Multivariate Calibration*. 2nd English edition, Bruker Optik GmbH.
- [120] นราพร ดาลัย. 2553. "การเก็บรักษาและการใช้ความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวและแป้งข้าว." วิทยานิพนธ์ หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 111 หน้า.

- [121] CODEX International Food Standard. CODEX STAN 198-1995 “Standards for Rice” [Online]. Available: <http://codexalimentarius.org>. 2013.
- [122] Ministry of commerce of Thailand. “National imports-exports product standard: Standard for Thai Hom Mali Rice” [Online]. Available: <http://www.moc.go.th>. 2013.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ขนาดของเมล็ดข้าวกล้องหอมมะลิ

ตัวอย่าง	ชนิดข้าว	ขนาดเมล็ดข้าว (ม.ม.)		
		ด้านกว้าง	ด้านยาว	ด้านหนา
01	หอมมะลิ 105	2.11	7.82	1.78
02	หอมมะลิ 105	1.98	7.50	1.69
03	หอมมะลิ 105	2.15	7.05	1.69
04	หอมมะลิ 105	1.97	7.30	1.69
05	หอมมะลิ 105	2.02	7.00	1.60
06	หอมมะลิ 105	1.99	7.27	1.74
07	หอมมะลิ 105	1.94	7.23	1.68
08	หอมมะลิ 105	2.09	7.68	1.72
09	หอมมะลิ 105	2.12	7.20	1.66
10	หอมมะลิ 105	2.25	7.32	1.73
11	หอมมะลิ 105	1.94	7.43	1.68
12	หอมมะลิ 105	2.14	7.39	1.44
13	หอมมะลิ 105	2.01	6.91	1.66
14	หอมมะลิ 105	2.10	7.87	1.67
15	หอมมะลิ 105	2.11	7.26	1.77
16	หอมมะลิ 105	2.09	7.43	1.60
17	หอมมะลิ 105	2.12	7.66	1.78
18	หอมมะลิ 105	1.99	7.27	1.73
19	หอมมะลิ 105	2.12	7.21	1.75
20	หอมมะลิ 105	2.16	7.81	1.58
21	หอมมะลิ 105	2.11	7.00	1.66
22	หอมมะลิ 105	1.98	7.53	1.74
23	หอมมะลิ 105	2.04	7.23	1.73
24	หอมมะลิ 105	2.17	7.41	1.43
25	หอมมะลิ 105	2.03	7.02	1.70
26	หอมมะลิ 105	2.14	7.49	1.63
27	หอมมะลิ 105	2.03	7.40	1.68
28	หอมมะลิ 105	2.21	7.48	1.76
29	หอมมะลิ 105	2.23	7.23	1.67
30	หอมมะลิ 105	2.11	7.59	1.69
31	หอมมะลิ 105	2.13	7.35	1.68
32	หอมมะลิ 105	2.16	7.81	1.73
33	หอมมะลิ 105	2.17	7.21	1.71
34	หอมมะลิ 105	2.11	7.54	1.66
35	หอมมะลิ 105	1.86	7.21	1.60
36	หอมมะลิ 105	2.11	7.47	1.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	ชนิดข้าว	ขนาดเมล็ดข้าว (ม.ม.)		
		ด้านกว้าง	ด้านยาว	ด้านหนา
37	หอมมะลิ 105	2.12	7.76	1.77
38	หอมมะลิ 105	2.11	6.88	1.71
39	หอมมะลิ 105	2.07	7.54	1.70
40	หอมมะลิ 105	2.12	7.72	1.76
41	หอมมะลิ 105	2.12	7.93	1.76
42	หอมมะลิ 105	2.09	7.18	1.65
43	หอมมะลิ 105	2.20	7.55	1.74
44	หอมมะลิ 105	2.06	7.38	1.65
45	หอมมะลิ 105	2.10	7.71	1.73
46	หอมมะลิ 105	2.05	8.18	1.76
47	หอมมะลิ 105	2.10	7.42	1.77
48	หอมมะลิ 105	1.99	7.53	1.65
49	หอมมะลิ 105	2.12	2.47	1.75
50	หอมมะลิ 105	2.11	7.92	1.75
51	หอมมะลิ 105	2.17	7.40	1.64
52	หอมมะลิ 105	2.15	7.62	1.78
53	หอมมะลิ 105	2.13	7.11	1.74
54	หอมมะลิ 105	1.99	7.28	1.64
55	หอมมะลิ 105	2.09	7.47	1.71
56	หอมมะลิ 105	2.15	7.70	1.72
57	หอมมะลิ 105	2.07	7.15	1.73
58	หอมมะลิ 105	2.17	7.23	1.63
59	หอมมะลิ 105	2.13	7.22	1.62
60	หอมมะลิ 105	2.14	7.68	1.71
61	หอมมะลิ 105	2.08	7.78	1.73
62	หอมมะลิ 105	2.04	7.24	1.61
63	หอมมะลิ 105	2.16	7.86	1.73
64	หอมมะลิ 105	2.10	7.46	1.69
65	หอมมะลิ 105	1.88	7.48	1.75
66	หอมมะลิ 105	2.15	7.59	1.74
67	หอมมะลิ 105	2.08	7.26	1.70
68	หอมมะลิ 105	2.08	7.48	1.75
69	หอมมะลิ 105	2.08	6.91	1.62
70	หอมมะลิ 105	2.11	7.55	1.73
71	หอมมะลิ 105	2.15	7.46	1.73
72	หอมมะลิ 105	2.08	7.53	1.69
73	หอมมะลิ 105	2.11	7.37	1.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	ชนิดข้าว	ขนาดเมล็ดข้าว (ม.ม.)		
		ด้านกว้าง	ด้านยาว	ด้านหนา
74	หอมมะลิ 105	2.19	7.39	1.76
75	หอมมะลิ 105	2.15	7.26	1.69
76	หอมมะลิ 105	2.05	7.46	1.72
77	หอมมะลิ 105	2.19	7.35	1.80
78	หอมมะลิ 105	2.09	7.45	1.64
79	หอมมะลิ 105	2.19	7.69	1.72
80	หอมมะลิ 105	2.05	7.53	1.74
81	หอมมะลิ 105	2.14	7.53	1.68
82	หอมมะลิ 105	2.16	7.95	1.79
83	หอมมะลิ 105	2.08	7.85	1.76
84	หอมมะลิ 105	2.11	7.44	1.70
85	หอมมะลิ 105	2.07	7.49	1.80
86	หอมมะลิ 105	2.16	7.40	1.69
87	หอมมะลิ 105	2.04	7.61	1.74
88	หอมมะลิ 105	2.07	7.47	1.65
89	หอมมะลิ 105	2.16	7.40	1.73
90	หอมมะลิ 105	2.20	7.32	1.62
91	หอมมะลิ 105	1.95	7.23	1.64
92	หอมมะลิ 105	2.12	7.49	1.75
93	หอมมะลิ 105	2.11	7.40	1.64
94	หอมมะลิ 105	2.10	7.00	1.65
95	หอมมะลิ 105	2.21	7.03	1.57
96	หอมมะลิ 105	2.06	7.61	1.79
97	หอมมะลิ 105	1.98	7.68	1.63
98	หอมมะลิ 105	2.13	7.50	1.80
99	หอมมะลิ 105	2.05	7.36	1.71
100	หอมมะลิ 105	2.07	7.66	1.71
เฉลี่ย		2.10	7.44	1.70
S.D.		0.07	0.56	0.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ขนาดของเมล็ดข้าวหอมมะลิ

ตัวอย่าง	ชนิดข้าว	ขนาดเมล็ดข้าว (ม.ม.)		
		ด้านกว้าง	ด้านยาว	ด้านหนา
01	หอมมะลิ 105	1.98	7.40	1.65
02	หอมมะลิ 105	2.12	7.51	1.67
03	หอมมะลิ 105	2.11	7.66	1.68
04	หอมมะลิ 105	2.13	7.15	1.60
05	หอมมะลิ 105	1.96	7.14	1.68
06	หอมมะลิ 105	1.96	7.30	1.65
07	หอมมะลิ 105	2.03	6.90	1.69
08	หอมมะลิ 105	1.95	7.44	1.68
09	หอมมะลิ 105	2.07	6.76	1.58
10	หอมมะลิ 105	1.98	6.92	1.63
11	หอมมะลิ 105	2.06	6.82	1.69
12	หอมมะลิ 105	2.09	7.06	1.70
13	หอมมะลิ 105	2.08	7.31	1.68
14	หอมมะลิ 105	2.15	7.10	1.60
15	หอมมะลิ 105	2.05	6.01	1.61
16	หอมมะลิ 105	1.92	7.09	1.63
17	หอมมะลิ 105	2.02	7.01	1.59
18	หอมมะลิ 105	2.06	7.42	1.70
19	หอมมะลิ 105	1.92	6.85	1.61
20	หอมมะลิ 105	2.03	7.23	1.66
21	หอมมะลิ 105	1.92	7.19	1.66
22	หอมมะลิ 105	1.90	6.72	1.55
23	หอมมะลิ 105	1.95	7.15	1.76
24	หอมมะลิ 105	2.14	7.16	1.60
25	หอมมะลิ 105	2.14	7.23	1.66
26	หอมมะลิ 105	2.05	7.16	1.64
27	หอมมะลิ 105	2.05	6.86	1.66
28	หอมมะลิ 105	2.05	7.20	1.71
29	หอมมะลิ 105	2.09	7.22	1.65
30	หอมมะลิ 105	2.05	7.37	1.64
31	หอมมะลิ 105	2.03	7.65	1.72
32	หอมมะลิ 105	2.10	7.17	1.64
33	หอมมะลิ 105	1.94	7.35	1.65
34	หอมมะลิ 105	1.95	7.42	1.62
35	หอมมะลิ 105	2.00	7.14	1.69
36	หอมมะลิ 105	2.09	6.71	1.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	ชนิดข้าว	ขนาดเมล็ดข้าว (ม.ม.)		
		ด้านกว้าง	ด้านยาว	ด้านหนา
37	หอมมะลิ 105	1.95	7.22	1.69
38	หอมมะลิ 105	2.05	7.06	1.66
39	หอมมะลิ 105	1.95	7.04	1.59
40	หอมมะลิ 105	1.97	6.81	1.57
41	หอมมะลิ 105	2.11	7.19	1.67
42	หอมมะลิ 105	1.95	7.09	1.61
43	หอมมะลิ 105	2.05	7.31	1.66
44	หอมมะลิ 105	2.09	7.50	1.68
45	หอมมะลิ 105	1.95	7.13	1.68
46	หอมมะลิ 105	2.02	7.33	1.63
47	หอมมะลิ 105	1.95	6.61	1.65
48	หอมมะลิ 105	2.05	7.54	1.60
49	หอมมะลิ 105	2.05	7.24	1.62
50	หอมมะลิ 105	2.07	6.81	1.69
51	หอมมะลิ 105	1.95	6.86	1.71
52	หอมมะลิ 105	2.10	7.29	1.70
53	หอมมะลิ 105	2.01	6.53	1.68
54	หอมมะลิ 105	1.99	7.10	1.68
55	หอมมะลิ 105	1.99	6.80	1.67
56	หอมมะลิ 105	2.11	7.41	1.66
57	หอมมะลิ 105	2.07	6.69	1.62
58	หอมมะลิ 105	2.00	7.10	1.67
59	หอมมะลิ 105	1.99	6.96	1.59
60	หอมมะลิ 105	2.02	7.43	1.65
61	หอมมะลิ 105	2.04	6.75	1.64
62	หอมมะลิ 105	2.05	6.85	1.65
63	หอมมะลิ 105	1.99	6.71	1.60
64	หอมมะลิ 105	2.00	7.91	1.68
65	หอมมะลิ 105	2.18	7.43	1.67
66	หอมมะลิ 105	2.06	7.06	1.65
67	หอมมะลิ 105	2.07	7.32	1.70
68	หอมมะลิ 105	2.05	7.12	1.70
69	หอมมะลิ 105	2.05	7.00	1.56
70	หอมมะลิ 105	2.12	6.59	1.55
71	หอมมะลิ 105	2.06	7.00	1.61
72	หอมมะลิ 105	2.02	7.39	1.67
73	หอมมะลิ 105	2.00	7.69	1.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	ชนิดข้าว	ขนาดเมล็ดข้าว (ม.ม.)		
		ด้านกว้าง	ด้านยาว	ด้านหนา
74	หอมมะลิ 105	2.06	6.65	1.68
75	หอมมะลิ 105	2.10	7.55	1.70
76	หอมมะลิ 105	2.02	7.55	1.68
77	หอมมะลิ 105	1.80	7.30	1.72
78	หอมมะลิ 105	2.04	7.36	1.61
79	หอมมะลิ 105	2.09	7.29	1.70
80	หอมมะลิ 105	2.08	7.55	1.63
81	หอมมะลิ 105	2.00	7.23	1.663
82	หอมมะลิ 105	2.09	6.97	1.71
83	หอมมะลิ 105	1.95	6.86	1.58
84	หอมมะลิ 105	2.06	7.54	1.63
85	หอมมะลิ 105	1.95	7.65	1.65
86	หอมมะลิ 105	2.00	6.25	1.63
87	หอมมะลิ 105	2.07	7.00	1.63
88	หอมมะลิ 105	1.99	6.20	1.63
89	หอมมะลิ 105	2.07	7.15	1.67
90	หอมมะลิ 105	2.01	6.65	1.64
91	หอมมะลิ 105	2.09	7.01	1.65
92	หอมมะลิ 105	2.06	6.72	1.66
93	หอมมะลิ 105	1.82	6.73	1.66
94	หอมมะลิ 105	1.98	6.92	1.60
95	หอมมะลิ 105	2.05	6.90	1.66
96	หอมมะลิ 105	2.01	6.98	1.64
97	หอมมะลิ 105	2.14	7.42	1.72
98	หอมมะลิ 105	2.02	6.94	1.71
99	หอมมะลิ 105	2.03	7.46	1.63
100	หอมมะลิ 105	2.09	6.73	1.66
เฉลี่ย		2.03	7.10	1.65
S.D.		0.07	0.34	0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ขนาดของมอดข้าวสาร

ตัวอย่าง	ชนิดศัตรูข้าว	ขนาดเมล็ดข้าว (ม.ม.)		
		ด้านกว้าง	ด้านยาว	ด้านหนา
01	มอดข้าวสาร	1.05	3.30	0.75
02	มอดข้าวสาร	1.02	3.35	0.78
03	มอดข้าวสาร	1.01	3.27	0.77
04	มอดข้าวสาร	1.02	3.23	0.74
05	มอดข้าวสาร	0.99	3.31	0.73
06	มอดข้าวสาร	1.04	3.30	0.76
07	มอดข้าวสาร	1.05	3.29	0.72
08	มอดข้าวสาร	1.03	3.20	0.74
09	มอดข้าวสาร	1.08	3.36	0.76
10	มอดข้าวสาร	1.06	3.32	0.73
11	มอดข้าวสาร	1.03	3.28	0.71
12	มอดข้าวสาร	1.07	3.26	0.70
13	มอดข้าวสาร	1.07	3.24	0.69
14	มอดข้าวสาร	1.03	3.23	0.72
15	มอดข้าวสาร	1.05	3.32	0.74
16	มอดข้าวสาร	1.06	3.30	0.73
17	มอดข้าวสาร	1.05	3.34	0.72
18	มอดข้าวสาร	1.06	3.28	0.71
19	มอดข้าวสาร	1.09	3.25	0.75
20	มอดข้าวสาร	1.01	3.30	0.71
21	มอดข้าวสาร	1.00	3.29	0.72
22	มอดข้าวสาร	1.02	3.25	0.74
23	มอดข้าวสาร	1.05	3.28	0.74
24	มอดข้าวสาร	1.08	3.31	0.70
25	มอดข้าวสาร	1.04	3.27	0.75
26	มอดข้าวสาร	1.07	3.26	0.74
27	มอดข้าวสาร	1.03	3.29	0.72
28	มอดข้าวสาร	1.04	3.30	0.73
29	มอดข้าวสาร	1.03	3.34	0.75
30	มอดข้าวสาร	1.02	3.36	0.74
31	มอดข้าวสาร	1.00	3.25	0.75
32	มอดข้าวสาร	1.06	3.24	0.75
33	มอดข้าวสาร	1.05	3.27	0.71
34	มอดข้าวสาร	1.02	3.32	0.76
35	มอดข้าวสาร	0.98	3.33	0.73
36	มอดข้าวสาร	1.04	3.26	0.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	ชนิดศัตรูข้าว	ขนาดเมล็ดข้าว (ม.ม.)		
		ด้านกว้าง	ด้านยาว	ด้านหนา
37	มอดข้าวสาร	1.06	3.29	0.72
38	มอดข้าวสาร	1.08	3.31	0.70
39	มอดข้าวสาร	1.09	3.25	0.76
40	มอดข้าวสาร	1.03	3.30	0.71
41	มอดข้าวสาร	0.99	3.28	0.72
42	มอดข้าวสาร	1.04	3.33	0.75
43	มอดข้าวสาร	1.03	3.24	0.70
44	มอดข้าวสาร	1.02	3.29	0.74
45	มอดข้าวสาร	1.01	3.27	0.73
46	มอดข้าวสาร	1.01	3.35	0.74
47	มอดข้าวสาร	0.98	3.27	0.72
48	มอดข้าวสาร	1.04	3.26	0.75
49	มอดข้าวสาร	1.03	3.23	0.76
50	มอดข้าวสาร	1.07	3.27	0.75
51	มอดข้าวสาร	1.03	3.32	0.76
52	มอดข้าวสาร	1.02	3.30	0.72
53	มอดข้าวสาร	1.05	3.26	0.74
54	มอดข้าวสาร	1.08	3.34	0.73
55	มอดข้าวสาร	1.04	3.36	0.75
56	มอดข้าวสาร	0.99	3.29	0.74
57	มอดข้าวสาร	1.02	3.25	0.75
58	มอดข้าวสาร	1.03	3.28	0.74
59	มอดข้าวสาร	1.08	3.32	0.69
60	มอดข้าวสาร	1.01	3.34	0.72
61	มอดข้าวสาร	1.07	3.27	0.74
62	มอดข้าวสาร	1.05	3.35	0.71
63	มอดข้าวสาร	1.03	3.28	0.73
64	มอดข้าวสาร	1.06	3.24	0.72
65	มอดข้าวสาร	1.04	3.27	0.75
66	มอดข้าวสาร	1.03	3.29	0.74
67	มอดข้าวสาร	1.07	3.31	0.75
68	มอดข้าวสาร	0.98	3.35	0.74
69	มอดข้าวสาร	1.00	3.29	0.74
70	มอดข้าวสาร	1.08	3.24	0.73
71	มอดข้าวสาร	1.05	3.26	0.73
72	มอดข้าวสาร	1.02	3.28	0.72
73	มอดข้าวสาร	1.01	3.31	0.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	ชนิดศัตรูข้าว	ขนาดเมล็ดข้าว (ม.ม.)		
		ด้านกว้าง	ด้านยาว	ด้านหนา
74	มอดข้าวสาร	1.03	3.33	0.71
75	มอดข้าวสาร	1.04	3.29	0.76
76	มอดข้าวสาร	1.07	3.27	0.75
77	มอดข้าวสาร	0.97	3.26	0.75
78	มอดข้าวสาร	0.99	3.24	0.72
79	มอดข้าวสาร	1.04	3.28	0.74
80	มอดข้าวสาร	1.02	3.29	0.74
81	มอดข้าวสาร	1.01	3.33	0.72
82	มอดข้าวสาร	1.06	3.35	0.73
83	มอดข้าวสาร	1.05	3.36	0.75
84	มอดข้าวสาร	1.01	3.31	0.74
85	มอดข้าวสาร	1.02	3.23	0.73
86	มอดข้าวสาร	1.03	3.35	0.74
87	มอดข้าวสาร	1.05	3.29	0.75
88	มอดข้าวสาร	1.08	3.28	0.74
89	มอดข้าวสาร	1.07	3.24	0.75
90	มอดข้าวสาร	1.04	3.27	0.75
91	มอดข้าวสาร	0.99	3.33	0.73
92	มอดข้าวสาร	0.99	3.26	0.76
93	มอดข้าวสาร	1.04	3.24	0.74
94	มอดข้าวสาร	1.02	3.34	0.76
95	มอดข้าวสาร	1.03	3.30	0.72
96	มอดข้าวสาร	0.98	3.29	0.73
97	มอดข้าวสาร	1.02	3.24	0.74
98	มอดข้าวสาร	1.03	3.28	0.75
99	มอดข้าวสาร	1.02	3.27	0.74
100	มอดข้าวสาร	1.05	3.26	0.72
เฉลี่ย		1.03	3.29	0.74
S.D.		0.03	0.04	0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 น้ำหนักของเมล็ดข้าวกล้องหอมมะลิ

ตัวอย่าง	ชนิดข้าว	น้ำหนัก (กรัม/เมล็ด)
01	หอมมะลิ 105	0.023
02	หอมมะลิ 105	0.021
03	หอมมะลิ 105	0.022
04	หอมมะลิ 105	0.020
05	หอมมะลิ 105	0.019
เฉลี่ย		0.021
S.D.		0.002

หมายเหตุ : ชั่งน้ำหนักของเมล็ดข้าวจำนวน 100 เมล็ด และนำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นน้ำหนักต่อเมล็ดข้าว

ตารางที่ ก.5 น้ำหนักของเมล็ดข้าวขาวหอมมะลิ

ตัวอย่าง	ชนิดข้าว	น้ำหนัก (กรัม/เมล็ด)
01	หอมมะลิ 105	0.019
02	หอมมะลิ 105	0.018
03	หอมมะลิ 105	0.020
04	หอมมะลิ 105	0.019
05	หอมมะลิ 105	0.020
เฉลี่ย		0.019
S.D.		0.001

หมายเหตุ : ชั่งน้ำหนักของเมล็ดข้าวจำนวน 100 เมล็ด และนำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นน้ำหนักต่อเมล็ดข้าว

ตารางที่ ก.6 น้ำหนักของมอดข้าวสาร

ตัวอย่าง	ชนิดศัตรูข้าว	น้ำหนัก (กรัม/ตัว)
01	มอดข้าวสาร	0.00184
02	มอดข้าวสาร	0.00185
03	มอดข้าวสาร	0.00186
04	มอดข้าวสาร	0.00185
05	มอดข้าวสาร	0.00185
เฉลี่ย		0.00185
S.D.		0.00001

หมายเหตุ : ชั่งน้ำหนักของมอดข้าวสารจำนวน 100 ตัว และนำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นน้ำหนักต่อตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

แบบจำลองทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์
และในผลิตภัณฑ์ข้าวหอมมะลิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิ โดยวิธี Partial Least Squares Regression ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ (ระดับปริมาณการปนตั้งแต่ 0-200 ตัว)

Type of rice	อันดับที่	Wave number ranges	Pre-treatment	PLS Factors	R ²	r ²	RMSEE	RMSEP	RPD	Bias
MHR	1	9434-5435 cm ⁻¹ (1,060-1,840 nm)	Min-Max normalization	9	0.97	0.96	9.66	10.4	6.07	2.93
		4608-4237 cm ⁻¹ (2,170-2,360 nm)								
MHR	2	9434-5435 cm ⁻¹ (1,060-1,840 nm)	SNV	8	0.96	0.96	10.20	11.00	5.98	4.27
		4428-4237 cm ⁻¹ (2,258-2,360 nm)								
MHR	3	9434-5435 cm ⁻¹ (1,060-1,840 nm)	SNV	9	0.96	0.96	10.00	11.10	5.94	4.21
		4428-4237 cm ⁻¹ (2,258-2,360 nm)								

หมายเหตุ :

MHR = Milled Hommali rice

SNV = Standard normal variate

R² = Coefficient of determination of calibration set

r² = Coefficient of determination of validation set

RMSEE = Root mean square error of estimation

RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวกล้องหอมมะลิ โดยวิธี Partial Least Squares Regression ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบทำนายปริมาณมอดข้าวสารในข้าวหอมมะลิ (ระดับปริมาณการปนตั้งแต่ 0-200 ตัว)

Type of rice	อันดับที่	Wave number ranges	Pre-treatment	PLS Factors	R^2	r^2	RMSEE	RMSEP	RPD	Bias
BHR	1	9434-6098 cm^{-1} (1,060-1,640 nm)	Straight line subtraction	7	0.90	0.90	19.6	18.70	3.26	2.94
		5465-4237 cm^{-1} (1,830-2,360 nm)								
BHR	2	9434-4598 cm^{-1} (1,060-2,175 nm)	Straight line subtraction	8	0.90	0.89	20.10	19.00	3.19	1.39
BHR	3	9434-4598 cm^{-1} (1,060-2,175 nm)	MSC	8	0.90	0.89	19.40	19.70	3.10	2.72

หมายเหตุ :

BHR = Brown Hommali rice

MSC = Multiplicative scatter correction

R^2 = Coefficient of determination of calibration set

r^2 = Coefficient of determination of validation set

RMSEE = Root mean square error of estimation

RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Partial Least Squares Regression (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)

Type of rice	อันดับที่	Wave number ranges	Pre-treatment	PLS Factors	R ²	r ²	RMSEE	RMSEP	RPD	Bias
MHR	1	9407-5447 cm ⁻¹ (1063-1836 nm)	SNV	9	0.96	0.95	0.012	0.014	4.79	-0.007
		4746-4421 cm ⁻¹ (2170-2262 nm)								
MHR	2	9407-5447 cm ⁻¹ (1063-1836 nm)	SNV	9	0.96	0.95	0.012	0.014	4.61	-0.006
		4428-4243 cm ⁻¹ (2,258-2,357 nm)								
MHR	3	9407-5447 cm ⁻¹ (1063-1836 nm)	SNV	9	0.96	0.94	0.012	0.014	4.66	-0.007
		4746-4243 cm ⁻¹ (2170-2,357 nm)								

หมายเหตุ :

MHR = Milled Hommali rice

SNV = Standard normal variate

R² = Coefficient of determination of calibration set

r² = Coefficient of determination of validation set

RMSEE = Root mean square error of estimation

RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Partial Least Squares Regression (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)

Type of rice	อันดับที่	Wave number ranges	Pre-treatment	PLS Factors	R ²	r ²	RMSEE	RMSEP	RPD	Bias
BHR	1	9407-4244 cm ⁻¹ (1063-2356 nm)	Straight line subtraction	10	0.90	0.90	0.019	0.019	3.11	-0.008
BHR	2	9407-7498 cm ⁻¹ (1063-1334 nm)	SNV	10	0.84	0.85	0.024	0.022	2.81	-0.008
		6102-4598 cm ⁻¹ (1639-2175 nm)								
BHR	3	9407-7498 cm ⁻¹ (1063-1334 nm)	MSC	8	0.84	0.84	0.024	0.023	2.74	-0.009
		6102-4598 cm ⁻¹ (1639-2175 nm)								

หมายเหตุ :

BHR = Brown Hommali rice

SNV = Standard normal variate

MSC = Multiplicative scatter correction

R² = Coefficient of determination of calibration set

r² = Coefficient of determination of validation set

RMSEE = Root mean square error of estimation

RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวขาวหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Singular Value Decomposition (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)

Type of rice	อันดับที่	Wave number (rice : rice weevil)	Pre-treatment	r^2	RMSEP	RPD	Bias
MHR	1	5263,5000,4808:8850,8489,5988 cm^{-1} (1900,2000,2080:1130,1178,1670 nm)	Base line offset	0.97	0.012	5.71	-0.003
MHR	2	6329,5263,4808:8489,6667,5988 cm^{-1} (1580,1900,2080:1178,1500,1670 nm)	2 nd Derivative	0.50	0.049	2.31	-0.038
MHR	3	6329,5263,4808:8850,6667,5988 cm^{-1} (1580,1900,2080:1130,1500,1670 nm)	1 st Derivative	0.45	0.051	2.13	-0.039

หมายเหตุ :

MHR = Milled Hommali rice

r^2 = Coefficient of determination of validation set

RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในข้าวกล้องหอมมะลิที่ไม่มีบรรจุภัณฑ์ โดยวิธี Singular Value Decomposition (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)

Type of rice	อันดับที่	Wave number (rice : rice weevil)	Pre-treatment	r^2	RMSEP	RPD	Bias
BHR	1	5263,5000,4808:8850,8489,6667 cm^{-1} (1900,2000,2080:1130,1178,1500 nm)	SNV	0.96	0.013	5.39	0.002
BHR	2	5263,4808,4762:8850,6667,5988 cm^{-1} (1900,2080,2100:1130,1500,1670 nm)	Base line offset	0.89	0.023	3.13	-0.007
BHR	3	6329,5263,4808:8489,6667,5988 cm^{-1} (1580,1900,2080:1178,1500,1670 nm)	2 nd Derivative	0.42	0.056	2.03	-0.040

หมายเหตุ :

BHR = Brown Hommal rice

SNV = Standard normal variate

r^2 = Coefficient of determination of validation set

RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิ ชนิดถุงพลาสติก PE โดยวิธี Partial Least Squares Regression (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)

Type of rice	อันดับที่	Wave number ranges	Pre-treatment	PLS Factors	R ²	r ²	RMSEE	RMSEP	RPD	Bias
MHR +PE	1	9404-5446 cm ⁻¹ (1063-1836 nm)	SNV	9	0.94	0.93	0.014	0.016	3.92	0.005
MHR +PE	2	9404-5446 cm ⁻¹ (1063-1836 nm)	Min-Max normalization	9	0.93	0.92	0.016	0.017	3.82	0.006
MHR +PE	3	9404-4598 cm ⁻¹ (1063-2175 nm)	Min-Max normalization	9	0.92	0.91	0.017	0.018	3.72	0.009

หมายเหตุ :

MHR = Milled Hommali rice

PE = Polyethelene plastic bag

SNV = Standard normal variate

R² = Coefficient of determination of calibration set

r² = Coefficient of determination of validation set

RMSEE = Root mean square error of estimation

RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิ ชนิดถุงพลาสติก PE โดยวิธี Partial Least Squares Regression (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)

Type of rice	อันดับที่	Wave number ranges	Pre-treatment	PLS Factors	R ²	r ²	RMSEE	RMSEP	RPD	Bias
BHR+ PE	1	9404-7498 cm ⁻¹ (1063-1334 nm)	MSC	8	0.86	0.86	0.022	0.022	3.00	0.008
		6102-4243 cm ⁻¹ (1639-2357 nm)								
BHR+ PE	2	9404-7498 cm ⁻¹ (1063-1334 nm)	MSC	8	0.84	0.85	0.024	0.023	2.91	0.009
		6102-4598 cm ⁻¹ (1639-2175 nm)								
BHR+ PE	2	9404-7498 cm ⁻¹ (1063-1334 nm)	SNV	10	0.83	0.85	0.024	0.023	2.81	0.008
		6102-4598 cm ⁻¹ (1639-2175 nm)								

หมายเหตุ :

BHR = Brown Hommali rice

PE = Polyethelene plastic bag

MSC = Multiplicative scatter correction

SNV = Standard normal variate

R² = Coefficient of determination of calibration set

r² = Coefficient of determination of validation set

RMSEE = Root mean square error of estimation

RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิ ชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี Partial Least Squares Regression (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)

Type of rice	อันดับที่	Wave number ranges	Pre-treatment	PLS Factors	R ²	r ²	RMSEE	RMSEP	RPD	Bias
MHR +PP	1	9404-4243 cm ⁻¹ (1063-2357 nm)	SNV	8	0.88	0.87	0.020	0.021	3.05	0.006
MHR +PP	2	9404-4243 cm ⁻¹ (1063-2357 nm)	MSC	8	0.87	0.86	0.021	0.022	2.95	0.005
MHR +PP	3	9404-5446 cm ⁻¹ (1063-1836 nm)	SNV	8	0.86	0.86	0.022	0.022	2.92	0.006
		4605-4243 cm ⁻¹ (2172-2357 nm)								

หมายเหตุ :

MHR = Milled Hommali rice

PP = Polypropylene plastic sack

SNV = Standard normal variate

MSC = Multiplicative scatter correction

R² = Coefficient of determination of calibration set

r² = Coefficient of determination of validation set

RMSEE = Root mean square error of estimation

RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิ ชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี Partial Least Squares Regression (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)

Type of rice	อันดับที่	Wave number ranges	Pre-treatment	PLS Factors	R ²	r ²	RMSEE	RMSEP	RPD	Bias
BHR+ PP	1	9404-7498 cm ⁻¹ (1064-1334 nm)	MSC	8	0.77	0.75	0.028	0.029	2.04	0.009
		5454-4598 cm ⁻¹ (1834-2175 nm)								
BHR+ PP	2	9404-7498 cm ⁻¹ (1064-1334 nm)	1 st Derivative	8	0.77	0.75	0.029	0.029	2.03	0.004
		6102-4598 cm ⁻¹ (1639-2175 nm)								
BHR+ PP	3	9404-4243 cm ⁻¹ (1064-2357 nm)	Straight line subtraction	9	0.79	0.74	0.030	0.030	1.99	0.004

หมายเหตุ :

BHR = Brown Hommali rice

PP = Polypropylene plastic sack

MSC = Multiplicative scatter correction

R² = Coefficient of determination of calibration set

r² = Coefficient of determination of validation set

RMSEE = Root mean square error of estimation

RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิ ชนิดถุงพลาสติก PE โดยวิธี Singular Value Decomposition (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)

Type of rice	อันดับที่	Wave number (rice : rice weevil)	Pre-treatment	r^2	RMSEP	RPD	Bias
MHR +PE	1	6945,6329,5263:8850,6667,5988 cm^{-1} (1440,1580,1900:1130,1500,1670 nm)	Base line offset	0.91	0.021	3.39	0.004
MHR +PE	2	6945,5000,4808:8489,6667,5988 cm^{-1} (1440,2000,2080:1178,1500,1670 nm)	SNV+1 st Derivative	0.87	0.025	3.14	-0.012
MHR +PE	3	6945,5000,4808:8489,6667,5988 cm^{-1} (1440, 2000,2080:1178,1500,1670 nm)	1 st Derivative	0.86	0.025	3.13	0.012

หมายเหตุ :

MHR = Milled Hommali rice

PE = Polyethelene plastic bag

SNV = Standard normal variate

r^2 = Coefficient of determination of validation set

RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิ ชนิดถุงพลาสติก PE โดยวิธี Singular Value Decomposition (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)

Type of rice	อันดับที่	Wave number (rice : rice weevil)	Pre-treatment	r^2	RMSEP	RPD	Bias
BHR+ PE	1	6945,5263,4762:8850,8489,6667 cm^{-1} (1440,1900,2100:1130,1178,1500 nm)	Base line offset	0.87	0.025	3.04	0.003
BHR+ PE	2	5263,5000,4808:8850,6667,5988 cm^{-1} (1900,2000,2080:1130,1500,1670 nm)	2 nd Derivative	0.86	0.026	2.83	-0.009
BHR+ PE	3	6329,5263,4808:8850,6667,5988 cm^{-1} (1580,1900,2080:1130,1500,1670 nm)	MSC+1 st Derivative	0.83	0.029	2.45	0.006

หมายเหตุ :

BHR = Brown Hommali rice

PE = Polyethelene plastic bag

MSC = Multiplicative scatter correction

r^2 = Coefficient of determination of validation set

RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.13 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวขาวหอมมะลิ ชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี Singular Value Decomposition (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)

Type of rice	อันดับที่	Wave number (rice : rice weevil)	Pre-treatment	r^2	RMSEP	RPD	Bias
MHR +PP	1	5000,4808,4762:8850,8489,5988 cm^{-1} (2000,2080,2100:1130,1178,1670 nm)	Smoothing (moving average)	0.76	0.034	2.67	0.010
MHR +PP	2	6329,5000,4762:8489,6667,5988 cm^{-1} (1580,2000,2100:1178,1500,1670 nm)	Base line offset	0.67	0.039	1.91	-0.006
MHR +PP	3	5000,4808,4762:8850,8489,5988 cm^{-1} (2000,2080,2100:1130,1178,1670 nm)	Min-Max normalization	0.55	0.046	1.77	0.029

หมายเหตุ :

MHR = Milled Hommali rice

PP = Polypropylene plastic sack

r^2 = Coefficient of determination of validation set

RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.14 แบบจำลองที่ดีที่สุด 3 อันดับแรก ของการทำนายปริมาณสัดส่วนโดยน้ำหนักของมอดข้าวสารในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมมะลิ ชนิดกระสอบพลาสติกสาน PP โดยวิธี Singular Value Decomposition (ระดับสัดส่วนการปนโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0-0.222 %)

Type of rice	อันดับที่	Wave number (rice : rice weevil)	Pre-treatment	r^2	RMSEP	RPD	Bias
BHR+ PP	1	6945,6329,5000:8850,8489,6667 cm^{-1} (1440,1580,2000:1130,1178,1500 nm)	Base line offset	0.71	0.037	2.06	-0.027
BHR+ PP	2	5263,5000,4808:8850,8489,5988 cm^{-1} (1900,2000,2080:1130,1178,1670 nm)	Smoothing (moving average)	0.66	0.040	1.73	0.005
BHR+ PP	3	6329,4808,4762:8850,8489,5988 cm^{-1} (1580,2080,2100:1130,1178,1670 nm)	1 st Derivative	0.51	0.049	1.44	0.005

หมายเหตุ :

BHR = Brown Hommali rice

PP = Polypropylene plastic sack

r^2 = Coefficient of determination of validation set

RMSEP = Root mean square error of prediction

RPD = Ratio of standard error of prediction to the standard deviation

Bias = Average of difference between actual value and NIR value

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. JARRUWAT P. and CHOOMJAIHAN P. “Feasibility study on estimation of rice weevil quantity in rice stock using near-infrared spectroscopy technique”, Journal of Innovative Optical Health Sciences, vol.7 (4), 2014, 1450001 (8 pages).
2. Jarruwat P. and Choomjaihan P. “Applicability of near infrared spectroscopy for detecting post-fumigated weevils in packaged rice”, Journal of Near Infrared Spectroscopy, 24, 2016, 1-9.
3. Jarruwat P. and Choomjaihan P. “Applying singular value decomposition technique for quantifying the insects in commercial Thai Hommali Rice from NIR Spectrum”, Journal of Innovative Optical Health Sciences, vol.10 (2), 2017, 1650047 (12 pages).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FEASIBILITY STUDY ON ESTIMATION OF RICE WEEVIL QUANTITY IN RICE STOCK USING NEAR-INFRARED SPECTROSCOPY TECHNIQUE

PUTTINUN JARUWAT* and PRASAN CHOOMJAIHAN†
*Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand, 10520
*putjar2001@yahoo.com
†kcprasan@kmitl.ac.th*

Received 9 August 2013
Accepted 22 October 2013
Published 12 December 2013

Thai rice is favored by large numbers of consumers of all continents because of its excellent taste, fragrant aroma and fine texture. Among all Thai rice varieties, Thai *Hommali* rice is the most preferred. Classification of rice as premium quality requires that almost all grain kernels of the rice be perfectly whole with only a small quantity of foreign particles. Of all the foreign particles found in rice, rice weevils can wreck severest havoc on the quality and quantity of rice such that premium grade rice is transformed into low grade rice. It is widely known that rice millers adopt the “overdose” fumigation practice to control the birth and propagation of rice weevils, the practice of which inevitably gives rise to pesticide residues on rice which end up in the body of consumers. However, if population concentration of rice weevils could be approximated, right amounts of chemicals for fumigation would be applied and thereby no overdose is required. The objective of this study is thus to estimate the quantity of rice weevils in both milled rice and brown rice of Thai *Hommali* rice variety using the near infrared spectroscopy (NIRS) technique. Fourier transforms near infrared (FT-NIR) spectrometer was used in this research and the near-infrared wavelength range was 780–2500 nm. A total of 20 levels of rice weevil infestation with an increment of 10 from 10 to 200 mature rice weevils were applied to 1680 rice samples. The spectral data and quantity of weevils are analyzed by partial least square regression (PLSR) to establish the model for prediction. The results show that the model is able to estimate the quantity of weevils in milled *Hommali* rice and brown *Hommali* rice with high R^2_{val} of 0.96 and 0.90, high RPD of 6.07 and 3.26 and small bias of 2.93 and 2.94, respectively.

Keywords: Rice weevil; Thai *Hommali* rice; near infrared spectroscopy.

1. Introduction

Apart from being a political crop, rice is one of Thailand's important economic crops and a major export income earner of the kingdom for decades. In 2011, Thailand exported 10.71 million tons of rice and generated a profit of approximately USD 6.3 billion.¹ Among the exported rice, Thai *Hommali* rice is classified as premium grade rice and is favored worldwide by consumers because of its unique aroma. The characteristics of Thai *Hommali* rice are long grain kernel, low amylase content (14–18%) and with gelatinization temperatures of 70–74°C.² As such, its texture becomes soft and sticky when cooked.

The milling process of Thai *Hommali* rice in the rice mills begins with dehusking or hulling of paddy rice to obtain brown rice, and then the bran is polished to obtain white rice or milled rice. However, most rice mills store both milled rice and brown rice to meet the demands of different customer groups.

During storage, rice is subjected to damage induced by either physical factors or biological factors or both. Examples of damage caused by physical and biological factors have large variations in storage temperature and insect attacks.³ The biological factors, especially insect attacks, are reported to induce far greater damage to rice quality than the physical factors. FAO reported that in Thailand, insects could cause the damage up to 10% of rice in storage.⁴ The damaged grains not only result in an economic loss but could also be turned into a political issue. Buyer countries would reject the delivery of rice if a large proportion of rice grains is damaged or if the rice is infested with insects or both. Of all the insects, the one found most in the rice stock is rice weevils (*Sitophilus Oryzae L.*).⁵ The cycle of rice weevils consists of four stages: egg, pupa, larva and adult (as shown in Fig. 1). As seen in Fig. 2, in the adult stage, rice weevils become noticeably black in appearance, thereby allowing easy visual detection if the rice stock is infested.

Rice weevils propagate by laying eggs inside rice kernel. From the egg to pupa stages, rice weevils grow inside the rice kernel and feed on starch until they reach the adult stage before emerging from the kernel.⁶ Additionally, the mature rice weevils gnaw other rice kernels and excrete on the damaged kernels. The waste, then, causes reduction in rice quality.

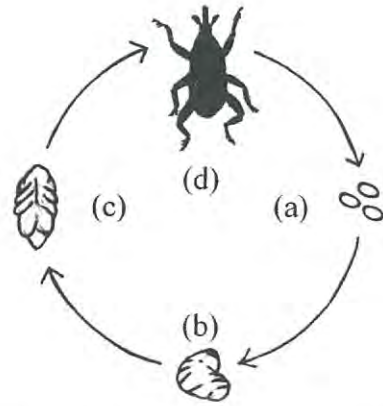


Fig. 1. The cycle of rice weevil (a) egg stage (b) pupa stage (c) larva stage (d) adult stage.



Fig. 2. A snapshot of rice stock infested with rice weevils.

Generally, rice exporters fumigate rice produce with phosphine (PH_3) to disinfest rice weevils. PH_3 is a gas produced by the reaction of aluminium phosphide or zinc phosphide with moisture in the ambient air.⁷ The toxic PH_3 gas can kill and control the birth of rice weevils. However, its residues adversely affect human respiratory system, particularly lungs, brain, heart, liver and kidneys. The toxicity of PH_3 prevents the electron transportation in mitochondria and subsequently causes death.^{6,8} The appropriate recommended dose must be strictly followed for effective disposal of rice weevils, for the safety of the handlers of the chemical, and for reduction of the toxic intake by humans.⁶

Even though rice weevils are easily visually detectable under normal light, those spotted are the rice weevils that inhabit on the surface whereas the rice weevils underneath are undetected. To estimate the quantity of rice weevils with the proposed technique, the NIR waveband is transmitted through rice to detect rice weevils by means of

different chemical compounds between rice weevils and *Hommali* rice. The NIRS technique measures the chemical composition of biological materials using the diffuse reflectance or transmittance of the samples at several wavelengths.^{9,10} The NIRS technology can also measure the concentration of components with different molecular structures, such as protein, water, starch and hydrogen bonding.^{10,11} The NIR spectral region of 780–2500 nm lies between the visible and mid-infrared regions of the electromagnetic spectrum. In addition, NIRS have been widely used with several other food products including grains, cereals and oilseed.^{10,12} It is also used in breeding programs for quality improvement of cereals, such as wheat flour yield, barley malting quality, durum semolina yield, rice milling yield and oat groat percentage. In addition, the technology is applicable to crop management, receivable testing and online process control.^{10,13,14} In later years, the NIRS technique has been steadily refined for evaluation of rice kernel components and detection of foreign particles with faster speed, greater reliability, higher accuracy and nondestruction.¹⁵ The reflectance frequencies from NIRS, which are varied depending on materials being scanned and different absorption spectra of the materials chemically, are used in material composition analysis. NIRS have been, then, applied to distinguish the interested objects from combined material, such as; detecting the insect infested chestnut, identifying stored-grain insects, detecting the insect fragments in wheat flour and so on.^{16–18} Apart from that, NIRS have been used to evaluate the nonorganic materials as well, for instance, contaminating sand and soil in fuel.¹⁹ It is proven that NIRs technique is able to discriminate the organic and nonorganic objects from materials by using the difference of chemical components detection. Therefore, reflectance spectra of other similar noticeable objects with rice weevil are unable to influence the rice weevil detection because both objects have different chemical compositions. Protein and carbohydrate (mainly starch) are the main constituents of Thai rice² whereas protein, chitin and lipids are the main constituents found in rice weevils.¹⁸ So, the difference in the chemical compounds of rice and rice weevils contributes to differences in the NIR absorption spectra. The application of the NIRS technology to estimate the quantity of rice weevils in rice stocks is not only appropriate for determining the number of insects but also helps avoid the overdose of the chemical in

fumigation, thus reducing toxic residues on rice. The use of the technology can be further extended to the rice quality control division, especially to rice destined for export. Thus, the objective of this research is to estimate the rice weevil quantity in rice stock with the NIRS technique.

2. Research Methodology

2.1. Preparation of rice and rice weevil

The rice samples used throughout the experiment were 100% premium grade Hommali rice which were milled into Hommali rice (MHR) and brown Hommali rice (BHR). The average dimensions of MHR were 2.03, 7.10 and 1.65 mm ($W \times L \times T$) and of BHR were 2.10, 7.44 and 1.70 mm ($W \times L \times T$). The average weights of one grain of MHR and BHR were about 0.019 and 0.021, respectively.

Mature rice weevils had been raised and fed with 13.5% moisture content of Hommali rice in the controlled room with temperature of 28–30°C and with the relative humidity of 55–60% for 45 days. The dimensions of one rice weevil were 1.03, 3.29 and 0.74 mm ($W \times L \times T$) on average and the average weight of one rice weevil was 1.85 mg.

2.2. Preparation of samples

The experiments were divided in two parts to estimate the amount of rice weevil in both MHR and BHR categories. In each category experiment, 800 samples were infested with rice weevils for 20 levels, varying from 10 to 200 rice weevils, and the 40 samples were free from infestation, this made 840 samples for measuring in each category. Then rice sample was filled in each sample to make 100 g and the sample was gently shaken 20 times for uniform mixing and each sample was performed for 10 replications on NIRS measuring.

2.3. Collection of the sample spectra

The MHR and BHR samples (i.e., 1680 samples) were each divided into two sets by ratio of 4:1 (i.e., calibration set: validation set). As such, the calibration and validation sets of the MHR and BHR samples were each 672 and 168 samples. Multi Purpose Analyzer Fourier transforms near infrared (FT-NIR) Spectrometer (Bruker Corporation, Germany) was then employed to collect the NIR spectra from the samples. The spectra were the NIR absorbance

within the wavelength range of 780–2500 nm with 0.5-nm resolution, which is expressed as $\log 1/R$, where R is the diffused reflectance. A cylinder-shaped rice holder of 8.7 cm in diameter, 9.0 cm in height and 0.5 cm in thickness was used to hold the rice samples for scanning. The base of the container through which light passed was of transparent crystal quartz and the side was of tin-plated metal. The top of the container was an opening to fill and empty the rice samples. A total of 64 spectra of NIR absorbance measured with the spectrometer of each replication were collected and averaged, and the results were then reported on a computer screen. The 10 replications of each sample were averaged again to get the representative spectrum of one sample.

2.4. Statistical data analysis

The best suited mathematical spectral treatment method from all methods (i.e., Constant offset elimination, Straight line subtraction, Vector normalization (SNV), Min-Max normalization, Multiplicative scattering correction (MSC), First derivative, Second derivative, First derivative + Straight line subtraction, First derivative + SNV, First derivative + MSC) was selected for pretreatment the NIR raw absorbent spectra. Then, the pretreated spectra and the number of weevils were analyzed with the partial least-squares (PLS) regression of the OPUS 7.0 (Bruker Corporation, Germany) program to establish the prediction model. The optimal number of PLS factors was determined based on the least residual sum of square by the OPUS 7.0 program whereby suitable ranges of wavelengths were automatically identified. The regression coefficients indicate NIR absorption values of protein and carbohydrate in rice; and protein, lipids and chitin in rice weevils which affect the determination of quantity of weevils by means of molecular vibration.

The predictive capacity of the model in regard to the calibration sets of MHR and BHR was expressed in coefficient of determination (R^2_{cal}) and root mean square error of calibration (RMSEC), while that of the model in regard to the validation sets of both rice groups was in R^2_{val} , root mean square error of prediction (RMSEP), ratio of standard deviation of reference data in validation set to standard error of prediction (RPD of 3.0 or higher is required for classification and quality control,²⁰), and average of differences between actual value and NIR value (i.e., bias).

3. Results and Discussions

The experiments indicated the absorbent NIR spectra of the noninfested and infested rice with weevils. Figures 3 and 4 show the raw absorbent spectra between the 100% MHR and BHR compared with 200 rice weevils infestation and with the 100% rice weevil respectively. However, significant overlap in individual spectra across all wavelengths indicates that absorbance at one specific wavelength could not be used to estimate rice weevils. The important wavelengths are determined from the regression coefficient plots.

Table 1 shows that in the MHR case the suitable ranges of wavelength for the calibration model for detection of rice weevils in the rice samples are 1060–1840 nm and 2170–2360 nm. The best suited

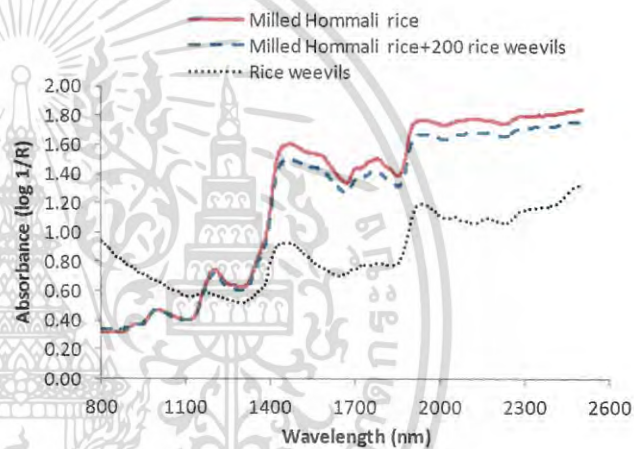


Fig. 3. Raw absorbent spectra of 100% milled Hommali rice, 200 rice weevils infested and 100% rice weevil.

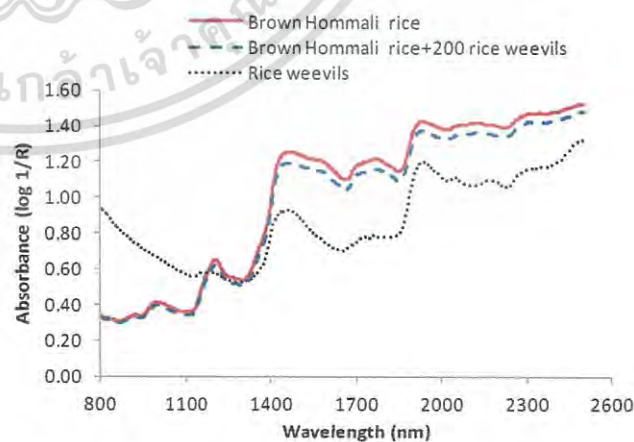


Fig. 4. Raw absorbent spectra of 100% brown Hommali rice, 200 rice weevils infested and 100% rice weevil.

Table 1. The results of PLSR models in estimation of rice weevil populations in milled *Hommali* rice and brown *Hommali* rice.

Type of rice	Wavelength ranges	Pretreatment	PC	R^2_{cal}	R^2_{val}	RMSEC	RMSEP	RPD	Bias
Milled rice	1060–1840 nm 2170–2360 nm	Min-Max normalization	9	0.97	0.96	9.66	10.4	6.07	2.93
Brown rice	1060–1640 nm 1830–2360 nm	Straight line subtraction	7	0.90	0.90	19.6	18.7	3.26	2.94

Note: PC – The optimal number of principal components.

R^2_{cal} – The coefficient of determination of calibration set.

R^2_{val} – The coefficient of determination of validation set.

RMSEC – Root mean square error of calibration.

RMSEP – Root mean square error of prediction.

Bias – The average of difference between actual value and NIR value.

RPD–Ratio of standard deviation of reference data in validation set to standard error of prediction.

mathematical spectral treatment method was Min-Max normalization and the optimal number of PLS factors was 9, which yielded R^2_{cal} and RMSEC of 0.97 and 9.66, respectively. Meanwhile, the results of the validation set showed R^2_{val} , RMSEP, RPD and bias of 0.96, 10.4, 6.07 and 2.93, respectively.

In the case of BHR, the same table shows that the appropriate wavelength ranges for the calibration model to detect rice weevils in the rice samples were 1060–1640 nm and 1830–2360 nm. The suitable number of PLS factors was 7, which yield R^2_{cal} and RMSEC of 0.90 and 19.6, respectively. The results of the validation set showed R^2_{val} , RMSEP, RPD and bias of 0.90, 18.7, 3.26 and 2.94, respectively. The best mathematical spectral pretreatment method for this case was Straight line subtraction.

The correlations between the actual number of rice weevils and the predicted number of rice weevils in the MHR and BHR rice samples of the validation set in PLS models are respectively depicted in Figs. 5 and 6. The results show a significantly positive correlation between the actual number and predicted quantity of rice weevils in both MHR and BHR cases as indicated by high R^2 of 0.96 and 0.90 and slopes of 0.9874 and 0.8863, respectively.

The regression coefficient plots as shown in Figs. 7 and 8 indicate that the important wavelengths for detection of rice weevils in MHR are 1070, 1120, 1210, 1320, 1375, 1410, 1430, 1560, 1730, 1770 and 2310 nm while those in BHR are 1065, 1170, 1220, 1320, 1390, 1440, 1495, 1560, 1640, 1895, 2050, 2230 and 2310 nm. These wavelengths are representations of the chemical bonds of hydrocarbon (C–H), i.e., 1070, 1120, 1170, 1210,

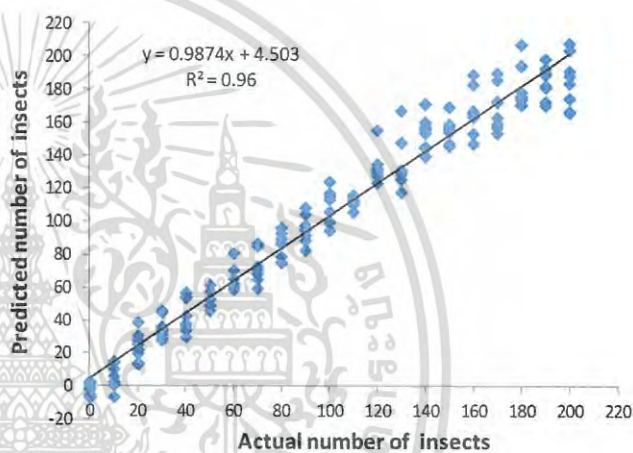


Fig. 5. Scatter plot of actual and predicted population of rice weevils in milled *Hommali* rice samples.

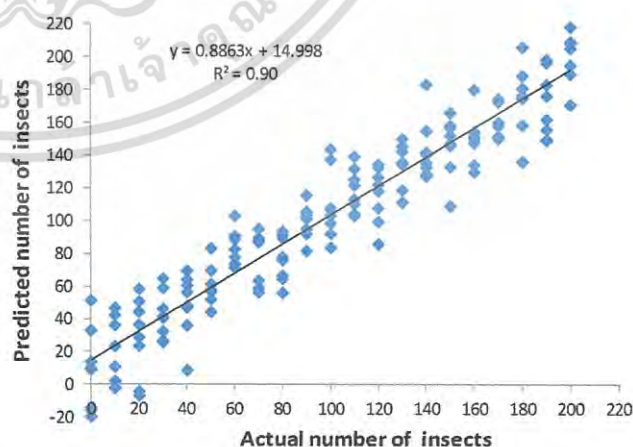


Fig. 6. Scatter plot of actual and predicted population of rice weevils in brown *Hommali* rice samples.

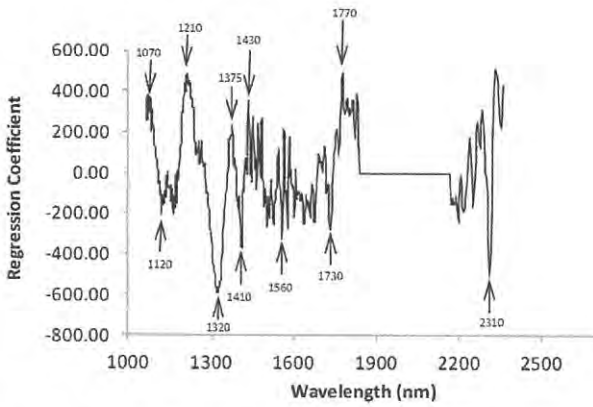


Fig. 7. Regression coefficient plot of milled *Hom Mali* rice.

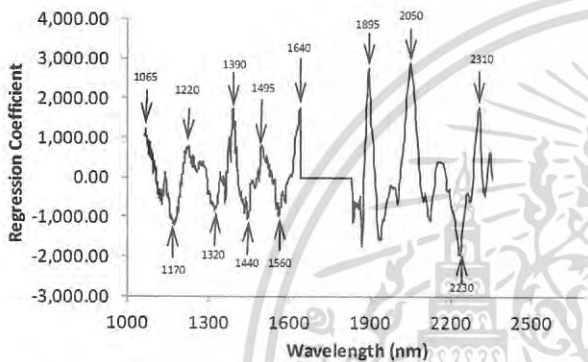


Fig. 8. Regression coefficient plot of brown *Hom Mali* rice.

1220, 1320, 1375, 1390, 1440, 1495, 1560, 1640, 1770, 1895, 2050 and 2310 nm; of protein and amino acid (N-H), i.e., 1065, 1430, 1495, 1560 and 2230 nm; and of starch and glucose (O-H), i.e., 1410, 1440 and 1895 nm.

A number of researchers^{17,18,21-23} applied the NIRS technique to the separation of noninfested wheat kernels from contaminated wheat kernels and inhabiting insects; and also to isolation of insect fragments in wheat flour from the wheat flour. Their research works concluded that the absorbent spectra varied according to the amount of cuticle of insects. Cuticles consist of high amounts of chitin and lipid, both of which are main components of C-H structure.

Chitin, mainly composed of $\beta(1-4)$ linked units of amino sugar N-acetyl-D-glucosamine, is a polysaccharide found mostly in the carapace of, for instance, insects, crabs, prawns and lobsters. Previous research reported that crab chitin ($\beta(1-4)$ linked hexasaccharide of 2-acetamido-2-deoxy-D-glucopyranoside) had very high NIR absorption at

1178 and 1500 nm^{18,21} both of which were the wavelengths employed in this proposed model.

The cuticular lipids of insects are composed of hydrocarbons, esters, ketones, epoxides, alcohols, fatty acids, sterols and triacylglycerols.^{18,24,25} The cuticular lipids of a live rice weevil account for approximately 0.08% of its weight and contain n-alkanes and n-alkadienes.^{18,26} The CH₃ and CH₂ groups are common chemical constituents of most lipid classes, particularly the long-chain hydrocarbons. Therefore, the spectra of cuticular lipids of rice weevils are most absorbed in the wavelengths of 1130 and 1670 nm.^{17,18} Both wavelengths are also NIR bands of the model in this research work for approximation of rice weevils in the rice samples. The NIRS technique, then, has the potential to be used for estimation of the rice weevil quantity in MHR and BHR stocks.

The established model provides the amount of rice weevil in 100 g of a sample which can calculate the concentration of rice weevil in terms of either mass or volume in rice stock from the physical properties of rice and rice weevil, reported in Sec. 2.1. The obtained concentration, then, can be applied for determining the suitable chemical fumigation in rice stock for reducing the use of toxicity.

4. Conclusion

The application of the NIRS technique to estimate the quantity of rice weevils inhabiting MHR and BHR rice stocks is a novel technique that yields $R^2 \geq 0.90$ and RPD > 3.0 for both rice types. In addition, the NIRS technology offers a faster and more accurate result without destruction of rice products. Although this approach is unable to differentiate between live and dead rice weevils, it could still be employed to reasonably estimate and then control with an appropriate dose of PH₃ the quantity of rice weevils in rice stock. The reduction in PH₃ used not only translates into more savings for the rice millers but also means lowered pesticide residues on rice products and thereby less harm to rice consumers.

Acknowledgments

The authors are grateful to the Agricultural Research Development Agency (ARDA) for research funding, without which this research work would never have materialized. We would also like to

express our deep gratitude to Assoc. Prof Dr Panmanas Sirisomboon for assistance and advice on NIRS techniques, Multi Purpose Analyzer FT-NIR Spectrometer and spectra analysis.

References

- Office of Agricultural Economics, "Thailand foreign agricultural trade statistics 2012 (in Thai)", Available at: http://www.oae.go.th/oae_report/export-import/export_result.php (2012).
- E. V. Araullo, D. B. de Padua, M. Graham, "Rice Postharvest Technology," pp. 13–16, International Development Research Centre, Ottawa, Canada (1976).
- S. Neethirajan, C. Karunakaran, D. S. Jayas, N. D. G. White, "Detection techniques for stored-product insects in grain," *J. Food Control* **18**, 157–162 (2007).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, Insect pests of stored products, accessed date 9 July 2012, Available at: <http://www.fao.org/docrep/x5036e/x5036e0y.htm> (1989).
- G. Dal Bello, S. Padin, C. Lopez Lastra, M. Fabrizio, "Laboratory evaluation of chemical-biological control of the rice weevil (*Sitophilus oryzae* L.) in stored grains," *J. Stored Prod. Res.* **37**, 77–84 (2001).
- P. Poonnoi, B. Mahathep, P. Phuttal, "Disinfestation of weevil's eggs in organic rice with microwave heating," *KMUTT Res. Dev. J.* **33**(1), 39–48 (2010).
- R. Kengkarnpanich, P. Visantanon, D. Suthisut, "Use of phosphine fumigant to control stored maize insect pests," *Agricultural Sci. J.* **41**(1), 295–298 (2010).
- K. R. Olson, I. B. Anderson, N. L. Benowitz, P. D. Blanc, R. F. Clark, T. E. Kearney *et al.*, *Poisoning & Drug Overdose*, 5th Edition, McGraw-Hill, New York (2004).
- J., Jr. Workman, J. Shenk, *Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture*, pp. 3–10, American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., and Soil Science Society of America, Inc., WI. (2004).
- P. Cheewapramong, "Use of near-infrared spectroscopy for qualitative and quantitative analyses of grains and cereal products," Dissertations & Thesis in Food Science and Technology, Food Science and Technology Department, University of Nebraska (2007).
- I. Murray, P. C. Williams, *Chemical principle of near-infrared technology, Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*, P. C. Williams and K. H. Norris, Eds., pp. 17–34, American Association of Cereal Chemists. St. Paul, MN (1990).
- R. L. Wehling, *Infrared spectroscopy*, Chap. 27 *Food Analysis*, 2nd Edition, pp. 413–424, S.S. Nielson, Ed., Aspen Publishers, Inc., Gaithersburg, MD, (1998).
- B. G. Osborne, "Review: Applications of near infrared spectroscopy in quality screening of early-generation material in cereal breeding programmes," *J. Near Infrared Spectros.* **14**, 93–101 (2006).
- B. G. Osborne, *Flours and breads, Near-Infrared Spectroscopy in Food Science and Technology, Chap. 8.1*, Y. Ozaki, W. F. McClure, A. A. Christy, Eds., pp. 281–296, John Wiley & Sons, Inc., NJ (2007).
- S. S. Kim, M. R. Phyu, M. J. Kim, S. H. Lee, "Authentication of rice using near infrared reflectance spectroscopy," *J. Cereal Chem.* **80**(3), 346–349 (2003).
- R. Moschetti, R. P. Haff, S. Saranwong, D. Monarca, M. Cecchini, R. Massantini, "Nondestructive detection of insect infested chestnuts based on NIR spectroscopy," *J. Postharvest Biol. Technol.* **87**, 88–94 (2014).
- F. E. Dowell, J. E. Throne, D. Wang, J. E. Baker, "Identifying stored-grain insects using near-infrared spectroscopy," *J. Econ. Entomol.* **92**, 165–169 (1999).
- J. Perez-Mendoza, J. E. Throne, F. E. Dowell, J. E. Baker, "Detection of insect fragments in wheat flour by near-infrared spectroscopy," *J. Stored Prod. Res.* **39**, 305–312 (2003).
- H. W. Zwanziger, H. Förster, "Near infrared spectroscopy of fuel contaminated sand and soil. I. Preliminary results and calibration study," *J. Near Infrared Spectrosc.* **6**, 189–197 (1998).
- P. Williams, *Near-Infrared Technology Getting the Best Out of Light*, pp. 5–16, PDK Grain Nanaimo, British Columbia, and Winnipeg, Manitoba, Canada (2007).
- F. E. Dowell, J. E. Throne, J. E. Baker, "Automated nondestructive detection of internal insect infestation of wheat kernels using near-infrared reflectance spectroscopy," *J. Econ. Entomol.* **91**, 899–904 (1998).
- A. R. Ghaedian, R. L. Wehling, "Discrimination of sound and granary-weevil-larva-infested wheat kernels by near-infrared diffuse reflectance spectroscopy," *J. AOAC Int.* **80**, 997–1005 (1997).
- C. Ridgway, J. Chambers, "Detection of external and internal insect infestation in wheat by near-infrared reflectance spectroscopy," *J. Sci. Food Agric.* **71**, 251–264 (1996).

24. G. J. Blomquist, J. W. Dillwith, Cuticular lipids, *Comprehensive Insect Physiology, Biochemistry, and Pharmacology*, G. A. Kerkut and L. I. Gilbert, Eds., Vol. III, pp. 117–154, Pergamon Press, New York (1985).
25. L. L. Jackson, M. T. Arnold, F. E. Regnier, “Cuticular lipids of adult fleshflies, *Sarcophaga bullata*,” *J. Insect Biochem.* 4, 369–379 (1974).
26. J. E. Baker, S. M. Woo, D. R. Nelson, C. L. Fatland, “Olefins as major components of epicuticular lipids of three *Sitophilus* weevils,” *J. Biochem. Physiol.* 77, 877–884 (1984).



Editor-in-Chief

Graeme D. Batten
C/- Sea Spec Pty Ltd
54 Bradleys Road, North Avoca,
NSW, Australia
thebattens@bigpond.com

Editors

Franklin E. Barton, II
Light Light Solutions, USA
barton@lightlightsolutions.com

Gerard Downey
Ashtown Food Research
Centre, Teagasc, Ireland
gerard.downey@teagasc.ie

Tom Fearn
University College London, UK
t.fearn@ucl.ac.uk

Christian Huck
University of Innsbruck, Austria
Christian.W.Huck@uibk.ac.at

Sumio Kawano
Kagoshima National University,
Japan
nir-kawano@nifty.com

Roger Meder
Meder Consulting, Australia
roger@mederconsulting.com

Brad Swarbrick
QualityByDesign Consultancy,
Australia
brad@qbd-consultancy.com

Paola Taroni
Politecnico di Milano, Italy
paola.taroni@polimi.it

Online Submissions

www.impublishations.com/authors

or send to the

Editorial Office

IM Publications, 6 Charlton Mill,
Charlton, Chichester, West
Sussex PO18 0HY, UK.
sara@impublishations.co.uk



JOURNAL OF NEAR INFRARED SPECTROSCOPY

Dr Prasan Choomjaihan
Department of Agricultural Engineering,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok,
THAILAND, 10520

Wednesday, December 28, 2016

Dear Drs Choomjaihan and Jarruwat,

I am pleased to advise that your paper J-1484 "Applicability of Near Infrared Spectroscopy to Detecting Post Fumigated Weevils in Packaged Rice" has been accepted for publication and sent to IM Publications for typesetting.

Your paper will soon appear as a paper 'in press' at <http://www.impublishations.com/content/jnirs-table-contents?issue=jpp>

Congratulations.

You will soon receive a proof. Please check the proof for changes made during the final editing and typesetting period and return your corrected proof to IM Publications, 6 Charlton Mill, Charlton, Chichester, West Sussex PO18 0HY, UK within the specified time to aid the efficient publication of the Journal.

I have received a Copyright Transfer & Publishing Agreement. Thank you.

At this stage, I would like to indicate that we ask **at the proof stage** if you are able to make your data available to other researchers under the arrangements outlined on the Contents page of each issue of the Journal. In brief, researchers will request your data by email or by sending you a disk, CD etc. with the undertaking that they will use it for private research and they must obtain your agreement to any publication using the data. Papers containing data that are available will be marked with a disk symbol. I would like to stress that this is NOT a condition of acceptance of the paper, which is why I do not ask the question until after the paper has been accepted.

Thank you for submitting your valuable research findings to the JNIRS

Yours sincerely,

Graeme Batten

E-mailed to: prasan.ch@kmitl.ac.th



Special Issue: Honouring Phil Williams

Applicability of near infrared spectroscopy for detecting post-fumigated weevils in packaged rice

Puttinun Jarruwat and Prasan Choomjaihan*

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.
E-mail: prasan.ch@kmitl.ac.th

This research proposes the utilisation of Fourier transform near infrared (FT-NIR) spectroscopy to estimate post-fumigation rice weevils in packaged rice. Different mixtures of dead rice weevils in rice samples were scanned via FT-NIR through the package, and then the data were statistically analysed. The rice samples were of milled hom mali rice (MHR) and brown hom mali rice (BHR), while the packaging materials were polyethylene (PE) plastic bags, polypropylene (PP) woven plastic sacks and hemp sacks. The results revealed that FT-NIR is most applicable for detecting dead rice weevils in MHR in PE bags as indicated respectively by validation r^2 and RPD values of 0.93 and 3.92, followed by the MHR-PP case with r^2 and RPD values of 0.87 and 3.05. The r^2 and RPD values were 0.86 and 3.00 for BHR-PE and 0.75 and 2.04 for BHR-PP. Due to poor penetration of NIR light through the hemp sacks, experiments were not carried out for this packaging material type.

Keywords: insect, Thai hom mali rice, near infrared spectroscopy, package

Introduction

Thai hom mali rice is a premium-grade rice variety that has long been favoured by consumers of rice all over the globe for its unique fragrant aroma which is similar to that of pandanus. The aromatic smell of the rice is attributable to 2-acetyl-1-pyrroline.¹ In addition, Thai hom mali rice is a long-grain kernel rice variety with low amylose content (14–18%) and gelatinisation temperature of 70–74°C,² thereby contributing to its soft and sticky texture once cooked.

In milling, rice is first de-husked or hulled to obtain brown rice whose bran layer is then polished for white rice or milled rice. In the milling process, foreign objects, e.g. immature kernels, chalky kernels, other seeds and stones, are also removed before the rice is packaged. To meet the demands of varying customer groups, rice millers typically produce both milled hom mali rice (MHR) and brown hom mali rice (BHR)

To prolong its shelf life, the milled rice is generally packed in polyethylene (PE) plastic bags of 190 μm in thickness, polypropylene (PP) woven plastic sacks or hemp sacks, as shown in Figure 1.

Insects are the principal enemies of rice products, particularly rice weevils (*Sitophilus oryzae* L.). Rice weevils propagate by depositing eggs inside the rice kernels where they hatch into pupae that feed on starch until reaching the adult stage before emerging from the kernels.³ A new generation of mature rice weevils then continues to wreak havoc and also excrete on other rice kernels. The waste of rice weevils is a main cause of the reduced quality of rice.

It is thus necessary that the fumigation of rice with phosphine (PH_3) be carried out to eliminate rice weevils and their eggs prior to packaging. Figure 2 shows an enlarged



Figure 1. The packaging for hom mali rice: PE plastic bag (left), PP plastic sack (middle), hemp sack (right).

photograph of post-fumigated rice in which only dead rice weevils (DRW) can be observed since other foreign objects, e.g. immature kernels, chalky kernels, other seeds and stones, were removed during the milling process.

According to the international standard for rice CODEX STAN 198-1995, the amounts of filth (including impurities of animal origin, e.g. dead insects) in rice must not exceed 0.1% (w/w).⁴ Domestically, Thailand's Ministry of Commerce has stipulated that the foreign materials allowable in premium-grade Thai rice products must not exceed 0.2% (w/w).⁵

DRW on the surface are readily visually detected under normal lighting; however, such an inspection method fails to detect the dead weevils lying underneath and obscured by the rice grains. Thus, conventional invasive methods are utilised whereby a stick trier or a sleeve-type trier is stabbed into rice packages to collect rice samples for visual examination under

normal lighting. These conventional methods are, however, time-consuming and damage the rice packages. To address this, the present paper proposes a non-destructive inspection technique using near infrared (NIR) spectroscopy.

The utilisation of NIR spectroscopy for the detection of objects and analysis based on different chemical compounds of materials has gained more traction due to its speediness, reliability and accuracy, and, more importantly, the technique requires no destruction of samples. The NIR spectroscopy technique measures the chemical composition of biological materials using the diffuse reflectance or transmittance of samples at several wavelengths.^{6,7} The NIR spectral region of 780–2500 nm lies between the visible and mid-infrared regions of the electromagnetic spectrum. NIR spectroscopy can also measure the concentrations of components with different molecular structures, e.g. proteins, water, starch and hydrogen bonding.^{7,8} In addition, NIR spectroscopy technology has been widely used for management, testing and on-line control of several other food products, e.g. grains, cereals and oilseed.^{7,9,10}

Recently, the NIR spectroscopy technique has been employed for evaluation of rice kernel components and detection of foreign particles because it is fast, reliable, accurate and non-destructive.⁶ The reflectance frequencies from NIR spectroscopy, which vary depending on the materials being scanned and their different absorption spectra, are used in the material composition analysis. In addition, NIR spectroscopy has been applied for distinguishing an individual component or a group of components of examined materials, e.g. detecting insects in stockpiles of chestnuts and in the grains stored in granaries as well as insect fragments in wheat flour.^{11–13}

Carbohydrates (mainly starch) are the main constituents of Thai rice,¹⁴ while chitin and lipids are the main constituents found in rice weevils,¹¹ thereby resulting in differences in the NIR absorption spectra.



Figure 2. An enlarged photograph of post-fumigated rice with dead rice weevils.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Previously, Jaruwat and Choomjaihan applied NIR spectroscopy for estimating the number of rice weevils in rice stock with the results of $r^2 = 0.96$ and 0.90 for MHR and BHR, respectively.¹⁵ Their experiments were nevertheless carried out without the interference of packaging, as the rice samples were first taken out of the sealed packages. In addition, their experiments suffered from a limited number of samples as a result of a desire to minimise the number of rice packages destroyed and resealed. Nevertheless, inspecting the quality of goods without opening the container or package has become more important because some products need to be examined within a sealed package to prevent contamination of the products due to exposure to the environment. Examples are pharmaceutical products and hazardous materials. NIR for detecting the quality of products inside sealed packages was not used. However, with the property of NIR that it can penetrate materials that allow light to pass through, particularly crystal quartz or cling film, these were used to contain or to cover materials for examination using NIR.^{16–19} Therefore, using NIR technology to estimate DRW in rice packages becomes possible.

The objectives of this research were to investigate the effects of different packaging materials on the NIR spectra of rice; and to determine the applicability of the non-destructive NIR spectroscopy technique for detecting DRW inside packages of rice. The research findings are expected to be of use to rice exporters as the implementation of the technique to rice inspection would help maintain the quality of Thai hom mali rice products.

Materials and methods

Equipment and sample preparation

This experimental research utilised a Fourier transform NIR (FT-NIR) spectrometer (MPA, Bruker Corporation, Ettlingen, Germany) in reflection mode with a wavelength range of 780–2500 nm. A cylindrical container with an inner diameter, height and thickness of 8.7 cm, 9.0 cm and 0.5 cm, respectively, was used as the rice sample holder. The container base through which the NIR light passed was of transparent crystal quartz material, its wall was of tin-plated metal and its top was an opening through which the rice samples were filled or emptied.

The experimental rice samples were whole MHR and whole BHR, whose corresponding average dimensions ($W \times L \times T$) were 2.03 mm \times 7.10 mm \times 1.65 mm and 2.10 mm \times 7.44 mm \times 1.70 mm. The average weights for one grain of MHR and BHR were approximately 0.019 g and 0.021 g, respectively. The experimental insects were dead mature rice weevils. The average dimensions and weight of a rice weevil were 1.03 mm \times 3.29 mm \times 0.74 mm ($W \times L \times T$) and 0.00185 g. The experimental packages were PE plastic bags, PP plastic sacks and hemp sacks. In carrying out the experiments, the packages were trimmed into a circular shape of 8.7 cm in diameter to perfectly fit the base of the FT-NIR spectrometer's rice sample holder.

Experimental procedure

To investigate the effects of the various packaging materials on the NIR spectra of rice and to determine the applicability of the NIR spectroscopy technique to detecting in-pack DRW, the experimental procedure was accordingly divided into two parts.

Determination of effects of packaging materials on NIR spectra of rice

To determine the interference effects of the packaging on the rice spectra measured by NIR spectroscopy, three steps were undertaken for each MHR and BHR sample individually. In the first step, 100 g of the rice grain was used to fill the sample container and the absorption spectrum was subsequently measured. The container was then emptied and cleaned and the rice retained. In the second step, a piece of circular-trimmed PE plastic was placed on the inside base of the sample container and the NIR absorption spectrum was then acquired. In the final step, the retained rice sample from the first step was placed on top of the trimmed PE plastic and another measurement of absorption spectrum taken. The experiments for the determination of the packaging interference effects were carried out with 40 samples each of MHR and BHR rice samples, giving rise to a total of 80 experimental samples for PE plastic packaging material. The same procedure was repeated for both PP plastic and hemp sacks.

Determination of NIR spectroscopy applicability for detecting in-pack DRW

To determine the applicability of NIR spectroscopy, the MHR and BHR samples individually were deliberately de-contaminated and contaminated with specified numbers of DRW. In the experiments, the circular-trimmed PE plastic was placed on the inside base of the sample holder prior to filling it with 100 g of the rice samples and the NIR absorption spectra subsequently measured. The container was then emptied and cleaned.

There were 13 levels of DRW contamination under investigation: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 and 120 weevils per 100 g of rice grain sample. These were equivalent to 0 g (100 g)⁻¹ (the de-contaminated case), 0.018 g (100 g)⁻¹, 0.037 g (100 g)⁻¹, 0.055 g (100 g)⁻¹, 0.074 g (100 g)⁻¹, 0.093 g (100 g)⁻¹, 0.111 g (100 g)⁻¹, 0.130 g (100 g)⁻¹, 0.148 g (100 g)⁻¹, 0.167 g (100 g)⁻¹, 0.185 g (100 g)⁻¹, 0.204 g (100 g)⁻¹ and 0.222 g (100 g)⁻¹. The experiments for the determination of the applicability of NIR spectroscopy were carried out with 40 each of MHR and BHR rice samples for each contamination level, giving rise to a total of 1040 samples for PE plastic packaging material. The same procedure was repeated for PP plastic with another 1040 samples on aggregate.

Collection of spectra

The 40 samples of each treatment were divided randomly into two sets (the calibration and validation sets). An amount of 20% of each rice sample was assigned as the validation sets and the rest were for calibration sets. Therefore, the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

calibration and validation sets of each sample group (i.e. MHR-PE, BHR-PE, MHR-PP, BHR-PP) were respectively 416 and 104 samples. The FT-NIR spectrometer was then employed to measure the NIR spectra of the samples. The spectra were collected the wavelength range of 780–2500 nm with 0.5 nm resolution, and the data expressed as $\log(1/R)$, where R is the diffuse reflectance. In the measurement, 64 spectra of NIR absorbance of each sample were collected and averaged.

Statistical data analysis

In the analysis of data, the best-suited mathematical spectral treatment method of the following was selected for pretreatment of the NIR raw absorption spectra: standard normal variate (SNV), min-max normalisation, multiplicative scattering correction (MSC), first derivative, second derivative, SNV + first derivative and MSC + first derivative. The pretreated spectra and the numbers of DRW were then statistically analysed using OPUS 7.0 (Bruker Corporation, Bremen, Germany) partial least squares (PLS) regression to establish a prediction model. The optimal number of PLS factors was determined based on OPUS 7.0 least residual sum of squares error in which the suitable wavelength ranges were automati-

cally identified. The regression coefficients indicated the NIR absorption wavelengths that can be attributed to carbohydrates in the rice samples and to lipids and chitin in the rice weevils, which influenced the estimation of DRW by means of molecular vibration.

The predictive capacity of the model for the calibration sets was expressed in terms of the coefficients of determination R^2 and root mean square error of estimation (RMSEE). The model's predictive capacity for the validation sets was expressed in terms of r^2 , root mean square error of prediction (RMSEP), ratio of standard deviation of reference data in the validation set to standard error of prediction (RPD) and average of the differences between the actual value and NIR value (i.e. bias).

Results and discussion

The results are divided into two parts in accordance with the research objectives, i.e. to investigate the effects of different packaging materials on the NIR spectra of rice; and to determine the applicability of the non-destructive NIR spectroscopy technique for detecting DRW inside packages.

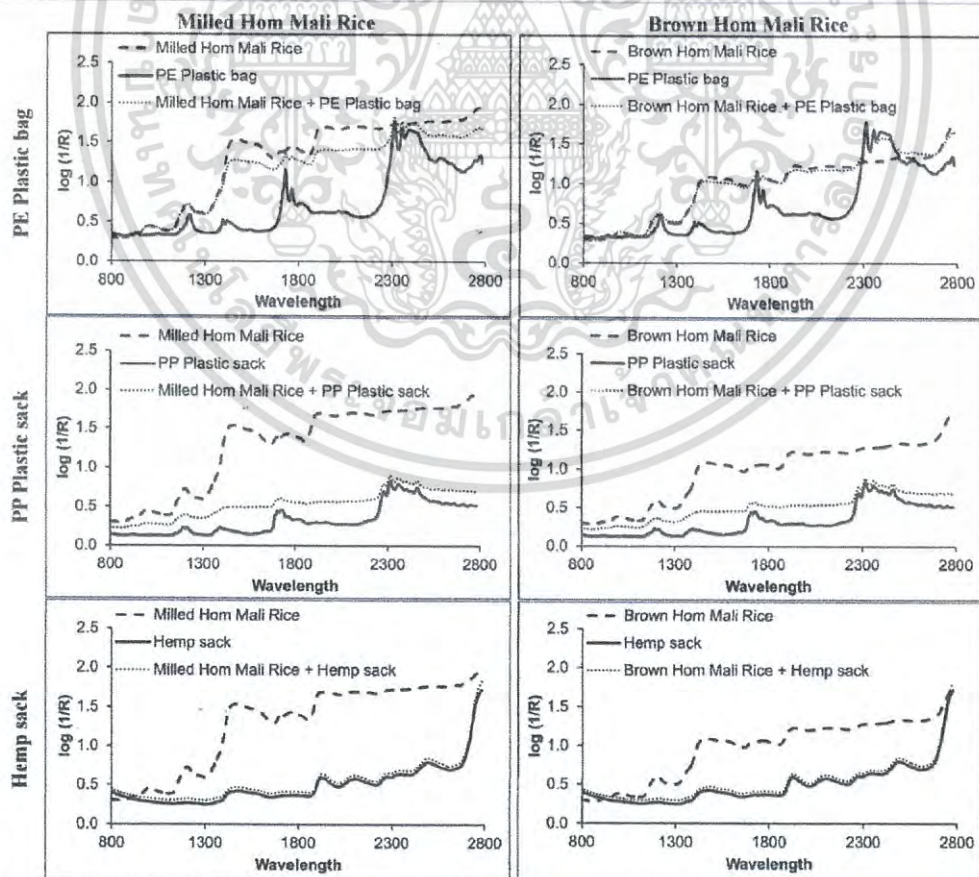


Figure 3. The MSC spectra of MHR and BHR samples with different packaging materials.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Determination of effects of packaging materials on NIR spectra of rice

The raw absorption spectra were pretreated using the SNV, min-max normalisation, MSC, first derivative, second derivative, SNV + first derivative and MSC + first derivative methods.

Since the absorption spectra of the aforesaid pretreatment techniques were similar, Figure 3 specifically illustrates the pretreated MSC spectra of the two types of rice samples (MHR and BHR) and the three packaging types (PE, PP and hemp sack). It was found that PE allowed the NIR radiation to easily pass through, a phenomenon attributable to the transparent nature of the material. In addition, it could be observed that the NIR radiation through the rice samples in the presence of PE packaging closely resembled that without PE packaging.

Due to the translucent property (non-transparent) of PP, the NIR radiation through the rice samples in the presence of PP packaging was much less satisfactory compared with the PE case. On the other hand, due to the opaqueness of hemp sacks, the NIR radiation barely passed through, rendering the material unfit for the detection with NIR spectroscopy. Thus, only the PE and PP packaging materials were subsequently investigated to determine the applicability of NIR spectroscopy for detecting DRW in the packages.

Determination of applicability of NIR spectroscopy for detecting in-pack DRW

Figure 4 compares the MSC spectra of the MHR and BHR rice samples with 0g DRW/100g rice sample (non-contaminated) and 0.222g DRW/100g rice sample for the PE and PP packaging materials. With PE, the MSC spectra of the 0g DRW

contamination were distinct from those of the 0.222g DRW contamination, particularly in the case of MHR, whereas, with PP, the corresponding MSC spectra were barely distinguishable, a phenomenon partly attributed to the translucence of the PP packaging material.

For MHR, in the case of the calibration set, the wavelength ranges suitable for detection of DRW for PE and PP were respectively 1063–1836nm and 1063–2357nm (Table 1). The best-suited mathematical spectral treatment method was SNV for both packaging materials, while the corresponding optimal numbers of PLS factors were 9 and 8, with R^2 of 0.94 and 0.88 and $RMSEE$ of 0.014 DRW (100g) $^{-1}$ and 0.020 DRW (100g) $^{-1}$, respectively. In the case of the validation set, the results were r^2 of 0.93 and 0.87, $RMSEP$ of 0.016 DRW (100g) $^{-1}$ and 0.021 DRW (100g) $^{-1}$, RPD of 3.92 and 3.05 and bias of 0.005 DRW (100g) $^{-1}$ and 0.006 DRW (100g) $^{-1}$, respectively, for PE and PP.

For BHR, in the case of the calibration set, the appropriate wavelength ranges for detecting DRW in the PE bags were 1063–1334nm and 1639–2357nm. The best-suited mathematical spectral treatment method was MSC, and the optimal number of PLS factors was 8, with R^2 of 0.86 and $RMSEE$ of 0.022 DRW (100g) $^{-1}$. The results of the validation set for the PE packaging material were r^2 , $RMSEP$, RPD and bias of 0.86, 0.022 DRW (100g) $^{-1}$, 3.00 and 0.008 DRW (100g) $^{-1}$, respectively. Meanwhile, for the PP plastic sacks, the appropriate wavelength ranges for the calibration model to detect DRW were 1064–1334nm and 1834–2175nm. The best-suited mathematical spectral treatment method was MSC, and the optimum number of PLS factors was 8, resulting in R^2 and $RMSEE$ of

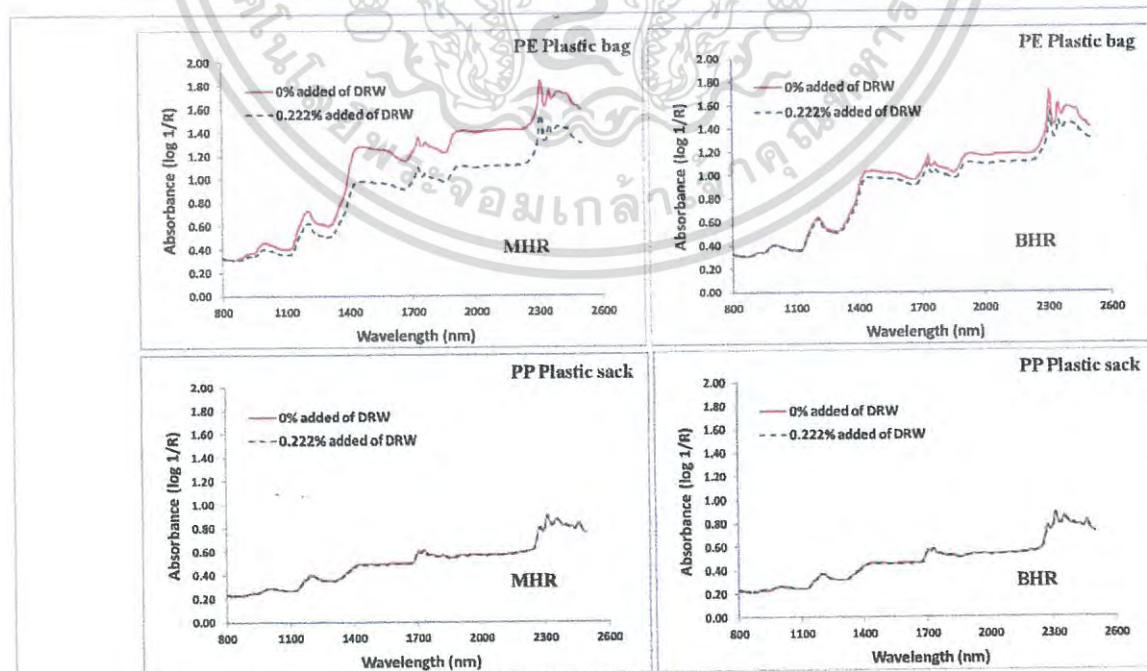


Figure 4. The MSC spectra of MHR and BHR with 0% and 0.222% of added (DRW) for PE and PP packaging.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. The results of PLS regression models in predicting DRW in MHR and BHR with PE and PP packaging.^a

Type of rice	Type of packaging	Wavelength ranges (nm)	Preprocessing	PLS factors	Calibration set		Validation set			
					R^2	RMSEE	r^2	RMSEP	RPD	Bias
MHR	PE	1063–1836	SNV	9	0.94	0.014	0.93	0.016	3.92	0.005
	PP	1063–2357	SNV	8	0.88	0.020	0.87	0.021	3.05	0.006
BHR	PE	1063–1334; 1639–2357	MSC	8	0.86	0.022	0.86	0.022	3.00	0.008
	PP	1064–1334; 1834–2175	MSC	8	0.77	0.028	0.75	0.029	2.04	0.009

^a R^2 , coefficient of determination of calibration set; r^2 , coefficient of determination of validation set; RMSEE, root mean square error of estimation; RMSEP, root mean square error of prediction; RPD, ratio of standard deviation of reference data in validation set to standard error of prediction; bias, average of difference between actual value and NIR value.

0.77 and 0.028 DRW (100g)⁻¹, respectively. The results for the validation set were r^2 , RMSEP, RPD and bias of 0.75, 0.029 DRW (100g)⁻¹, 2.04 and 0.009 DRW (100g)⁻¹, respectively (Table 1).

Figures 5 and 6 illustrate the correlations between the actual portion and the predicted portion of DRW in the MHR and BHR rice samples of the validation set in the PLS regression models for PE (Figure 5) and PP (Figure 6) packaging materials. The MHR-PE case exhibited the highest R^2 (= 0.93), whereas the BHR samples in the PP sacks showed the lowest R^2 (= 0.75).

According to Williams,²⁰ who documented that, for classification and quality control, R^2 and RPD should be ≥ 0.8 and ≥ 3.0 , respectively, the NIR spectroscopy technique could thus be utilised to detect DRW in MHR packed inside PE bags. The use of NIR spectroscopy for detection of DRW in MHR inside PP sacks and BHR inside PE bags provided somewhat less satisfactory detection results. However, the analysis results advise against the utilisation of NIR spectroscopy for BHR packed inside PP sacks.

The regression coefficient plots of the prediction set validated model for the detection of DRW in MHR inside PE plastic bags, MHR inside PP plastic sacks and BHR inside PE plastic bags, as shown in Figures 7–9, respectively, indicated that the suitable wavelengths for the detection of DRW in MHR in PE plastic bags were 1144 nm, 1305 nm, 1375 nm, 1410 nm, 1510 nm, 1643 nm, 1695 nm, 1770 nm and 1818 nm, while those for the detection of DRW in PP sacks were 1127 nm, 1152 nm,

1182 nm, 1327 nm, 1785 nm, 1870 nm, 2090 nm and 2242 nm. In addition, the suitable wavelengths for DRW detection in BHR in PE plastic bags were 1180 nm, 1330 nm, 1675 nm, 1895 nm, 2003 nm, 2050 nm, 2208 nm and 2282 nm. The results for BHR in PP plastic sacks were ignored due to R^2 (0.75) and RPD (2.04) being below the thresholds of ≥ 0.8 and ≥ 3.0 for these parameters.²⁰

These wavelengths are characteristic of chemical bonds of hydrocarbon (C–H), i.e. 1127 nm, 1144 nm, 1152 nm, 1180 nm, 1182 nm, 1305 nm, 1327 nm, 1330 nm, 1640 nm, 1643 nm, 1675 nm, 1695 nm, 1770 nm, 1785 nm, 2208 nm and 2282 nm; of nitrogen and amino acid (N–H), i.e. 1510 nm, 2003 nm, 2050 nm and 2242 nm; and of starch and glucose (O–H), i.e. 1410 nm, 1818 nm, 1870 nm, 1895 nm and 2090 nm.²¹ Additionally, a wavelength characteristic of water, 1940 nm, also appeared, but it was not used for establishing the model.²¹

Unlike the chemical composition of grain, which consists of high amounts of starch, rice weevil consists of high amounts of chitin and lipids, which vary according to the concentration of the cuticle of the insect. Thus, previous research studies have applied the NIR spectroscopy technique to discriminating between contaminated and inhabiting insects in wheat and to isolating the insect fragments in wheat flour.^{11,12,22–24}

Prior studies have shown that crab chitin (β (1–4)-linked hexasaccharide of 2-acetamido-2-deoxy-D-glucopyranoside) was able to absorb NIR radiation at 1178 nm and 1500 nm,^{12,24} both of which are in the range of wavelengths employed in

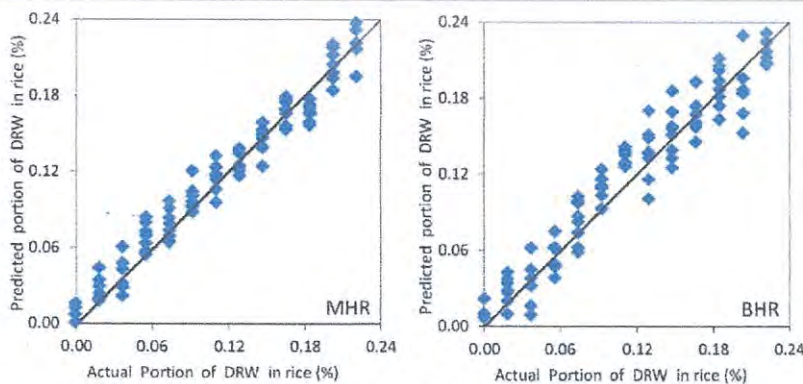


Figure 5. Scatter plots of actual and predicted portion of DRW in MHR and BHR samples inside PE packaging.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

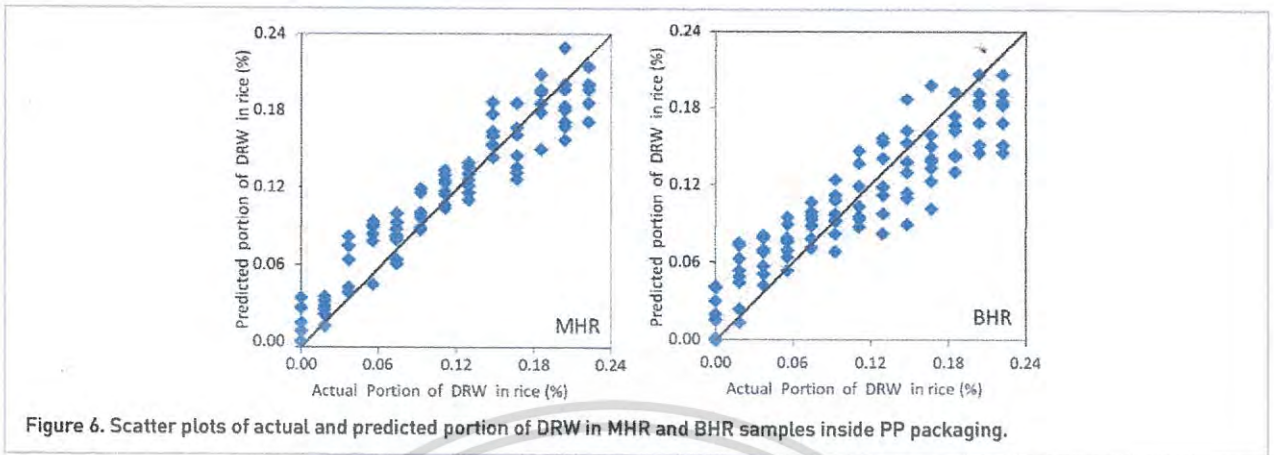


Figure 6. Scatter plots of actual and predicted portion of DRW in MHR and BHR samples inside PP packaging.

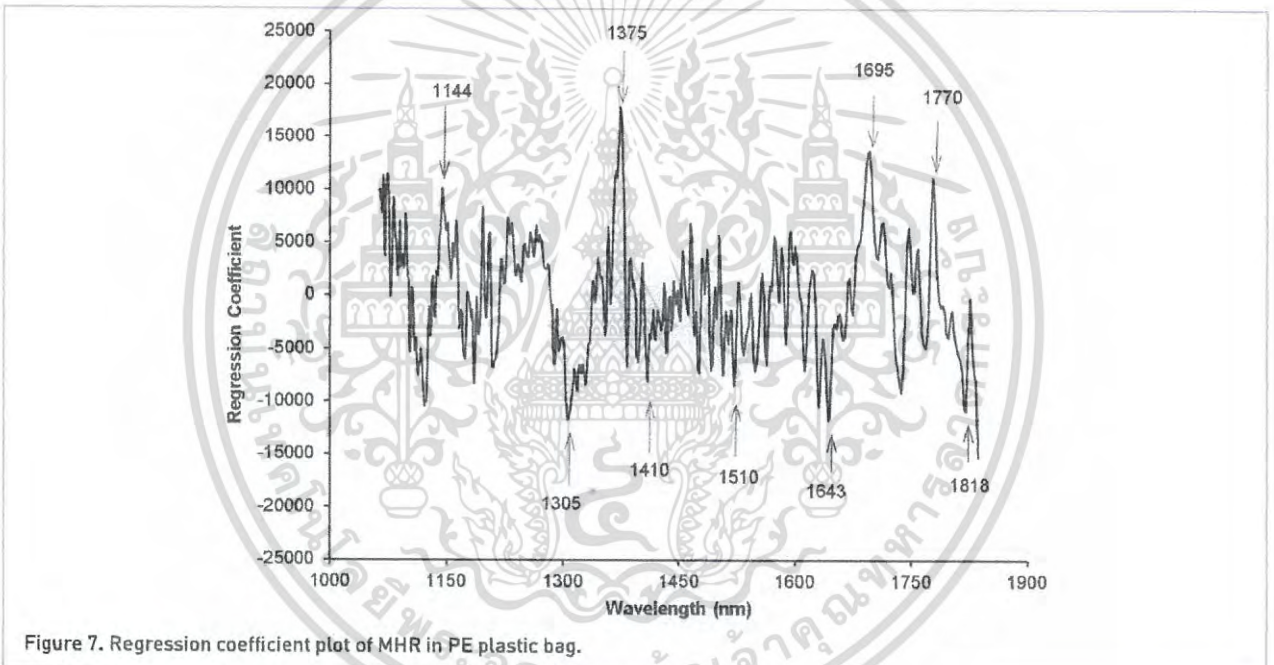


Figure 7. Regression coefficient plot of MHR in PE plastic bag.

the current research. Interestingly, chitin is the link of amino sugar *N*-acetyl- β -glucosamine, which is a polysaccharide that is typically found in the carapaces of insects, crabs, prawns and lobsters.

The cuticular lipids in the cuticle of a rice weevil contain *n*-alkanes and *n*-alkadienes, accounting for about 0.08% of its weight.^{12,25} The CH_3 and CH_2 groups constitute the principal components of the lipids, which can be long-chain compounds composed of hydrocarbons, esters, ketones, epoxides, alcohols, fatty acids, sterols and triacylglycerols.^{12,26,27} Previous studies have reported that the spectra of cuticular lipids of rice weevils mostly contained bands at wavelengths of 1130 nm and 1670 nm,^{11,12} both of which are also NIR bands of the current research. It is thus possible to conclude that the NIR spectroscopy technique can potentially be applied to detecting DRW in packaged MHR and BHR products.

Conclusions

This research has attempted to determine the applicability of NIR spectroscopy for detecting and estimating the quantity of DRW in MHR and BHR packaged in PE plastic bags, PP plastic sacks and hemp sacks. The results with the validation samples revealed that FT-NIR spectroscopy is most applicable to MHR in PE bags as indicated respectively by r^2 and *RPD* values of 0.93 and 3.92, followed by the MHR-PP case with r^2 and *RPD* values of 0.87 and 3.05. The values of r^2 and *RPD* were 0.86 and 3.00 for BHR-PE and 0.75 and 2.04 for BHR-PP. Nevertheless, the poor penetration of NIR radiation through the hemp sacks led to no further experiments for this packaging material type. Economically, the use of NIR spectroscopy in rice quality inspection is more efficient than the conventional labour-intensive inspection methods, and, more

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

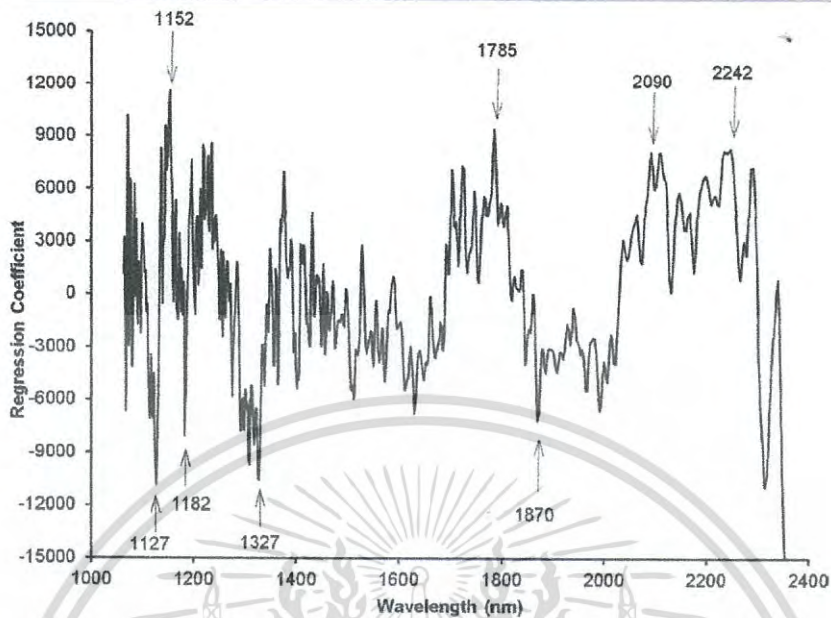


Figure 8. Regression coefficient plot of MHR in PP plastic sack.

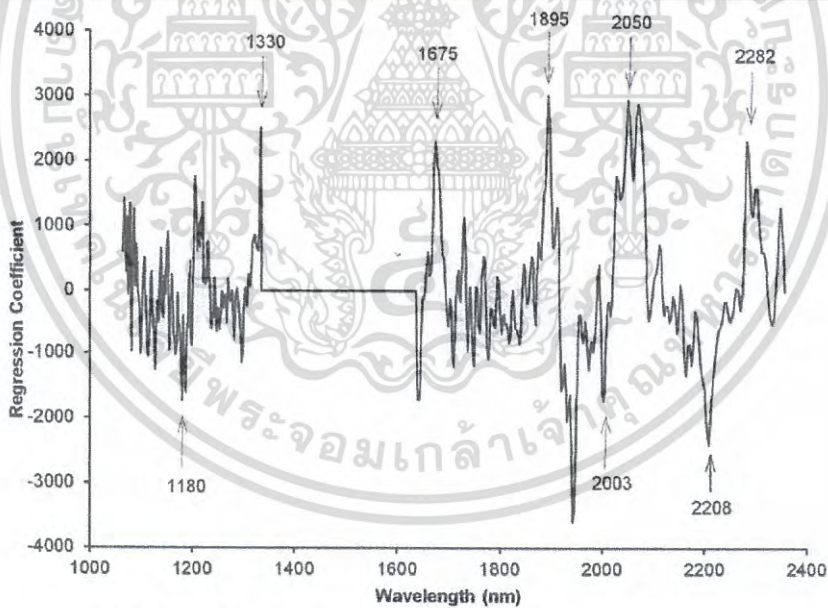


Figure 9. Regression coefficient plot of BHR in PE plastic bag.

importantly, the NIR spectroscopy technique is non-invasive and thereby its use requires no destruction of packaging.

Acknowledgement

The authors express their deep gratitude to the Agricultural Research Development Agency (ARDA) for the financial sponsorship of this research.

References

1. F. Gray, I. Maraval, S. Roques, Z. Gunata, R. Boulanger, A. Audebert and C. Mestres, "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 Res.* **117**, 154 (2010). doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2010.02.008>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. E.V. Araullo, D.B. de Padua and M. Graham, *Rice Postharvest Technology*. International Development Research Centre, Ottawa, Canada, p. 13 (1976).
3. P. Poonnoi, B. Mahathep and P. Phuttal, "Disinfestation of weevil's eggs in organic rice with microwave heating", *KMUTT Res. Dev. J.* **33**, 39 (2010).
4. CODEX International Food Standard, *CODEX STAN 198-1995 Standards for Rice*. <http://codexalimentarius.org> [accessed 6 November 2013].
5. Ministry of Commerce of Thailand, *National Imports–Exports Product Standard: Standard for Thai Hom Mali Rice*. <http://www.moc.go.th> [accessed 20 November 2013].
6. S.S. Kim, M.R. Phyu, M.J. Kim and S.H. Lee, "Authentication of rice using near infrared reflectance spectroscopy", *Cereal Chem.* **80**, 346 (2003). doi: <http://dx.doi.org/10.1094/CCHEM.2003.80.3.346>
7. P. Cheewapramong. "Use of near-infrared spectroscopy for qualitative and quantitative analyses of grains and cereal products," Dissertations & Theses in Food Science and Technology, Food Science and Technology Department, University of Nebraska (2007).
8. I. Murray and P.C. Williams, "Chemical principles of near-infrared technology", in *Near-Infrared Technology in the Agriculture and Food industries*, Ed by P.C. Williams and K.H. Norris. American Association of Cereal Chemists, St Paul, MN, p. 17 (1990).
9. R.L. Wehling, "Infrared spectroscopy", in *Food Analysis*, 2nd Edn, Ed by S.S. Nielson. Aspen Publishers, Gaithersburg, MD, p. 413 (1998).
10. B.G. Osborne, "Flours and breads", in *Near-Infrared Spectroscopy in Food Science and Technology*, Ed by Y. Ozaki, W.F. McClure and A.A. Christy. John Wiley, Hoboken, NJ, p. 281 (2007).
11. F.E. Dowell, J.E. Throne, D. Wang and J.E. Baker, "Identifying stored-grain insects using near-infrared spectroscopy", *J. Econ. Entomol.* **92**, 165 (1999). doi: <http://dx.doi.org/10.1093/jee/92.1.165>
12. J. Perez-Mendoza, J.E. Throne, F.E. Dowell and J.E. Baker, "Detection of insect fragments in wheat flour by near-infrared spectroscopy", *J. Stored Prod. Res.* **39**, 305 (2003). doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-474X\(02\)00021-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-474X(02)00021-8)
13. R. Moscetti, R.P. Haff, S. Saranwong, D. Monarca, M. Cecchini and R. Massantini, "Nondestructive detection of insect infested chestnuts based on NIR spectroscopy", *Postharvest Biol. Technol.* **87**, 88 (2014). doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.08.010>
14. K. Ngamchuen, W. Sunantha, S. Poonsri and M. Pranom, "Milled rice quality preservation through packaging development", *Thai Agric. Res. J.* **17** (1999).
15. P. Jaruwat and P. Choomjaihan, "Feasibility study on estimation of rice weevil quantity in rice stock using near-infrared spectroscopy technique", *J. Innov. Opt. Health Sci.* **7**, 1450001 (2014). doi: <http://dx.doi.org/10.1142/S1793545814500011>
16. R.S. Park, R.E. Agnew and D.J. Kilpatrick, "The effect of freezing and thawing on grass silage quality predictions based on near infrared reflectance spectroscopy", *Anim. Feed Sci. Technol.* **102**, 151 (2002). doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-8401\(02\)00247-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-8401(02)00247-X)
17. P. Fredericks, L. Rintoul and J. Coats, "Vibrational spectroscopy: instrumentation for infrared and Raman spectroscopy", in *Ewing's Analytical Instrumentation Handbook*, 3rd Edn, Ed by J. Cazes. Marcel Dekker, New York, p. 163 (2004).
18. R.S. Park and M.D. Stronge, *Silage Production and Utilisation*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen (2005).
19. L.W. Hansen, R.B. Claridge, M.J. Cree, R. Kunemeyer and C. Devine, "Estimation of visible fat content in beef *m. longissimus* using near infrared spectroscopy", <http://www.mirin.org.nz/docs/poster-estimating-fat-using-nir.pdf> [accessed 5 July 2016].
20. P. Williams, *Near-Infrared Technology: Getting the Best Out of Light*. PDK Grain, Nanaimo, British Columbia/Winnipeg, Manitoba, p. 5 (2007).
21. B.G. Osborne, T. Fearn and P.H. Hindle, *Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis*. John Wiley, New York (1993).
22. C. Ridgway and J. Chambers, "Detection of external and internal insect infestation in wheat by near-infrared reflectance spectroscopy", *J. Sci. Food Agric.* **71**, 251 (1996). doi: [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199606\)71:2<251::AID-JSFA579>3.0.CO;2-A](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199606)71:2<251::AID-JSFA579>3.0.CO;2-A)
23. A.R. Ghaedian and R.L. Wehling, "Discrimination of sound and granary-weevil-larva-infested wheat kernels by near-infrared diffuse reflectance spectroscopy", *J. AOAC Int.* **80**, 997 (1997).
24. F.E. Dowell, J.E. Throne and J.E. Baker, "Automated nondestructive detection of internal insect infestation of wheat kernels using near-infrared reflectance spectroscopy", *J. Econ. Entomol.* **91**, 899 (1998). doi: <http://dx.doi.org/10.1093/jee/91.4.899>
25. J.E. Baker, S.M. Woo, D.R. Nelson and C.L. Fatland, "Olefins as major components of epicuticular lipids of three *Sitophilus* weevils", *Comp. Biochem. Physiol. B* **77**, 877 (1984). doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0305-0491\(84\)90327-4](http://dx.doi.org/10.1016/0305-0491(84)90327-4)
26. L.L. Jackson, M.T. Arnold and F.E. Regnier, "Cuticular lipids of adult fleshflies, *Sarcophaga bullata*", *Insect Biochem.* **4**, 369 (1974). doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0020-1790\(74\)90074-2](http://dx.doi.org/10.1016/0020-1790(74)90074-2)
27. G.J. Blomquist and J.W. Dillwith, "Cuticular lipids", in *Comprehensive Insect Physiology, Biochemistry, and Pharmacology*, Vol. III, Ed by G.A. Kerkut and L.I. Gilbert. Pergamon Press, New York, p. 117 (1985).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Applying singular value decomposition technique for quantifying the insects in commercial Thai Hommali Rice from NIR Spectrum

Puttinun Jaruwat* and Prasan Choomjaihan†
Department of Agricultural Engineering,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520
*putjar2001@yahoo.com
†prasan.ch@kmitl.ac.th

Received 17 February 2016

Accepted 19 June 2016

Published 10 August 2016

Insect infestation in rice stock is a significant issue in rice exporting business, resulting in the loss of product quality, nutrient as well as the economic losses. However, detecting the insect contamination with the traditional sorting techniques were destructive, inaccurate, time consuming and unable to detect the internal insect infestation. This study used near infrared (NIR) spectroscopy for obtaining the absorbent spectra from the insect contamination in two kinds of rice samples, Milled Hommali rice (MHR) and Brown Hommali rice (BHR). The mathematical methods of partial least squares (PLSs) regression and singular value decomposition (SVD) were employed to construct the predicting model. The statistical analysis results, R^2 , RMSEP, RPD and bias, concluded that the predictive models from PLS for MHR and BHR were 0.95 and 0.90, 0.014 and 0.019, 4.79 and 3.11, as well as -0.007 and -0.008 , respectively; while the statistical analysis results from SVD for MHR and BHR were 0.97 and 0.96, 0.012 and 0.013, 5.71 and 5.39, as well as -0.003 and 0.002 , respectively. It showed that SVD technique performed better than PLS technique which shows that using the advantage of SVD technique required less amounts of wave numbers for predicting and was possible to construct the low cost handheld equipment for detecting the insects in rice samples.

Keywords: Insect; rice; NIR; SVD.

†Corresponding author.

This is an Open Access article published by World Scientific Publishing Company. It is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY) License. Further distribution of this work is permitted, provided the original work is properly cited.

1650047-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Introduction

Rice is one of the major food sources with rich nutrition for mankind living and also becomes the most important agricultural product in the Asian economy. Thailand has been nominated as one of the top largest rice production countries with about 22% of Thailand exporting goods.¹ Before exporting, rice grain should be stored strategically for economical purposes according to the time frame. Generally, about 5–10% of grain stocks are significantly deteriorated due to insect infestation during storage.² The damage to grains by insects causes loss of weight, nutrients, germination ability and increased susceptibility to contamination by fungi and downgrades the grain resulting in lowering its market value.³ The damaged grains are not only resulting in an economic loss in terms of quantity and quality losses but could also be turned into political issue in the exporting country. Rejection from the buyer countries can occur, if a large proportion of rice grains are damaged or infested with insects or both. Internationally, standards of rice products impurity have been announced by FAO and WHO called CODEX ALIMENTARIUS. They have been used as guidelines and codes of practice to contribute to the safety, quality and fairness of the international food trade. Certainly, the standard for exporting rice is included in CODEX STAN 198-1995 and has set the amount of filth (impurities of animal origin, including dead insects) which must not exceed 0.1%.⁴ Domestically, the ministry of commerce of Thailand has specified that the foreign material allowance in premium grade of Thai rice product must not exceed 0.2% for domestic trade.⁵ According to the report of FAO, Thailand has encountered 10% of rice grain damage from insect infestation yearly²; particularly, the damage from rice weevil. Traditionally, insect detection methods used the stick trier or the sleeve-type trier to stab into the package and to collect the rice sample for examination by visual inspection, sieving and floatation methods. These methods are widely used for insect contamination in grain stock. Most of these methods tend to have one or more disadvantages such as being subjective, destructive, inaccurate, time consuming, especially, sometimes unable to detect internal insect infestation. However, chemical and electrical detections of insect infestation, such as carbon dioxide, uric acid

measurement, X-ray detection, electronic nose, and acoustic impact emissions^{6–10} have become alternative examinations. The problems of some methods were their inability to detect low-intensity of insect infestation and some of them lacked potential when being examined automatically.

The near infrared (NIR) spectroscopy can solve these problems with the real-time inspection, which is more reliable and more accurate. The NIR spectroscopy technique measures the chemical composition of biological materials using diffuse reflectance or transmittance of the samples at several wavelengths including detection of insect or piece of insect in whole single grain, ground grain and bulk grain samples.^{11–17} However, NIR spectroscopy detection method also has weaknesses such as the complex development of robust calibration models, and inconsistency across several individual instruments. Most of the commercial NIR instruments are inconvenient for practical use in the field. The suggested suitable predicting ranges of wavelengths of NIR were calculated from statistically complex mathematic methods. Sometime the selected wavelengths were not related to the chemical origin of measuring materials or unable to explain the source of chemical terms. The chemical compound profiles of insect and of rice are used, related to their active wavelengths resulting from NIR spectroscopy, then, the mathematics algorithm is applied to solve the proportion of the insect infestation which is a more reliable and trustful method. The selected active wavelengths can be used more numbers of wavelength for rice weevil and rice than one wavelength for each. Therefore, the set of equation becomes greater than two equations from two wavelengths for solving two unknowns (the equation becomes greater than a square 2×2 matrix; i.e., 3×2 , 4×2 and so on). Singular valued decomposition (SVD) is a powerful mathematical technique to deal with the solution of nonsquare sets of equations or matrices based on the theorem of linear algebra¹⁸ and it has been used with several applications such as measuring bubble size distribution in bread doughs, and identifying distribution of wheat compositions throughout sizes from the First Break milling process.^{19,20} Furthermore, SVD has been widely applied in many areas of research, for instance, for mapping the X-ray signal to measure the distribution of acrylic acid in microporous polypropylene,²¹ for signal enhancement and noise suppression of seismic

data²² and for detecting the defect using the magnetostrictive guided wave technique.²³

In this study, Fourier transform near-infrared (FT-NIR) spectral technique was performed for carrying out the full spectral data. Therefore, the objective of this study is to apply SVD for calculating the proportion of insect infestation in rice stock from FT-NIR spectral data.

2. Material and Methods

2.1. Sample preparation and NIR data acquisition

Brown Hom mali rice (BHR) and Milled Hom mali rice (MHR) samples at approximately 14% moisture content (wet basis) were used throughout this study and collected directly from four different rice mill plants. Moisture content was determined using a standard oven method (AOAC, 2000). The broken kernels were removed leaving only the whole healthy kernel for examination. Each rice sample was mixed with dead rice weevils (DRW) by proportion of 0%, 0.018%, 0.037%, 0.055%, 0.074%, 0.093%, 0.111%, 0.130%, 0.148%, 0.167%, 0.185%, 0.204% and 0.222% by weight which covered the standard allowance range of CODEX STAN 198-1995 and of the standard of Thai rice product.

A multi-purpose analyzer FT-NIR spectrometer (Bruker Corporation, Germany) with the wave number range of 12,500–4,000 cm^{-1} (800–2500 nm) was used throughout this experiment. The diffuse reflectance mode at 16 cm^{-1} was set for measuring sample. The spectrum of the sample was derived from the average of 64 scans. The sample holder is cylinder-shaped with 8.7 cm in diameter (inside), 9.0 cm in height, and 0.5 cm in thickness. The base of the sample holder is made of a transparent crystal quartz and the side is made of tin-plated metal. The top of the container is an opening channel for filling and emptying samples.

100 g of uniformly mixed rice samples were filled into the sample holder; then, were placed on the measuring station of the multi-purpose analyzer FT-NIR. The experiments were carried out with four rice sources of two types of rice samples (MHR and BHR) and 13 levels of contamination (10 measuring for each mixture), giving rise to a total of 1040 experiments. The mathematical spectral treatments (i.e., standard normal variate

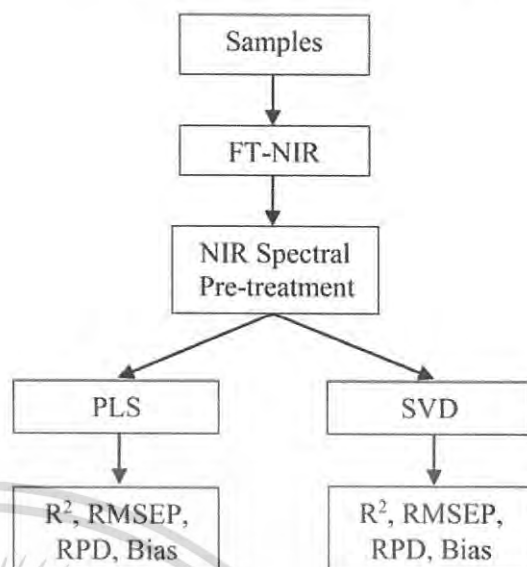


Fig. 1. Flow diagram of the experiment.

(SNV), min-max normalization, Based line offset, multiplicative scattering correction (MSC), first derivative, second derivative, smoothing, straight line subtraction, SNV + first derivative and MSC + first derivative) were then calculated from NIR raw absorbent spectra. Pretreated spectra were used for further data analysis, PLS and SVD. The flow diagram throughout this experiment is illustrated in Fig. 1.

2.2. Data analysis by PLS regression for NIR

The pretreated spectra and the proportion of rice weevils were then analyzed using a partial least squares (PLSs) regression of the OPUS 7.0 (Bruker Corporation, Germany) program in order to establish the prediction model. The optimal number of PLS factors was determined based on the least residual sum of square using the OPUS 7.0 program whereby suitable ranges of wavelengths were automatically identified. The best mathematical pretreatment for prediction of NIR spectra was indicated using statistical information as expressed by coefficients of determination (R^2_{val}), root mean square error of prediction (RMSEP), ratio of standard deviation of reference data in the validation set to standard error of prediction (RPD), and the average of the differences between the actual value and the NIR value (i.e., bias).

2.3. Applying SVD technique for NIR

The SVD approach was used as the tool for generating proportional results of rice weevil versus rice sample. The SVD calculation was performed by MATLAB program version 7.11.0. SVD method uses the fundamental of matrices calculation based on the following theorem of linear algebra.¹⁸ The SVD structure was composed by three related matrices as $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$, where \mathbf{A} describes a linear mapping from the vector space \mathbf{x} to the vector space \mathbf{b} . If the set of equations has m linear equation with n coefficients, the size of matrix \mathbf{A} , \mathbf{x} and \mathbf{b} can be defined as $m \times n$, $n \times 1$, and $m \times 1$, respectively. \mathbf{A} and \mathbf{b} are known; the equation is solved to find the unknown \mathbf{x} .

In terms of square matrix, computing the \mathbf{x} , the inverse of \mathbf{A} must be calculated then multiplied with \mathbf{b} as follows: $\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{b}$. In contrast, the SVD method has three composition matrices of the matrix \mathbf{A} , as $\mathbf{A} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{V}^T$. An $m \times n$ matrix \mathbf{A} is the product of an $m \times n$ column-orthogonal matrix \mathbf{U} , and $n \times n$ diagonal matrix \mathbf{W} with positive or zero elements, and the transpose of and $n \times n$ orthogonal matrix \mathbf{V} . Then $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{V} \cdot [\text{diag}(1/w_j)] \cdot \mathbf{U}^T$; where $[\text{diag}(1/w_j)]$ is the inverse of diagonal element of matrix \mathbf{W} (if $w_j = 0$, the inverse of w_j is replaced with zero). Therefore, with the substitution of \mathbf{A}^{-1} , the matrix \mathbf{x} can be calculated as $\mathbf{x} = \mathbf{V} \cdot [\text{diag}(1/w_j)] \cdot \mathbf{U}^T \cdot \mathbf{b}$.

Accordingly, knowing matrix \mathbf{A} and vector \mathbf{b} , the unknown vector \mathbf{x} can be calculated by a best fit solution that minimizes the error. In the current study, the matrix \mathbf{A} was produced by NIR absorbent intensity of the particular wave numbers which were pretreated by previous explained approach. The selected wave numbers were the predominant wave numbers indicating the important chemical compositions of rice sample, BHR and MHR, and of DRW. In this study, selected wave numbers were three wave numbers for rice samples and three wave numbers for rice weevil which were six wave numbers in total. The matrix \mathbf{b} was produced by pretreating raw NIR absorbent spectra with same six selective wave numbers as matrix \mathbf{A} in unknown mixture sample. From these two matrices, the matrix \mathbf{x} was calculated, giving the proportion of rice weevil and rice sample in the unknown sample. The sizes of matrices \mathbf{A} , \mathbf{x} and \mathbf{b} were, therefore, 6×2 , 2×1 and 6×1 , respectively and composed

as follows:

$$\begin{bmatrix} A_{WL1,DRW} & A_{WL1,rs} \\ A_{WL2,DRW} & A_{WL2,rs} \\ A_{WL3,DRW} & A_{WL3,rs} \\ A_{WL4,DRW} & A_{WL4,rs} \\ A_{WL5,DRW} & A_{WL5,rs} \\ A_{WL6,DRW} & A_{WL6,rs} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{DRW,i,1} \\ x_{rs,i,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{WL1,i,1} \\ b_{WL2,i,1} \\ b_{WL3,i,1} \\ b_{WL4,i,1} \\ b_{WL5,i,1} \\ b_{WL6,i,1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

where

- (1) $\mathbf{A}_{m,n}$ is the pretreated NIR spectroscopy absorbent intensity of the particular wave number m of material n .
- (2) $x_{n,1}$ is the proportion of n in unknown sample i .
- (3) $b_{m,1}$ is the pretreated NIR spectroscopy absorbent intensity of the particular wave number m of unknown sample i .
- (4) m refers to the particular wave number (WL1toWL6) of DRW and rs (dead rice weevil and rice sample).
- (5) n refers to DRW and rs .

The performance of SVD technique was evaluated by statistical values, i.e., coefficients of determination (R^2_{val}) and root mean square error of prediction (RMSEP), ratio of standard deviation of reference data in the validation set to standard error of prediction (RPD), and the average of the differences between the actual value and NIR value (i.e., bias).

3. Results and Discussions

3.1. FT-NIR spectral analysis for rice and rice weevil

The original spectra for BHR, MHR and DRW from the multi-purpose analyzer FT-NIR spectrometer were individually averaged and shown in Fig. 2. It shows that at the wave number longer than about 8500 cm^{-1} , the NIR absorbance of DRW was higher than the rice samples, while, at the shorter wave number range, the NIR absorbance of rice samples as greater than DRW.

This figure demonstrates the predominant peaks of BHR and MHR were at $10,098$, 8370 , 6895 , 5685 , 5207 , 4806 , 4438 and 4019 cm^{-1} . The peaks of $10,098$, 6895 , 4806 , 4438 and 4019 cm^{-1} were related to the chemical structure of starchy material

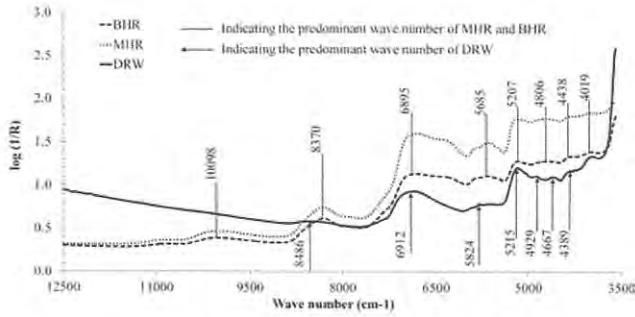


Fig. 2. Initial NIR spectra of BHR, MHR and DRW obtained using an FT-NIR spectrometer over the wave number region 12,500–4,000 cm^{-1} .

and the peaks of 8370, 5685 and 5207 were related to the chemical structure of CH_3 , CH_2 and CONH , respectively, regarding the report of Osborne *et al.*,²⁴ Furthermore, the predominant peaks for DRW were 8486, 6912, 5824, 5215, 4929, 4667 and 4389 cm^{-1} . The peaks were related to the chemical structure of $\text{HC}=\text{CH}$, aromatic, CH_2 , CONH , CONH_2 , $\text{HC}=\text{CH}$ and CH_3 , respectively.²⁴

Figures 3 and 4 show the second derivative spectra between 12500 cm^{-1} and 3500 cm^{-1} of Hommali rice samples (BHR and MHR) and the insect (DRW), respectively. In Fig. 3, the important peaks of Hommali rice samples appeared at the wave number 7043, 5886, 5616, 5261 and 4397 cm^{-1} , where the chemical structure components of these wave numbers were Phenolic or ArOH , CH_3 , cellulose and starch, respectively. Meanwhile, Fig. 4 shows the significant peaks of DRW, these appeared at the wave number 7113, 5793, 5246, 4868, 4629, 4343 and 4050 cm^{-1} , most of the illustrated peaks were related to the O–H, C–H, N–H and amide, which were respectively ROH, CH_2 , POH (Phosphate), Protein, CONHR , CH_2 and CH_3 .²⁴ Additionally, some researchers^{13,25}

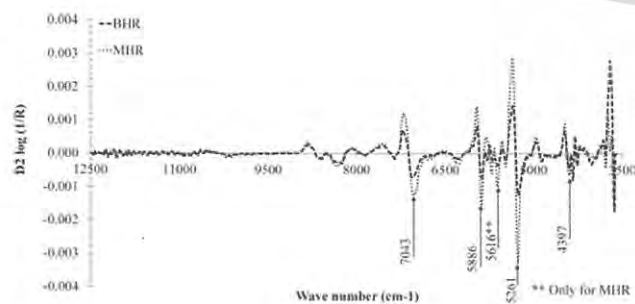


Fig. 3. Average second-derivative of NIR spectra of BHR, MHR obtained using an FT-NIR spectrometer over the wave number region 12,500–4,000 cm^{-1} .

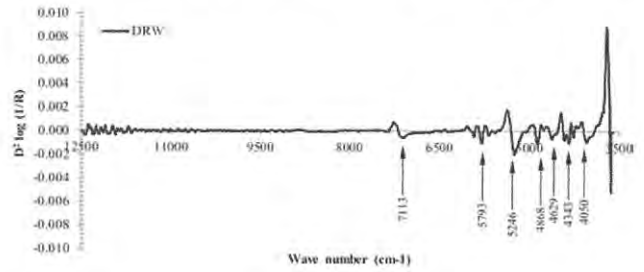


Fig. 4. Average second-derivative of NIR spectra of DRW obtained using an FT-NIR spectrometer over the wave number region 12,500–4,000 cm^{-1} .

mentioned that the wave number of 8489 cm^{-1} (1178 nm) is related to the chitin which is the majority composition in the insect cuticles and it is close to the wave number of 8486 cm^{-1} on the initial NIR spectra of DRW. It could be assumed that this wave number was related to chitin. Nevertheless, this wave number did not appear dominantly on the second derivative of NIR spectra when compared with other wave numbers as mentioned earlier.

3.2. Development of PLS models

The model for predicting DRW was developed by applying the PLS factors in the wavenumber range of 9407–5447 cm^{-1} and 4746–4421 cm^{-1} for predicting the percentage of DRW in MHR and in the wave number range of 9407–4244 cm^{-1} of predicting the percentage of DRW in BHR as demonstrated in Table 1. The PLS factors of PLS model for MHR and BHR were selected using the lowest value of RMSEP as shown in Fig. 5. The best model for predicting DRW in MHR sample was established using nine PLS factors with standard normal variate (SNV) pretreatment method. The vibration bands used in the model were mainly starch, lipid and cellulose. The MHR model expressed the statistical values of R^2 , RMSEP, RPD and bias of 0.95%, 0.014%, 4.79% and -0.007% , respectively. Meanwhile, the model predicting DRW in BHR sample was also established. The model employed 10 PLS factors from the straight line subtraction pretreatment method. The vibration bands used in the model were similar to the model of MHR, as well as, the vibration band of sucrose was also included. The BHR model, together, expressed the statistical values of R^2 , RMSEP, RPD and bias of 0.90, 0.019%, 3.11% and -0.008% , respectively. Considering the selected NIR spectrum pretreating

Table 1. Statistics of prediction of DRW (%) in MHR and BHR by partial least square model.

Type of rice	Wave number ranges	Pre-treatment	PLS Factors	R^2_{val}	RMSEP	RPD	Bias
MHR	9407–5447 cm^{-1} (1063–1836 nm) 4746–4421 cm^{-1} (2107–2262 nm)	SNV	9	0.95	0.014	4.79	-0.007
BHR	9407–4244 cm^{-1} (1063–2356 nm)	Straight line subtraction	10	0.90	0.019	3.11	-0.008

Notes: MHR — Milled Hommali rice.

BHR — Brown Hommali rice.

DRW — Dead rice weevils.

R^2_{val} — The coefficient of determination of validation set.

RMSEP — Root mean square error of prediction.

RPD — Ratio of standard deviation of reference data in validation set to standard error of prediction.

Bias — The average of difference between actual value and NIR value.

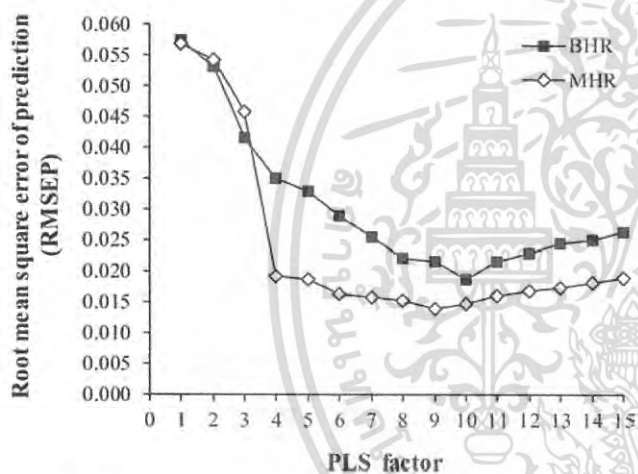


Fig. 5. Root mean square error of prediction versus PLS factors for BHR and MHR.

process, the suitable predicting models of MHR and BHR picked SNV and straight line subtraction, respectively. Even though both the pretreated processes are for adjusting the baseline shifting, tilting and scattering during the change of path length of the NIR signals, the SNV is focused on scattering correction and straight line subtraction is aimed on baseline correction.²⁶ In this case, the effect of straight line subtraction pretreating process of BHR could cause a variations in the chemical compositions of brown rice, e.g., oil, fiber, starch and etc., which affects the path length of NIR spectrum. While, the effect of SNV pretreating process of MHR could cause the surface characteristic of milled rice to have as more reflection on its surface than brown rice. Additionally, many researchers reported that the baseline shift and scattering correction

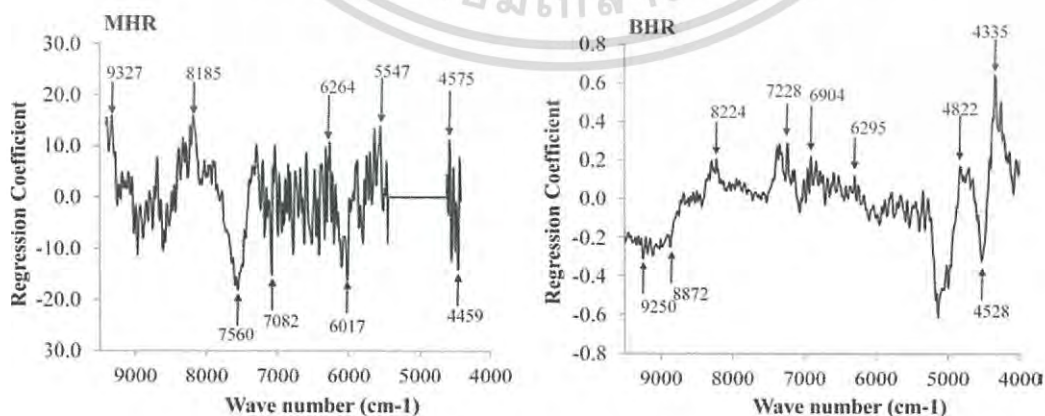


Fig. 6. Regression coefficient plots of the validated models for DRW prediction in MHR (left) and BHR (right) samples.

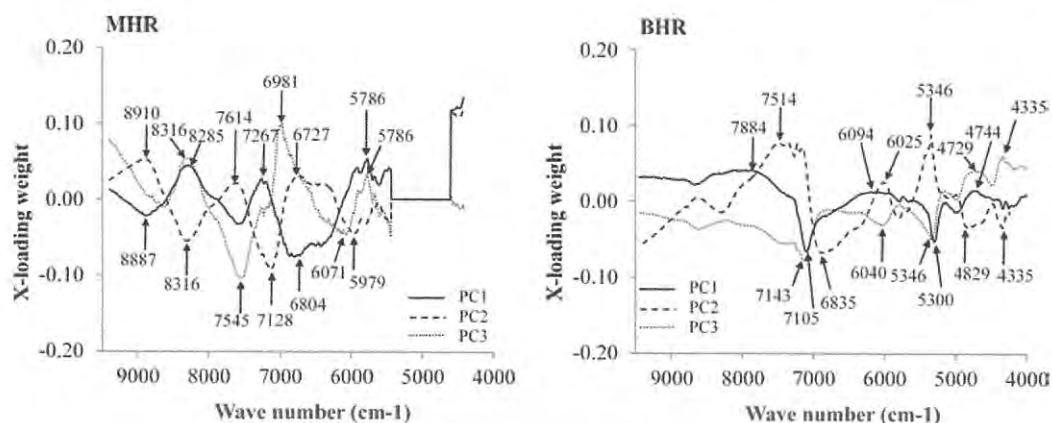


Fig. 7. X-Loading weight plots of the validated models for DRW prediction in MHR (left) and BHR (right) samples.

were needed for milled rice and brown rice materials.²⁶⁻²⁹

Considering the statistical value, it has been suggested that an R^2 of 0.83–0.90 indicates that the model is usable with caution for most applications, including research; whereas, an R^2 of 0.92–0.96 implies that this model is usable in most

applications in the quality assurance level. Additionally, an RPD in the range of 3.1–4.9 has indicated that the model is for fairly screening level.³⁰

Figures 6 and 7 show the regression coefficient plots of validated model for DRW prediction and the X-loading weight of the PLS factor plots of the best validated model of prediction set using FT-NIR

Table 2. The absorption bands (from regression coefficient and X-loading weight) with predominantly affected the prediction model of DRW (%) in MHR using partial least square regression.

Wave number (cm ⁻¹)	Wavelength (nm)	Plot	Band vibration ²¹	Structure ²¹
9327	1072	RC	2 x C-H stretching + 2 x C-C stretching	Benzene
8910–8887	1122–1125	PC1,PC2	C-H stretching second overtone	Aromatic
8316–8285	1202–1207	PC1,PC2,PC3	C-H stretching second overtone	CH ₂
8185	1222	RC	C-H stretching second overtone	CH
7614–7545	1313–1325	PC2,RC,PC3	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH ₃
7267	1376	PC1	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH ₂
7128–7082	1403–1412	PC2,RC	O-H stretching first overtone	ROH
6981	1432	PC3	N-H stretching first overtone	CONH ₂
6804	1470	PC1	N-H stretching first overtone	CONHR
6727	1487	PC2	N-H stretching first overtone	CONH ₂
6071	1647	PC3	C-H stretching first overtone	R-CH-CH
6017	1662	RC	C-H stretching first overtone	<i>cis</i> -RCH=CHR
5979	1673	PC2	C-H stretching first overtone	Aromatic
5786	1728	PC1,PC3	C-H stretching first overtone	CH ₂
5547	1803	RC	C-H stretching + 2 x C-O stretching	Cellulose
4575	2186	RC	CH ₂ asym.stretching+C=stretching	HC=CH
4459	2243	RC	N-H stretching + NH ₃ ⁺ deformation	Amino acid

Notes: MHR — Milled Hommali rice.

DRW — Dead rice weevils.

RC = Regression coefficient.

PC1 = PLS factor1.

PC2 = PLS factor2.

PC3 = PLS factor3.

Table 3. The absorption bands (from regression coefficient and X-loading weight) with predominantly affected the prediction model of DRW (%) in BHR using partial least square regression.

Wave number (cm ⁻¹)	Wavelength (nm)	Plot	Band vibration ²¹	Structure ²¹
9250	1081	RC	2 x C-H stretching + 2 x C-C stretching	Benzene
8872	1127	RC	C-H stretching second overtone	Aromatic
8224	1216	RC	C-H stretching second overtone	CH ₂
7884-7514	1268-1331	PC1,PC2	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH ₃
7228	1383	RC	2 x C-H stretching + C-H deformation	CH ₂
7143-7105	1400-1407	PC3,PC1	O-H stretching first overtone	ROH
6904	1448	RC	2 x C-H stretching + C-H deformation	Aromatic
6835	1463	PC2	N-H stretching first overtone	CONH ₂
6094	1641	PC1	C-H stretching first overtone	R-CH-CH O
6040-6025	1655-1660	PC3,PC2	C-H stretching first overtone	<i>cis</i> -RCH=CHR
5346-5300	1870-1887	PC2,PC3,PC1	O-H stretching+ 2 x C-O stretching	Starch
5145	1940	RC	O-H stretching+O-H deformation	H ₂ O
4829-4822	2071-2074	PC2,RC	O-H stretching+O-H deformation	ROH, Sucrose, Starch
4744-4729	2108-2115	PC1,PC3	N-H sym. stretching+amide III	CONH ₂ , CONHR
4528	2208	RC	N-H stretching+C=O stretching	CONH ₂ , Protein
4335	2307	RC,PC2,PC3	C-H stretchini + C-H deformation	CH ²

Notes: BHR — Brown Hommati rice.

DRW — Dead rice weevils.

RC = Regression coefficient.

PC1 = PLS factor1.

PC2 = PLS factor2.

PC3 = PLS factor3.

spectrometer. The distinctive values of regression coefficient and X-loading affected the bond vibration on the DRW prediction which was demonstrated in the high peaks in the plots. The peaks of MHR and BHR are reported in Tables 2 and 3, respectively. The dominant wave numbers used in validated model for MHR and BHR could be referred as the peak vibration bonds that responded to the structure of CH₂, CH₃, H₂O, starch, aromatic, cellulose, amino acid and so on. These were the fundamental chemical compounds of rice and weevil. However, the main constituent of rice sample, starch, did not predominantly appear on MHR. Correspondingly, the main component of DRW, chitin (6667 cm⁻¹ and 8489 cm⁻¹), was also not presented. It could be concluded that these components, starch and chitin, did not absorb well the electromagnetic in the range of NIR compared with other constituents. Considering the validated model for BHR, the wave number of H₂O is 5145 cm⁻¹, appeared with high peak. Additionally, from Table 1 of MHR model, the OPUS program selected wave number ranging from 9407-5447 cm⁻¹ and 4746-4421 cm⁻¹ for producing PLS model, which mean it abandoned wave number

band of 5446-4747 cm⁻¹. The relinquished wave number band was mainly the absorption band of starch (shown in Table 3). This confirms the earlier statement that the suitable predicting model of NIR was calculated from statistically complex mathematical methods in which sometimes those selected wavelengths were not related to the chemical origin of measuring materials or unable to explain the source of chemical terms. Therefore, this model can be interfered with the moisture content from two objects, BHR and DRW, and also some absorption bands of starch were not selected to perform the PLS model. This model was, then, not a robust model for predicting.

The scatter plots of the best equation (shown in Table 1) for predicting percentage of DRW in MHR and BHR samples versus the actual percentage of DRW in MHR and BHR samples are shown in Fig. 8. The NIR spectra for PLS model prediction of DRW percentage in MHR were pretreated by SNV technique and in BHR were pretreated by straight line subtraction technique. Most of the predicting samples from validation set were gathered nearby the target line, which implied that using PLS

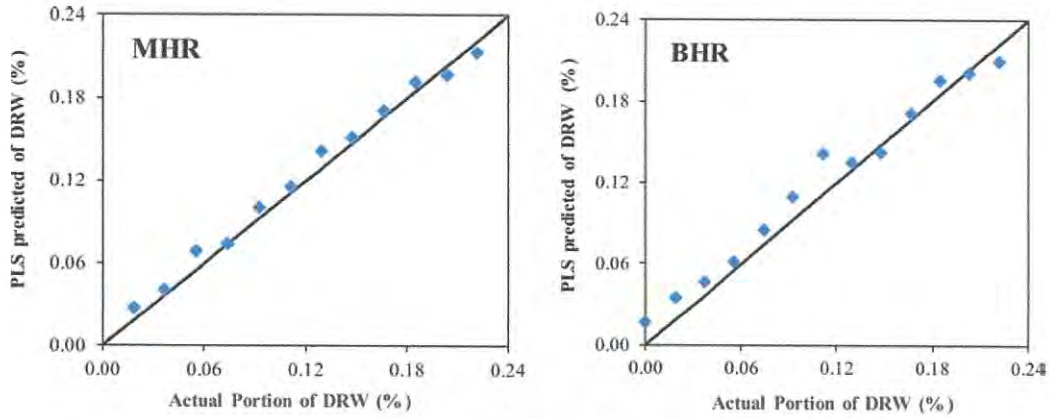


Fig. 8. Scatter plots of prediction percentage of DRW obtained from PLS validation set versus the actual percentage of DRW in MHR and BHR.

Table 4. The predominant wave numbers affect the chemical structures of rice samples and DRW.

Rice samples		DRW	
Wave number (cm ⁻¹)	Structure ²⁴	Wave number (cm ⁻¹)	Structure ^{13,25}
10101	Starch	8850	Lipid
6944	Starch, Sucrose	8489	Chitin
6545	Starch	6667	Chitin
6329	Starch, Glucose	5988	Lipid
5263	Starch		
5000	Starch		
4808	Starch, ROH, Sucrose		
4762	Starch		

Note: DRW — Dead rice weevils.

Table 5. Statistics of prediction of DRW (%) in MHR and BHR by SVD model.

Type of rice	Wave number (cm ⁻¹)	Pre-treatment	R^2_{val}	RMSEP	RPD	Bias
MHR	Rice : 5263, 5000, 4808 DRW : 8850, 8489, 5988	Base line offset	0.97	0.012	5.71	-0.003
BHR	Rice : 5263, 5000, 4808 DRW : 8850, 8489, 6667	SNV	0.96	0.013	5.39	0.002

Notes: MHR — Milled Hommali rice.

BHR — Brown Hommali rice.

DRW — Dead rice weevils.

R^2_{val} — The coefficient of determination of validation set.

RMSEP — Root mean square error of prediction.

RPD — Ratio of standard deviation of reference data in validation set to standard error of prediction.

Bias — The average of difference between actual value and NIR value.

method for predicting DRW in rice sample was possible. The coefficient of determination, R^2 , for MHR and BHR model, therefore, was 0.95 and 0.90 respectively, as reported earlier in Table 1.

3.3. SVD from selected wave number

The wave numbers for substituting their pretreated NIR spectra absorbance in Eq. (1) were selected according to the predominant wave numbers which

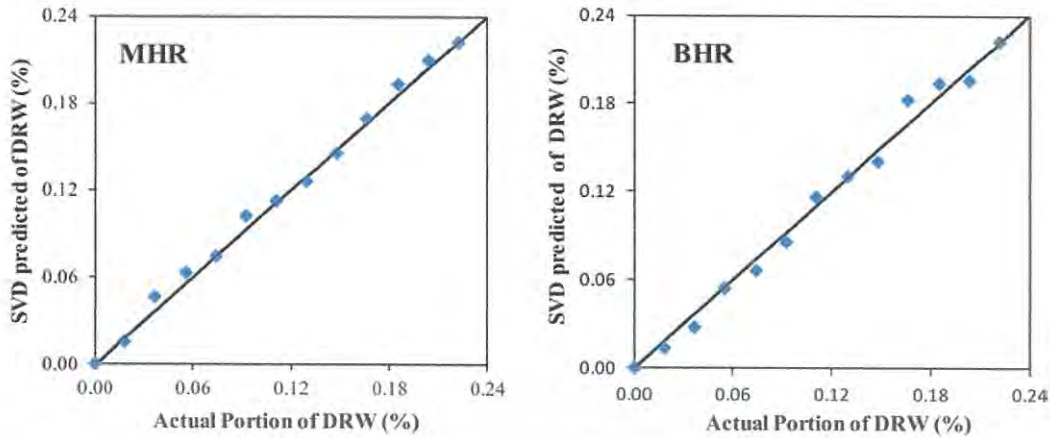


Fig. 9. Scatter plots of prediction percentage of DRW obtained from SVD analysis versus the actual percentage of DRW in MHR and BHR.

affect the band vibration of rice and DRW structures. Rice kernel mainly composes of starch; therefore, the selected wave numbers must be related to the starch molecular structure which was 10,101, 6944, 6545, 6329, 5263, 5000, 4808 and 4762 cm^{-1} . Rice weevil is an arthropod having exoskeleton and called cuticle made of chitin.³¹ The basic arthropod body structure consists of heart, gut, brain, nerve cord and eye, which principally are lipids.³² Consequently, the selected wave numbers for DRW were 8850, 8489, 6667 and 5988 cm^{-1} . Table 4 shows the selected wave numbers of rice sample and DRW are related to their chemical structures. The NIR spectra of individual selected wave numbers were pretreated by the approaches explained in Sec. 2.1 The pretreated NIR spectra from three selected wave numbers of rice and of DRW, six wave numbers in total, were randomly chosen for substituting in matrices $[A]$ and $[b]$ to calculate the proportion of DRW in rice sample matrix $[x]$ by (Eq. (1)). The best prediction models of MHR and BHR were considered from statistical values, R^2 , RMSEP, RPD and bias. Table 5 shows that the best set of wave numbers for predicting percentage of DRW in MHR were 8850, 8489, 5988, 5263, 5000 and 4808 cm^{-1} with base line offset pretreatment. It gave R^2 , RMSEP, RPD and bias of 0.97%, 0.012%, 5.71% and -0.003% respectively. For predicting percentage of DRW in BHR, the best set of wave numbers was 8850, 8489, 6667, 5263, 5000 and 4808 cm^{-1} with SNV pretreatment. The statistical values of R^2 , RMSEP, RPD and bias were 0.96, 0.013, 5.39 and 0.002, respectively. The results showed that the statistical values of the SVD

method were better than that of the PLS methods but not significantly different in terms of statistical ranges. Correspondingly, the scatter plots of the best equation for predicting percentage of DRW in MHR and BHR samples versus the actual percentage of DRW in MHR and BHR samples are shown in Fig. 9. The predicting data were more gathered nearby the target line compared with the PLS method, nevertheless, they indicated that the predicted percentage of DRW in both rice samples was not different from the actual percentage of DRW in both rice samples. Additionally, the potential of using the SVD method, selected only the related wave number with the chemical constituents of rice and DRW, could be easier and cheaper for constructing the handheld equipment for detecting DRW in rice stock because it required less number of light sources and detectors.

4. Conclusion

Prediction model of the DRW in rice sample using SVD technique from NIR signals was performed and the model's performance was compared with PLS technique based on statistical information. The wave numbers used in for SVD analysis technique were selected from the predominantly responded wave number of NIR to the major chemical components of DRW and rice samples (chitin, lipid and starch). Statistical results of employing SVD technique for predicting DRW in rice samples were better than using PLS technique. Therefore, SVD technique can be used as a tool for evaluating the DRW in rice samples with less amount of wave

numbers. This finding, therefore, provided the potential for using only six wave numbers instead of using the full range of NIR wave number for constructing the handheld equipment to operate on the working site with lower production cost when compared while using the NIR spectroscopy.

Acknowledgment

We thank the Agricultural Research Development Agency (ARDA) for financial support for this study.

References

- Office of Agricultural Economics, Thailand foreign agricultural trade statistics 2015, http://www.oae.go.th/oea_report/exportimport/export_result.php (2015).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, Insect pests of stored products, <http://www.fao.org/docrep/x5036e/x5036e0y.htm> (2015).
- N. D. G. White, Insects, mites, and insecticides in stored grain ecosystems, *Stored-Grain Ecosystems*, D. S. Jayas, N. D. G. White, W. E. Muir, Eds., pp. 123–168, Marcel Dekker Inc., New York (1995).
- CODEX International Food Standard, CODEX STAN 198-1995 “Standards for Rice”, <http://codexalimentarius.org> (2013).
- Ministry of commerce of Thailand, National imports-exports product standard: Standard for Thai Hom Mali Rice, <http://www.moc.go.th> (2013).
- W. A. Bruce, M. W. Street Jr., “Infrared CO₂ detection of hidden insects,” *J. Georgia Entomol. Soc.* **9**, 260 (1974).
- W. M. Lamkin, N. C. Unruh, Y. Pomeranz, “Use of fluorometry for the determination of uric acid in grain elimination of interfering fluorescence,” *J. Cereal Chem.* **68**(1), 81–86 (1991).
- C. Karunakaran, D. S. Jayas, N. D. G. White, “Detection of internal wheat seed infestation by *Rhyzopertha dominica* using X-ray imaging,” *J. Stored Prod. Res.* **40**(5), 507–516 (2004).
- T. C. Pearson, A. E. Cetin, A. H. Tewfik, R. P. Haff, “Feasibility of impact-acoustic emission for detection of damaged wheat kernels,” *J. Digit. Signal Process.* **17**, 617–633 (2007).
- H. Zhang, J. Wang, “Detection of age and insect damage incurred by wheat, with an electronic nose,” *J. Stored Prod. Res.* **43**(4), 489–495 (2007).
- S. S. Kim, M. R. Phyu, M. J. Kim, S. H. Lee, “Authentication of rice using near infrared reflectance spectroscopy,” *J. Cereal Chem.* **80**(3), 346–349 (2003).
- P. Cheewapramong, “Use of Near-Infrared Spectroscopy for Qualitative and Quantitative Analyses of Grains and Cereal Products,” Dissertations & Theses in Food Science and Technology, Food Science and Technology Department, University of Nebraska (2007).
- F. E. Dowell, J. E. Throne, J. E. Baker, “Automated nondestructive detection of internal insect infestation of wheat kernels using near-infrared reflectance spectroscopy,” *J. Econ. Entomol.* **91**, 899–904 (1998).
- F. E. Dowell, J. E. Throne, D. Wang, J. E. Baker, “Identifying stored-grain insects using near-infrared spectroscopy,” *J. Econ. Entomol.* **92**, 165–169 (1999).
- J. E. Baker, F. E. Dowell, J. E. Throne, “Detection of parasitized rice weevils in wheat kernels with near-infrared spectroscopy,” *J. Biol. Control.* **16**, 88–90 (1999).
- E. B. Maghirang, F. E. Dowell, J. E. Baker, J. E. Throne, “Automated detection of single wheat kernels containing live or dead insects using near infrared reflectance spectroscopy,” *Trans. ASAE* **46**, 1277–1282 (2003).
- P. Jarruwat, P. Choomjaihan, “Feasibility study on estimation of rice weevil quantity in rice stock using near-infrared spectroscopy technique,” *J. Innov. Opt. Health. Sci.* **7**(4), 145001, [8 pages] (2014).
- W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, *Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, Cambridge, (1988).
- G. M. Campbell, C. Fang, I. I. Muhamad, “On predicting roller milling performance VI Effect of kernel hardness and shape on the particle size distribution from First Break Milling of wheat,” *Trans. IchemE* **85**(C1), 7–23 (2007).
- P. Choomjaihan, “Extending the Breakage Equation for First Break milling of wheat to include particle composition,” Ph.D. thesis in the Faculty of Engineering and Physical Science, School of Chemical Engineering and Analytical Science, University of Manchester, England (2008).
- I. N. Koprinarov, A. P. Hitchcock, C. T. McCrory, R. F. Childs, “Quantitative mapping of structure polymeric systems using singular value decomposition analysis of soft X-ray image,” *J. Phys. Chem.* **106**(21), 5358–5364 (2002).
- M. Bekara, M. V. D. Baan, “Local singular value decomposition for signal enhancement of seismic data,” *Geophysics* **72**(2), V59–V65 (2007).
- M. Tang, X. Wu, M. Cong, K. Guo, “A method based on SVD for detecting the defect using the

- magnetostrictive guided wave technique,” *Mech. Syst. Signal Process.* **70–71**, 601–612 (2016).
24. B. G. Osborne, T. Fearn, P. H. Hindle, *Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis*. John Wiley and Sons, New York (1993).
 25. J. Perez-Mendoza, J. E. Throne, F. E. Dowell, J. E. Baker, “Detection of insect fragments in wheat flour by near-infrared spectroscopy,” *J. Stored Prod. Res.* **39**, 305–312 (2003).
 26. R. J. Barnes, M. S. Dhanoa, S. J. Lister, “Standard Normal Variate Transformation and De-trending of Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectra,” *J. App. Spec.* **43**(5), 772–777 (1989).
 27. R. Lapchareonsuk, P. Sirisomboon, “Eating quality of cooked rice determination using Fourier transform near infrared spectroscopy,” *J. Innov. Opt. Health. Sci.* **7**(6), 8 (2014), doi: 10.1142/S1793545814500035.
 28. K. Kaewson, P. Sirisomboon, “Study on evaluation of gamma oryzanol of germinated brown rice by near infrared spectroscopy,” *J. Innov. Opt. Health. Sci.* **7**(4), 7 (2014), doi: 10.1142/S1793545814500023.
 29. F. Xianshu, Y. Xiaoping, Y. Zihong, C. Haifeng, “Analysis of Antioxidant Activity of Chinese Brown Rice by Fourier-Transformed Near Infrared Spectroscopy and Chemometrics,” *J. Chem.* **2015**, 5 (2015) Article ID 379327.
 30. P. Williams, *Near-Infrared Technology Getting the Best Out of Light*, pp. 5–16, PDK Grain Nanaimo, British Columbia, and Winnipeg, Manitoba, Canada (2007).
 31. M. Locke, “The Wigglesworth Lecture: Insects for studying fundamental problems in biology,” *J. Insect Physiol.* **47**(4–5), 495–507 (2001).
 32. I. A. Sani, S. S. Ahmed, *Arthropodes & Classification of Class Insect*, 1st Edition, p.85, Lulu publisher, US (2015).



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายพุทธินันท์ จารุวัฒน์
วัน เดือน ปีเกิด	30 มิถุนายน 2519
ที่อยู่	68 ถนนชลบุรี-บ้านบึง ต.บ้านบึง อ.บ้านบึง จ.ชลบุรี 20170
ประวัติการศึกษา	2541 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2546 วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ประสบการณ์การทำงาน	2541-ปัจจุบัน วิศวกรการเกษตรระดับชำนาญการพิเศษ สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
ผลงานวิจัย	<ol style="list-style-type: none"> 1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการชะลอการสุกของทุเรียน งบประมาณประจำปี 2542 กรมวิชาการเกษตร 2. วิจัยและพัฒนาเครื่องลอกเปลือกกาแฟ งบประมาณประจำปี 2545 กรมวิชาการเกษตร 3. ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงแท่งจากเปลือกมะพร้าวอ่อน งบประมาณประจำปี 2546 กรมวิชาการเกษตร 4. วิจัยและพัฒนาเครื่องฝานแผ่นทุเรียน งบประมาณประจำปี 2548 กรมวิชาการเกษตร 5. วิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งลำไยเนื้อแบบต่อเนื่อง งบประมาณประจำปี 2551 กรมวิชาการเกษตร 6. ศึกษาแนวทางการนำเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาแบบไซโคลนสำหรับการลดความชื้นผลิตผลเกษตร งบประมาณประจำปี 2552 กรมวิชาการเกษตร 7. วิจัยและพัฒนาเครื่องลดความชื้นกล้วยไม้แบบอุโมงค์ลม งบประมาณประจำปี 2553 กรมวิชาการเกษตร 8. วิจัยและพัฒนาชุดสกัดน้ำมันปาล์มดิบเพื่อทำไบโอดีเซลสำหรับชุมชนทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ งบประมาณประจำปี 2554 กรมวิชาการเกษตร 9. วิจัยและพัฒนาชุดให้ความร้อนปาล์มน้ำมันทะเลลาย งบประมาณประจำปี 2554 กรมวิชาการเกษตร 10. ศึกษาทดสอบระบบให้น้ำพร้อมปุ๋ยที่เหมาะสมสำหรับสวนมังคุด งบประมาณประจำปี 2555 กรมวิชาการเกษตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งเนื้อมังคุดด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน งบประมาณประจำปี 2556 กรมวิชาการเกษตร
12. วิจัยและพัฒนาเครื่องมือขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ชีวภาพ งบประมาณประจำปี 2557 กรมวิชาการเกษตร
13. ศึกษาวิจัยการลดความชื้นเงาะในโรงคัดบรรจุเพื่อการส่งออก งบประมาณประจำปี 2558 กรมวิชาการเกษตร
14. ศึกษาวิจัยเครื่องต้นแบบสำหรับแปาแห้งมังคุดสดในโรงคัดบรรจุสำหรับการส่งออก งบประมาณประจำปี 2558 กรมวิชาการเกษตร
15. วิจัยและพัฒนาวัสดุปลูกจากสิ่งเหลือทิ้งทางการเกษตรสำหรับกล้วยไม้ งบประมาณประจำปี 2558 กรมวิชาการเกษตร

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

1. พุทธอินันท์ จารุวัฒน์, พิมล วุฒิสินธ์, ชูศักดิ์ ชาวประดิษฐ์, และยงยุทธ คงชาน. 2551. ศึกษาวิจัยเครื่องอบแห้งลำไยแบบต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการพืชสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 7, มหาวิทยาลัยนเรศวรและสมาคมพืชสวนแห่งประเทศไทย วันที่ 26-30 พฤษภาคม 2551 ร.ร.อมรินลาภูน จังหวัดพิษณุโลก
2. พุทธอินันท์ จารุวัฒน์, วิบูลย์ เทเพนทร์, พิมล วุฒิสินธ์, พิณิจ จิระคคกุล, บัญชา แสงวงษา และยงยุทธ คงชาน. 2553. ศึกษาแนวทางการนำหมักมันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาแบบไฮโคสสำหรับการลดความชื้นผลิตผลเกษตร. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสนและสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย วันที่ 6-7 พฤษภาคม 2553 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม
3. พุทธอินันท์ จารุวัฒน์, วุฒิพล จันทร์สระคู, ศุภวรรณ์ ภามาตย์, วิชเนย์ ออมทรัพย์สิน, ยงยุทธ คงชาน และบัญชา แสงวงษา. 2553. วิจัยและพัฒนาชุดสกัดน้ำมันปาล์มดิบเพื่อทำไบโอดีเซลสำหรับชุมชนทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. การประชุมวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 8, ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ วันที่ 1-3 กันยายน 2553 ร.ร.ดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่
4. พุทธอินันท์ จารุวัฒน์, ชูศักดิ์ ชาวประดิษฐ์, ศุภวรรณ์ ภามาตย์, ยงยุทธ คงชาน, สากล วีรียนันท์, และวัชรวิทย์ วิทยวรรณกุล. 2553. การวิจัยและพัฒนาเครื่องลดความชื้นกล้วยไม้แบบอุโมงค์ลม. การประชุมวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 8, ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ วันที่ 1-3 กันยายน 2553 ร.ร.ดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. พุทธอินันท์ จารุวัฒน์, ศุภวรรณ์ ภามัตย์, เวียง อากรซี, ยงยุทธ คงชาน, บัญชา แสงวงษา, สากล วีรียนันท์, และนิวัติ อาระวิล. 2555. การวิจัยและพัฒนาเครื่องทอดผลปาล์มน้ำมันในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบระดับชุมชน. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่และสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย วันที่ 4-5 เมษายน 2555 ร.ร.อิมพีเรียล แม่ปิง จังหวัดเชียงใหม่
6. พุทธอินันท์ จารุวัฒน์, ศุภวรรณ์ ภามัตย์, สากล วีรียนันท์, นิวัติ อาระวิล, เทียนชัย เหลลาลา, อุทัย ธานี, วุฒิพล จันทรสระคู และวิบูลย์ เทเพนทร์. 2557. การวิจัยและพัฒนาเครื่องให้ความร้อนปาล์มน้ำมันทะเลสาบ. การประชุมทางวิชาการระดับชาติ พะเยาวิจัย ครั้งที่ 3, มหาวิทยาลัยพะเยา วันที่ 23-24 มกราคม 2557 มหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา
7. พุทธอินันท์ จารุวัฒน์, ศุภวรรณ์ ภามัตย์, อนุสรณ์ สุวรรณเวียง, นิวัติ อาระวิล, เทียนชัย เหลลาลา และนาวิ จิระซีวี. 2557. การทดสอบระบบให้น้ำพร้อมปุ๋ยที่เหมาะสมสำหรับสวนมังคุด. การประชุมวิชาการพืชสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 13, มหาวิทยาลัยขอนแก่นและสมาคมพืชสวนแห่งประเทศไทย วันที่ 29-31 กรกฎาคม 2557 ร.ร.เซนทาราแอนด์คอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดขอนแก่น
8. พุทธอินันท์ จารุวัฒน์, สากล วีรียนันท์, ศุภวรรณ์ ภามัตย์, บัณฑิต จิตรจ้านงค์, ธนาวัฒน์ ทิพย์ชิต, นิวัติ อาระวิล, เทียนชัย เหลลาลา และจรรุวรรณรัตน์สกุลธรรม. 2558. ศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งเนื้อมังคุดด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16, สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย วันที่ 17-19 มีนาคม 2558 ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา กรุงเทพมหานคร
9. พุทธอินันท์ จารุวัฒน์, สากล วีรียนันท์, ศุภวรรณ์ ภามัตย์, บัณฑิต จิตรจ้านงค์, ธนาวัฒน์ ทิพย์ชิต, อนุสรณ์ สุวรรณเวียง, นิวัติ อาระวิล, อุทัย ธานี และเทียนชัย เหลลาลา. 2558. ศึกษาเทคโนโลยีการอบแห้งลำไยเนื้อแบบมีการเปลี่ยนอุณหภูมิด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 13, ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วันที่ 18-19 มิถุนายน 2558 กรีนเนอร์ รีสอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา
10. Jaruwat, P., Veriyanun, S., Pramart, K., Jitjumnong, B., Aravil, N., Thani, U., Laola, T., and Chaovanapong, P. Study on Agricultural

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Waste Substitute for Coconut Growing Medias of Orchids. การประชุมวิชาการนานาชาติ “The 12th Asia Pacific Orchid Conference” วันที่ 19-22 มีนาคม พ.ศ. 2559 ศูนย์แสดงสินค้าและการประชุม อิมแพ็ค เมืองทองธานี อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี ประเทศไทย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้