

การตรวจสอบคุณภาพภายในของมะขามหวานแบบไม่ทำลาย
โดยใช้เทคนิคแสงย่านใกล้อินฟราเรดแบบทะลุผ่าน

NON-DESTRUCTIVE DETECTION OF INTERNAL QUALITY
OF TAMARIND BY TRANSMITTANCE
NEAR INFRARED SPECTROSCOPY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร

คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-AI-M-053-184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**NON-DESTRUCTIVE DETECTION OF INTERNAL QUALITY
OF TAMARIND BY TRANSMITTANCE
NEAR INFRARED SPECTROSCOPY**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN FOOD SCIENCE
FACULTY OF AGRO-INDUSTRY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2013

KMITL-2013-AI-M-053-184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF AGRO-INDUSTRY

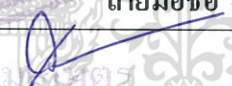
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะอุตสาหกรรมเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบคุณภาพภายในของมะขามหวานแบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคแสงย่าน
ใกล้อินฟราเรดแบบทะลุผ่าน
Non-destructive detection of internal quality of tamarind by transmittance near
infrared spectroscopy

ชื่อนักศึกษา นางสาวสินีนาด สุขทนารักษ์
รหัสประจำตัว 53680203
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์การอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สนธิสุข ชีระชัยชยดี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | ลายมือชื่อ |
|---------------------------|---|
| ผศ.ดร.สนธิสุข ชีระชัยชยดี |  |
| ดร.ระจิตร สุวานิช | ชระจิตร สุวานิช |
| ดร.ประมวดี ศรีกาหลง | ประมวดี ศรีกาหลง |
| ดร.ศุมาพร เกษมสำราญ | ศุมาพร เกษมสำราญ |

KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน / ปีที่สอบ 17 พฤษภาคม 2556 เวลา 10.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ ห้อง A 303 อาคารเจ้าคุณทหาร

คณะอุตสาหกรรมเกษตรรับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณ ตังเจริญชัย)

คณบดีคณะอุตสาหกรรมเกษตร

วันที่ 23 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบคุณภาพภายในของมะขามหวานแบบไม่ทำลาย
โดยใช้เทคนิคแสงย่านใกล้อินฟราเรดแบบทะลุผ่าน
นักศึกษา นางสาวสินีนาด สุขทนารักษ์
รหัสประจำตัว 53680203
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์การอาหาร
พ.ศ. 2556
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สนธิสุข ชีระชัยชยุติ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกมะขามหวานที่มีคุณภาพภายในปกติออกจากมะขามที่มีคุณภาพภายในผิดปกติ ได้แก่ การเกิดเชื้อราในมะขามหวาน การเกิดลักษณะเนื้อแห้ง แกร็น นอกจากนี้เพื่อศึกษาการการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ และอัตราส่วนระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ โดยใช้เทคนิคแสงย่านใกล้อินฟราเรดแบบทะลุผ่าน ช่วงความยาวคลื่น 665-955 นาโนเมตร ในการคัดแยกคุณภาพของมะขามหวาน ใช้กลุ่มมะขามหวานปกติจำนวน 127 ตัวอย่าง และกลุ่มมะขามหวานที่มีอาการผิดปกติภายใน 127 ตัวอย่าง ซึ่งพบว่า เมื่อทำการปรับสเปกตรัมด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative) สามารถคัดแยกมะขามหวานปกติและผิดปกติได้ 75.6 เปอร์เซ็นต์ และสามารถคัดแยกกลุ่มมะขามหวานกลุ่มปกติออกจากกลุ่มมะขามหวานที่มีอาการผิดปกติภายในตามระดับความรุนแรง พบว่า มะขามหวานที่มีอาการผิดปกติภายในระดับความรุนแรงมาก จะสามารถคัดแยกได้ 86.9 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาเป็นกลุ่มมะขามหวานที่มีเปอร์เซ็นต์ระดับความรุนแรงปานกลางและน้อย (85.2% และ 73.5%) ตามลำดับ การทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ทำนายปริมาณกรดทั้งหมด และทำนายอัตราส่วนระหว่างระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดทั้งหมด พบว่า เมื่อปรับสเปกตรัมด้วยวิธี smoothing (Savitsky-Golay) ได้ผลการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และการทำนายปริมาณกรดทั้งหมด มีแม่นยำ คือ ($R=0.86$, $RMSEP=1.91^{\circ}BX$) และ ($R = 0.84$, $RMSEP = 0.32\%$) ตามลำดับ สำหรับการทำนายอัตราส่วนระหว่างระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดทั้งหมด พบว่า original spectra ให้ผลการทำนายที่แม่นยำ ($R=0.84$, $RMSEP=3.76^{\circ}Bx/\%$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : มะขามหวาน, อาการผิดปกติภายใน, ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้, ปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ และ อัตราส่วนระหว่างระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเตรทได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis title Non-destructive detection of internal quality of tamarind by transmittance
near infrared spectroscopy

Student Miss. Sineenart Suktanarak

Student ID 53680203

Degree Master of science

Program Food science

Year 2013

Thesis advisor Asst. Prof. Dr. Sontisuk Teerachaichayut

ABSTRACT

The research aims to classify normal and defected sweet tamarind such as mold infection, dried and hard flesh in order to predict internal qualities such as total soluble solid content, titratable acidity and brix-ratio of sweet tamarind using near infrared spectroscopy (NIRS) in the range of 665-955 nm. For classification of sweet tamarind, a set of normal sweet tamarind (127 samples) and a set of defected sweet tamarind (127 samples) were used in this research. Second derivative spectra pretreatment was used and obtained 75.6% accuracy of classification. The results of classification for various severities of internal defects, it showed that increase level of severity obtained the higher accuracy (86.9%) than those of medium and low level of severity (85.2% and 73.5% respectively)

For the prediction of total soluble solid content, titratable acidity and brix-acid ratio of sweet tamarind, it obtained good results of prediction for total soluble solids content and titratable acidity using smoothing spectra pretreatment ($R = 0.86$, $RMSEP = 1.91$ °Bx and $R = 0.84$, $PMSEP = 0.32\%$ respectively) and obtained good results for brix-acid ratio prediction using original spectra ($R = 0.84$, $RMSEP = 3.76$ °Bx/%)

Keywords: sweet tamarind, internal defect, total soluble solids, titratable acidity and brix-acid ratio

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สนธิสุข ธีระชัยชยุติ ที่ให้เกียรติเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์และ ดร.ศุมาพร เกษมสำราญ ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก รวมทั้งกรุณาถ่ายทอดความรู้ ข้อเสนอแนะ ที่เป็นประโยชน์แก่ข้าพเจ้าในการทำวิจัย รวมทั้งตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ดร.ระจิตร สุวพานิช และ ดร. ประมวล ศรีกาหลง เป็นอย่างสูงที่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการสอบวิทยานิพนธ์ เพื่อให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ปานมนต์ ศิริสมบูรณ์ เป็นอย่างสูงที่ให้เกียรติช่วยเหลือด้านเทคนิค ทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกๆ ท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้และวิชาการต่าง ๆ ให้แก่ข้าพเจ้า ตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษา ณ สถาบัน ฯ แห่งนี้

ขอขอบคุณ นักวิทยาศาสตร์ ห้องปฏิบัติการคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีการตรวจสอบสินค้าโดยวิธีไม่ทำลาย สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในการทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปีพุทธศักราช 2554

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการเรียนและการทำวิจัยตลอดมา

หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าน้อมรับผิดนั้นไว้แต่เพียงผู้เดียว

สินีนาด สุขทนารักษ์

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | III |
| กิตติกรรมประกาศ..... | IV |
| สารบัญ..... | V |
| สารบัญตาราง..... | VII |
| สารบัญภาพ..... | VIII |
| สัญลักษณ์คำย่อและอักษรย่อ..... | X |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 3 |
| 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| | |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 ประวัติและความเป็นมาของมะขามหวาน..... | 4 |
| 2.2 อาการผิดปกติภายในของมะขามหวาน..... | 6 |
| 2.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี..... | 9 |
| 2.4 วิธีการสร้างสมการ calibration (calibration equation)..... | 15 |
| 2.5 วิธีการทดสอบสมการ (validation test)..... | 17 |
| 2.6 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสมการ..... | 18 |
| 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้เทคนิค NIRS..... | 19 |
| 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 20 |
| | |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย..... | 23 |
| 3.1 วัสดุและอุปกรณ์..... | 23 |
| 3.2 วิธีการทดลอง..... | 23 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง | 27 |
| 4.1 การสร้างสมการในการในการคัดแยกกลุ่มมะขามหวานปกติออกจาก กลุ่มมะขามหวานที่เกิดอาการผิดปกติภายในเนื้อมะขาม..... | 27 |
| 4.2 การสร้างสมการในการคัดแยกกลุ่มมะขามหวานปกติออกจาก กลุ่มมะขามหวานที่ความผิดปกติภายในตามระดับความรุนแรง..... | 32 |
| 4.3 การสร้างสมการในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้..... | 34 |
| 4.4 การสร้างสมการในการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้..... | 39 |
| 4.5 การสร้างสมการในการทำนายอัตราส่วนระหว่าง SSC และ TA ของเนื้อมะขามหวานพันธุ์ประกายทอง..... | 43 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 47 |
| เอกสารอ้างอิง | 48 |
| ภาคผนวก | 52 |
| ภาคผนวก ก | 53 |
| ภาคผนวก ข | 57 |
| ประวัติผู้วิจัย..... | 58 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 การแบ่งช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด..... | 10 |
| 2.2 เกณฑ์การพิจารณาค่า R และ R ² | 19 |
| 4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการทำนายการเกิดความผิดปกติภายใน มะขามหวานด้วยวิธีปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ..... | 29 |
| 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการทำนายการเกิดอาการผิดปกติภายใน มะขามหวานของกลุ่มที่ใช้ในการสร้างสมการและทดสอบสมการด้วยวิธี PLS-DA..... | 30 |
| 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการแยกกลุ่มมะขามปกติออกจากกลุ่ม มะขามหวานที่เกิดอาการผิดปกติภายในตามระดับความรุนแรง..... | 33 |
| 4.4 แสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับ ทดสอบสมการของการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้..... | 35 |
| 4.5 แสดงความแม่นยำในสร้างสมการในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ด้วยวิธีปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ..... | 37 |
| 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ของการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้..... | 38 |
| 4.7 แสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับ ทดสอบสมการของการทำนายปริมาณกรดที่ไเตรตได้..... | 39 |
| 4.8 แสดงความแม่นยำในสร้างสมการในการทำนายปริมาณกรดที่ไเตรตได้ ด้วยวิธีแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ..... | 41 |
| 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ของการทำนายปริมาณกรดที่ไเตรตได้..... | 42 |
| 4.10 แสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับ ทดสอบสมการของการทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA..... | 43 |
| 4.11 แสดงความแม่นยำในสร้างสมการในการทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA ของเนื้อมะขามหวานพันธุ์ประกายทอง ด้วยวิธีแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิค ทางคณิตศาสตร์ต่างๆ..... | 44 |
| 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ของการทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA...45 | |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 มะขามหวานพันธุ์ประกายทอง..... | 6 |
| 2.2 การส่องผ่าน (transmission)..... | 11 |
| 2.3 การสะท้อน (reflection) | 11 |
| 2.4 การส่องผ่านและสะท้อน (transflection) | 12 |
| 2.5 การส่องแบบ interaction | 12 |
| 3.1 แสดงตำแหน่งการวัดสเปกตรัมมะขามด้วยเครื่อง SW-NIR Spectrophotometer..... | 24 |
| 4.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของมะขามหวานของกลุ่มมะขามหวานปกติ และกลุ่มมะขามหวานที่เกิดอาการผิดปกติภายใน..... | 28 |
| 4.2 แสดงการแยกกลุ่มของกลุ่มมะขามปกติและกลุ่มมะขามหวานที่เกิดอาการผิดปกติภายใน..... | 31 |
| 4.3 แสดงความแม่นยำในการแยกกลุ่มมะขามปกติออกจากกลุ่มมะขามหวานที่เกิด ความผิดปกติภายในตามระดับความรุนแรง..... | 34 |
| 4.4 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของกลุ่มมะขามหวานที่ใช้ในการทำนาย ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้..... | 36 |
| 4.5 แสดงผลการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ..... | 38 |
| 4.6 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของกลุ่มมะขามหวานที่ใช้ในการทำนาย ปริมาณกรดที่ไโคเตรทได้..... | 40 |
| 4.7 แสดงผลการทำนายปริมาณกรดที่ไโคเตรทได้..... | 42 |
| 4.8 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแบบ original spectra ของกลุ่มมะขามหวาน ที่ใช้ในการทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA | 44 |
| 4.9 แสดงผลการทำนายทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA | 46 |
| ก.1 แสดงภาพมะขามหวานที่มีอาการผิดปกติภายในด้านที่ 1..... | 54 |
| ก.2 แสดงการทำ pixel ของพื้นที่มะขามหวานด้านที่ 1 ทั้งหมด โดยใช้โปรแกรม Photoshop.... | 54 |
| ก.3 แสดงการทำ pixel ของพื้นที่มะขามหวานในส่วนที่มีอาการผิดปกติภายในด้านที่ 1..... | 55 |

สารบัญภาพ

ภาพที่

หน้า

- ก.4 แสดงการหา pixel ของพื้นที่มะขามหวานด้านที่ 2 ทั้งหมด โดยใช้โปรแกรม Photoshop....55
- ก.5 แสดงการหา pixel ของพื้นที่มะขามหวานในส่วนที่มีอาการผิดปกติภายในด้านที่ 2.....56



สัญลักษณ์คำย่อและอักษรย่อ

สัญลักษณ์

ความหมาย

| | |
|----------------------------|---|
| NIRS | near infrared spectroscopy |
| PLSR | partial least square regression |
| PLS-DA | partial least squares-discriminant |
| R | ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) |
| SSC | ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (soluble solids content) |
| TA | ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity) |
| N | number of sample |
| F | Factors |
| Smoothing | Savitzky-Golay smoothing |
| 1 st derivative | Savitzky-Golay first derivative |
| 2 nd derivative | Savitzky-Golay second derivative |
| MSC | multiplicative scatter correction pretreatment |
| SNV | standard normal variate transformation |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มะขามหวาน (*Tamarindus indica* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญชนิดหนึ่ง ที่สามารถสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรและประเทศไทยได้เป็นอย่างดี ปัจจุบันตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศมีความต้องการมากขึ้น ถึงแม้ว่ามะขามจะเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดมาจากแอฟริกา แต่มะขามก็ยังสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพพื้นที่ของประเทศไทยได้เป็นอย่างดี จึงทำให้การปลูกมะขามได้แพร่กระจายพันธุ์ไปยังพื้นที่ต่างๆ ทั่วประเทศ จนถือได้ว่าการปลูกมะขามเป็นอาชีพที่สำคัญของเกษตรกรในหลายจังหวัด สามารถสร้างอาชีพและรายได้ ในประเทศไทยได้มีการปลูกมะขามหวานตามจังหวัดต่างๆ จังหวัดที่มีการปลูกมาก ได้แก่ เพชรบูรณ์ เลย ลำปาง เชียงใหม่ นครราชสีมา และอุบลราชธานี (ชูศักดิ์, 2550) มะขามหวานสามารถเก็บรักษาได้นานซึ่งพันธุ์ที่นิยมรับประทานกัน ได้แก่ ปรกษยทอง สีทอง ศรีชมพู และน้ำผึ้ง เป็นต้น สามารถจำหน่ายในราคาที่สูงทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยระยะเวลา 7 ปีที่ผ่านมา ตั้งแต่ปี พ.ศ.2549, พ.ศ. 2550, พ.ศ.2551, พ.ศ.2552, พ.ศ.2553, พ.ศ.2554, พ.ศ.2555 และ พ.ศ.2556 (เดือนมกราคม – เดือนมีนาคม) มะขามได้ส่งออกไปขายต่างประเทศ คิดเป็นมูลค่า 38.2 ล้านบาท, 42.3 ล้านบาท, 37.5 ล้านบาท, 88.5 ล้านบาท 52.2 ล้านบาท, 45.5 ล้านบาท, 159.2 ล้านบาท และ 70.3 ล้านบาท ตามลำดับ(สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2556) จะเห็นว่ามูลค่าการส่งออกมะขามจะมีราคาที่ไม่แน่นอน เนื่องจากปัญหาทางด้านคุณภาพมะขาม ดังนั้นลักษณะคุณภาพมะขามจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มะขามหวานพันธุ์ปรกษยทอง เป็นพันธุ์ที่ขายได้ราคาดีกว่าพันธุ์อื่นๆ เนื่องจากฝักใหญ่ เนื้อหนา รสหวานจัด และออกในช่วงปีใหม่ที่ผู้คนต้องการซื้อเป็นของฝากของกำนัลญาติมิตร แต่มะขามหวานพันธุ์ปรกษยทองมักพบปัญหาการเกิดเชื้อรา เพราะมีเนื้อหนา เปลือกค่อนข้างบาง และถ้าในช่วงที่ฝักมะขามเริ่มแก่ สภาพพื้นที่การปลูกมีฝนตกจนถึงช่วงแก่ฝัก จะทำให้คุณภาพของฝักมะขามไม่ดีเท่าที่ควร เนื้อมะขามจะชื้นไม่แห้ง ฝักมะขามเมื่อเก็บเกี่ยวไว้นานๆ มักจะมีปัญหาเรื่องเชื้อราขึ้นที่เนื้อ หรือบางครั้งอาจมีหนอนเจาะเมล็ดเจริญเติบโตอยู่ภายในฝัก โดยที่เปลือกภายนอกฝักยังปกติดอยู่ เมื่อนำไปจำหน่ายจะทำให้เกิดความ

เสียหายให้กับทั้งผู้ซื้อและผู้ขายได้ จินตนา (2545) ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อารเกิดเชื้อราในมะขามไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หวาน พบว่า ปัจจัยที่ทำให้เชื้อราเจริญเติบโตได้ดี คือ ปริมาณน้ำฝน ความชื้นในดินและในอากาศ ปริมาณน้ำตาลซูโครสในเนื้อมะขาม และความหนาของเนื้อ การเกิดเชื้อรา เกิดลักษณะเนื้อแห้ง แกร็น ในเนื้อมะขามหวาน เมื่อมองดูจากลักษณะเปลือกภายนอก ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่า มะขามฝักนี้จะเกิดเชื้อราหรือเกิดลักษณะเนื้อแห้ง แกร็น พอดี แม่ค้าคนกลางมักแยกอาการ การเกิดเชื้อรา เกิดลักษณะเนื้อแห้ง แกร็นภายในฝักมะขามโดยการสุมหีบมะขามมา แล้วแกะเปลือกเพื่อดูลักษณะภายใน ซึ่งเป็นวิธีที่ทำลายตัวอย่าง ถ้ามะขามเกิดเชื้อราเกิดลักษณะเนื้อแห้ง แกร็น พอดี แม่ค้าคนกลาง มักจะไม่รับซื้อมะขามภายในล็อตนั้น ซึ่งภายในล็อตนั้นอาจจะมีมะขามที่มีคุณภาพดี ส่งผลให้เกษตรกรโดนตัดราคาและมีปัญหาเมื่อส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศ และนอกจากนี้ ถ้าคัดแยกเพื่อแบ่งระดับความหวาน ความเปรี้ยวของมะขามหวาน พันธุ์ประกายทองได้ จะทำให้สามารถแบ่งระดับคุณภาพและแก้ปัญหาการปลอมปนของมะขาม ทำให้มะขามเป็นที่ยอมรับของตลาดมากขึ้น ลดปัญหาการปลอมปนของมะขามหวานที่มีคุณภาพแตกต่างกัน ทำให้เกิดความน่าเชื่อถือของผู้บริโภค

ดังนั้น เทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีสเปกโตรสโกปีย่านอินฟราเรด (near infrared spectroscopy: NIRS) จะช่วยวิเคราะห์คุณภาพภายในของฝักมะขามหวาน โดยการใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงย่านความยาวคลื่นสั้นแบบทะลุผ่านวิเคราะห์ ตรวจสอบ พิสูจน์และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสารซึ่งอาจอยู่ในสถานะของแข็งหรือของเหลวก็ได้ โดยอาศัยหลักการสั่น (vibration) ของโมเลกุลและดูดกลืนรังสี near infrared เทคนิค NIRS เป็นวิธีวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยไม่ทำลายตัวอย่าง สามารถทำนายค่าได้รวดเร็วและแม่นยำ ประหยัดเวลา ประหยัดค่าใช้จ่าย และลดต้นทุนในการใช้สารเคมี ช่วยตรวจสอบ คัดแยกคุณภาพภายในของมะขามหวาน ทำให้เกิดการคัดแยกมะขามหวานแบบไม่ทำลาย ให้เป็นที่น่าพึงพอใจของผู้บริโภคและตลาดส่งออก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อให้ได้สมการที่ใช้ในการทำนายอาการผิดปกติภายในของมะขามหวานพันธุ์ประกายทอง โดยใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานในแสงย่านใกล้อินฟราเรด

1.2.2 เพื่อให้ได้สมการที่ใช้ทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ และอัตราส่วนระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ของเนื้อมะขามหวานพันธุ์ประกายทอง โดยใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานในแสงย่านใกล้อินฟราเรด

1.2.3 เพื่อให้ได้ข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบคัดแยกคุณภาพมะขามหวานแบบไม่ทำลาย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการสร้างสมการเพื่อทำนายคุณภาพของมะขามหวานพันธุ์ประกายทอง จากสวนในจังหวัดเพชรบูรณ์ โดยจะศึกษาการสร้างสมการเพื่อที่จะทำนายอาการผิดปกติภายในมะขามหวาน ระดับความรุนแรงอาการผิดปกติภายใน การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) ปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ (%TA) และอัตราส่วนระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ (TSS/TA)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสร้างสมการที่ทำนายอาการผิดปกติภายในมะขามหวานและคัดแยกคุณภาพระดับความหวาน ความเปรี้ยวในเนื้อฝักมะขามได้ โดยที่ไม่ทำลายตัวอย่าง ซึ่งเป็นการคัดแยกคุณภาพของมะขามหวานก่อนที่จะส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศ และยังสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ลูกค้าส่งผลดีต่อตลาดการค้าส่งออกมะขามหวานของประเทศไทย นอกจากนี้ยังได้ผลงานทางวิชาการที่สามารถตีพิมพ์เพื่อการจบปริญญาบัณฑิตในระดับปริญญาโท

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติและความเป็นมาของมะขามหวาน

มะขามหวานมีถิ่นกำเนิดทางตอนใต้ของเอเชียและอัฟริกาตะวันออก มีผู้นำมะขามหวานมาจากอินเดียเข้าไปในยุโรป คำว่า “Tamarind” นั้นมาจาก Tamsbindi และ Tamarul Hind ซึ่งหมายถึง Indian Date หรือ Date of India มะขามหวานเป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ ทิ้งใบออกใหม่ในช่วงฤดูแล้ง (ราวปลายเดือนมกราคม - กุมภาพันธ์) จะแตกใบออกใหม่ในช่วงฤดูฝน (กลางเดือนเมษา - พฤษภาคม) และออกดอกติดฝักในช่วงฤดูฝน ฝักมะขามจะแก่และสามารถเก็บฝักได้ในช่วง เดือนธันวาคม - กุมภาพันธ์ มะขามมีรากทำสำคัญ อยู่สามชนิด คือ รากแก้ว รากแขนงและรากฝอย ลำต้น สูงประมาณ 20 – 40 เมตร เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ดอกเป็นดอกสมบูรณ์เพศ ฝักเป็นแบบผลเดี่ยวแต่มีหลายเมล็ด ตั้งแต่ 1 – 8 เมล็ด ความยาวประมาณ 3 – 8 นิ้ว ฝักอ่อนมีสีเขียวปนเทาและเมื่อแก่จะมีสีน้ำตาล เปลือกแห้งและแตกง่าย มะขามจะเจริญเติบโตช้า มีอัตราการเจริญเติบโตประมาณ 0.5 – 0.8 เมตรต่อปี สามารถเจริญเติบโตแผ่กิ่งก้านออกไปได้ถึง 25 เมตร (Gibbon และ Pain, 1985)

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมะขามหวาน

| | |
|-----------------|-----------------------------|
| ชื่อสามัญ | Sweet Tamarind |
| ชื่อวิทยาศาสตร์ | <i>Tamarindus indica</i> L. |
| วงศ์ | Leguminosae |
| สกุล | Tamarindes |
| ชนิด | indica |

ลักษณะฝักหรือผลของมะขามหวานเป็นชนิดผลเดี่ยวหรือฝักเดี่ยว แต่มีหลายเมล็ดมีตั้งแต่ 1 – 8 เมล็ด ฝักเป็นฝักยาว บางพันธุ์เป็นฝักตรง บางพันธุ์มีลักษณะโค้ง เปลือกเมื่อดิบมีสีเขียว เมื่อแก่จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล และเปลือกแยกออกจากเนื้อฝักหรือผลของมะขามหวาน อาจแบ่งออกตามลักษณะความยาวหรือความโค้งของฝักได้ดังนี้ คือ ฝักดาบ มีลักษณะค่อนข้างแบน โค้งเล็กน้อย มีลักษณะคล้ายมีดดาบ ฝักโค้งเป็นรูปวงฆ้อง มีลักษณะค่อนข้างกลม ส่วนยาวของฝักจะโค้งจนหัวและท้ายเกือบจดกัน มีลักษณะเหมือนวงฆ้อง ฝักดิ่ง มีลักษณะค่อนข้างตรง ไม่โค้ง ฝักค่อนข้างกลม ฝักคูก มีลักษณะเป็นปล้อง ข้อถี่โค้งบ้างตรงบ้าง ฝักมีทั้งกลมและแบน นับว่าเป็นมะขามหวานที่ลักษณะไม่ค่อยดี ลักษณะเนื้อมะขามหวานแต่ละพันธุ์ไม่เหมือนกัน ทั้งรสชาติและสี เมื่อสังเกตความแตกต่างของเนื้อมะขามหวานในเรื่องสี พอจะแบ่งได้ดังนี้ สีน้ำตาลเกือบดำ สี

น้ำตาลอ่อน สีเหลืองคล้ายขี้ผึ้ง สีน้ำตาลแดงเข้มและสีค่อนข้างเหลือง รสมะขามจะมีองค์ประกอบที่เหมือนกัน คือ กรด tartaric acid ซึ่งถ้าในมะขามเปรี้ยวจะมีกรดนี้มาก ในมะขามหวานจะมีน้อยมาก นอกจากนั้นมะขามหวานจะมีความหวานตั้งแต่ 30 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป และมีโปรตีนอยู่ประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ ถ้ามะขามใดมีเปอร์เซ็นต์น้ำตาลสูงก็นับว่าเป็นมะขามที่มีรสหวานมาก แต่ก็ไม่น่าแน่นอนเสมอไป แต่ถ้ารสกลมกล่อมก็ขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์มะขามได้ ในประเทศไทยมีการปลูกมะขามหวานตามจังหวัดต่างๆ จังหวัดที่มีการปลูกมาก ได้แก่ เพชรบูรณ์ เลย ลำปาง เชียงใหม่ นครราชสีมา และอุบลราชธานี (ชูศักดิ์, 2550)

2.1.1 ประวัติมะขามหวานพันธุ์ประกายทอง

มะขามหวานพันธุ์ประกายทองมีชื่อเดิมว่า พันธุ์ตาแป๊ะหรือพันธุ์ทอง ต้นกำเนิดได้มาจากการกลายพันธุ์ โดยการเพาะเมล็ดมะขามที่นำมาจากชัยภูมิ ซึ่งนายเจียง แซ่เฮง เป็นผู้เพาะขึ้น ณ หมู่บ้านโป่งตาแป๊ะ อำเภอชนแดน จังหวัดเพชรบูรณ์ นายเจียง แซ่เฮง ได้นำมะขามหวานชนิดนี้มาประกวดในงานกาชาดจังหวัดเพชรบูรณ์ ปรากฏว่าได้รับรางวัลชนะเลิศ 3 ปีซ้อน คือ พ.ศ. 2534, พ.ศ. 2535 และ พ.ศ. 2536 นายอำเภอชนแดน จึงได้ตั้งชื่อมะขามหวานพันธุ์นี้ให้ใหม่ว่าประกายทอง ใน พ.ศ. 2537 กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้ประกาศรับรองมะขามหวานพันธุ์ประกายทองเป็นพันธุ์ส่งเสริมของกรมฯ (ประทุมทิพย์ และประภาส, 2539)

2.1.2 ลักษณะประจำพันธุ์ของมะขามหวานพันธุ์ประกายทอง

ลักษณะของทรงต้นเป็นพุ่มกลม ใบประกอบหนา สีเขียวเข้ม ยอดอ่อนมีสีขาว ผิวเปลือกของลำต้นหยาบ สีน้ำตาล ดอกมีสีขาวเป็นพวง ฝักมีขนาดใหญ่ กลมยาวและตรงปลายโค้งเล็กน้อย เปลือกของฝักบาง ผิวเปลือกเรียบ สีน้ำตาล ในแต่ละฝักมีรก 3-4 เส้น เนื้อเป็นสีน้ำตาล ออกทราบดี รสหวานฉ่ำ กลิ่นหอม เมล็ดกลมแบนหรือคล้ายสี่เหลี่ยมคางหมู ขนาดใหญ่ คล้ายเมล็ดมะขามเปรี้ยวเป็นพันธุ์ที่แก่เร็ว จัดเป็นพันธุ์เบาพันธุ์หนึ่ง เริ่มให้ผลผลิตได้ตั้งแต่เดือนธันวาคมไปจนถึงเดือนกุมภาพันธ์ แต่มะขามหวานพันธุ์ประกายทองก็มีข้อเสีย คือ เปลือกผลบาง ทำให้แตกง่าย ความหวานฉ่ำและกลิ่นหอมทำให้ขึ้นราภายในเนื้อเกือบทั้งฝักเมื่อได้รับความชื้น ทำให้เก็บได้ไว้นาน (คณาจารย์กลุ่มวิทยาลัยครูภาคเหนือ, 2525)



ภาพที่ 2.1 มะขามหวานพันธุ์ประกายทอง

2.2 อาการผิดปกติภายในของมะขามหวาน

2.2.1 เชื้อราและแมลง

2.2.1.1 โรคราแป้งของมะขามหวาน

โรคนี้เกิดจากเชื้อราออยด์เดียม (*Oidium heveae* Steinmann) เข้าทำลายมะขามหวาน ส่วนของใบอ่อน กิ่งอ่อน และฝักอ่อน ช่วงที่ราแป้งระบาดมากที่สุด คือ ช่วงฤดูฝนติดต่อกัน หนาวหรืออากาศร้อนชื้น, หรือหนาวชื้น นอกจากนี้ณัฐวีรณ (2531) ได้ทำงานวิจัย โดยเก็บ มะขามหวานที่จำหน่ายในท้องตลาด และจากไร่โดยตรงในจังหวัดเพชรบูรณ์, สมุทรสาคร, นครปฐม, สระบุรี, ลพบุรี และกรุงเทพมหานคร ทั้ง 3 พันธุ์ คือ พันธุ์สีทอง พันธุ์หมื่นจง และ พันธุ์ศรีชมพู รวมทั้งสิ้น 74 ตัวอย่าง (กิโลกรัม) ตรวจพบชนิดของเชื้อราที่เจริญในเนื้อมะขาม หวานรวม 67 ตัวอย่าง ชนิดของเชื้อราที่ตรวจพบ ได้แก่ *Pestalotiopsis* sp., *Nigrospora* sp., *Aspergillus niger*, *Penicillin* sp., *Fusarium* sp., *Rhizopus* sp., *Aureobasidium pullulans*, *Altemaria* sp., *Curvularia lunata*, *Cladosporium* sp., และ *Candida* sp. ซึ่งเป็นกลุ่มของเชื้อรา ไม่สร้างสารพิษ ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี TLC – Densitometry โดยกองวิเคราะห์อาหาร กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์

2.2.1.2 หนอนเจาะฝักมะขาม

มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Citripestis sagittiferella* เป็นหนอนของผีเสื้อกลางคืนขนาดเล็ก ปีกคู่หน้าสีน้ำตาล ปีกคู่หลังสีขาวมีขอบสีน้ำตาล จะวางไข่เป็นฟองเดี่ยวบนฝักมะขามตั้งแต่ยังเป็น ฝักอ่อนจนกระทั่งฝักแก่ โดยชอบวางไข่บริเวณรอยแตกหักของฝัก เพื่อช่วยให้ตัวหนอนเข้าไปใน

ฝักง่ายขึ้น ฝักอ่อนที่ถูกหนอนชนิดนี้ทำลาย ฝักจะแห้งลีบ ถ้าเป็นฝักแก่จะกัดกินเนื้อภายในและ ถายเป็นขุยออกมาอยู่ในฝักเข้าทำลายทั้งตอนเก็บเกี่ยวและหลังเก็บเกี่ยว

2.2.1.3 หนอนด้วงเจาะฝักมะขาม

จะทำลายโดยการกัดกินเมล็ดมะขาม ทำให้ฝักเสีย เนื้อมะขามจะแห้งใช้ประโยชน์ ไม่ได้ จะเข้าทำลายเมื่อเมล็ดเริ่มแก่ และติดมากับฝักหลังเก็บเกี่ยว ตัวเต็มวัยจะมีสีน้ำตาล สม่่าเสมอทั้งตัว จะวางไข่ตามผิวของฝักมะขาม เมื่อฝักเป็นตัวยาวจะเจาะเข้าไปในฝัก หนอนมีรูปร่าง ค่อนข้างกลม สีขาว ไม่มีขา เมื่อเข้าไปคืบคืบจะถักรังสีขาว

2.2.1.4 มอด

เข้าทำลายฝักมะขามหวานที่รอการขาย โดยส่วนใหญ่มอดจะเจาะเข้าไปทำลายเมล็ด ข้างใน

2.2.2 การเก็บรักษา

จากความพยายามต้องการเก็บรักษามะขามหวานให้ได้มากขึ้น และให้เกิดการสูญเสีย น้อยที่สุด เกษตรกรผู้ปลูกมะขามหวานจึงได้พยายามหาวิธีการต่างๆ เพื่อที่จะใช้กำจัดแมลงและควบคุม การเจริญของเชื้อราในมะขามหวาน รวมทั้งการศึกษาและพัฒนาวิธีการเก็บรักษาของนักวิชาการ หลังการเก็บเกี่ยว โดยมีการนำเอาความรู้และวิทยาการสมัยใหม่มาประยุกต์ร่วมใช้ด้วย ทำให้เกิด วิธีการปฏิบัติเพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะขามหวานให้นานขึ้นหลายวันด้วยกัน

2.2.2.1 การนึ่งด้วยไอน้ำ (ล้งถึง)

วิธีการนี้เป็นที่นิยมและมีการใช้กันมากที่สุด วัสดุที่ใช้เป็นของใช้ในชีวิตประจำวัน อยู่แล้ว ซึ่งได้แก่ เตาหุงต้มอาหารที่ใช้ถ่านและถ่านสำหรับนึ่งอาหาร ทำโดยนำเอามะขามหวานที่ เก็บจากต้นแล้วไปผึ่งแดด 1 วัน แล้วนำไปบรรจุลงในล้งถึง ต้มน้ำให้เดือดเสียก่อนจึงทำการนึ่ง ใช้เวลานานประมาณ 5-8 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์มะขามหวานที่นำมาใช้เป็นพันธุ์ที่มีเปลือก หนาหรือบางเพียงใด อย่างไรก็ตามระยะเวลาที่ใช้ครั้งนี้ เกษตรกรแต่ละรายอาจใช้ระยะเวลานึ่ง แตกต่างกันขึ้นอยู่กับประสบการณ์ ภายหลังจากนึ่งต้องนำมะขามหวานไปผึ่งแดดต่ออีกประมาณ ครึ่งวัน เพื่อให้เปลือกมะขามหวานแห้งสนิทเสียก่อนจึงนำไปบรรจุในภาชนะสำหรับวางจำหน่าย ต่อไป การนึ่งด้วยไอน้ำสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราและทำลายแมลงประเภทผีเสื้อกลางคืน ของมะขามหวานได้ แต่ไม่อาจทำลายแมลงปีกแข็งบางชนิดได้ เนื่องจากมักอาศัยอยู่ภายในเมล็ด ของมะขามหวาน และความร้อนไม่อาจกระจายเข้าไปได้ทั่วถึง วิธีการนึ่งด้วยไอน้ำจะช่วยยืดอายุ การเก็บรักษาของมะขามหวานออกไปได้อีกระยะหนึ่ง

2.2.2.2 การอบด้วยไอน้ำร้อน

วิธีการนี้จะใช้ลมเป่าผ่านแผ่นเหล็กที่เผาไฟให้ร้อนด้วยแก๊สหุงต้มอาหาร หมุนเวียนลมร้อนให้กระจายไปทั่วทั้งตู้และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ 70–80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบประมาณ 50 นาที ต่อมา กองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ได้ช่วยออกแบบสร้างตู้อบมะขามหวานและผลไม้ชนิดอื่นๆ ด้วย โดยปรับปรุงระบบการหมุนเวียนความร้อนให้มีการกระจายดีขึ้นกว่าเดิมและควบคุมอุณหภูมิให้เที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น วิธีการอบด้วยไอน้ำร้อนนี้สามารถควบคุมการเจริญของเชื้อราและกำจัดแมลงที่ติดมาในมะขามหวานได้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงนำมาใช้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษามะขามหวานให้ได้นานขึ้นอีกระยะหนึ่ง แต่ไม่สามารถทำลายแมลงให้หมดสิ้นไปได้ สำหรับการอบด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่านี้ จะมีผลทำให้เนื้อของมะขามหวานมีความกระด้างและมีรสชาติเปลี่ยนแปลงไป

2.2.2.3 การอบด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์

เป็นการนำพลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติใช้ให้เกิดประโยชน์ เกษตรกรสามารถสร้างตู้อบขึ้นใช้ได้อีกโดยใช้เหล็กจากทำเป็นโครงรูปสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 48 × 96 × 20 ลูกบาศก์นิ้ว (กว้าง × ยาว × สูง) บุด้านล่างและด้านข้างของตู้ด้วยกระดาดชานอ้อย ด้านในทาสีดำเพื่อให้ดูดซับความร้อนได้ดี ด้านบนปิดด้วยพลาสติกใสอย่างแน่นหนา พื้นด้านล่างให้วางตะแกรงโดยยกให้สูงจากพื้นของตู้ประมาณ 1–2 นิ้ว เจาะรูเล็กๆ ที่กระดาดชานอ้อยที่มุมด้านข้างใกล้ขอบบนสุดและขอบล่าง เพื่อให้อากาศหมุนเวียนพาความร้อนขึ้นออกไปได้ นำมะขามหวานใส่ลงตู้โดยวางเรียงบนตะแกรงทั่วทั้งตู้ ปล่อยให้แห้งแดดเป็นเวลาประมาณ 1–2 วัน ขึ้นอยู่กับสภาพของมะขามหวาน จากนั้นนำมะขามหวานออกจากตู้ใส่ถุงพลาสติกขนาด 25 × 29 ตารางนิ้ว ปิดปากถุงพลาสติกให้แน่นแล้วปล่อยให้แห้งแดดต่อไปอีก 1 วัน จึงนำออกมาส่งลมให้เปลือกแห้งสนิทเสียก่อน แล้วนำไปบรรจุภาชนะเพื่อจำหน่ายต่อไป วิธีการอบด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์สามารถช่วยแก้ปัญหาที่เกิดจากเชื้อราอย่างได้ผลและลดความเสียหายจากแมลงได้ด้วย แม้ว่าจะไม่สามารถทำลายให้หมดสิ้นไปได้

2.2.2.4 การอบด้วยตู้อบไมโครเวฟ

เป็นวิธีการนำเอาตู้อบอาหารสมัยใหม่มาใช้อบมะขามหวานเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากแมลงและเชื้อรา วิธีการอบทำได้ง่ายและสะดวก แต่เกษตรกรต้องลงทุนซื้อตู้อบไมโครเวฟซึ่งมีราคาสูงพอสมควร วิธีการอบ จะนำมะขามหวานวางบนจานของตู้อบ และอบนานประมาณ 7–8 นาที การอบมะขามหวานแต่ละครั้งจะต้องหยุดเครื่องมืออบไปได้ครึ่งเวลาเพื่อทำการสับเปลี่ยนเอามะขามหวานที่อยู่ด้านล่างขึ้นมาแทน เพื่อให้มะขามหวานได้รับคลื่นไมโครเวฟอย่างทั่วถึง มะขามหวานที่เอาออกจากตู้อบไมโครเวฟใหม่ต้องปล่อยให้เย็นเสียก่อน จึงนำไปบรรจุกล่องหรือถุงพลาสติกเพื่อวางจำหน่ายต่อไป วิธีการอบด้วยตู้ไมโครเวฟสามารถช่วยกำจัดแมลงได้บางส่วน

และควบคุมการเจริญของเชื้อราได้เป็นอย่างดี เพราะการอบด้วยไมโครเวฟจะมีผลให้ความชื้นภายในผักมะขามหวานลดลงจนเชื้อราไม่สามารถเจริญได้ อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ไม่สามารถทำลายแมลงที่ติดมาในผักมะขามหวานได้หมดสิ้นไป เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากไมโครเวฟมีการกระจายไม่ทั่วถึง มะขามหวานที่อบด้วยไมโครเวฟอาจมีรสชาติและเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกับ บริเวณที่ถูกไมโครเวฟมากเกินไปอาจมีเนื้อสัมผัสแข็งกระด้างหรือบางครั้งมีกลิ่นไหม้อยู่ด้วย

2.2.2.5 การเก็บในห้องเย็น

เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้เก็บรักษามะขามหวานไว้จำหน่ายนอกฤดูกาลอย่างได้ผล วิธีนี้เป็นการผสมผสานระหว่างวิธีการหนึ่งด้วยไอน้ำกับการใช้ความเย็น โดยก่อนการเก็บในห้องเย็นจะต้องนำมะขามหวานไปนึ่งด้วยไอน้ำประมาณ 5 นาที แล้วนำไปผึ่งแดดอีกประมาณครึ่งวันเพื่อลดความชื้นของมะขามหวานลง จากนั้นจึงนำไปเก็บในห้องเย็น (อุณหภูมิประมาณ 0-2 องศาเซลเซียส) เมื่อต้องการจะนำออกไปจำหน่ายให้นำมะขามหวานออกจากห้องเย็นไปนึ่งด้วยไอน้ำอีกครั้งหนึ่งแล้วนำไปผึ่งแดดให้เปลือกแห้งดีเสียก่อน จากนั้นจึงนำไปบรรจุถุงพลาสติกหรือกล่องเพื่อวางจำหน่าย ข้อดีของการเก็บรักษามะขามหวานในห้องเย็น คือ สามารถรักษาสีของเนื้อมะขามหวานให้ดูเหมือนสดอยู่เสมอ คือ สีไม่คล้ำหรือเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้ม แม้ว่าจะเก็บรักษาเป็นเวลานานๆ ก็ตาม

2.2.2.6 การฉายรังสีแกมมา

ยุทธพงศ์ (2551) ได้ศึกษาและรายงานว่า การฉายรังสีมะขามหวานเป็นการนำมะขามหวานไปรับรังสี ซึ่งได้จากสารต้นกำเนิดรังสี เช่น โคบอลต์ รังสีที่ใช้ คือ รังสีแกมมา เป็นพลังงานที่มีลักษณะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง มีความยาวคลื่นสั้นและมีอำนาจทะลุทะลวงผ่านวัตถุต่างๆ ได้สูง สามารถทำลายแมลงและเชื้อโรคชนิดต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหารได้ จากการนำมะขามหวานมาลดความชื้น ด้วยการผึ่งแดดหรืออบไอร้อน แล้วบรรจุในกล่องพลาสติกที่ปิดสนิท นำไปฉายรังสีปริมาณ 1 กิโลเกรย์ จะสามารถควบคุมการเจริญของเชื้อราและทำลายแมลงที่ติดมาได้หมดสิ้น มะขามหวานที่ผ่านการฉายรังสีแล้ว สามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้นานกว่า 8 เดือน โดยยังมีรสชาติเป็นที่ยอมรับของผู้ทดสอบ

2.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (near infrared spectroscopy หรือ NIRS)

2.3.1 หลักพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้

เมื่อปี ค.ศ.1800 Sir William Herschel ได้ศึกษาเกี่ยวกับ Heating effect ในช่วงต่างๆ ของสเปกตรัม โดยค้นพบ Heating effect สูงสุดในแถบแสงที่อยู่ถัดไปจากแสงสีแดง (red end) แต่ไม่สามารถมองเห็นสเปกตรัม (spectrum) ได้ จึงเรียกช่วงรังสีที่ค้นพบว่ารังสีอินฟราเรด

เอกส (infrared Radiation) การค้นพบครั้งนี้ถือเป็นการค้นพบที่ยิ่งใหญ่ เพราะรังสีอินฟราเรดประกอบ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปด้วยสามช่วงความยาวคลื่นสำคัญ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่างกัน หนึ่งในนั้นก็คือช่วงรังสีอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (near infrared spectroscopy) นั่นเอง ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์โมเลกุลที่ไม่ทำลายตัวอย่าง โดยอาศัยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนโดยตัวอย่าง เป็นวิธีการที่ให้ผลที่ดีและรวดเร็ว ถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดผลิตภัณฑ์ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ตั้งแต่การตรวจสอบวัตถุดิบไปจนถึงการตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ เมื่อฉายแสงในช่วงความยาวคลื่น NIR ลงไปบนตัวอย่าง แสงที่มีพลังงานเพียงพอจะถูกดูดกลืนและกระตุ้นให้เกิดการสั่นของโมเลกุลใน functional groups ต่าง ๆ (ศุมาพร, 2545) แสงใกล้อินฟราเรด (near infrared) เป็นคลื่นแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 780 – 2500 นาโนเมตร โดยมีหลักการดังนี้ คือ เมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ แล้วสารเกิดการดูดกลืนแสงในช่วง near infrared ทำให้โมเลกุลของสารเกิดการสั่นที่มีความถี่สูง ในการสั่นของพันธะต่างๆ จะเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกันไปซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละหมู่ฟังก์ชันด้วย ดังนั้นเมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นตรงกับพันธะในโมเลกุลจะเกิดการสั่นและดูดกลืนรังสีไว้ทำให้มีพลังงานมากกว่าปกติ จากเดิมที่โมเลกุลอยู่ในสถานะพื้น (ground vibration level) เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจะอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited vibration level) อย่างไรก็ตามเมื่อโมเลกุลกลับสู่สถานะพื้นก็จะปล่อยพลังงานที่รับเพิ่มเข้าไปออกมาในรูปพลังงานความร้อน ปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสงเป็นไปตามกฎของ เบียร์ – แลมเบิร์ต (Beer – Lambert) พลังงานของคลื่นแสงเมื่อผ่านเข้าไปในตัวอย่าง พลังงานจะถูกดูดกลืนไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง พลังงานของคลื่นแสงที่ผ่านออกมาโดยทั่วไปในตัวอย่าง พลังงานจะถูกดูดกลืนไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง ความเข้มข้นของแสงที่ผ่านออกมาโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีนั้น (Osborne et al., 1993)

ช่วงคลื่นย่าน Near infrared spectroscopy หรือ NIRS สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้ ตารางที่ 2.1 การแบ่งช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด

| ช่วงคลื่น | ช่วงความยาวคลื่น (nm) | Wavenumber (cm ⁻¹) |
|------------|-----------------------|--------------------------------|
| Region I | 800 – 1100 | 12500 – 9000 |
| Region II | 1200 – 1800 | 8500 – 5500 |
| Region III | 1800 – 2500 | 5500 – 4000 |

ที่มา: นิพนธ์ (2545)

Region I

มีชื่อเรียกกันว่า “รังสีเนียร์อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น” (Short wavelength NIR, SWNIR) หรือ “Herschel region” จะพบโอเวอร์โทนที่สองและสาม (2^{nd} and 3^{rd} overtones) และการสั่นรวม (combination mode) สำหรับการสั่นแบบยืด (stretching vibration) ของหมู่ฟังก์ชัน X-H, X=C, O, N

Region II

จะพบโอเวอร์โทนที่หนึ่งและการสั่นรวมหลากหลายแบบในการสั่นแบบยืด (stretching vibration) ของ X-H

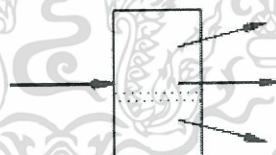
Region III

ส่วนมากจะปรากฏการสั่นรวม (combination mode)

2.3.2 รูปแบบที่วัดภูมิปฏิกิริยาต่อแสงเนียร์อินฟราเรด (NIR)

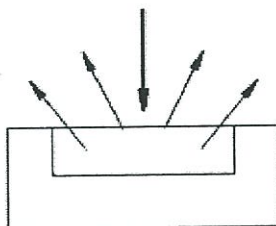
เมื่อเครื่อง NIR ปล่อยแสงผ่านลงมาตัวอย่าง จะเกิดการกระทำกับกับสารได้หลายแบบ ดังนั้น ควรมีการจัดการวางตัวอย่างในการใช้เทคนิค NIR เพื่อให้ได้สเปกตรัมที่สัมพันธ์กับปริมาณค่าทางเคมีที่สนใจ ได้แก่ (ศุมาพร, 2545)

2.3.2.1 transmission เป็นการวัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมาในด้านตรงข้ามกับด้านที่แสงตกกระทบ ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การส่องผ่าน (transmission)

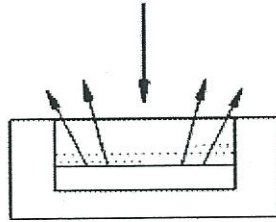
2.3.2.2 reflection แสงตกกระทบพื้นที่ผิวของตัวอย่าง วัดปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาโดยรวมถึงแสงที่สะท้อนจากเนื้อตัวอย่างส่วนที่ใกล้ผิวตัวอย่างได้อีกด้วย ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การสะท้อน (reflection)

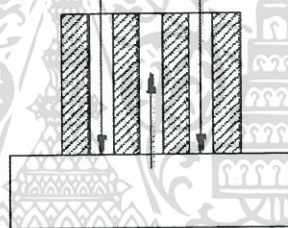
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 transfection แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบตัวอย่าง ผ่านตัวอย่างลงไป ตกกระทบแผ่นเซรามิก ทอง หรืออะลูมิเนียมในชั้นใต้สุด แล้วสะท้อนกลับมายัง detector ดัง ภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การส่องผ่านและสะท้อน (transfection)

2.3.2.4 interaction ใช้ในกรณี fiber optics probe แสงจากแหล่งกำเนิดย่าน NIR ส่องผ่านมายังตัวอย่างในวงแหวนด้านนอก แล้วแสงที่สะท้อนออกมาจากเนื้อตัวอย่างถูกส่งไปยัง detector บริเวณส่วนกลาง fiber optics probe ดังภาพที่ 2.5



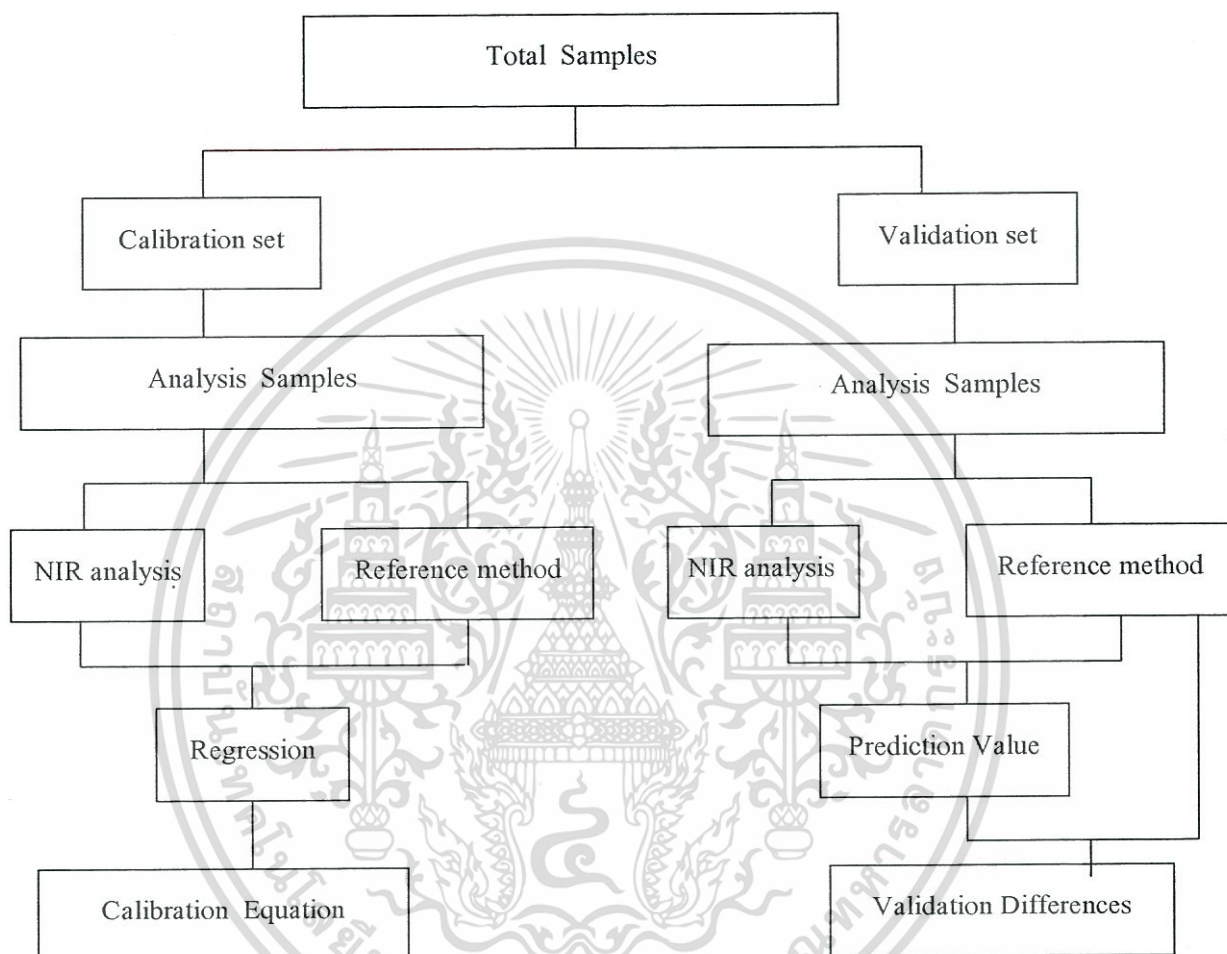
ภาพที่ 2.5 การส่องแบบ interaction

2.3.3 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูล near infrared spectra

การดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม NIR แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งประกอบไปด้วย ขั้นตอน 2 ขั้นตอนหลักเป็นอย่างน้อย คือ ขั้นตอนการสร้างสมการที่ใช้ทำนาย (calibration set) และขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้นมา (validation set) ในการสร้างสมการที่ใช้ทำนาย ก็เพื่อให้ได้สมการมาตรฐานที่ใช้ในการทำนายค่าคุณลักษณะคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทราบ ต่อจากนั้นต้องมีการนำสมการมาตรฐานที่ได้จากการทำ calibration มาตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของสมการมาตรฐานในการทำนายค่าคุณภาพ ซึ่งขั้นตอนนี้ เรียกว่า การทำ validation เพื่อทดสอบสมการที่ได้ว่ามีความแม่นยำหรือไม่ เมื่อได้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือแล้ว จึงนำสมการที่ได้ไปใช้ทำนายค่าคุณลักษณะที่ต้องการศึกษาจากสเปกตรัม NIR ที่ทำการวัดมาได้ โดยกลุ่มตัวอย่างที่ดีจะต้องมีจำนวนตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์อย่างพอเพียงทั้งตัวอย่างในปัจจุบัน และตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ในอนาคต โดยเฉพาะปริมาณองค์ประกอบทางเคมี จะต้องมีค่าครอบคลุมปริมาณทั้งต่ำสุดและสูงสุดของตัวอย่าง โดยมีการสุ่มตัวอย่าง (sampling) ที่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงพอและเป็นตัวแทนที่ของประชากร การสุ่มตัวอย่างถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการที่จะได้สมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ดี ทำให้ค่าผิดพลาดที่ได้จากการทดลองลดลง (Hruschka, 2001) นอกจากนี้ควรพิจารณาวิธีวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งควรเป็นวิธีที่เป็นมาตรฐานและมีความแม่นยำเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องเนื่องจากส่งผลต่อสมการที่สร้างขึ้นต่อไป (Kawano, 2002)



ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัม NIR

ที่มา: Kawano *et al.* (1995)

2.3.4 การแปลงข้อมูลก่อนการวิเคราะห์

ปัจจัยที่มีผลต่อสเปกตรัมมาก ได้แก่ ความชื้น และขนาดอนุภาค (particle size) ซึ่งจะทำให้สเปกตรัมที่ได้มีความแตกต่างกันอันเนื่องมาจากสภาพกระเจิงแสง และความแตกต่างที่เป็นผลมาจากความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการวัดซึ่งอาจจะทำให้เกิดความแตกต่างในผลเชิงบวก (additive scattering) สเปกตรัมเพิ่มขึ้นตามตลอดช่วงความยาวคลื่น หรือผลเชิงคูณ (multiplicative scattering) สเปกตรัมเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสูงขึ้น นอกจากนี้สเปกตรัมที่ได้จากการดูดกลืนแสงในย่านใกล้อินฟราเรด เป็นสเปกตรัมที่มีการเหลื่อมซ้อนทับกันอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(overlapping band) ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงนำไปปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ก่อนเพื่อลดความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง วิธีที่นิยมใช้ มี 2 วิธี คือ

2.3.4.1 วิธีอนุพันธ์ (derivative)

เป็นการหาความชันของเส้นสเปกตรัม เพื่อแก้ปัญหาพีคที่มีฐานกว้าง (broad peak) เนื่องจากการซ้อนทับกันของพีค (overlapping) และอิทธิพลจากการยกตัวของเส้นสเปกตรัม (base line shift) ที่เกิดจากการกระเจิงแสง (scattering light) เมื่อแสงตกกระทบที่ตัวอย่างทำให้แสงเปลี่ยนทิศทาง ซึ่งมีผลต่อการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากขนาดของตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ การอัดตัว และการกระจายตัวของตัวอย่างภายในเซลล์บรรจุที่แตกต่างกัน รวมทั้งความชันภายในตัวอย่างที่แตกต่างกันด้วย (William and Norris, 2001)

2.3.4.1.1 first derivative เป็นการหาความชันของสเปกตรัม ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่นหรือการเลื่อนตัวของสเปกตรัมแกน Y เนื่องจากอิทธิพลของความชัน และขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน การทำ first derivative ทำให้การแปลความหมายยาก ดังนั้นจึงนิยมใช้ second derivative มากกว่า first derivative

2.3.4.1.2 second derivative การใช้ second derivative จะเป็นการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัม สเปกตรัมที่ได้จะมีรูปร่างที่แตกต่างจากสเปกตรัมเริ่มต้น การหาการเปลี่ยนแปลงของความชัน สามารถแยกจุดยอดที่เหลื่อมซ้อนกันอยู่ สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี second derivative ที่ได้จะมีจุดยอดที่เป็นบวกลบในด้านซ้ายและด้านขวา ส่วนจุดยอดตรงกลางจะอยู่ตรงข้ามที่มีค่ามากที่สุดและตรงกับจุดยอดเริ่มต้น การคำนวณการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัมสามารถแยกจุดยอดของสเปกตรัมที่เหลื่อมซ้อนกันของสเปกตรัมเริ่มต้นได้ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี second derivative จึงเป็นที่นิยมมากกว่าวิธี first derivative

2.3.4.2 multiplicative scatter correction (MSC)

สเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืนย่านแสง NIRS แบบ diffuse reflectance และแบบ transmission มักจะเกิดการกระเจิงแสง (scatter light) ดังนั้น ได้มีการใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า MSC มาปรับแต่งสเปกตรัม เป็นการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสเปกตรัม เพื่อลดอิทธิพลของการกระเจิงของแสง ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการลดค่าผิดพลาด Barnes *et al.* (1989) ใช้ NIRS แบบวัดการสะท้อนกลับของแสง เพื่อหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดพืช โดยแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี MSC พบว่า มีค่าผิดพลาดของสมการต่ำกว่าสมการของสเปกตรัมดั้งเดิม (original spectrum)

2.3.4.3 วิธี Smoothing

เป็นการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อน โดยมีการแทนค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความยาวคลื่นด้วยค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีจุดศูนย์กลางของช่วงความยาวคลื่นตรงกับจุดที่ถูกแทนที่ ต่อจากนั้นเลื่อนช่วงไปหนึ่งความยาวคลื่น แล้วคำนวณซ้ำจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ซึ่งสามารถลดปัญหาของสัญญาณรบกวนต่อค่าการดูดกลืนแสง โดยจะได้สเปกตรัมที่มีลักษณะเหมือนสเปกตรัมดั้งเดิม แต่จะเรียบสม่ำเสมอมากกว่า (Siesler *et al.*, 2002)

2.4 วิธีการสร้างสมการ (calibration equation)

สมการ calibration ประกอบไปด้วยด้วยตัวแปร 2 ชนิด คือ ตัวแปรอิสระ X และตัวแปรตาม Y การหาตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรตามเป็นสิ่งสำคัญของการสร้างสมการ calibration ซึ่งแบ่งได้ 2 วิธีหลัก คือ

2.4.1 wavelength Selection

2.4.1.1 wavelength selection เป็นการเลือกความยาวคลื่นเฉพาะซึ่งเป็นตัวแปรอิสระให้มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรตามนั้น โดยการพิจารณาจากข้อมูลทางสถิติ ดังนี้

2.4.1.2 simple linear regression (SLR)

เป็นการสร้างสมการที่ประกอบด้วยตัวแปรสองชนิดที่มีความสัมพันธ์กัน คือ ตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) SLR เป็นการเลือกพิจารณาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างที่ความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียว (single wavelength) การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีด้วย NIRS เป็นไปไม่ได้ที่จะใช้ความยาวคลื่นใด ความยาวคลื่นหนึ่งในการหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้ เนื่องจากตัวอย่าง ประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิดด้วยกัน ดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งมีผลต่อสเปกตรัม และส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำของสมการ ดังนั้นจึงต้องใช้ข้อมูลจากหลายความยาวคลื่น (multiple wavelengths) เพื่อทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของผลผลิต (สุมาพร, 2545) สมการ SLR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Y = b_0 + b_1X$$

เมื่อ Y = ค่าองค์ประกอบทางเคมี

X = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นตำแหน่งเดียว

b_0 = ค่าคงที่ ณ จุดตัดแกน Y เมื่อ X มีค่าเท่ากับศูนย์

b_1 = ค่าคงที่การถดถอย

2.4.1.3 multiple linear regression (MLR)

เป็นวิธีการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่นำตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) มากกว่าหนึ่งตัว มาใช้

ในการประมาณค่าตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) การนำเทคนิค MLR มาใช้ในการวิเคราะห์ผล พบว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีข้อดีมากกว่าวิธี SLR หลายประการ เช่น สมการที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้กับตัวอย่างที่มีองค์ประกอบซับซ้อนได้ แต่อย่างไรก็ตาม สร้างสมการด้วยวิธี MLR มีข้อเสีย คือ การคัดเลือกตัวแปรอิสระหรือค่าการคูณที่แต่ละความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลทางเคมีต้องใช้เวลาอันยาวนาน จำนวนของตัวแปรอิสระหรือจำนวนของความยาวคลื่นที่นำมาใช้ในการสมการจะถูกจำกัดโดยจำนวนของตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบ ต้องมีตัวอย่างจำนวนมากเพื่อให้สมการจะถูกจำกัดโดยจำนวนของตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบ ต้องมีตัวอย่างจำนวนมากเพื่อให้สมการที่สร้างขึ้นมีความถูกต้องและแม่นยำ การคัดเลือกตัวแปรอิสระหรือความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดมาสร้างสมการอาจได้ข้อมูลที่ไม่ครอบคลุมมากพอ ทำให้ค่าที่ทำนายได้จากวิธีนี้ มีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่แท้จริง (Osborne et al., 1993) สมการ MLR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 \dots + b_nX_n$$

เมื่อ X_1, X_2, \dots, X_n = ค่าการคูณที่ความยาวคลื่น n ตำแหน่ง

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ความยาวคลื่น n ตำแหน่ง

2.4.2 full spectrum method

การที่จะพิจารณาเลือกความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่าองค์ประกอบที่ศึกษานั้นค่อนข้างทำได้ยาก เกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย การใช้ข้อมูลสเปกตรัมทั้งหมดหรือในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจ จะช่วยให้สมการ calibration ที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น full spectrum method เป็นการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม จากความยาวคลื่นทั้งหมดในสเปกตรัม (full spectrum) มาสร้างสมการ โดยทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) และสร้างตัวแปรกลุ่มใหม่ขึ้นมา วิธีทางสถิติที่นิยมใช้ได้แก่ 2 วิธี คือ principle component regression (PCR) และ partial least square regression (PLSR) ทั้งสองวิธีนี้ต้องใช้ในการสร้างตัวแปรใหม่ ที่เรียกว่า แฟกเตอร์หรือองค์ประกอบ

2.4.2.2 principle component regression (PCR)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดจำนวนของตัวแปรอิสระ ในกรณีที่ตัวแปรอิสระมีจำนวนมาก การลดจำนวนของตัวแปรมีวิธีการ คือ แบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่ เรียกว่า แฟกเตอร์ หรือองค์ประกอบ แฟกเตอร์ที่สร้างขึ้นอีกนัยหนึ่งก็คือผลรวมของค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นที่น้ำหนักแตกต่างกัน แฟกเตอร์จะมีได้หลายแฟกเตอร์ โดยแต่ละแฟกเตอร์จะแตกต่างกันที่น้ำหนักของแต่ละค่าสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งประกอบกันเป็นแฟกเตอร์นั้นๆ แฟกเตอร์แรกจะถูกสร้างขึ้นมาให้สามารถอธิบายความแปรปรวนที่เหลือ ซึ่งจะ ทำให้แฟกเตอร์แต่ละแฟกเตอร์แทบไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการวิเคราะห์ด้วย PCR เมื่อทำการหาแฟกเตอร์เรียบร้อยแล้ว นำแฟกเตอร์ที่ได้มาทำ regression กับค่าทางเคมีโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) ก็จะได้ค่า calibration coefficient

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.3 partial least square regression (PLSR)

วิธีนี้จะคล้ายคลึงกับ PCR แต่จะต่างกันตรงที่วิธี PCR กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมจะเป็นอิสระจากกระบวนการทำสมการถดถอยของสมการ calibration ซึ่งใน PLSR ทั้งสองกระบวนการจะถูกเชื่อมโยงเข้าไว้ด้วยกัน โดยมีการนำค่าองค์ประกอบทางเคมีมาคิดรวมข้อมูลและเกี่ยวข้องกับการประเมินค่าทางเคมีในกระบวนการหาแฟกเตอร์ด้วย ทำให้แฟกเตอร์ที่ได้จากวิธี PLSR สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลและเกี่ยวข้องกับการประเมินค่าทางเคมีในเวลาเดียวกัน สมการ calibration ที่ได้จากวิธี PLSR จึงประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น Saranwong (2003) ได้ศึกษาการพัฒนาสมการที่ใช้ในการทำนายค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ (total soluble solid) และค่าน้ำหนักเนื้อแห้ง (dry matter) ของมะม่วงด้วยวิธี PLSR กับ MLR ในการสร้างสมการทำนาย พบว่า วิธี PLSR ให้ค่าผิดพลาดของสมการทำนายของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่ำกว่าวิธี MLR แต่สำหรับสมการทำนายค่าน้ำหนักเนื้อแห้งด้วยวิธี PLSR กับ MLR ที่สร้างขึ้นให้ค่าไม่แตกต่างกัน

2.5 วิธีการทดสอบสมการ (validation test)

เมื่อได้สมการ calibration แล้วจะต้องนำสมการที่ได้มาทวนสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพของสมการว่าสามารถใช้ในการประเมินค่าได้แม่นยำมากน้อยเพียงใด วิธีที่นิยมใช้ในเทคนิค NIRS มี 2 วิธี คือ

2.5.1 full cross validation

วิธีนี้การทดสอบในลักษณะนี้เป็นการทดสอบภายใน (internal validation) มีวิธีการคือ ขั้นแรก ตัดตัวอย่างที่ 1 ออกไปจากกลุ่ม calibration แล้วนำตัวอย่างที่เหลือมาสร้างสมการ calibration เมื่อได้สมการ calibration แล้วก็นำมาประเมินค่าตัวอย่างที่ 1 ที่ตัดไปก่อนหน้านี้ ขั้นสอง ตัดตัวอย่างที่ 2 ออกไป นำตัวอย่างที่ 1 กลับเข้ามาในกลุ่ม calibration รวมกับตัวอย่างอื่นๆ ที่เหลือเพื่อสร้างสมการ calibration เมื่อได้สมการ calibration นำมาประเมินค่าของตัวอย่างที่ 2 ทำซ้ำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งประเมินค่าตัวอย่างครบทุกตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างแต่ละตัวจะถูกตัดออก 1 ครั้งเท่านั้น

การทดสอบภายใน (internal validation) จะวัดผลโดยการดูค่า RMSECV (root mean square error of cross validation) เป็นการวัดค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการประเมินโดยใช้สมการ calibration กับค่าที่วิเคราะห์ได้ (measured value or true value) ถ้ามีค่าแตกต่างกันน้อยแสดงว่าสมการ calibration ที่ใช้ทำการประเมินนั้นมีประสิทธิภาพ ให้ค่าที่ยอมรับได้ การใช้วิธี Full cross validation มักใช้กับวิธีการวิเคราะห์โดยวิธี PLSR ไม่นิยมใช้กับวิธีวิเคราะห์โดยวิธี MLR การใช้วิธีนี้ในกรณีที่มีตัวอย่างจำนวนน้อยๆ แต่ถ้าในกรณีที่มีตัวอย่างจำนวนมากๆ วิธีนี้จะไม่เหมาะที่จะนำมาใช้การทดสอบเพราะผลที่ได้อาจจะไม่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การทดสอบผลการประเมิน (prediction testing)

เป็นการทดสอบโดยนำกลุ่มตัวอย่างชุดใหม่ (external validation) มาประเมินค่าจากสมการ calibration ที่ได้ โดยตัวอย่างชุดใหม่ที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีวิธีการเตรียมตัวอย่าง การวัดสเปกตรัมสถานะในการทดลอง รวมไปถึงการแปลงข้อมูลสเปกตรัมต้องเหมือนกับกลุ่ม calibration ข้อควรระวังก็คือ ตัวอย่างในกลุ่มใหม่จะต้องมีค่าที่ต้องการประเมินอยู่ในช่วงของกลุ่ม calibration การทดสอบลักษณะนี้ มีวิธีการ คือ นำตัวอย่างกลุ่มใหม่มาวิเคราะห์หาค่าที่ต้องการ เช่น ค่าโปรตีน โดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบ reference methods แทนด้วยข้อมูล X และนำไปวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIRS แล้วนำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการ calibration แทนด้วยข้อมูลชุด Y นำผลที่ได้จากทั้งสองวิธีมาพิจารณาเปรียบเทียบโดยมีค่าทางสถิติที่ใช้วัดคือ SEP (standard error of prediction) หรือ RMSEP (root mean square error of prediction) และ bias ซึ่งค่าสถิติเหล่านี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสมการ calibration ถ้าผลการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับผลที่อ้างอิง และให้ค่าทางสถิติที่ดี แสดงว่าสมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีนั้นยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ทำนายปริมาณตัวอย่างต่อไปได้อย่างถูกต้อง (อนุพันธ์, 2545)

2.6 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสมการ

2.6.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient; R) คือค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) หากค่าที่คำนวณได้มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1 หมายความว่า สมการที่สร้างขึ้น สามารถนำมาใช้ในการอธิบายค่าทำนาย ที่เกิดจากอิทธิพลของตัวแปรอิสระ (X) กับค่าแปรตาม (Y) ที่มีความสัมพันธ์กันมาก

2.6.2 ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มสร้างสมการ (standard error of calibration; SEC) คือ ค่าที่บอกถึงสมการที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการทำนายต่อไปได้ดีหรือไม่ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย

2.6.3 ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มทดสอบสมการ (standard error of prediction; SEP) คือค่าที่บอกถึงการนำเอาสมการที่สร้างขึ้น มาทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากเครื่อง NIR มีความแม่นยำสูงหรือต่ำ ซึ่งถ้าค่าที่คำนวณได้มีค่าน้อย หมายความว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำสูง

2.6.4 ค่าเฉลี่ย ของผลต่างระหว่างค่าที่ได้ จากวิธีอ้างอิงกับค่าที่ได้จาก NIR (average of difference between actual value and NIR value; bias) คือ ค่าเฉลี่ยของการทำนายข้อมูลของตัวแปรตาม (Y) และค่าเฉลี่ยข้อมูลของตัวแปรอิสระ (X) มีความแตกต่างกันหรือไม่ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5 อัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่ม validation set ต่อค่า SEP (ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP; RPD) ค่าจากที่คำนวณได้มีค่าสูง หมายถึง ค่าผิดพลาดมาตรฐานที่ทำนายได้จาก NIR มีค่าน้อยกว่าค่าผิดพลาดมาตรฐานที่ได้จากวิเคราะห์จริง

ตาราง 2.2 เกณฑ์การพิจารณาค่า R และ R²

| Value of R | Value of R ² | Interpretation |
|-------------------|-------------------------|---|
| Up to ± 0.5 | 5 Up to 0.25 | Not usable in NIRS calibration |
| $\pm 0.51 - 0.70$ | 0.26 - 0.49 | Poor correlation, research the reasons |
| $\pm 0.71 - 0.80$ | 0.50 - 0.64 | Rough screening |
| $\pm 0.81 - 0.90$ | 0.66 - 0.81 | Screening and approximate calibration |
| $\pm 0.91 - 0.95$ | 0.83 - 0.90 | Usable with caution for most applications, including research |
| $\pm 0.96 - 0.98$ | 0.92 - 0.96 | Usable in most applications, including quality assurance |
| $\pm 0.99 >$ | 0.98 > | Usable in any application |

ที่มา: Williams (2007)

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้เทคนิค NIRS

2.6.1 ขนาดของอนุภาค

ขนาดของอนุภาคเป็นแหล่งของความผิดพลาดที่สำคัญ เพราะขนาดของตัวอย่างมีความสัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติขององค์ประกอบของสาร โดยตัวอย่างขนาดเล็กสามารถสะท้อนแสงได้ดีกว่าตัวอย่างขนาดใหญ่ เพราะฉะนั้น ค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมตัวอย่างที่มีขนาดเล็กจึงมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ (Osborne *et al.*, 1993) ขนาดของอนุภาคยังขึ้นอยู่กับการเตรียมตัวอย่างอีกด้วย เพราะจะทำให้การวัดค่าองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน จึงควรใช้การเตรียมตัวอย่างแบบเดียวกันทุกครั้งที่ทำการวัดและควรให้มีขนาดใกล้เคียงกัน

2.6.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการวัดโดยใช้ NIRS อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการวัดองค์ประกอบทางเคมี Guyer *et al.*, (2006) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในพริกหยวก พบว่า เมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างที่ -5 องศาเซลเซียส ความแน่นเนื้อที่วัดได้จะสูงกว่าการใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส แต่เมื่อวัดค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างที่ 45 องศาเซลเซียส ความแน่นเนื้อที่วัดได้จะต่ำกว่าค่าจริง 0.5% ทำการแก้ไขโดยควบคุมอุณหภูมิของห้องทดลองให้คงที่

2.6.3 ความชื้น

เป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการอ่านค่าองค์ประกอบทางเคมี ความชื้นอาจสูญเสียไปได้จากการเตรียมตัวอย่างและการเก็บตัวอย่าง Greensill and Walsh, (2000) ได้ศึกษาความแปรปรวนของความชื้นในลูกพลัมพบว่า ลูกพลัมที่มีความชื้นสูงจะทำให้การอ่านค่าผิดไปจากค่าจริงมาก

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้ประโยชน์ทางด้านเทคนิค NIR ค่อนข้างจะแพร่หลายมากขึ้น ส่วนมากจะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร เพราะเป็นการตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการตรวจสอบคุณภาพของผลไม้ ซึ่งมีงานวิจัยจากต่างประเทศมากมายที่วิจัยเกี่ยวกับการใช้เทคนิค NIR ตรวจสอบคุณภาพของผลไม้ เช่น

Miyamoto *et al.* (1998) ได้ทำการตรวจวัดปริมาณกรดซิตริกในผลส้ม Satsuma mandarins ด้วยเทคนิค NIR พบว่าการทดสอบสมการผลส้มที่ปอกเปลือกให้ค่า R สูงกว่าของส้มทั้งผล

Mc Glone and Kawano (1998) ได้ประเมินความแน่นเนื้อ น้ำหนักแห้งและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของผลกีวีโดยใช้เทคนิค NIR ทำการวัดผลกีวีจากแหล่งต่างๆ กันทั้งหมด 5 กลุ่ม ในช่วงความยาวคลื่น 400- 700 นาโนเมตร และ 700-1000 นาโนเมตร นำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS โดยโปรแกรม Unscrambler พบว่า ตัวอย่างที่นำมาวัดควรจะมีหลากหลายในด้านของแหล่งเพาะปลูก อายุ และขนาด

Peirs *et al.* (2000) ได้นำเทคนิคการดูดกลืนพลังงานแสงย่านตามองเห็นและย่านใกล้อินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น 380-2000 นาโนเมตร ไปใช้ในการประเมินระยะเวลาสำหรับการเก็บเกี่ยวของผลแอปเปิ้ลที่เหมาะสม โดยทำนายจากความหวาน ปริมาณกรดและความแน่นเนื้อ

Shao *et al.* (2007) ได้นำเทคนิควิธีการวัดการดูดกลืนแสงในย่านสายตามองเห็นและย่านใกล้อินฟราเรดมาใช้เพื่อประเมินคุณภาพภายในของมะเขือเทศ ได้แก่ ความแน่นเนื้อและความหวานแบบไม่ทำลายในช่วงความยาวคลื่น 350-2500 นาโนเมตร

Teerachaichayut *et al.* (2007) ได้ศึกษาการตรวจอาการเนื้อแก้ว ภายในผลมังคุด โดยนำเทคนิคการดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรดในช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่าน ความยาวคลื่น 640-980 นาโนเมตร ได้ผลการทำนายที่แม่นยำ

Liu *et al.* (2008) ได้นำเทคนิค Vis – NIR มาใช้ทำนายของแข็งที่ละลายน้ำได้และความแน่นเนื้อของผลลูกแพร์แบบไม่ทำลาย ในช่วงความยาวคลื่น 350-1800 นาโนเมตร ผลการวิจัยพบว่าเทคนิค Vis – NIR สามารถทำนายได้ถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยไม่ทำลายคุณภาพภายในของลูกแพร์

Guoqiang *et al.* (2009) ได้นำเทคนิค Vis/NIR มาใช้ทำนายความแน่นเนื้อและของแข็งที่ละลายน้ำได้ในผลแอปเปิ้ลฟูจิ โดยใช้ช่วงความยาวคลื่นที่ 650–920 นาโนเมตร ในขั้นตอนการทำ calibration เกิดจุด peak ที่ไม่ชัดเจน แก้ไขโดยวิธี PLS และปรับแต่งเส้นสเปกตรัมด้วยวิธี second derivative

Wang *et al.* (2010) ได้นำเทคนิค NIRS มาใช้ทำนายของแข็งที่ละลายน้ำได้ในพุทรา โดยเปรียบเทียบรูปแบบที่วัดดูมีปฏิริยาต่อแสงเนียร์อินฟราเรดระหว่าง interactance และ transmission โดยพบว่าการวางรูปแบบของพุทราแบบ interactance ให้ผลที่แม่นยำกว่า transmiision

Yande *et al.* (2010) ได้นำเทคนิค NIRS มาใช้ทำนายของแข็งที่ละลายน้ำได้ในผลส้ม ในช่วงความยาวคลื่น 350–1800 นาโนเมตร ปรับแต่งเส้นสเปกตรัมด้วยวิธี MSC และหาสมการที่เหมาะสมเพื่อใช้ทำนายของแข็งที่ละลายน้ำได้ โดยวิธี PCA-BPNN

วรรณกนก (2546) ได้ศึกษาคุณภาพภายในของส้มเขียวหวานพันธุ์สายน้ำผึ้ง โดยใช้ความยาวคลื่นระหว่าง 700-1100 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงคลื่นสั้น เพื่อประเมินค่าทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) และปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (TA) สร้างสมการ calibration โดยวิธี MLSR, PCR และ MLR พบว่าสมการ calibration MPLS และ MLR สามารถทำนายค่าทางเคมีได้แม่นยำใกล้เคียงกัน

ศุมาพร และคณะ (2552) ได้ทำการตรวจสอบคุณภาพภายในของส้มเขียวหวาน ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ และปริมาณกรดด้วยเทคนิค NIRS โดยใช้ส้ม 5 ชนิด คือ ธาราธรรมเบอร์วัน สายน้ำผึ้ง เขียวหวาน โชกุนและพริมองต์ ในช่วงความยาวคลื่นที่ 643–970 นาโนเมตร ซึ่งผลออกมาแสดงถึงความเป็นไปได้ในการเทคนิค NIRS ประกันคุณภาพของส้มสามารถตรวจสอบคุณภาพได้ถึงภายในผลโดยปราศจากความเสียหาย

นิพนธ์ (2536) ได้ทำการสำรวจความเสียหายของมะขามที่เกิดจากเชื้อรา โดยทำการสำรวจร่วมกับสำนักงานเกษตรจังหวัดเลย พบว่า รา *Aspergillus niger* ทำให้เนื้อในฝักเน่าเป็นกลุ่มราสีดำ มักพบกับมะขามที่มีลักษณะฝักแก่หรือระยะคาบหมู พบราในลักษณะนี้ไม่มากนัก รา *Phomopsis sp.* เป็นราที่พบมากในมะขามสุกใกล้เก็บเกี่ยว เชื้อรามีลักษณะเป็นเส้นใยสีขาวเจริญเป็นจุลบนเนื้อฝัก รา *Penicillium sp.* มีปริมาณการทำลายน้อยในมะขามที่แห้งมากหรือเก็บไว้นาน การเกิดเชื้อราเกิดจากในสภาพอากาศมีความชื้นสูง ซึ่งความชื้นทำให้เปลือกเน่า ซึ่งง่ายต่อการเข้าทำลายของเชื้อราและเจริญเนื้อในฝัก

สุขกมล (2536) ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบระยะเวลาในการนึ่งมะขามหวานพันธุ์ขันตีที่มีผลต่อการเก็บรักษา โดยพบว่า มะขามหวานที่ผ่านการนึ่งเป็นเวลา 10, 15 และ 20 นาที มีเปอร์เซ็นต์ความหวานไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนเนื้อมะขามหวานที่ผ่านการนึ่งแล้วนำมาเก็บไว้

จะมีเนื้อนุ่มและฉ่ำน้ำค่อนข้างมาก ซึ่งมะขามหวานที่ผ่านการนึ่ง 20 นาที จะมีเชื้อราเข้าทำลายได้เป็นจำนวนมาก

พิพัฒน์ และคณะ (2543) ได้ทำการศึกษาถึงอุณหภูมิที่แตกต่างกันมีผลต่อการเก็บรักษาคุณภาพมะขาม โดยทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิ 0, 5 และ 8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และระยะเวลาในการเก็บเป็น 2, 4, 6, 8 และ 10 เดือน ตามลำดับ โดยพบว่าที่อุณหภูมิห้องทำให้มะขามมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมากที่สุด แต่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0, 5 และ 8 องศาเซลเซียส ไม่ทำให้น้ำหนักมะขามหวานลดลง ส่วนค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความหวานพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการรักษาเปอร์เซ็นต์ความหวาน คือ อุณหภูมิ 5, 8, 0 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ

ชวนพิศ (2545) ได้ทำการศึกษาลักษณะประจำพันธุ์ของมะขาม 7 ชนิด คือ พันธุ์ประกายทอง พันธุ์สีทอง, พันธุ์ศรีชมพู, พันธุ์ขันตี, พันธุ์หมื่นจง, พันธุ์ปลาดุก แลพันธุ์น้ำผึ้ง พบว่า พันธุ์ประกายทองมีน้ำหนักฝักสุกเฉลี่ย 28.35 กรัม ความยาวฝักเฉลี่ย 8.47 เซนติเมตร เปอร์เซ็นต์ของเนื้อมะขามต่อน้ำหนักฝักสุกเฉลี่ย 44.17 เปอร์เซ็นต์ เนื้อนุ่มเนื้อมีลักษณะเป็นทราย หวานฉ่ำ พันธุ์สีทองมีน้ำหนักฝักสุกเฉลี่ย 21.42 กรัม ความยาวฝักเฉลี่ย 12.42 เซนติเมตร เปอร์เซ็นต์ของเนื้อมะขามต่อน้ำหนักฝักสุกเฉลี่ย 49.42 เปอร์เซ็นต์ เนื้อในฝักหนา เนื้อเป็นสีทอง พันธุ์ศรีชมพูมีน้ำหนักฝักสุกเฉลี่ย 20.25 กรัม ความยาวฝักเฉลี่ย 11.42 เซนติเมตร เปอร์เซ็นต์ของเนื้อมะขามต่อน้ำหนักฝักสุกเฉลี่ย 44.41 เปอร์เซ็นต์ มีรสชาติหวานกรอบ เนื้อหนา สีน้ำตาลอมเหลือง พันธุ์ขันตี มีน้ำหนักฝักสุกเฉลี่ย 16.37 กรัม ความยาวฝักเฉลี่ย 11.42 เซนติเมตร เปอร์เซ็นต์ของเนื้อมะขามต่อน้ำหนักฝักสุกเฉลี่ย 47.75 เปอร์เซ็นต์ มีรสชาติหวาน เนื้อหนามีสีน้ำตาลเข้ม พันธุ์น้ำผึ้งมีน้ำหนักฝักสุกเฉลี่ย 14.89 กรัม ความยาวฝักเฉลี่ย 10.12 เซนติเมตร เปอร์เซ็นต์ของเนื้อมะขามต่อน้ำหนักฝักสุกเฉลี่ย 61.66 เปอร์เซ็นต์ พันธุ์ปลาดุกมีน้ำหนักฝักสุกเฉลี่ย 19.24 กรัม ความยาวฝักเฉลี่ย 9.76 เซนติเมตร เปอร์เซ็นต์ของเนื้อมะขามต่อน้ำหนักฝักสุกเฉลี่ย 47.50 เปอร์เซ็นต์ พันธุ์หมื่นจง มีน้ำหนักฝักสุกเฉลี่ย 23.17 กรัม ความยาวฝักเฉลี่ย 10.95 เซนติเมตร เปอร์เซ็นต์ของเนื้อมะขามต่อน้ำหนักฝักสุกเฉลี่ย 39.37 เปอร์เซ็นต์

เบญจพรและจินตนา (2552) ได้ทำการศึกษาช่วงเวลาของการติดเชื้อราในมะขามหวานพันธุ์ประกายทอง โดยพบว่ามะขามหวานพันธุ์ประกายทองติดเชื้อราตั้งแต่ระยะเวลาเป็นดอก และทำการสำรวจและแยกเชื้อรา พบว่ามีเชื้อรา 3 ชนิดที่พบมาก คือ ราสีขาว (*phomopsis sp.*) ราสีเขียว (*Aspergillus sp.*) และราสีส้ม (ยังไม่ทราบชื่อวิทยาศาสตร์) ได้นำทั้ง 3 ชนิดไปทำการทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโต และพบว่า น้ำส้มควันไม้ให้ผลดีที่สุด โดยจะยับยั้งเชื้อราด้วยการฉีดน้ำส้มควันไม้ร่วมกับไตรโคเดอร์มาบนพื้นดินได้ต้นมะขามหวาน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุดิบและอุปกรณ์

3.1.1.1 มะขามหวานพันธุ์ประกายทองจากสวนในจังหวัดเพชรบูรณ์
(เก็บเกี่ยวในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2554 - เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2555)

3.1.1.2 auto titrator (METTLER TOLEDO รุ่น T50)

3.1.1.3 auto pipette (Titration Excellence T50, Switzerland)

3.1.1.4 refractometer (Atago รุ่น 3442 PR-1-1Q Palette Serie Portable)

3.1.1.5 บีกเกอร์ (beaker)

3.1.1.6 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล 2, 4 ตำแหน่ง (Denver instrument TB- 214)

3.1.1.7 กล้องถ่ายรูปแบบดิจิตอลพร้อมขาตั้งและฉาก (Fujifilm, FinePix F700)

3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 sodium hydroxide (NaOH) (AR grade ยี่ห้อ Merck)

3.1.2.2 potassium hydrogen phthalate (KHP) (AR grade ยี่ห้อ Merck)

3.1.3 การวัดสเปกตรัม

3.1.3.1 เครื่อง vis near infrared spectroscopy (Vis-NIRS) (PureSpect, Saika TIF., Japan)

3.1.3.2 โปรแกรม Unscrambler® version 9.7 (Camo, Oslo, Norway)

3.1.3.3 โปรแกรม Photoshop

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การทดลองเพื่อทำนายอาการผิดปกติภายในของมะขามหวานพันธุ์ประกายทอง

3.2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างโดยการชั่งมะขามพันธุ์ประกายทอง โดยคัดเลือกฝักที่แก่ ลักษณะเปลือกภายนอกเป็นสีน้ำตาล ผิวเรียบ บริเวณรอบเปลือกฝักไม่มีรอยแตก มะขามที่เก็บเกี่ยวได้ให้

ไว้ในภาชนะกล่อกกระดาษ ทำการขนส่งโดยทางรถยนต์มายังห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีการ

ตรวจสอบสินค้าโดยวิธีไม่ทำลาย สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ทำการถ่ายรูปมะขามด้วยกล้องถ่ายรูปแบบดิจิทัลที่มีการควบคุมแสงและระยะการถ่ายให้คงที่ นำตัวอย่างทั้งหมดมาทำการปรับอุณหภูมิก่อนการวัดด้วยการเก็บไว้ในห้องปรับอากาศที่รักษาอุณหภูมิห้องที่ระดับ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน ก่อนทำการวัดด้วยเครื่อง NIR spectrophotometer เพื่อป้องกันผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิระหว่างการวัด

3.2.1.2 การวัดด้วย SW-NIR spectrophotometer

นำมะขามแต่ละฝักมาทำการวัดการดูดกลืนพลังงานด้วยเครื่อง SW-NIR spectrophotometer, transmittance mode ช่วงความยาวคลื่น 655-955 นาโนเมตร โดยระบุตำแหน่งของการวัดเป็น 3 จุด คือ ตำแหน่งกึ่งกลางของต้น กลาง และท้ายของฝัก ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 3.1 หลังจากนั้นแกะเปลือกออกตรวจสอบดูอาการภายใน ณ ตำแหน่งที่ scan



ภาพที่ 3.1 แสดงตำแหน่งการวัดสเปกตรัมมะขามด้วยเครื่อง SW-NIR spectrophotometer

3.2.1.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์

3.2.1.3.1 กำหนดให้กลุ่มมะขามปกติ คือ 0 และกลุ่มมะขามที่มีความผิดปกติภายใน คือ 1 ซึ่งมะขามที่มีความผิดปกติภายใน จะมีลักษณะเป็นเชื้อรา และเกิดลักษณะเนื้อแห้ง แกร็น โดยจำนวนของกลุ่มมะขามปกติและกลุ่มของมะขามที่มีมีความผิดปกติภายในจะต้องมีจำนวนตัวอย่างเท่ากัน คือ มีมะขามกลุ่มมะขามปกติ จำนวน 127 ตัวอย่าง และกลุ่มมะขามที่มีความผิดปกติภายใน จำนวน 127 ตัวอย่าง

3.2.1.3.2 แบ่งกลุ่มมะขามเป็นกลุ่มสร้างสมการ (calibration set) และกลุ่มทดสอบสมการ (prediction set) โดยแบ่งเป็นกลุ่ม calibration จำนวน 70 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่ม prediction จำนวน 30 เปอร์เซ็นต์

3.2.1.3.3 นำข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการทำ pretreatment ข้อมูลสเปกตรัม ด้วยวิธีการต่างๆ และสร้างสมการในการทำนาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.3.4 ทำการวิเคราะห์แยกกลุ่มโดยใช้วิธีเทคนิค PLS-DA (partial least squares-discriminant analysis) เลือกสมการที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด จากการพิจารณาที่ ค่า R (correlation coefficient) ให้มีค่าสูงสุด, RMSECV ต้องมีค่าต่ำที่สุด และพิจารณาจาก factor ที่มีค่าต่ำสุดด้วย

3.2.1.3.5 ตรวจสอบความแม่นยำในการทำนาย โดยนำตัวอย่างจากกลุ่ม prediction set ไปทดสอบความถูกต้องในการทำนายของสมการ

3.2.2 การทดลองเพื่อทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ปริมาณกรดทั้งหมดและอัตราส่วนระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดทั้งหมดของเนื้อมะขามหวานพันธุ์ประกายทอง

3.2.2.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างโดยการชั่งมะขามหวานพันธุ์ประกายทอง โดยคัดเลือกฝักที่แก่ ลักษณะเปลือกภายนอกเป็นสีน้ำตาล ผิวเรียบ บริเวณรอบเปลือกฝักไม่มีรอยแตก มะขามที่เก็บเกี่ยวได้ให้ใส่ในภาชนะกลองกระดาษ ทำการขนส่งโดยทางรถยนต์มายังห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีการตรวจสอบสินค้าโดยวิธีไม่ทำลาย สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ทำการถ่ารูปมะขามด้วยกลิ้งถ่ารูปแบบดิจิทัลที่มีการควบคุมแสงและระยะการถ่าให้คงที่ นำตัวอย่างทั้งหมดมาทำการปรับอุณหภูมิก่อนการวัดด้วยการเก็บไว้ในห้องปรับอากาศที่รักษาอุณหภูมิห้องที่ระดับ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน ก่อนทำการวัดด้วยเครื่อง NIR spectrophotometer เพื่อป้องกันผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิระหว่างการวัด

3.2.2.2 การวัด SW-NIR spectroscopy

นำมะขามแต่ละฝักมาทำการวัดการดูดกลืนพลังงานด้วยเครื่อง SW-NIR spectrophotometer, transmittance mode ช่วงความยาวคลื่น 655-955 นาโนเมตร โดยระบุตำแหน่งของการวัดเป็น 3 จุด คือ ตำแหน่งกึ่งกลางของต้น กลาง และท้ายของฝัก ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 3.1 นำผลตัวอย่างมะขามแต่ละฝักที่วัดค่าสเปกตรัมแล้วมาตรวจสอบคุณภาพด้านเคมี คือ การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ (Salvador *et al.*, 2007) และวัดปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตรเตรทได้ (AOAC, 2000)

3.2.2.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์

3.2.2.3.1 กำหนดตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ โดยให้ตัวแปรตาม คือ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ และปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรทได้ ส่วนตัวแปรอิสระ คือ ข้อมูลสเปกตรัม

3.2.2.3.2 แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มสำหรับการสร้างสมการ (calibration set) และกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มสำหรับการทดสอบสมการ (prediction set) โดยแต่ละกลุ่ม มีการกระจายตัวของข้อมูลเท่าๆกัน โดยแบ่งเป็นกลุ่ม calibration จำนวน 70 เปอร์เซ็นต์ และแบ่งเป็นกลุ่ม prediction จำนวน 30 เปอร์เซ็นต์

3.2.2.3.3 นำข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยที่ได้ของแต่ละตัวอย่างมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการทำให้ pretreatment ข้อมูลสเปกตรัม ด้วยวิธีการต่างๆ และสร้างสมการในการทำนาย โดยใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) เลือกสมการที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด จากการพิจารณาที่ ค่า R (coefficient of correlation) ให้มีค่าสูงสุด, RMSECV ต้องมีค่าต่ำที่สุด และพิจารณาจาก factor ที่มีค่าต่ำสุดด้วย

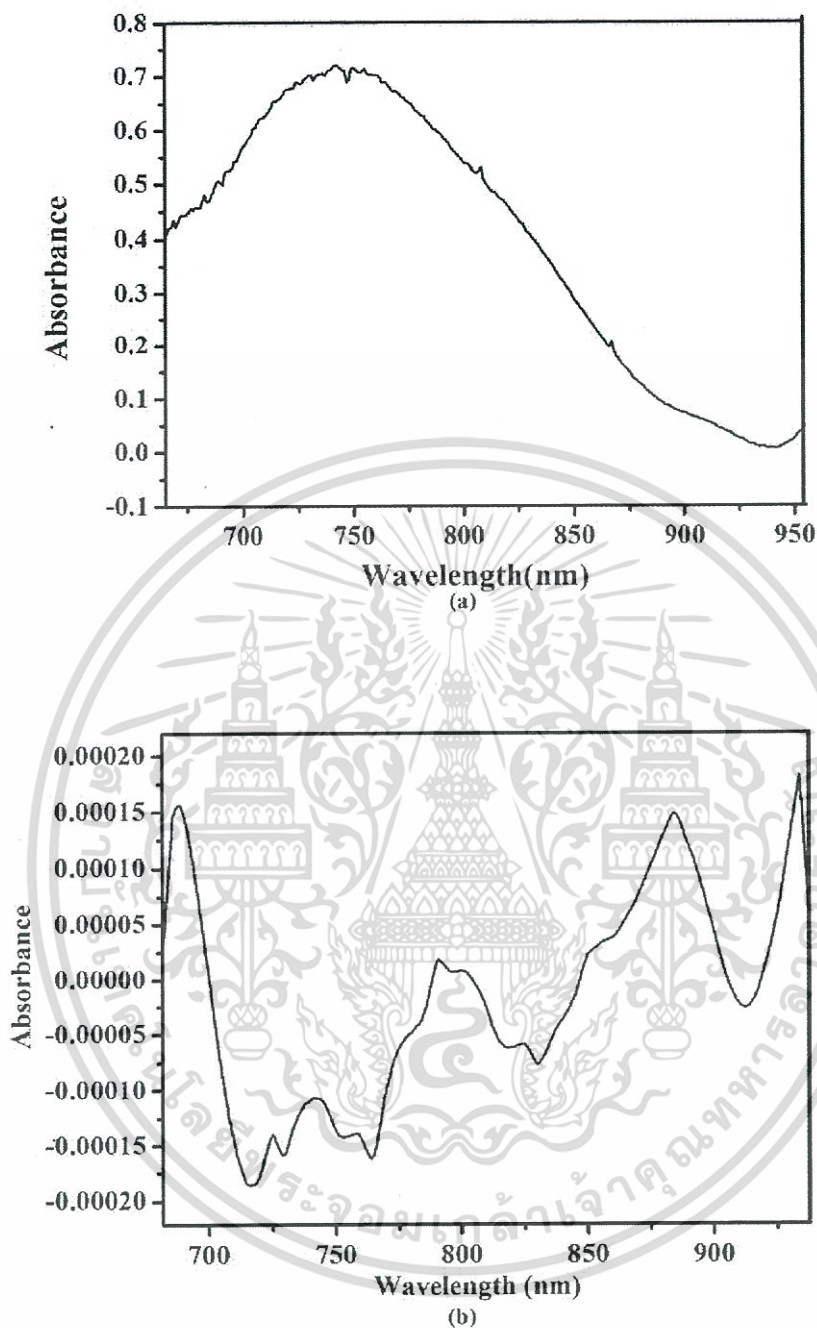
3.2.2.6.4 จากข้อมูลกลุ่ม calibration เมื่อได้สมการ calibration ให้นำสมการที่ได้ไปใช้ในการทำนายคุณภาพของตัวอย่างในกลุ่ม prediction set เพื่อดูความแม่นยำของสมการ โดยใช้โปรแกรม Unscrambler version 9.7

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การสร้างสมการในการคัดแยกกลุ่มมะขามหวานปกติออกจากกลุ่มมะขามหวานที่เกิดอาการผิดปกติภายในเนื้อมะขาม

การสร้างสมการในการคัดแยกกลุ่มมะขามหวานปกติออกจากกลุ่มมะขามหวานที่เกิดอาการผิดปกติภายใน เช่น การเกิดเชื้อรา เกิดลักษณะเนื้อแห้ง แกร็นภายในเนื้อมะขามหวาน จะทำการศึกษา โดยการเก็บข้อมูลมะขามหวานทั้งหมด 254 ตัวอย่าง แบ่งเป็นมะขามหวานกลุ่มปกติจำนวน 127 ตัวอย่าง กลุ่มมะขามหวานที่เกิดอาการผิดปกติภายในจำนวน 127 ตัวอย่าง กำหนดให้กลุ่มมะขามหวานปกติ คือ 0 กลุ่มกลุ่มมะขามหวานที่ผิดปกติภายใน คือ 1 หลังจากนั้น นำมาวิเคราะห์โดยสุ่มแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการโมเดล (calibration set) จำนวน 164 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ (prediction set) จำนวน 90 ตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง NIR ในช่วงความยาวคลื่น 655-955 นาโนเมตร สร้างสมการโมเดลโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การคัดแยกถดถอยบางส่วนโดยวิธี partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) และปรับเทียบแบบ cross-validation โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ Unscamblеr (version 9.7, CAMO AS, Trondheim, Norway) ซึ่งภาพที่ 4.1 (a) เป็นภาพการแสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแบบ original spectra ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นสเปกตรัมเฉลี่ยมีลักษณะไม่เรียบ ขรุขระ จึงได้นำข้อมูลสเปกตรัมที่ใช้สำหรับสร้างสมการโมเดล (calibration set) มาทำการปรับแต่งด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 และพบว่าการปรับแต่งสเปกตรัมแบบดั้งเดิมด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative) ให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการทำนายกลุ่มที่ใช้ในการสร้างสมการได้ดีที่สุด ($F=7$, total accuracy =81.7%) และภาพที่ 4.1 (b) เป็นภาพแสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative) ของกลุ่มมะขามหวาน ดังนั้นการใช้ second derivative ที่แสดงในภาพ 4.1 (b) นี้ จะพบว่า การดูดกลืนแสงในช่วง 760, 830 และ 910 นาโนเมตรมีความสำคัญ เนื่องจากพีคน้ำจะอยู่ในช่วง 760, 830 นาโนเมตร และพีคน้ำตาลจะอยู่ในช่วง 910 นาโนเมตร (Osborne *et al.*,1993)



ภาพที่ 4.1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของกลุ่มมะขามหวานปกติและกลุ่มมะขามหวานที่เกิดอาการผิดปกติภายใน

(a) ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแบบ original spectra

(b) ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการทำนายความผิดปกติภายในมะขามหวานด้วย
วิธีการปรับแต่งด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ

| Spectral pretreatment | N | F | Normal of sample group | | Internal defect of sample group | | %Total accuracy |
|---|-----|----|------------------------|-------------|---------------------------------|-------------|-----------------|
| | | | corrected | uncorrected | corrected | uncorrected | |
| original | 164 | 8 | 69/82 | 13/82 | 60/82 | 22/82 | 78.7 |
| Smoothing | 164 | 18 | 69/82 | 13/82 | 59/82 | 23/82 | 78.1 |
| 1 st derivative | 164 | 7 | 72/82 | 10/82 | 55/82 | 27/82 | 77.4 |
| 2 nd derivative | 164 | 7 | 73/82 | 9/82 | 61/82 | 21/82 | 81.7 |
| Mean | 164 | 8 | 69/82 | 13/82 | 60/82 | 22/82 | 78.7 |
| MSC | 164 | 8 | 73/82 | 9/82 | 58/82 | 24/82 | 79.9 |
| SNV | 164 | 8 | 69/82 | 13/82 | 60/82 | 22/82 | 78.7 |
| Smoothing + 1 st derivative | 164 | 9 | 68/82 | 14/82 | 57/82 | 25/82 | 76.2 |
| Smoothing + 2 nd derivative | 164 | 6 | 73/82 | 9/82 | 59/82 | 23/82 | 80.5 |
| Mean + Smoothing+ | 164 | 10 | 70/82 | 12/82 | 54/82 | 28/82 | 75.6 |
| 1 st derivative | | | | | | | |
| Mean + Smoothing+ | 164 | 6 | 73/82 | 9/82 | 59/82 | 23/82 | 80.5 |
| 2 nd derivative | | | | | | | |
| SNV + Smoothing+ | 164 | 9 | 69/82 | 13/82 | 56/82 | 26/82 | 76.2 |
| 1 st derivative | | | | | | | |
| SNV + Smoothing+ | 164 | 8 | 73/82 | 9/82 | 59/82 | 23/82 | 80.5 |
| 2 nd derivative | | | | | | | |

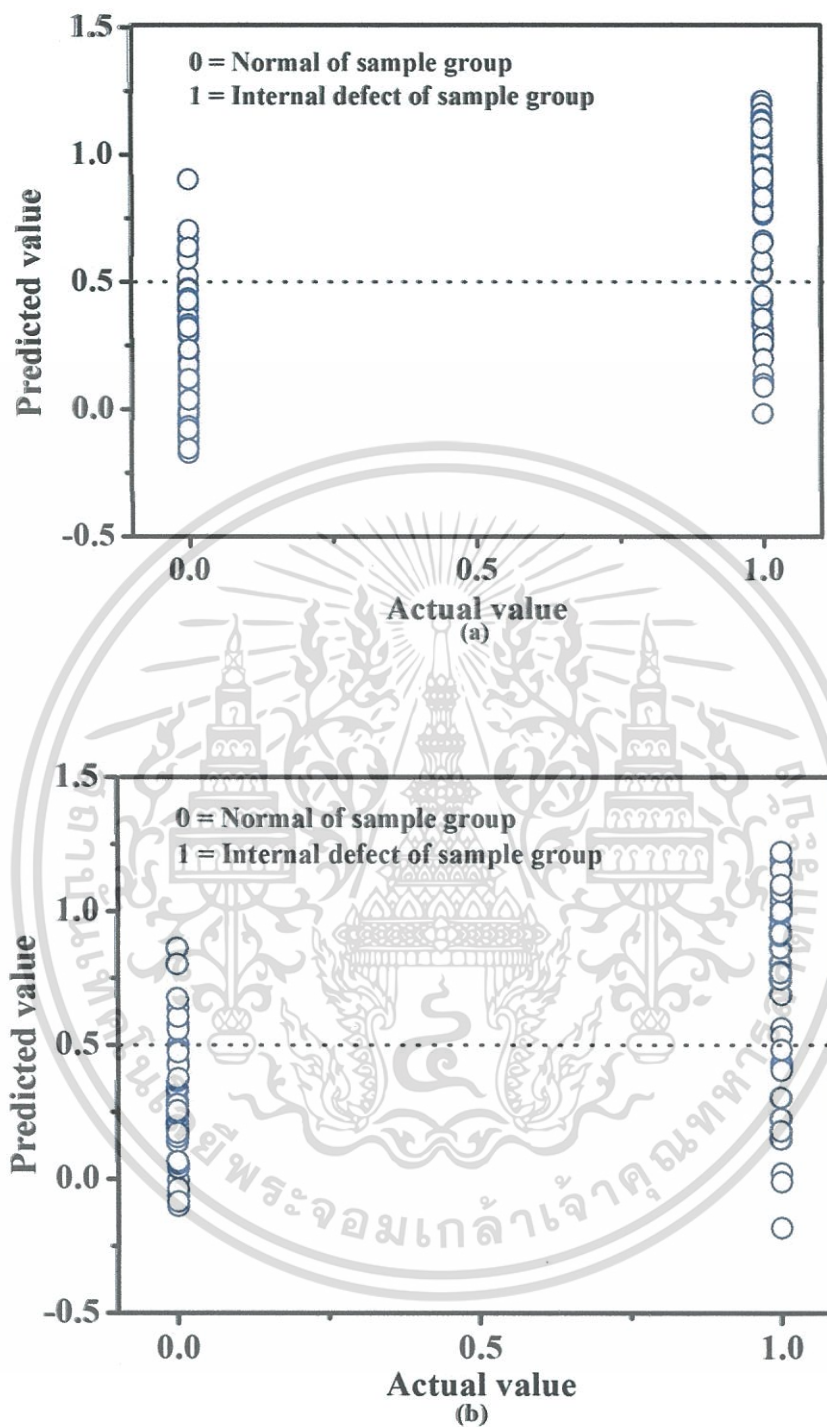
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นเลือกสมการที่ดีที่สุด ซึ่งพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการทำนาย แล้วพบว่าค่าการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี second derivative ให้ผลดีที่สุด จึงนำสมการที่ปรับแต่งด้วยวิธี second derivative มาทดสอบความแม่นยำของสมการโดยใช้กลุ่มทดสอบสมการ (prediction set) พบว่ากลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำ 75.6% โดยทำนายได้ถูกต้องทั้งหมด 68 ตัวอย่าง จากตัวอย่างทั้งหมด 90 ตัวอย่าง ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 ส่วนภาพที่ 4.2 จะแสดงการแยกกลุ่มของกลุ่มมะขามปกติและกลุ่มมะขามหวานที่เกิดอาการผิดปกติภายใน ในกลุ่ม calibration set และกลุ่ม prediction set ซึ่งจากภาพที่ 4.2 จะกำหนดให้ 0 คือกลุ่มมะขามปกติ ถ้าความสามารถการทำนายกลุ่มมะขามปกติได้เกณฑ์ต่ำกว่า 0.5 จะทำนายถูก แต่ถ้าทำนายได้สูงกว่า 0.5 จะทำนายผิด ส่วน 1 คือกลุ่มมะขามที่เกิดอาการผิดปกติภายใน ถ้าความสามารถการทำนายกลุ่มมะขามที่เกิดอาการผิดปกติภายในสูงกว่า 0.5 จะทำนายถูก แต่ถ้าทำนายต่ำกว่า 0.5 จะทำนายผิด

ตารางที่ 4.2. แสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการทำนายการเกิดอาการผิดปกติภายในมะขามหวานของกลุ่มที่ใช้ในการสร้างสมการและทดสอบสมการด้วยวิธี PLS-DA

| Items | | The calibration set | The prediction set |
|---------------------------------|-------------|---------------------|--------------------|
| number of samples | | 164 | 90 |
| wavelength(nm) | | 655-955 | 655-955 |
| spectral pretreatment | | second derivative | second derivative |
| factor | | 7 | 7 |
| normal of sample group | corrected | 73/82 | 35/45 |
| | uncorrected | 9/82 | 10/45 |
| internal defect of sample group | corrected | 61/82 | 33/45 |
| | uncorrected | 21/82 | 12/45 |
| %total accuracy | | 81.7 | 75.6 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 แสดงการแยกกลุ่มของกลุ่มมะขามปกติและกลุ่มมะขามหวานที่เกิดอาการผิดปกติ
ภายใน
(a) กลุ่มที่ใช้ในการสร้างสมการ
(b) กลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การสร้างสมการในการคัดแยกกลุ่มมะขามหวานปกติออกจากกลุ่มมะขามหวานที่ความผิดปกติภายในตาม ระดับความรุนแรง

การสร้างสมการในการคัดแยกกลุ่มมะขามหวานปกติออกจากกลุ่มมะขามหวานที่เกิดความผิดปกติภายในตามระดับความรุนแรง ทำโดยการนำข้อมูลมะขามหวานที่เกิดความผิดปกติภายในจำนวน 127 ตัวอย่างมาวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ระดับความรุนแรงของความผิดปกติภายใน โดยการถ่ายภาพมะขามหวานที่เกิดความผิดปกติภายใน แล้วใช้โปรแกรม Photoshop วิเคราะห์หา ระดับความรุนแรง โดยดูจากอัตราส่วนของ pixel ในส่วนที่เกิดความผิดปกติภายในต่อ pixel ของพื้นที่มะขามหวานทั้งหมด ทั้งนี้ มะขามหวานที่เกิดอาการผิดปกติภายใน จะถูกแบ่งระดับเปอร์เซ็นต์ความรุนแรงออกเป็น 3 ระดับ คือ

- ระดับความรุนแรงที่เกิดอาการผิดปกติภายในน้อย (มะขามหวานที่มีเปอร์เซ็นต์ความผิดปกติภายใน < 8.00 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 34 ตัวอย่าง)
- ระดับความรุนแรงที่เกิดอาการผิดปกติภายในปานกลาง (มะขามหวานที่มีเปอร์เซ็นต์ความผิดปกติภายใน 8% - 29% เปอร์เซ็นต์ จำนวน 51 ตัวอย่าง)
- ระดับความรุนแรงที่เกิดอาการผิดปกติภายในมาก (มะขามหวานที่มีเปอร์เซ็นต์การเกิดความผิดปกติภายใน > 30% เปอร์เซ็นต์ จำนวน 42 ตัวอย่าง)

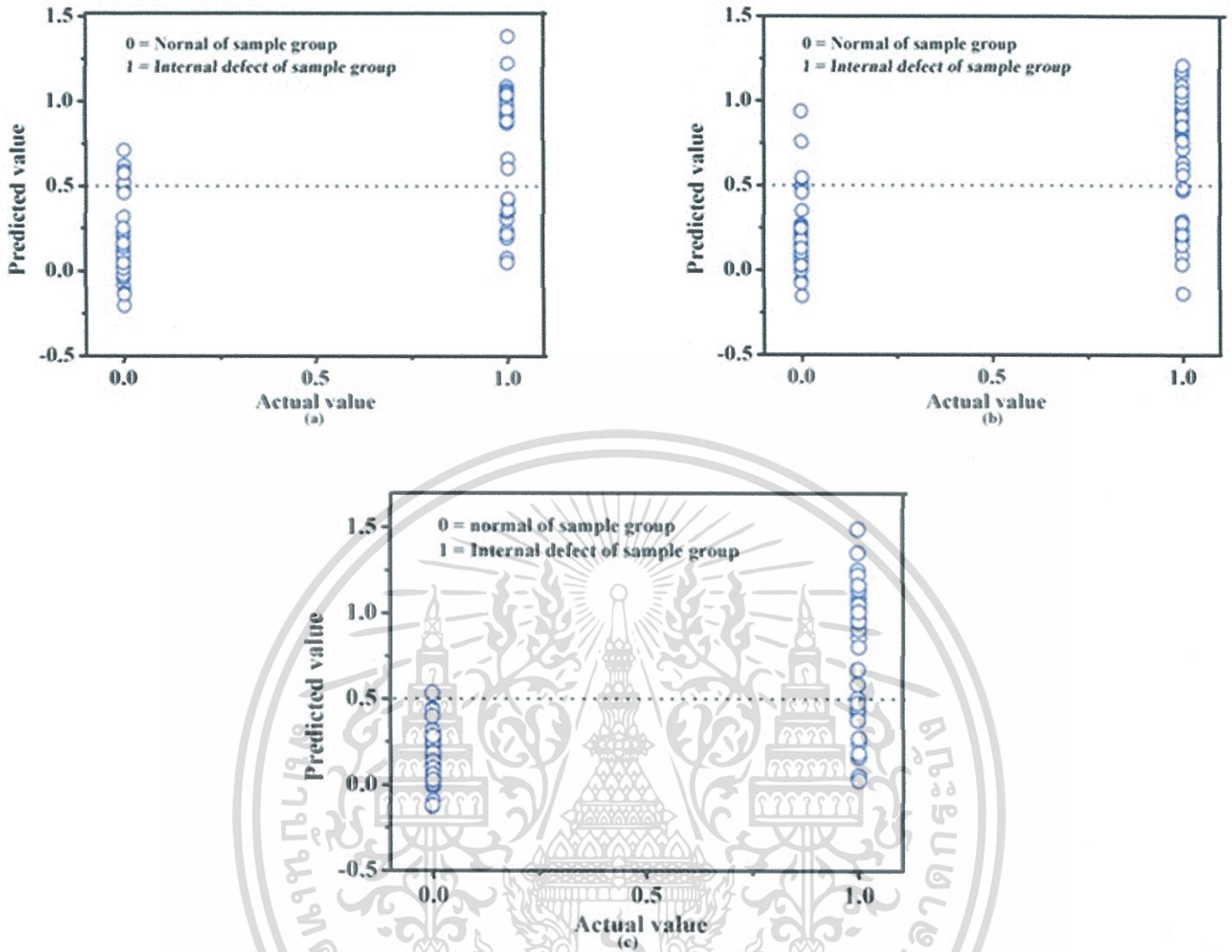
หลังจากนั้น ทำการวิเคราะห์แยกกลุ่มมะขามหวานปกติออกจากกลุ่มมะขามที่เกิดความผิดปกติภายในที่ระดับความรุนแรงน้อย, แยกกลุ่มมะขามหวานปกติออกจากกลุ่มมะขามที่เกิดความผิดปกติภายในที่ระดับความรุนแรงปานกลาง และแยกกลุ่มมะขามหวานปกติออกจากกลุ่มมะขามที่เกิดความผิดปกติภายในที่ระดับความรุนแรงมาก โดยใช้สมการจากการปรับแต่งข้อมูลด้วยวิธี second derivative มาทำนาย ซึ่งจากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ากลุ่มมะขามหวานที่มีเปอร์เซ็นต์การเกิดความผิดปกติภายในมากจะมีความแม่นยำในการทำนายคัดแยกออกจากกลุ่มมะขามปกติได้ดีที่สุด คือ มีความแม่นยำในการทำนาย 86.9 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาเป็นกลุ่มมะขามหวานที่มีเปอร์เซ็นต์การเกิดความผิดปกติภายในปานกลาง และน้อย ตามลำดับ และยังสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.3 ซึ่งจากภาพที่ 4.3 เป็นภาพแสดงความแม่นยำในการทำนายคัดแยกกลุ่มมะขามปกติออกจากกลุ่มมะขามหวานที่เกิดความผิดปกติภายในตามระดับความรุนแรงต่างๆ โดยกำหนดให้ 0 คือกลุ่มมะขามปกติ ถ้าความสามารถการทำนายกลุ่มมะขามปกติได้เกณฑ์ต่ำกว่า 0.5 จะทำนายถูก แต่ถ้าทำนายได้สูงกว่า 0.5 จะทำนายผิด ส่วน 1 คือกลุ่มมะขามที่เกิดอาการผิดปกติภายใน ถ้า

ความสามารถการทำนายกลุ่มมะขามที่เกิดอาการผิดปกติภายในสูงกว่า 0.5 จะทำนายถูก แต่ถ้าทำนายต่ำกว่า 0.5 จะทำนายผิด ซึ่งภาพที่ 4.3 (a), (b) และ (c) จะเห็นได้ว่า ภาพ 4.3 (c) มีกลุ่มมะขามปกติสามารถทำนายถูกได้เกือบหมด และกลุ่มมะขามที่เกิดอาการผิดปกติภายในทำนายถูกได้ดีกว่ากลุ่มมะขามเกิดอาการผิดปกติภายในที่ระดับความรุนแรงปานกลางและน้อย

ตารางที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการแยกกลุ่มมะขามปกติออกจากกลุ่มมะขามหวานที่เกิดอาการผิดปกติภายในตามระดับความรุนแรง

| Sample set | Number of samples | Normal sample | | Internal mold sample | | %Total accuracy uncorrected |
|--------------|-------------------|---------------|-------------|----------------------|-------------|-----------------------------|
| | | corrected | uncorrected | corrected | uncorrected | |
| low level | 34 | 28/34 | 6/34 | 22/34 | 12/33 | 73.5 |
| medium level | 51 | 47/51 | 4/51 | 40/51 | 11/51 | 85.2 |
| high level | 42 | 41/42 | 1/42 | 32/42 | 10/42 | 86.9 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.3 แสดงความแม่นยำในการแยกกลุ่มมะขามปูดออกจากกลุ่มมะขามหวานที่เกิดความผิดปกติภายในตามระดับความรุนแรง

- กลุ่มมะขามหวานที่มีระดับความรุนแรงที่เกิดอาการผิดปกติภายในน้อย
- กลุ่มมะขามหวานที่มีระดับความรุนแรงที่เกิดอาการผิดปกติภายในปานกลาง
- กลุ่มมะขามหวานที่มีระดับความรุนแรงที่เกิดอาการผิดปกติภายในมาก

4.3 การสร้างสมการในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

การสร้างสมการในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ จะทำโดยการเก็บข้อมูลมะขามหวาน จำนวน 209 ตัวอย่าง นำมาวิเคราะห์โดยแบ่งมะขามออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ใช้

สำหรับสร้างสมการโมเดล (calibration set) จำนวน 137 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบค่า

เอกสารในชั้นเรียนสำหรับงานวิจัยการแข็งนเพื่อการศึกษาหาวิธีที่มีอยู่ให้ทันสมัยกับวิธีอื่นที่มีค่า

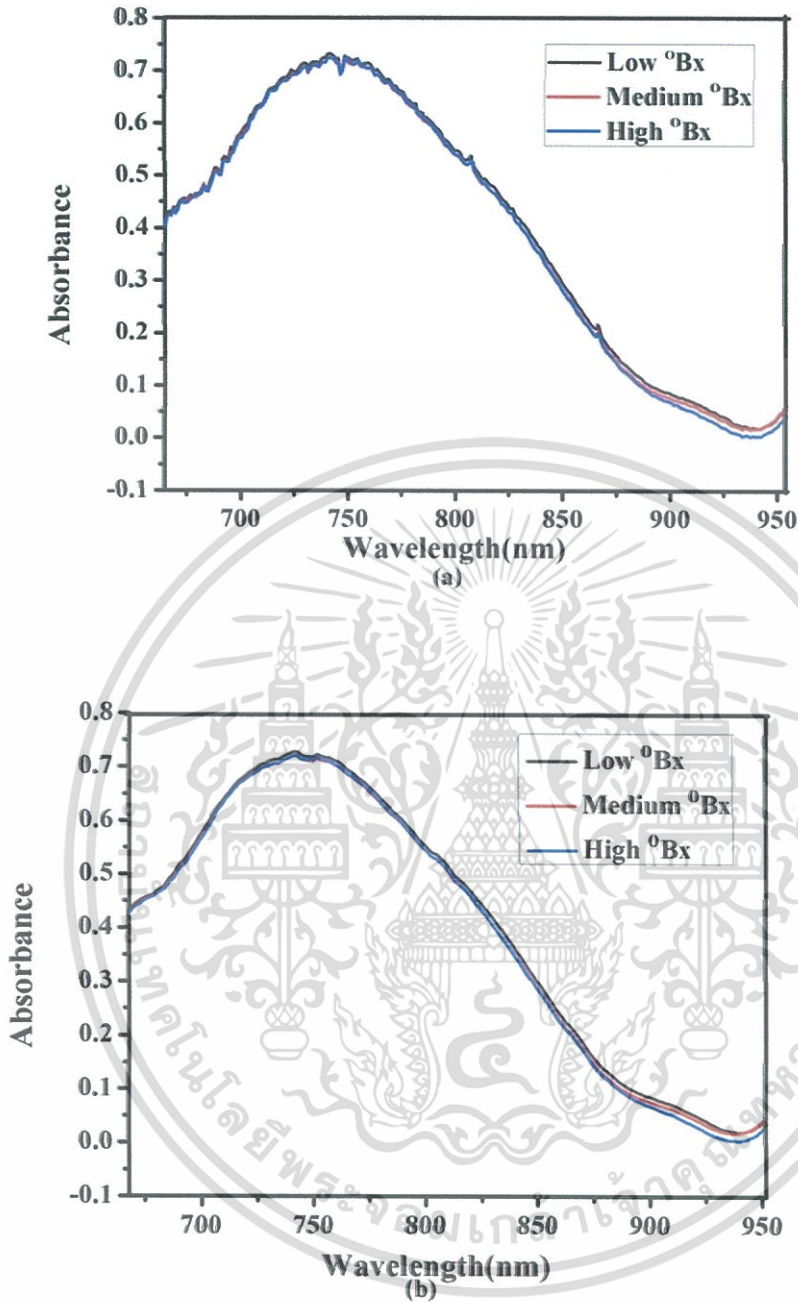
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (prediction set) จำนวน 72 ตัวอย่าง วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง NIRS กับ ในช่วงความยาวคลื่น 655-955 นาโนเมตร แล้ววิเคราะห์หาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ หลังจากนั้น สร้างสมการในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ โดยคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัม NIRS กับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยใช้วิธี วิเคราะห์ด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR) และเปรียบเทียบแบบ cross-validation ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ the Unscambler (version 9.7, CAMO AS, Trondheim, Norway) โดยกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการโมเดลจะต้องมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้สูงสุดและต่ำสุดอยู่ในกลุ่มนี้ ซึ่งตารางที่ 4.4 จะแสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

| Items | The calibration set | The prediction set |
|-------------------------|---------------------|---------------------|
| number of sample | 137 | 72 |
| unit | $^{\circ}\text{Bx}$ | $^{\circ}\text{Bx}$ |
| range | 53.3-78.3 | 57.5-75.8 |
| mean | 67.69 | 68.02 |
| standard deviation (SD) | 4.0 | 3.85 |
| wavelength | 665-955 nm | 665-955 nm |

ส่วนภาพที่ 4.4 (a) เป็นภาพการแสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแบบ original spectra ของกลุ่มมะขามหวานที่ใช้ในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จากภาพจะเห็นว่าเส้นสเปกตรัมเฉลี่ยมีลักษณะขรุขระ ไม่เรียบ จึงได้ทำการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และพบว่าการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมดั้งเดิมด้วยวิธี Smoothing (Savitsky-Golay) ให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการทำนายกลุ่มที่ใช้ในการสร้างสมการได้ดีที่สุด และภาพที่ 4.4 (b) เป็นภาพแสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยด้วยวิธี Smoothing (Savitsky-Golay) ของกลุ่มมะขามหวานที่ใช้ในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้



ภาพที่ 4.4 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของกลุ่มมะขามหวานที่ใช้ในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

- (a) ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแบบ original spectra
- (b) ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยด้วยวิธี Smoothing (Savitsky-Golay)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงความแม่นยำในสร้างสมการในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยวิธี
ปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ

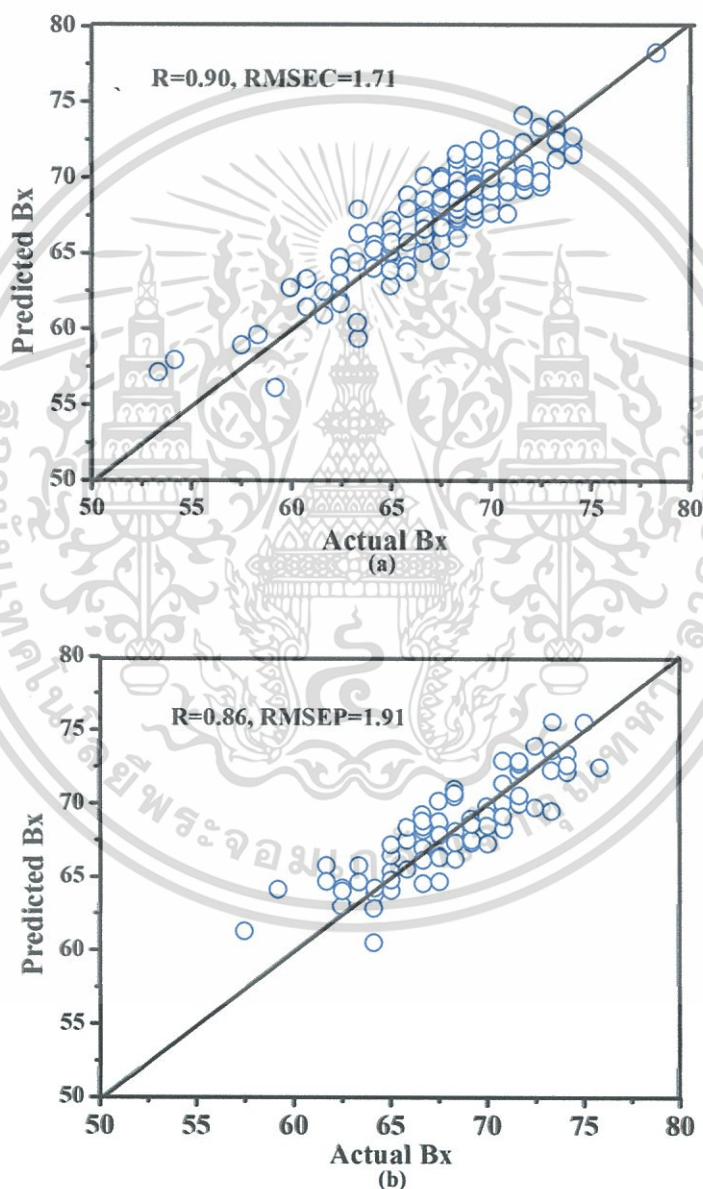
| Spectral | N | F | R | RMSECV($^{\circ}$ Bx) |
|---|-----|----|------|------------------------|
| Pretreatments | | | | |
| original | 137 | 13 | 0.72 | 2.85 |
| Smoothing | 137 | 15 | 0.74 | 2.77 |
| 1 st derivative | 137 | 12 | 0.91 | 2.92 |
| 2 nd derivative | 137 | 16 | 0.66 | 3.21 |
| MSC | 137 | 11 | 0.71 | 2.88 |
| Mean | 137 | 13 | 0.72 | 2.85 |
| SNV | 137 | 12 | 0.72 | 2.87 |
| Smoothing + 1 st derivative | 137 | 11 | 0.68 | 2.99 |
| Smoothing + 2 nd derivative | 137 | 17 | 0.69 | 3.05 |
| MSC + Smoothing + 1 st derivative | 137 | 12 | 0.70 | 2.93 |
| MSC + Smoothing + 2 nd derivative | 137 | 13 | 0.66 | 3.06 |
| mean + Smoothing + 1 st derivative | 137 | 13 | 0.68 | 2.00 |
| mean + Smoothing + 2 nd derivative | 137 | 17 | 0.69 | 3.05 |
| SNV + Smoothing + 1 st derivative | 137 | 13 | 0.71 | 2.94 |
| SNV + Smoothing + 2 nd derivative | 137 | 13 | 0.64 | 3.09 |

หลังจากการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ แล้วพบว่า การสร้างสมการด้วยวิธี Smoothing (Savitsky-Golay) ใน cross-validation ให้ผลดีที่สุด จึงนำข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการทำ Smoothing (Savitsky-Golay) มาสร้างสมการการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) ซึ่งได้ผลดังนี้ คือ $R=0.90$ และ $RMSEC = 1.71^{\circ}$ Bx หลังจากนั้นนำโมเดลสมการที่สร้างได้ไปทดสอบในกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ พบว่าได้ค่า $R=0.86$ และ $RMSEP = 1.91^{\circ}$ Bx ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.6 ส่วนภาพที่ 4.5(a) แสดงผลการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำในกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ และภาพที่ 4.5(b) แสดงผลการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำในกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ของการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

| Model | Pretreatment | F | N | R | RMSEC ($^{\circ}$ Bx) | RMSEP ($^{\circ}$ Bx) |
|-----------------|--------------|----|-----|------|------------------------|------------------------|
| calibration set | smoothing | 15 | 137 | 0.90 | 1.71 | - |
| prediction set | smoothing | 15 | 72 | 0.86 | - | 1.91 |



ภาพที่ 4.5 แสดงผลการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ

(a) กลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ

(b) กลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

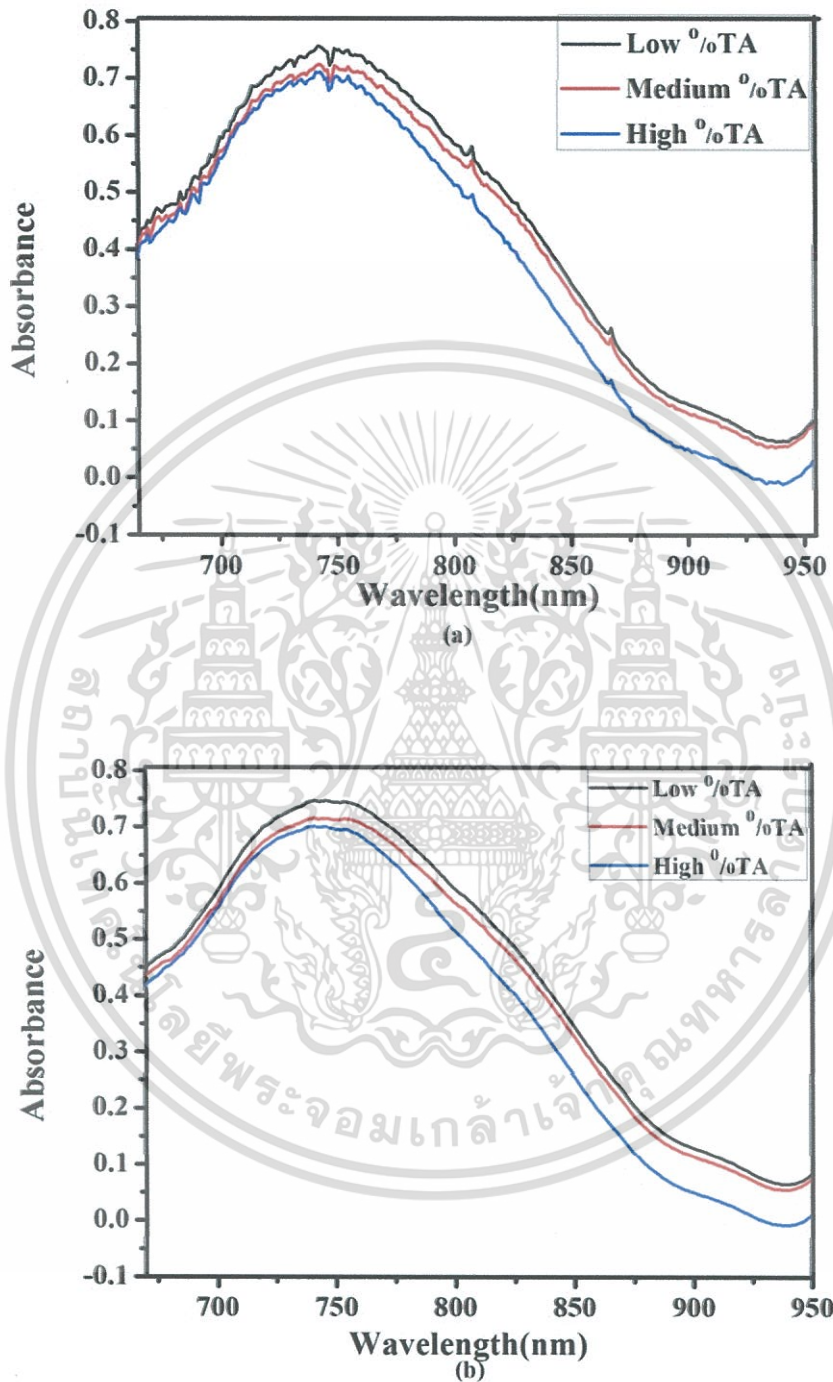
4.4 การสร้างสมการในการทำนายปริมาณกรดที่ไคเตรทได้

การสร้างสมการในการทำนายปริมาณกรดที่ไคเตรทได้ จะทำโดยการเก็บข้อมูลมะขามหวาน จำนวน 163 ตัวอย่าง นำมาวิเคราะห์โดยแบ่งมะขามออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการโมเดล (calibration set) จำนวน 104 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ (prediction set) จำนวน 59 ตัวอย่าง วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง NIRS กับ ในช่วงความยาวคลื่น 655-955 นาโนเมตร สร้างสมการในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ โดยคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัม NIRS กับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยใช้วิธี วิเคราะห์ด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR) และปรับเทียบแบบ cross-validation ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ unscambler (version 9.7, CAMO AS, Trondheim, Norway) โดยตารางที่ 4.7 จะแสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายปริมาณกรดที่ไคเตรทได้

| Items | The calibration set | The prediction set |
|-------------------------|---------------------|--------------------|
| number of sample | 104 | 59 |
| unit | %TA | %TA |
| range | 0.26-3.59 | 0.27-3.44 |
| mean | 2.12 | 2.09 |
| standard deviation (SD) | 0.61 | 0.61 |
| wavelength | 665-955 nm | 665-955 |

ส่วนภาพที่ 4.6 (a) เป็นภาพการแสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแบบ original spectra ซึ่งจะเห็นว่าเส้นสเปกตรัมเฉลี่ยบริเวณช่วงความยาวคลื่น 655-750 นาโนเมตร มีลักษณะขรุขระ จึงได้ทำการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.8 และพบว่า การแปลงข้อมูลสเปกตรัมดั้งเดิมด้วยวิธี Smoothing (Savitsky-Golay ให้อัตราเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการทำนายกลุ่มที่ใช้ในการสร้างสมการได้ดีที่สุด และภาพที่ 4.6(b) เป็นภาพแสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยด้วยวิธี Smoothing (Savitsky-Golay) ของกลุ่มมะขามหวานที่ใช้ในการทำนายปริมาณกรดที่ไคเตรทได้



ภาพที่ 4.6 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของกลุ่มมะขามหวานที่ใช้ในการทำนายปริมาณกรดที่ไต่เตรทได้

(a) ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแบบ original spectra

(b) ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยด้วยวิธี Smoothing (Savitsky-Golay)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

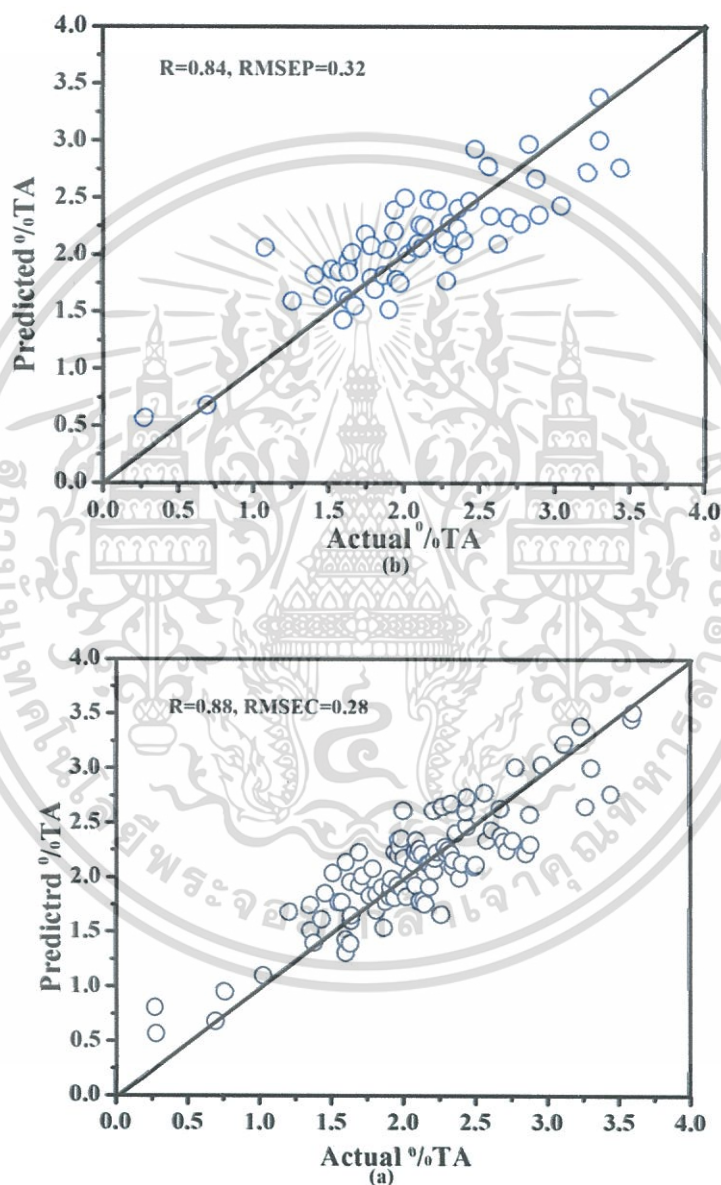
ตารางที่ 4.8 แสดงความแม่นยำในสร้างสมการในการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ด้วยวิธี
ปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ

| Spectral Pretreatments | N | F | R | RMSECV(%TA) |
|---|-----|-----|------|-------------|
| original | 104 | 6 | 0.69 | 0.44 |
| Smoothing | 104 | 114 | 0.71 | 0.43 |
| 1 st derivative | 104 | 10 | 0.70 | 0.44 |
| 2 nd derivative | 104 | 3 | 0.62 | 0.48 |
| MSC | 104 | 12 | 0.68 | 0.45 |
| Mean | 104 | 6 | 0.69 | 0.44 |
| SNV | 104 | 6 | 0.63 | 0.48 |
| Smoothing + 1 st derivative | 104 | 10 | 0.69 | 0.44 |
| Smoothing + 2 nd derivative | 104 | 4 | 0.60 | 0.49 |
| MSC + Smoothing + 1 st derivative | 104 | 4 | 0.64 | 0.47 |
| MSC + Smoothing + 2 nd derivative | 104 | 4 | 0.60 | 0.49 |
| mean + Smoothing + 1 st derivative | 104 | 5 | 0.65 | 0.47 |
| mean + Smoothing + 2 nd derivative | 104 | 4 | 0.60 | 0.49 |
| SNV+ Smoothing + 1 st derivative | 104 | 6 | 0.62 | 0.50 |
| SNV+ Smoothing + 2 nd derivative | 104 | 4 | 0.62 | 0.48 |

หลังจากการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ แล้วพบว่า การสร้างสมการด้วยวิธี Smoothing (Savitsky-Golay) ใน cross-validation ให้ผลดีที่สุด นำข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการทำ Smoothing (Savitsky-Golay) มาสร้างสมการการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) ซึ่งได้ผลดังนี้ คือ 0.87 และ RMSEC = 0.28% และนำโมเดลสมการที่สร้างได้ไปทดสอบในกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ พบว่าได้ค่า 0.84 และ RMSEP = 0.32% ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.9 ส่วนภาพที่ 4.7(a) แสดงผลการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ในกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ และภาพที่ 4.7(b) แสดงผลการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ในกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ของการทำนายปริมาณกรดที่ไคเตรทได้

| Model | Pretreatment | F | N | R | RMSEC% | RMSEP% |
|-----------------|--------------|---|-----|------|--------|--------|
| calibration set | Smoothing | 9 | 104 | 0.88 | 0.28 | - |
| prediction set | Smoothing | 9 | 59 | 0.84 | - | 0.32 |



ภาพที่ 4.7 แสดงผลการทำนายปริมาณกรดที่ไคเตรทได้

(a) กลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ

(b) กลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

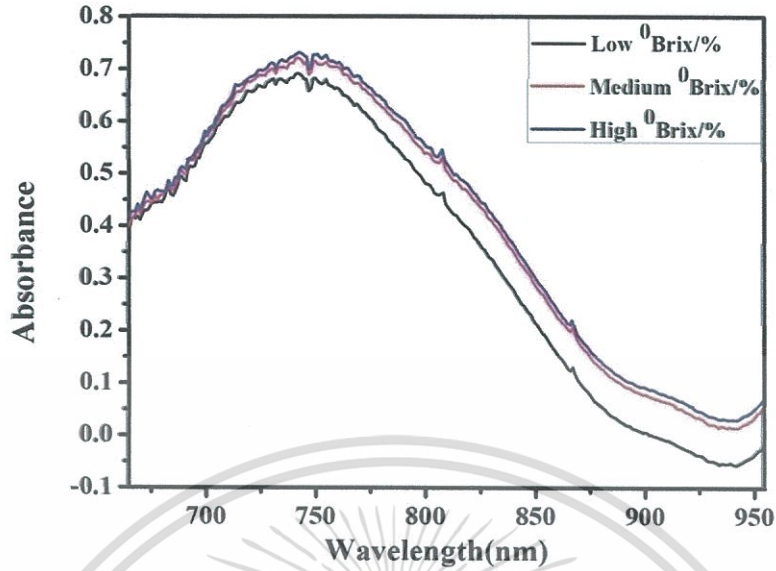
4.5 การสร้างสมการในการทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA ของเนื้อมะขามหวานพันธุ์ประกายทอง

การสร้างสมการในการทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA ของเนื้อมะขามหวานพันธุ์ประกายทอง จะใช้มะขามหวานจำนวน 163 ตัวอย่าง แล้วแบ่งมะขามออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการโมเดล (calibration set) จำนวน 109 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ (prediction set) จำนวน 54 ตัวอย่าง คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัม NIRS กับอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA โดยใช้วิธี วิเคราะห์ด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR) และเปรียบเทียบแบบ cross-validation ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ unscambler (version 9.7, CAMO AS, Trondheim, Norway) สำหรับกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการโมเดลจะต้องมีอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA ได้สูงสุดและต่ำสุดอยู่ในกลุ่มนี้ โดยตารางที่ 4.10 จะแสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA

| Items | The calibration set | The prediction set |
|-------------------------|------------------------|------------------------|
| number of sample | 109 | 54 |
| unit | $^{\circ}\text{Bx}/\%$ | $^{\circ}\text{Bx}/\%$ |
| range | 17.99-43.78 | 16.98-41.56 |
| mean | 29.67 | 29.07 |
| standard deviation (SD) | 5.88 | 5.71 |
| wavelength | 665-955 nm | 665-955 nm |

ส่วนภาพที่ 4.8 เป็นภาพการแสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแบบ original spectra ของกลุ่มมะขามหวานที่ใช้ในการทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA ได้ทำการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.11 แต่ก็ยังพบว่า เมื่อทำการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ วิธีการแบบ original ก็ยังให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการทำนายกลุ่มที่ใช้ในการสร้างสมการได้ดีที่สุด



ภาพที่ 4.8 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแบบ original spectra ของกลุ่มมะขามหวานที่ใช้ในการ
ทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA

ตารางที่ 4.11 แสดงความแม่นยำในสร้างสมการในการทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA
ของเนื้อมะขามหวานพันธุ์ประกายทอง ด้วยวิธีปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิค
ทางคณิตศาสตร์ต่างๆ

| spectral pretreatments | N | F | R | RMSECV (°Bx/%) |
|--|-----|---|------|-------------------|
| original | 109 | 7 | 0.67 | 4.37 |
| Smoothing | 109 | 8 | 0.67 | 4.41 |
| 1 st derivative | 109 | 3 | 0.66 | 4.49 |
| 2 nd derivative | 109 | 4 | 0.66 | 4.49 |
| MSC | 109 | 6 | 0.66 | 4.49 |
| Mean | 109 | 6 | 0.66 | 4.39 |
| SNV | 109 | 5 | 0.66 | 4.43 |
| Smoothing + 1 st derivative | 109 | 7 | 0.67 | 4.42 |
| Smoothing + 2 nd derivative | 109 | 7 | 0.66 | 4.50 |
| MSC + Smoothing + 1 st derivative | 109 | 6 | 0.66 | 4.51 |
| MSC + Smoothing + 2 nd derivative | 109 | 7 | 0.66 | 4.47 |

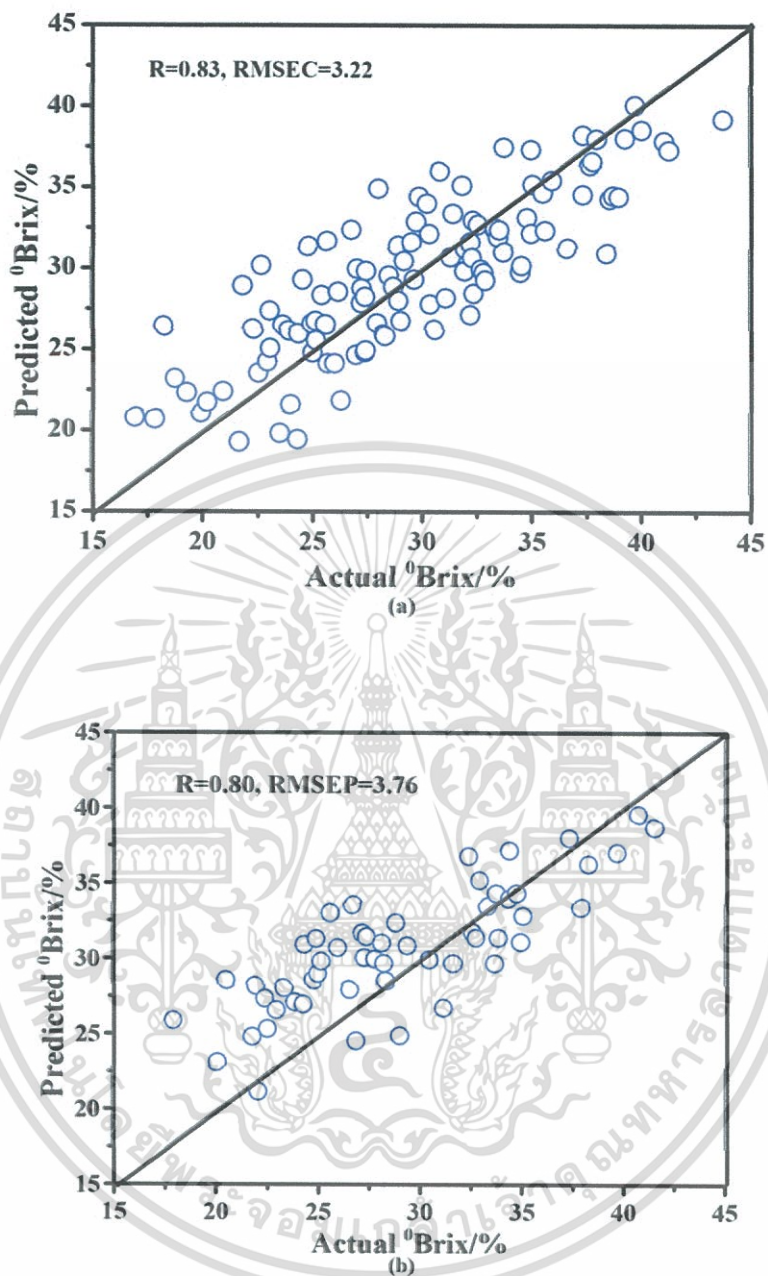
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ห้ามการใช้นวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Spectral Pretreatments | N | F | R | RMSECV (°Bx/%) |
|---|-----|---|------|-------------------|
| mean + Smoothing + 2 nd derivative | 109 | 7 | 0.66 | 4.50 |
| SNV+ Smoothing + 1 st derivative | 109 | 6 | 0.66 | 4.46 |
| SNV Smoothing + 2 nd derivative | 109 | 8 | 0.66 | 4.52 |

หลังจากนั้น นำข้อมูลสเปกตรัมที่ มาสร้างสมการการทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA โดยใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) ซึ่งได้ผลดังนี้ คือ 0.83 และ RMSEC = 3.22 °Bx/% และนำโมเดลสมการที่สร้างได้ไปทดสอบในกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ พบว่า ได้ค่า 0.80 และ RMSEP = 3.76 °Bx/% ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.12 โดยภาพที่ 4.9(a) แสดงผลการทำนายทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA ในกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ และ ภาพที่ 4.9(b) แสดงผลการทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA ในกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ของการทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA

| Model | Pretreatment | F | N | R | RMSEC(°Bx/%) | RMSEP(°Bx/%) |
|-----------------|--------------|---|-----|------|--------------|--------------|
| calibration set | original | 6 | 109 | 0.83 | 3.22 | - |
| prediction set | original | 6 | 54 | 0.80 | - | 3.76 |



ภาพที่ 4.9 แสดงผลการทำนายทำนายอัตราส่วนระหว่าง TSS และ TA

- (a) กลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ
- (b) กลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลอง การตรวจสอบคุณภาพภายในของมะขามหวานแบบไม่ทำลาย โดยใช้เทคนิคแสงย่านใกล้อินฟราเรดแบบทะลุผ่าน จะแบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 ตอน คือ การคัดแยกคุณภาพภายในของมะขามหวานในเชิงคุณภาพ และการทำนายคุณภาพภายในของมะขามหวานเชิงปริมาณ

ในส่วนของการคัดแยกคุณภาพภายในของมะขามหวานในเชิงคุณภาพ เป็นการคัดแยกกลุ่มมะขามปกติออกจากกลุ่มมะขามที่เกิดลักษณะผิดปกติภายใน เช่น การเกิดเชื้อรา การเกิดเนื้อแห้ง แกร็นในเนื้อมะขามหวาน ซึ่งพบว่า การแยกกลุ่มมะขามปกติออกจากกลุ่มมะขามออกจากมะขามที่เกิดลักษณะผิดปกติภายใน เมื่อทดสอบกับกลุ่มทดสอบสมการ สามารถคัดแยกได้ถึง 75.6% และเมื่อมาแยกกลุ่มโดยวิเคราะห์ตามระดับความรุนแรงของการเกิดลักษณะผิดปกติภายในพบว่า มะขามหวานที่เปอร์เซ็นต์การเกิดลักษณะผิดปกติภายในมากที่สุด จะสามารถคัดแยกกลุ่มออกจากกลุ่มปกติได้ดีที่สุด สามารถคัดแยกได้ถึง 86.9% รองลงมาเป็น กลุ่มมะขามหวานที่มีเปอร์เซ็นต์การเกิดลักษณะผิดปกติภายในปานกลาง และน้อย ซึ่งคัดแยกออกจากกลุ่มได้ 85.2% และ 73.5% ตามลำดับ

ในด้านการทำนายคุณภาพภายในของมะขามหวานเชิงปริมาณ จะเป็นการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ทำนายปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ และทำนายอัตราส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ ซึ่งพบว่า เมื่อนำมาทดสอบในกลุ่มสำหรับทดสอบสมการการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ได้ค่า $R = 0.86$ การทำนายปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ ได้ค่า $R = 0.84$ ซึ่งเป็นผลการทำนายที่ดีในระดับหนึ่งเท่านั้น คือ สามารถคัดกรองและแยกได้ ส่วนการทำนายอัตราส่วนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่อปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ ได้ค่า $R = 0.80$ ซึ่งเป็นผลการทำนายที่สามารถคัดกรองได้แบบหยาบๆ (Williams *et al.*, 2007) ทั้งเส้นสเปกตรัมเฉลี่ยแบบดั้งเดิมของมะขามหวานทั้งการในทดลองเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณนั้น จะได้เส้นสเปกตรัมที่มีลักษณะขรุขระ ไม่เรียบ เนื่องจากเมล็ดมะขามมีลักษณะแข็งทำให้ไปขวางทางเดินของแสง ทำให้ได้เส้นสเปกตรัมไม่ดีเท่าที่ควร

เอกสารอ้างอิง

คณาจารย์วิทยาลัยครูกลุ่มภาคเหนือ. 2525. ผลการวิจัยเรื่องการศึกษาลักษณะประจำพันธุ์และการปลูกมะขามหวานในจังหวัดเพชรบูรณ์ เพชรบูรณ์.

ชวนพิศ แดงสวัสดิ์. 2545. ศึกษาลักษณะประจำพันธุ์ของมะขามหวานบางพันธุ์. วารสารวิทยาศาสตร์คชสส. 24: 77-80.

ชูศักดิ์ สัจจงพงษ์. 2550. มะขามพีชสร้างอนาคต. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์มติชน: 31-33.

จินตนา สนามชัยสกุล. 2545. รายงานการวิจัยเรื่องการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดเชื้อราบนฝักมะขามหวานต่อลักษณะทางกายภาพและคุณภาพ. การศึกษาสาเหตุป้องกันกำจัดเชื้อจากเกษตรกร. สถาบันราชภัฏเพชรบูรณ์ เพชรบูรณ์.

ณัฐสิริวรรณ ปูนวัน. 2531. ชนิดและสารพิษของเชื้อราในมะขามหวาน. วารสารวิทยาศาสตร์การแพทย์. 30(1): 3-8.

นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์. 2545. หลักพื้นฐานเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. การอบรมเชิงปฏิบัติการ การควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ: 39 - 66

นิพนธ์ วิสารทานนท์. 2536. โรคพืชที่ทำความเสียหายให้แก่มะขาม. หน้า 80-92. ในการประชุมวิชาการสัมมนามะขามหวานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1: วิทยาลัยครูเพชรบูรณ์ เพชรบูรณ์.

เบญจพร ศรีสุวรรณ และจินตนา สนามชัยสกุล. 2552. งานวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่องการศึกษาช่วงเวลาของการติดเชื้อราและผลการใช้เชื้อราไตรโคเดอร์มา สมุนไพรหมักและน้ำส้มควันไม้ ในการยับยั้งเชื้อราจากมะขามหวาน (พันธุ์ประกายทอง) ในห้องปฏิบัติการ. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ เพชรบูรณ์.

ประทุมทิพย์ ใจปัญญา และประภาส โป้แล. 2539. การศึกษามะขามหวานพันธุ์ประกายทอง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏเพชรบูรณ์.

พิพัฒน์ ชนาทพาพร, จินตนา สนามชัยสกุล และศันสนีย์ อุดมอ่าง. 2543. ผลของระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันที่มีผลในการเก็บรักษาคุณภาพมะขามหวานพันธุ์สีทอง พันธุ์ศรีชมพู และพันธุ์ขันตี. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.

ยุทธพงศ์ ประชาสิทธิศักดิ์. 2551. เทคโนโลยีการฉายรังสีมะขาม (แผ่นพับ). ปทุมธานี. ศูนย์ฉาย

วรรณกนก ทาสวรรณ์. 2546. การตรวจสอบคุณภาพของส้มเขียวหวานด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่.

ศุมาพร เกษมสำราญ. 2545. ขั้นตอนการสร้างสมการประเมินค่าทางเคมีและการทดสอบสมการในเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด. หน้า 131-151. ใน: วารุณี ฐานะแพสย์, อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุลและธงชัย สุวรรณสิขณน์, (ผู้รวบรวม), การควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. 27-28 พฤศจิกายน 2545. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร.

ศุมาพร เกษมสำราญ, วารุณี ฐานะแพสย์ และอนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล. 2552. การตรวจสอบคุณภาพภายในของส้มเขียวหวานโดยไม่ทำลายด้วยแสงเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 40 (มกราคม-เมษายน 2552) : 233-236

สำนักเศรษฐกิจการเกษตร. 2556. สถิติปริมาณและมูลค่าของตลาดส่งออกมะขาม. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export.php (20 พฤษภาคม 2556)

สุขกมล จิตสมร. 2536. การศึกษาเปรียบเทียบระยะเวลาการนึ่งมะขามหวานพันธุ์ชั้นดี ที่มีผลต่อการเก็บรักษา. หน้า 31. ในการประชุมวิชาการสัมมนามะขามหวานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1. เพชรบูรณ์: วิทยาลัยครูเพชรบูรณ์.

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

Branes, R. J., Dhanoa, M.S. and Lister, S. J. 1989. Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra. Applied Spectroscopy. 43(5): 772-777.

Gibbon, D. and Pain, A. 1985. Crop of drier regions of the tropics. Longman, London and New York..

Greensill, C.V. and Walsh, K.B. 2000. Optimization of instrument precision and wavelength resolution for the performance of NIR calibrations of sucrose in a water-cellulose matrix. 54: 426-430.

Guoqiang, F., Jianwen, Z., Ran, D. and Gao, L. 2009. Determination of soluble solids and firmness of apples by Vis/NIR transmittance. Journal of Food Engineering. 93(4): 416-420.

- Guyer, D.E., Ariana, D., Shrestha, B. and Lu, R.F. 2006. Opto-electronic determination of Insect presence in fruit. In : Portland, OR, Proceedings of the ASAE, Paper number 066061.
- Hruschka, W. R. 2001. Data Analysis: Wavelength Selection Methods. In: P.C. Williams, and K. H. Nortis, (eds.), Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries. 2nd ed. American Association of Cereal Chemists, Inc. St. Paul, Minnesota, USA. 39-58
- Kawano, S., Abe, H., and Iwamoto, M. 1995. Development of a calibration equation with temperature compensation for determination the Brix value in intact peaches. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 3: 211-218.
- Kawano, S. 2002. Sampling and Sample Presentation. In: H.W. Siesler, Y. Ozaki, S. Kawata, and H.M. Heise, (eds.), *Near-Infrared Spectroscopy*. WILEY-VCH Verlag GmbH, Federal Republic, Germany. 115-124.
- Liu, Y., Chen, X. and Ouyang, A. 2008. Nondestructive determination of pear internal quality indices by visible and near-infrared spectrometry. *LWT- Food Science and Technology*. 41(9): 1720 -1725.
- Miyamoto, K., Kawauchi, M. and Fukuda, T. 1998. Classification of high acid fruits by partial least squares using the near infrared transmittance spectra of intact satsuma mandarins. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 6: 267-271
- Mc Glone, V.A. and Kawano, S. 1998. Firmness, dry-matter and soluble-solids assessment of postharvest kiwifruit by NIR-spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*. 13: 131-141.
- Osborne, B.G., Fearn, T. and Hindle, P.H. 1993. *Practical NIR spectroscopy with Application in Food and Beverage Analysis*. Longman Scientific & Technical. 1-7.
- Peirs, A., Lammertyn, J., Ooms K. and Nicolal., B.M. 2000. Prediction of the optimal picking date of different apple cultivars by means of VIS:NIR-spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*. 21: 189-199.
- Salvador, A., Sanz, T., Fiszman, S.M. 2007. Changes in colour and texture and their relationship with eating quality during storage of two difference desert bananas. *Postharvest Biology and Technology*. 43: 319-325.
- Saranwong, S. 2003. Nondestructive determination of harvesting maturity of mango for fresh consuming by near infrared spectroscopy. Ph. D. thesis. Chiang Mai University, Chiang Mai. 179 pp.

- Siesler, H.W., Ozaki, Y. Kawata, S. 2002. Near-Infrared Spectroscopy. WILEYVCH Verlag GmbH, Federal Republic, Germany. 348 pp.
- Shao, Y., He, Y., Gomez, A.H., Pereir, A.G. and Qiu. Z. 2007. Visible/near infrared spectrometric technique for nondestructive assessment of tomato Heatwave (*Lycopersicon esculentum*) quality characteristics. *Journal of Food Engineering*. 81: 672-678.
- Teerachaichayut, S., Kil, K.Y., Terdwongworakul, A. Thanapase, W. and Nakanishi, 2007. Non-destructive prediction of translucent flesh disorder in intact mangosteen by short wavelength near infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*. 43: 202-206.
- Wang, J., Nakano, K. and Ohashi, S. 2010. Nondestructive evaluation of jujube quality by visible and near-infrared spectroscopy. *Journal of Food Science and Technology*: 1-7
- Williams, P. C. 2001. Implementation of Near – Infrared Technology. Pp. 145-170. In: P.C. Williams, and K. H. Norris, (eds.), *Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. 2nd ed. American Association of Cereal Chemists, Inc. Sy. Paul, Minnesota, USA.
- Williams, P. C. 2007. Application of Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) in the Agricultural and Food Industries. July 4th, 2007. Kasetsart University, Bangkok, Thailand. 26 pp.
- Yande, Liu., Xudong, S. and Aiguo, O. 2010. Nondestructive measurement of soluble solid content of navel orange fruit by visible–NIR spectrometric technique with PLSR and PCA-BPNN. *Journal of Food Science and Technology*. 43(4): 602-607.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

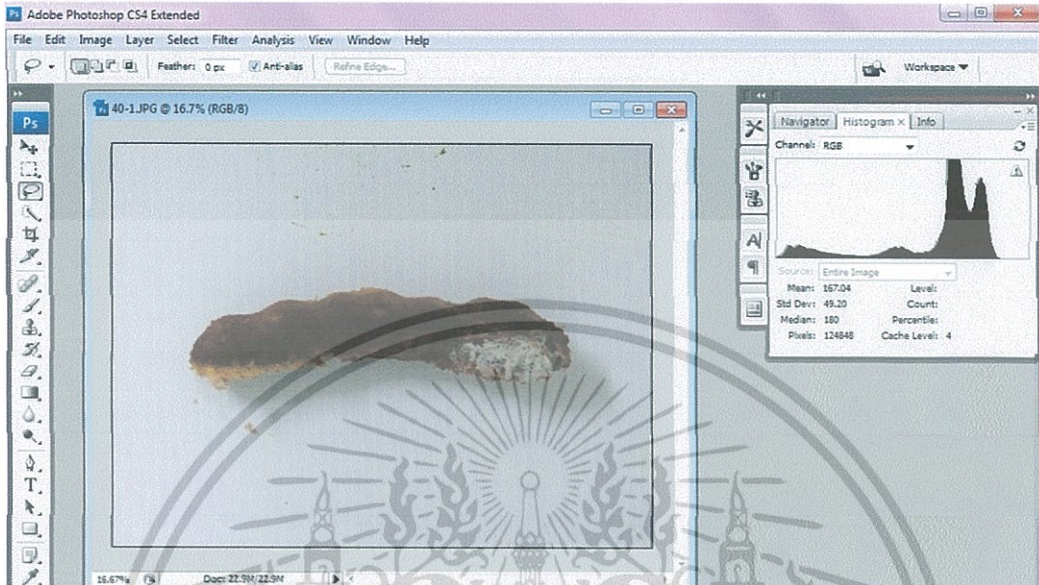


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำเปอร์เซ็นต์ความรุนแรงของอาการผิปกติภายในของมะขามหวานด้วยโปรแกรม

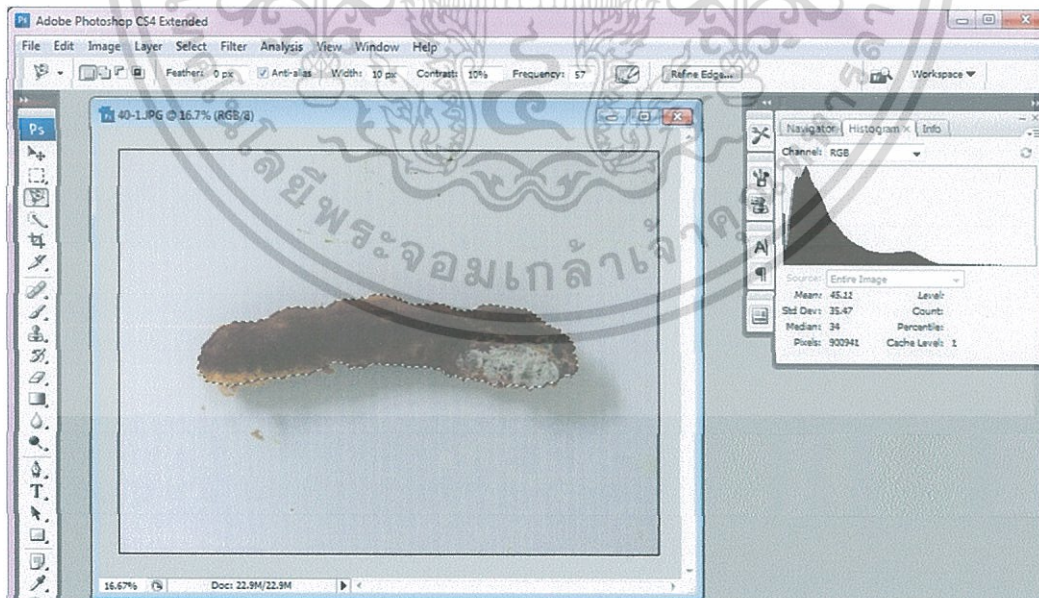
Photoshop

1. เปิดโปรแกรม Photoshop แล้วเลือกภาพมะขามหวานที่มีอาการผิปกติภายใน



ภาพที่ ก.1 แสดงภาพมะขามหวานที่มีอาการผิปกติภายในด้านที่ 1

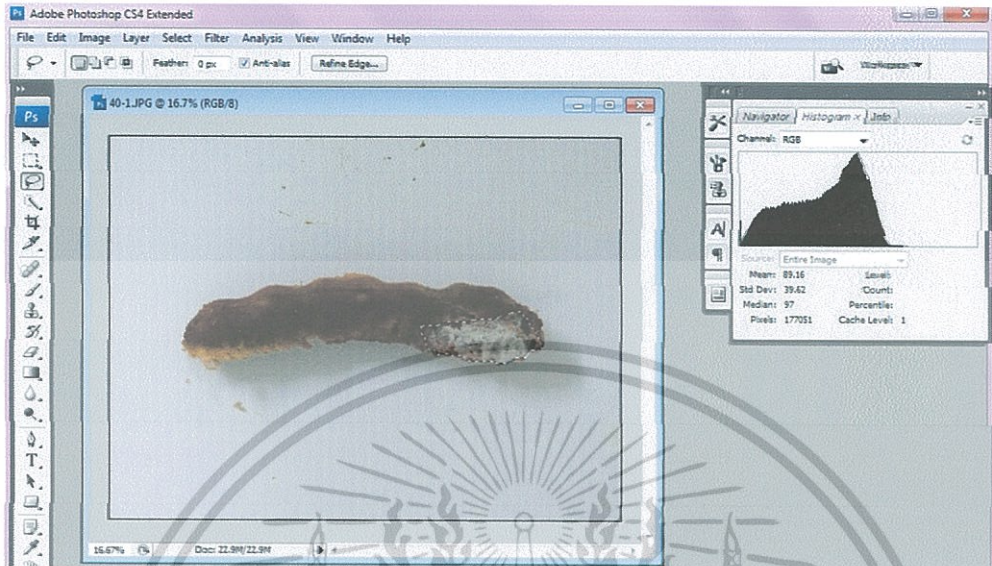
2. คลุมพื้นที่มะขามหวานทั้งหมด แล้วอ่านค่า pixel จาก histogram โดยก่อนอ่านค่านั้นต้องกำหนดค่า cache level ให้เป็น 1 ก่อน โดยในภาพนี้ได้ค่า pixel ได้เท่ากับ 900941



ภาพที่ ก.2 แสดงการทำ pixel ของพื้นที่มะขามหวานด้านที่ 1 ทั้งหมด โดยใช้โปรแกรม Photoshop

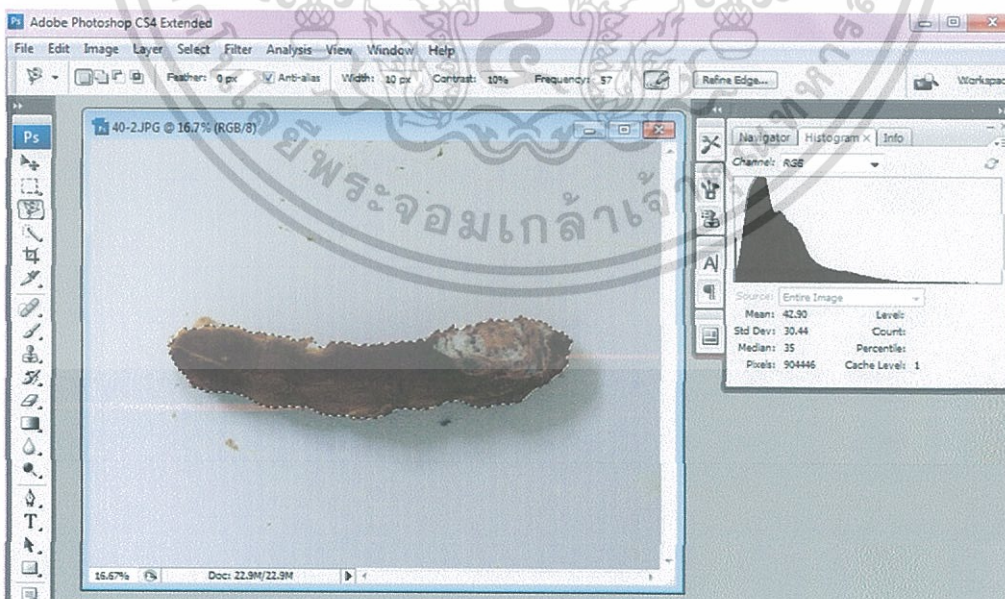
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คลุมพื้นที่ที่มะขามหวานในส่วนที่มีอาการผิดปกติภายใน อ่านค่า pixel จาก histogram โดยในภาพนี้ได้ค่า pixel ได้เท่ากับ 177051



ภาพที่ ก.3 แสดงการหา pixel ของพื้นที่มะขามหวานในส่วนที่มีอาการผิดปกติภายในด้านที่ 1

4. เปิดภาพมะขามหวานที่เป็นด้านตรงข้าม หลังจากนั้น คลุมพื้นที่มะขามหวานทั้งหมด แล้วอ่านค่า pixel จาก histogram โดยก่อนอ่านค่านั้นต้องกำหนดค่า cache level ให้เป็น 1 ก่อน โดยในภาพนี้ได้ค่า pixel ได้เท่ากับ 904446

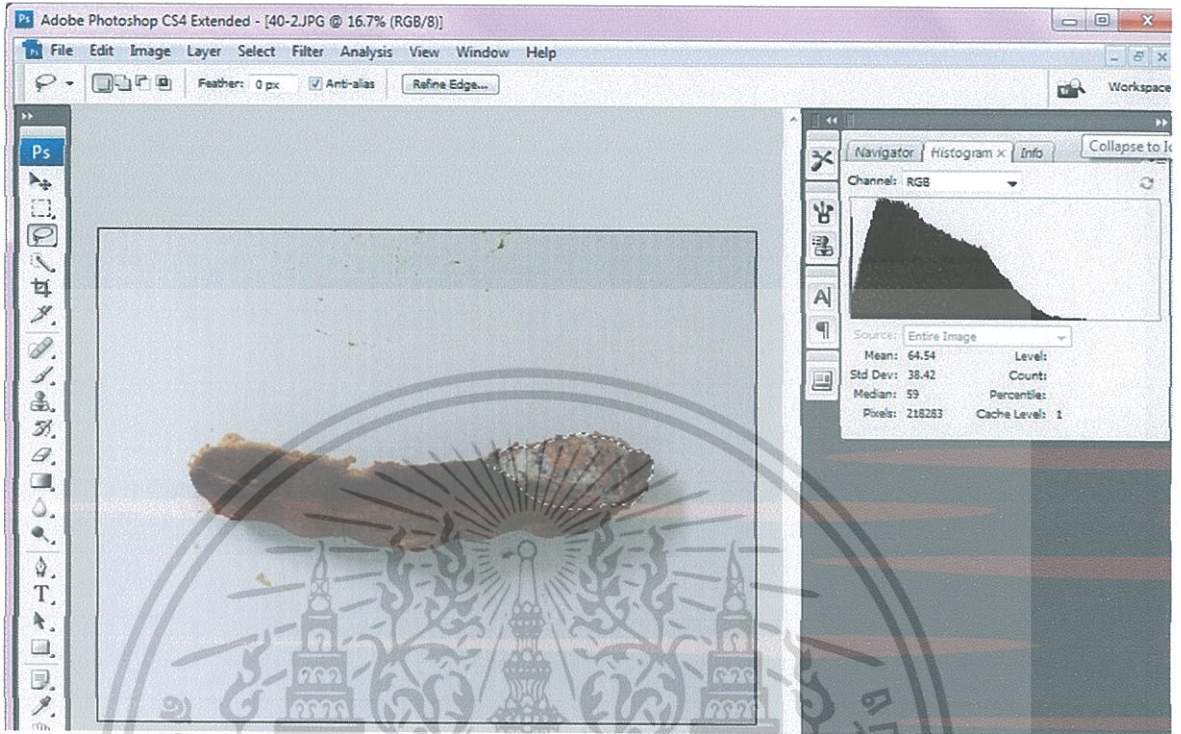


ภาพที่ ก.4 แสดงการหา pixel ของพื้นที่มะขามหวานด้านที่ 2 ทั้งหมด โดยใช้โปรแกรม

Photoshop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กลุ่มพื้นที่มะขามหวานในส่วนที่มีอาการผิดปกติภายใน อ่านค่า pixel จาก histogram โดยในภาพนี้ได้ค่า pixel ได้เท่ากับ 21823



ภาพที่ ก.5 แสดงการทำ pixel ของพื้นที่มะขามหวานในส่วนที่มีอาการผิดปกติภายในด้านที่ 2

กาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความรุนแรงของอาการผิดปกติภายในของมะขามหวาน

จะคำนวณได้จาก pixel ของพื้นที่ที่มะขามหวานที่มีอาการผิดปกติภายในต่อ pixel ของพื้นที่มะขามหวานทั้งหมด

วิธีคำนวณ

พื้นที่มะขามหวานมีอาการผิดปกติภายในจาก $177051 + 21863 = 198914$

พื้นที่ปกติทั้งหมด $900941 + 904446 = 1805387$

% ความรุนแรงของความผิดปกติของสี = $198914 / 1805387 * 100 = 11.01 \%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

1.1 แกะเปลือกมะขาม เอามะลิดออก

1.2 น้ำเนื้อมะขามมาชั่งน้ำหนัก 4 กรัม ปั่นผสมน้ำบริสุทธิ์ 100 มิลลิลิตร

1.3 กรองสารละลาย

1.4 นำน้ำที่ได้มาวัดค่าปริมาตร โดยใช้เครื่อง digital refractometer

1.5 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ย

1.6 นำค่าที่อ่านได้จากเครื่อง digital refractometer มาคูณ 25

2. การวัดปริมาณกรดที่ไตเตรทได้

2.1 แกะเปลือกมะขาม เอามะลิดออก

2.2 น้ำเนื้อมะขามมาชั่งน้ำหนัก 4 กรัม ปั่นผสมน้ำบริสุทธิ์ 100 มิลลิลิตร

2.3 กรองสารละลาย

2.4 นำสารละลายมาวัดปริมาณกรด ด้วยเครื่อง auto titrator โดยใช้ pH = 8.2 เป็นจุดยุติ

2.5 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.6 คำนวณหาปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ในรูปของกรดทาร์ทาริก

$$\% \text{ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้} = \frac{\text{ปริมาตร NaOH (ml.)} \times \text{ความเข้มข้น NaOH (N)} \times 0.075 \times 100}{1,000 \times \text{ปริมาตรของสารละลายตัวอย่าง}}$$

(เทียบในรูปกรดทาร์ทาริก)

*** ค่า equivalent wt. of acid of tartarlic acid = 0.075

ประวัติผู้วิจัย

| | |
|------------------|---|
| ชื่อ – สกุล | นางสาวสินีนาด สุขทนารักษ์ |
| วัน เดือน ปีเกิด | 4 ธันวาคม 2530 |
| สถานที่เกิด | จังหวัดชลบุรี |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 67/5 หมู่ 2 ต.หนองขี้ซาก อ.บ้านบึง จ.ชลบุรี 20170 |
| ประวัติการศึกษา | ปีพุทธศักราช 2553 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ ปีพุทธศักราช 2556 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโท หลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง |
| ผลงานที่นำเสนอ | Suktanarak, S. and Teerachaichayut, S. 2012. Detection for Moisture Content of Sweet Tamarind flesh by Transmittance Short Wavelength Near Infrared Spectroscopy. International Conference on Nutrition and Food Sciences. 39: 71-75. Suktanarak, S. and Teerachaichayut, S. 2013. Quantitative Analysis of Total Soluble Solids and Titratable Acidity of Sweet Tamarind by SW- NIRS. International journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics. 3: 328-331. |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้