

**เทคนิคการตรวจสอบเนื้อแก้วในมังคุดแบบไม่ทำลายโดยสเปกโทรสโกปีอินฟราเรด  
ย่านใกล้แบบสะท้อนแสง**

**Non-Destructive Technique for Detection of Translucency in Mangosteen by Near Infrared  
Spectroscopy in Reflectance Mode**

สิรินาฏ น้อยพิทักษ์<sup>1</sup> อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล<sup>1</sup> และ ศิวลักษณ์ ปรวีรัตน์<sup>1</sup>

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเทคนิคการคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วออกจากมังคุดปกติแบบไม่ทำลาย ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบสะท้อนแสง ในการวิจัยใช้ผลมังคุด จำนวน 217 ผล นำผลมังคุดทั้งหมดวัดค่าความถ่วงจำเพาะ แล้ววัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง FQA-Near Infrared (NIR) GUN ช่วงคลื่น 800-1050 nm แบบ Interactance ที่จุดกึ่งกลางด้านข้างของแต่ละผลบนแนวเส้นอีควาเตอร์ รอบผล จำนวน 4 จุด โดยได้ศึกษาวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมเพื่อลดอิทธิพลจากการกระเจิงแสง ด้วยวิธี อนุพันธ์อันดับหนึ่ง (1D), อนุพันธ์อันดับสอง (2D), multiplicative scattering correction (MSC) และ standard normal variate (SNV) เพื่อสร้างโมเดลการทำนายกลุ่มที่เหมาะสมที่สุด ด้วยการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่ม พบว่า การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มโดยใช้ตัวแปรทำนายกลุ่ม คือ ข้อมูลสเปกตรัม NIR ปรับแต่งด้วย MSC ทั้งช่วงความยาวคลื่น ด้าน 1, 3 และ 4 ให้ผลความถูกต้องในการจำแนกดีที่สุด 83.9% ส่วนด้าน 2 ให้ผลความถูกต้อง 83.4% ต่อจากนั้นได้ใช้เทคนิค Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA) วิเคราะห์เพื่อเลือกเฉพาะสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นสอดคล้องกับการแยกมังคุดเนื้อปกติและเนื้อแก้วเพื่อลดจำนวนพารามิเตอร์ในโมเดล ซึ่งข้อมูลการดูดกลืนของแสงที่ความยาวคลื่น 708 และ 880 nm ให้ผลความถูกต้องในการจำแนกดีที่สุด 83.9% ไม่ว่าจะใช้สเปกตรัมจากด้าน 1, 2, 3 หรือ 4 อย่างไรก็ตามโมเดลที่ดีที่สุดคือ โมเดลที่ใช้ตัวแปรทำนายกลุ่ม 2D ของการดูดกลืนของแสงเฉลี่ยทั้ง 4 ด้านที่ความยาวคลื่น 716, 752, 831, 910, 953, 989, 1022, 1038 และ 1058 nm ร่วมกับค่าความถ่วงจำเพาะโดยให้ผลความถูกต้องในการจำแนกดีที่สุด 84.8%

**คำสำคัญ :** มังคุด วิธีวิเคราะห์แบบตัวแปรพหุคูณ สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ เนื้อแก้ว

**Abstract**

This study was aimed to investigate a nondestructive technique to separate translucent flesh mangosteen from normal flesh mangosteen based on reflectance near infrared spectroscopy. In the study, 217 mangosteens were used. All mangosteens were measured for specific gravity and spectrum using FQA-Near Infrared (NIR) GUN in range of 800-1050 nm in interactance mode at 4 points on equatorial line. The spectra were pretreated with First Derivative (1D), Second Derivative (2D), Multiplicative Scatter Correction (MSC) or Standard Normal Variate (SNV) prior to building the best discriminant model using discriminant analysis. The results showed that when using full range of NIR spectrum scanned at the first, the third and the fourth sides as predicting parameters the MSC absorbance gave classification accuracy of 83.9%. For the second side, classification accuracy was 83.4%. Partial

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน / ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) was also performed to search and select parts of the spectra at wavelengths associated with separation between normal and translucent mangosteens. In using NIR spectra at PLS-DA suggested wavelengths, the absorbance at 708 and 880 nm gave classification accuracy of 83.9% at all sides. However, the best model was created from the 2D absorbance at 716, 752, 831, 910, 953, 989, 1022, 1038 and 1058 nm (averaged from 4 sides) and the specific gravity which offered the accuracy of discrimination of 84.8%

**Keywords :** mangosteen, multivariate data analysis, near infrared spectroscopy, translucency

## คำนำ

มังคุด (*Garcinia mangostana L.*) เป็นผลไม้เศรษฐกิจที่มีศักยภาพสูงในการส่งออก มีรสชาติดี จึงเป็นที่นิยมของผู้บริโภคทั้งชาวไทยและชาวต่างประเทศ จนได้รับสมญานามว่า เป็นราชินีของผลไม้เมืองร้อน ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและผู้ส่งออกมังคุดรายหลักของโลก โดยในปี 2550 ประเทศไทยส่งออกมังคุดผลสดและมังคุดแช่แข็งประมาณ 44,271 ตัน คิดเป็นมูลค่ารวม 744 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2551) แต่ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่สามารถส่งออกมังคุดที่มีคุณภาพ ปราศจากอาการเนื้อแก้ว ยางไหล และเปลือกแข็งได้ตามปริมาณที่ตลาดต่างประเทศต้องการ

ถึงแม้ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิธีการคัดแยกคุณภาพของผลมังคุดที่มีอาการเนื้อแก้วออกจากมังคุดเนื้อปกติหลายวิธี ได้แก่ การวัดค่าความถ่วงจำเพาะของผลซึ่งจากการศึกษาของธนัชชัย (2534) พบว่า ผลมังคุดที่จมน้ำมีความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย 1.01 เป็นผลมังคุดเนื้อแก้วร้อยละ 75.13 ส่วนผลที่ลอยน้ำมีความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย 0.95 เป็นผลมังคุดเนื้อปกติ ร้อยละ 90.68 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของรังสินันท์ (2541) พบว่า ผลมังคุดเนื้อปกติจะลอยน้ำ และผลมังคุดที่มีอาการภายในผิดปกติจะจมน้ำ ซึ่งศึกษาเปรียบเทียบค่าความถ่วงจำเพาะ 4 ค่า คือ 0.980, 1.000, 1.016 และ 1.020 โดยสามารถคัดแยกผลมังคุดเนื้อปกติและผลมังคุดที่มีอาการเนื้อแก้วและยางไหลได้ร้อยละ 83.4, 77.4, 64.6, 55.5 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของผลที่เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยจะให้ความสามารถในการคัดแยกที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ปรีชาติ (2550) ได้ศึกษาการตรวจสอบเนื้อแก้วในมังคุดโดยการวัดการถ่ายเทความร้อนในเปลือก ให้ผลความถูกต้องในการคัดแยกร้อยละ 74 แต่ยังมีปัญหาเรื่องระยะเวลาในการเก็บข้อมูลการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งจะเห็นว่าแต่ละเทคนิคก็ยังมีข้อจำกัดต่างกันไป เทคนิคที่ดีที่สุดคือ การวัดการดูดกลืนแสงความยาวคลื่นสั้นอินฟราเรดย่านใกล้แบบทะลุผ่าน จากผลการทดสอบการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม มีความถูกต้อง 92.0% (Teerachaichayut *et al.*, 2007) โดยมีความแม่นยำในการคัดแยกสูงสุดแต่เครื่องมือมีราคาสูง ในปัจจุบันงานวิจัยเริ่มเน้นการใช้เทคนิคการวัดค่าทางกายภาพหลายๆ แบบและการวิเคราะห์เชิงพหุในการประเมินคุณภาพของผลไม้ (Pathaveerat *et al.*, 2008; Fu *et al.*, 2007) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้สมบัติหลายๆ อย่างของมังคุดมาวิเคราะห์เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจสอบคุณภาพภายในผลมังคุดให้สูงขึ้น

การทำวิจัยนี้ใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีย่านใกล้ (near infrared spectroscopy, NIRS) วัดการดูดกลืนแสงของมังคุดด้วยเครื่องมือที่ราคาไม่สูงมากร่วมกับการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของผล และการวิเคราะห์แบบ Discriminant analysis เพื่อจำแนกคุณภาพภายในผลมังคุดที่มีอาการเนื้อแก้วและเนื้อปกติโดยไม่ทำลาย

## อุปกรณ์และวิธีการ

### 1. การเตรียมตัวอย่างมังคุด

เตรียมตัวอย่างผลมังคุดจำนวน 217 ผล ซึ่งมีขนาดและผิวสำหรับการส่งออก โดยนำผลมังคุดที่ซื้อจากตลาดสดองค์การตลาดเพื่อการเกษตรมาเก็บรักษาไว้ในห้องทดลอง โดยควบคุมอุณหภูมิห้องที่ระดับ 25 องศาเซลเซียส

ความชื้นสัมพัทธ์  $72 \pm 1\%$  เป็นเวลานาน 1 วันในห้องที่บดแสง ก่อนทำการวัดด้วยเครื่อง NIR spectrophotometer (FQA-NIR GUN; FANTEC Research Institute, Kosai, Japan) ดังที่แสดงใน (Figure 1a)

## 2. การวัดสเปกตรัมของผลมังคุด

นำผลมังคุดมาวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIR spectrophotometer ที่ค่า Integration time 150 ms โดยวิธีการดูดกลืนแสงแบบ Interactance ช่วงความยาวคลื่น 800-1050 nm ที่จุดกึ่งกลางด้านของแต่ละผลบนแนวเส้นเอควาเตอร์ (Equatorial line) 4 จุด ในแนวตั้งจาก จุดละ 3 ครั้ง รอบผล โดยตำแหน่งแรกเป็นตำแหน่งที่ตรงกับก้านเนื้อที่ใหญ่ที่สุดในผลโดยอ้างอิงจากทรงของผลและก้านยอดเกสรตัวเมีย (stigma) ด้านใต้ผล (Figure 1b) ซึ่งก่อนทำการวัดมังคุดแต่ละผล จะต้องทำการวัดค่าอ้างอิงจากวัสดุอ้างอิง (Reference) คือ แท่งเทฟลอน (Teflon) สีขาว แล้วจึงจะนำเครื่อง NIR ไปวัดสเปกตรัมกับผลมังคุดแต่ละผล และนำค่าเฉลี่ยไปวิเคราะห์ผล

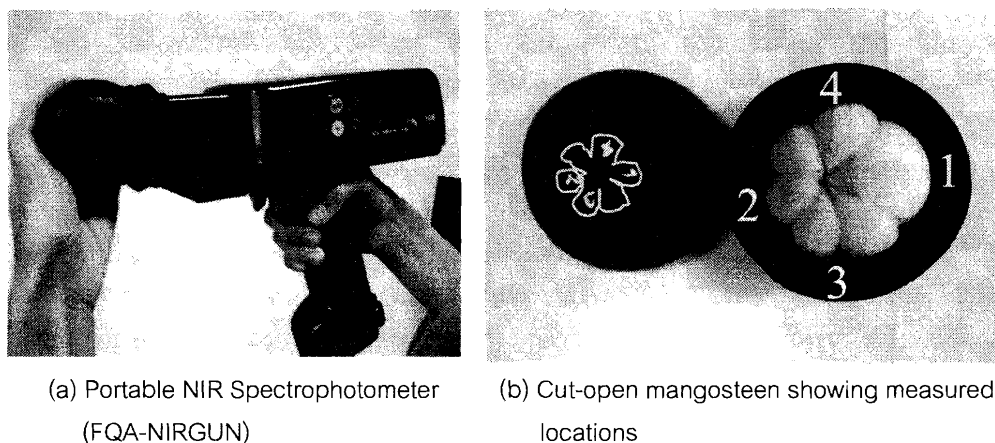


Figure 1 Measurement mangosteen using FQA-NIRGUN

## 3. การวัดลักษณะทางกายภาพและประเมินอาการภายในผลมังคุด

นำผลมังคุดมาซึ่งน้ำหนักผลทั้งในน้ำและในอากาศเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของผลมังคุด แล้วนำมาผ่าเปลือกออกตามแนวขวางกลางผลเพื่อถ่ายภาพบันทึกคุณภาพและอาการที่เกิดขึ้นในแต่ละผลด้วยกล้องถ่ายภาพแบบดิจิทัล Canon IXY digital 10 เพื่อจัดตัวอย่างเป็นมังคุดปกติหรือมังคุดเนื้อแก้ว โดยมังคุดเนื้อแก้วจะมีลักษณะของเนื้อกลีบเป็นสีขาวใส มักเป็นในกลีบที่มีขนาดใหญ่ที่สุดของผล

## 4. การวิเคราะห์ข้อมูล

นำตัวแปรทำนายนากลุ่มซึ่งได้แก่ ข้อมูลค่าความถ่วงจำเพาะของผลมังคุด ลักษณะอาการที่เกิดขึ้นภายในผล และข้อมูลสเปกตรัม NIR ที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี 1D, 2D, MSC และ SNV เพื่อลดผลกระทบจากการกระเจิงแสงโดยโปรแกรม Unscrambler version 9.7 และถ่ายโอนข้อมูลสเปกตรัมที่ปรับแต่งแล้วมาวิเคราะห์สร้างโมเดลในการคัดแยกมังคุดที่มีอาการเนื้อแก้วกับมังคุดปกติ ด้วยวิธีวิเคราะห์แบบ Discriminant analysis โดยใช้โปรแกรม SPSS version 11.5 โดยทดสอบโมเดลด้วยวิธี leave-one-out cross validation (LOV) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ข้อมูลทั้งหมดยกเว้นข้อมูล 1 ข้อมูลไปใช้สร้างโมเดลและใช้ข้อมูล 1 ข้อมูลดังกล่าวที่ไม่นำไปสร้างโมเดลมาทดสอบความแม่นยำของโมเดล และทำซ้ำโดยเปลี่ยนข้อมูล 1 ข้อมูลที่ไม่นำไปใช้สร้างโมเดลจนกระทั่งข้อมูลทั้งหมดถูกนำไปใช้ทดสอบโมเดล

## ผลการทดลอง

### 1. ความถ่วงจำเพาะของผลมังคุด

จากการทดลองวัดค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, SG) ของผลมังคุด พบว่า มังคุดปกติมีค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย 0.96 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.03 มังคุดเนื้อแก้วมีค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย 0.99 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.03 เมื่อนำค่าความถ่วงจำเพาะมาทดสอบทางสถิติ พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของมังคุดเนื้อปกติกับมังคุดเนื้อแก้วมีความแตกต่างกันทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมังคุดเนื้อแก้วจะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่ามังคุดปกติ ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pankasemsuk *et al.* (1996) โดยสาเหตุที่มังคุดเนื้อแก้วมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า น่าจะเกิดจากภาวะที่มังคุดดูดซึมน้ำไปไว้ในผลมากกว่าปกติเมื่อเกิดภาวะขาดน้ำที่ตามมาด้วยการให้น้ำ (วรภัทร, 2539) โดยเฉพาะเมื่อฝนตกในช่วงการเก็บเกี่ยวผลมังคุดจะยิ่งเกิดอาการเนื้อแก้วมากยิ่งขึ้น (ศรีสังวาลย์, 2537) ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้น้ำหนักผลมากขึ้นมากกว่าปริมาณผล

### 2. สเปกตรัมของผลมังคุด

ผลจากการวัดสเปกตรัมของผลมังคุดตัวอย่างด้วยเครื่อง FQA-NIRGUN พบว่ามังคุดที่มีอาการเนื้อแก้วมีค่าการสะท้อนแสงสูงกว่ามังคุดเนื้อปกติ (Figure 2a) และเมื่อสร้างกราฟสเปกตรัมมังคุดที่มีอาการเนื้อแก้วมีค่าการดูดกลืนแสงต่ำกว่ามังคุดเนื้อปกติ (Figure 2b) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Teerachaichayut *et al.* (2007) ถึงแม้ว่ารูปแบบการวัดการดูดกลืนแสงจะแตกต่างกันก็ตาม โดย Teerachaichayut และคณะ (2007) ใช้รูปแบบการวัดแบบส่องผ่าน ซึ่งจะเป็นการวัดการดูดกลืนแสงของมังคุดทั้งผลส่วนในกรณีนี้เป็นการวัดการดูดกลืนแสงของเปลือกมังคุดเนื่องจากแสงไม่สามารถส่องผ่านเข้าไปถึงเนื้อได้และวัดเฉพาะแสงที่สะท้อนกลับออกมาเท่านั้น การวัดในงานวิจัยนี้จึงเป็นการวัดทางอ้อมซึ่งมีพื้นฐานมาจากความแตกต่างของเปลือกที่สัมพันธ์กับความแตกต่างระหว่างมังคุดปกติและมังคุดเนื้อแก้วดังนั้นจึงน่าจะเป็นไปได้ที่จะใช้ NIR-GUN ในการคัดมังคุดเนื้อปกติออกจากมังคุดเนื้อแก้ว

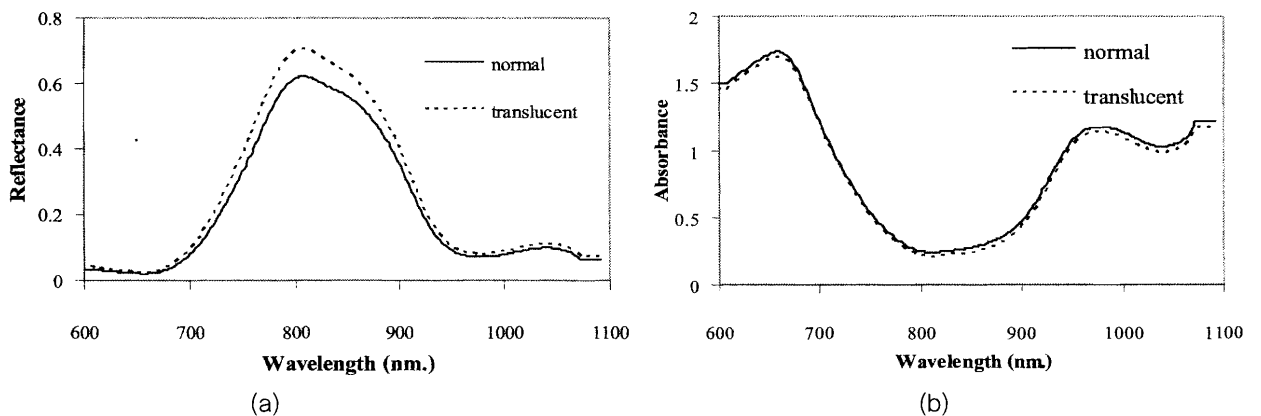


Figure 2 Averaged spectrum of normal mangosteens and translucent flesh mangosteens

(a) reflectance (b) absorbance

### 3. การวิเคราะห์ผล

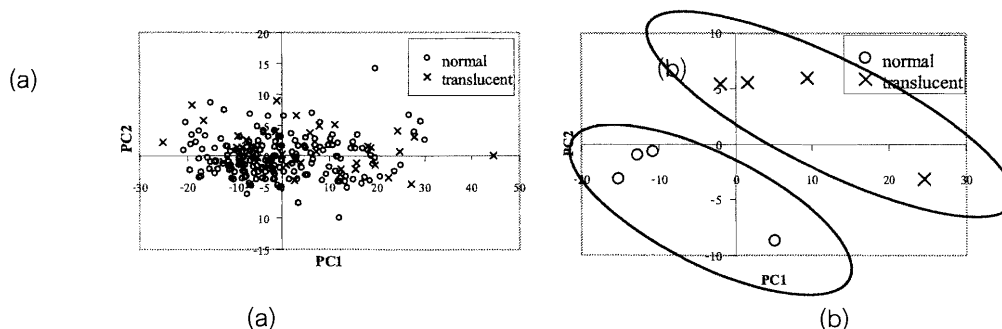
ในการสร้างโมเดลด้วยการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มด้วยวิธี Discriminant Analysis ได้นำข้อมูลสเปกตรัม NIR ของเปลือกมังคุดด้านที่ 1, 2, 3, 4, และค่าเฉลี่ยของทุกด้าน จำนวน 217 ผล เป็นตัวแปรจำแนกกลุ่ม ได้ผลดังนี้

1. กรณีวิเคราะห์โดยใช้ตัวแปรจำแนกกลุ่มคือ ข้อมูลการดูดกลืนแสงของเปลือกมังคุดทั้งช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 800-1050 nm. จากผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มดังแสดงใน Table 1 ความแม่นยำในการจำแนกกลุ่มอยู่ในช่วงระหว่าง 81.3-83.9% เมื่อพิจารณาการใช้ข้อมูลสเปกตรัมจากด้านที่วัดแต่ละด้านในการสร้างโมเดลแต่ละโมเดล พบว่าวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดคือ วิธี MSC ซึ่งให้ค่าการจำแนกสูงสุดคือ 83.9% โดยการใช้ข้อมูลจากสเปกตรัมด้านที่ 2 ให้ผลการจำแนกต่ำสุดคือ 83.4% และในกรณีการใช้ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมจากด้านทั้งหมดจะได้ผลการจำแนกเท่ากับ 83.7% ซึ่งสูงกว่าการใช้การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีอื่น

**Table 1** Classification of normal flesh and translucent flesh mangosteen using discriminant analysis with leave- one-out cross validation using full NIR spectra (800-1050 nm) at each side on the fruit as predictive variables.

| Pretreatment   | % Classification based on spectra scanned on side of mangosteens |        |        |        |                    |
|----------------|--|--------|--------|--------|--------------------|
|                | side 1   | side 2 | side 3 | side 4 | average of 4 sides |
| Absorbance     | 83.90%   | 83.40% | 83.90% | 83.90% | 81.30%             |
| 1D absorbance  | 83.90%   | 83.90% | 83.90% | 82.90% | 83.40%             |
| 2D absorbance  | 83.40%   | 82.50% | 83.90% | 83.90% | 83.40%             |
| MSC absorbance | 83.90%   | 83.40% | 83.90% | 83.90% | 83.70%             |
| SNV absorbance | 83.40%   | 83.90% | 83.90% | 83.40% | 82.90%             |

ในการสร้างโมเดลโดยใช้สเปกตรัม NIR ตลอดช่วงการวัดนั้นโมเดลจะมีตัวแปรจำแนกกลุ่ม (ตัวแปรอิสระ) จำนวนมาก อย่างไรก็ตามการลดจำนวนตัวแปรอิสระสำหรับแยกกลุ่มลงจะทำให้การพัฒนาเครื่องมือในอนาคตมีราคาถูกลงดังนั้นจึงใช้เทคนิค Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA) เพื่อเลือกตัวแปรอิสระที่เหมาะสม โดย PLS-DA เป็นเทคนิคการสร้างโมเดลทำนายตัวแปรกลุ่มที่สร้างตัวแปรแฝดเตอร์ (หรือ Principal Components; PC) จากข้อมูลความสัมพันธ์ร่วมระหว่างตัวแปรอิสระเริ่มต้นและตัวแปรถูกทำนาย ซึ่งผลการวิเคราะห์ส่วนหนึ่งจากเทคนิคจะให้ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ของตัวแปรอิสระที่สามารถนำมาพิจารณาเลือกความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับการแบ่งกลุ่มมังคุดที่มีอาการเนื้อแก้วและมังคุดปกติ โดยเลือกจากความยาวคลื่นที่มีค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสูง เพื่อคงไว้ในโมเดล



**Figure 3** Score plot between PC1 and PC2 based on 2D reflectance of mangosteen (a) showing all samples and (b) each point represents average of all samples for spectra of each side (normal mangosteen = o and translucent flesh = x)

ในการวิเคราะห์ PLS-DA เมื่อใช้ข้อมูลสเปกตรัมที่ปรับแต่งด้วยวิธีต่างๆ ของการวัดแต่ละด้านของตัวอย่างทั้งหมด จะได้ score plot (ซึ่งเป็นกราฟระหว่างตัวแปร PC 1 และ PC 2 ที่แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างการกระจายตัวของตัวอย่างโดยแต่ละจุดคือ ตัวอย่าง) ดังแสดงใน Figure 3a ซึ่งพบว่า ข้อมูลสเปกตรัมไม่สามารถทำให้เกิดการแยกกลุ่มระหว่างตัวอย่างมังคุดปกติและมังคุดเนื้อแก้วได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยของทุกผลที่ด้านต่างๆ ทั้ง 4 ด้าน (Figure 3b แต่ละจุดคือ ค่าเฉลี่ยของทุกตัวอย่างที่ค่าสเปกตรัมด้านเดียวกัน) โมเดล PLS-DA สามารถแยกกลุ่มตัวอย่างเป็นกลุ่มมังคุดเนื้อแก้วและมังคุดปกติได้อย่างชัดเจน โดยสเปกตรัมที่ใช้ได้รับการปรับแต่งด้วยวิธี 2D

ดังนั้นจึงใช้ผลที่ได้จากโมเดลที่สองเพื่อเลือกสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่มีค่าสัมบูรณ์ของสัมประสิทธิ์การถดถอยมากกว่า 0.5 แล้วนำมาใช้เป็นตัวแปรอิสระ (ตัวแปรจำแนกกลุ่ม) ในการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ที่แสดงใน Table 2 พบว่า ผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มอยู่ในช่วงระหว่าง 82.0-83.9% โดยข้อมูลสเปกตรัมเดิม ที่ช่วงความยาวคลื่น 708 และ 880 nm. ให้ค่าการจำแนกที่ดีที่สุด 83.9% ในทุกด้าน ดังแสดงใน Table 2

**Table 2** Classification of normal and translucent flesh mangosteen using discriminant analysis and leave-one-out cross validation based on PLS-DA-selected wavelength NIR spectra

| Pretreatment   | NIR range (nm.)                                | % Classification based on spectra scanned on side of mangosteens |        |        |        |                    |
|----------------|--|--|--------|--------|--------|--------------------|
|                |  | side 1   | side 2 | side 3 | side 4 | average of 4 sides |
| Absorbance     | 708, 880                                       | 83.90%   | 83.90% | 83.90% | 83.90% | 83.90%             |
| 1D absorbance  | 937, 969, 1034                                 | 83.90%   | 83.90% | 83.90% | 83.90% | 83.90%             |
| 2D absorbance  | 716, 752, 831, 910, 953, 989, 1022, 1038, 1058 | 82.00%   | 83.40% | 83.90% | 82.90% | 82.90%             |
| MSC absorbance | 773, 915                                       | 83.90%   | 83.40% | 83.90% | 83.40% | 83.90%             |
| SNV absorbance | 775, 917                                       | 83.90%   | 83.40% | 83.90% | 83.40% | 83.90%             |

2. กรณีวิเคราะห์โดยใช้ตัวแปรจำแนกกลุ่มคือ สเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่เลือกมาจากการทำ PLS-DA (ทั้งข้อมูลสเปกตรัมเดิมและ สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งทั้ง 4 วิธี) และค่าความถ่วงจำเพาะ (SG) พบว่า ผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มอยู่ในช่วงระหว่าง 82.0 – 84.8% โดยวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมด้วย วิธี 2D จากค่าสเปกตรัมทั้งผลเฉลี่ย ให้ค่าการจำแนกที่ดีที่สุด 84.8% ดัง Table 3

**Table 3** Classification of normal flesh and translucent flesh mangosteen using discriminant analysis and leave-one-out cross validation by the most informative wavelength and specific gravity

| Classifying variables   | % Classification based on spectra scanned on side of mangosteens |        |        |        |                    |
|---|--|--------|--------|--------|--------------------|
|   | side 1   | side 2 | side 3 | side 4 | average of 4 sides |
| SG, A(708), A(880)  | 82.50%   | 83.40% | 82.90% | 83.40% | 82.50%             |
| SG, 1DA(937), 1DA(969), 1DA(1034)   | 82.00%   | 82.50% | 82.50% | 82.90% | 82.90%             |
| SG, 2DA(716), 2DA(752), 2DA(831), 2DA(910), 2DA(953), 2DA(989), 2DA(1022), 2DA(1038), 2DA(1058) | 83.90%   | 82.50% | 82.00% | 82.50% | 84.80%             |
| SG, MSCA(773), MSCA(915)  | 82.50%   | 83.40% | 82.90% | 82.50% | 82.90%             |
| SG, SNVA(775), SNVA(917)  | 82.90%   | 82.90% | 82.90% | 82.90% | 82.90%             |

SG = specific gravity, A = absorbance, 1DA = first derivative of absorbance, 2DA = second derivative of absorbance, MSCA = multiplicative scattering correction of absorbance, SNVA = standard normal variate of absorbance

เมื่อใช้ข้อมูลสเปกตรัมค่าเฉลี่ยของทั้ง 4 ด้านที่ปรับแต่งด้วยวิธี 2D ให้ค่าความถูกต้องในการจำแนกโดยรวมที่ดีที่สุดเท่ากับร้อยละ 84.8 จากการทำนายมังคุดทั้งหมด 217 ผล แบ่งเป็นมังคุดเนื้อปกติ 182 ผล และมังคุดเนื้อแก้ว 35 ผล สำหรับมังคุดเนื้อปกติ 182 ผล พบว่าจำแนกได้ถูกต้อง 179 ผล และผิดพลาดเป็นมังคุดเนื้อแก้ว 3 ผล (คิดเป็นร้อยละ 98.4 และ 1.6) สำหรับมังคุดเนื้อแก้ว 30 ผล พบว่าจำแนกได้ถูกต้อง 5 ผล และผิดพลาดเป็นมังคุดปกติ 25 ผล (คิดเป็นร้อยละ 14.3 และ 85.7) จาก Table 3 พบว่าการวิเคราะห์โดยใช้ตัวแปรทำนายกลุ่มคือ ความยาวคลื่นที่เลือกมาจากการทำ PLS-DA ที่ความยาวคลื่น 716, 752, 831, 910, 953, 989, 1022, 1038, 1058 นาโนเมตร และค่าความถ่วงจำเพาะ โดยเป็นค่าเฉลี่ยจากเปลือก 4 ด้าน ให้ค่าการจำแนกที่ดีที่สุดร้อยละ 84.8

เมื่อเปรียบเทียบการใช้ข้อมูลสเปกตรัมแต่ละด้านที่วัดที่ปรับแต่งด้วยวิธี 2D ร่วมกับ SG เป็นตัวแปรทำนายกลุ่ม จะสังเกตพบว่า การใช้ข้อมูลสเปกตรัมของด้านที่ 1 ซึ่งตรงกับกลีบเนื้อที่ใหญ่ที่สุดร่วมกับ SG ให้ความถูกต้องดีที่สุด ซึ่งอาจสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของเปลือกมังคุด เนื่องจากบริเวณด้านในเปลือกที่ติดกับเนื้อที่ใหญ่ที่สุดมีความแตกต่างจากบริเวณเปลือกด้านอื่น

โมเดลที่ดีที่สุดจาก Table 3 แสดงเป็นสมการตามค่าสัมประสิทธิ์ canonical discriminant function ของตัวแปรจำแนกกลุ่มแสดงดังสมการที่ (1)

$$D = 13.215 - 25.368SG + 8646.4R(1058)AV + 6634.9R(1038)AV - 792.1R(1022)AV + 20459.9R(989)AV + 872.1R(953)AV - 328.3R(910)AV + 4642.1R(831)AV - 2054.9R(752)AV + 884.4R(716)AV \quad \text{----- (1)}$$

โดยที่ D คือ Discriminant score

SG คือ ค่าความถ่วงจำเพาะ

R(i)AV คือ ข้อมูล 2D absorbance ของเปลือกมังคุดทั้ง 4 ด้านเฉลี่ยกัน ที่ความยาวคลื่น i nm

เมื่อพิจารณาจาก ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation) ระหว่างพารามิเตอร์อิสระแต่ละตัวกับพารามิเตอร์ canonical (Table 4) ในการจำแนกกลุ่มพบว่า ตัวแปรความถ่วงจำเพาะ (SG) มีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ canonical มากที่สุด รองมาคือ ค่า 2D absorbance ที่ความยาวคลื่น 1038, 989, 1058, 1022, 953, 910, 716, 752 และ 831 nm. มีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ canonical น้อยลงตามลำดับ

**Table 4** Correlation between classifying variables and canonical function

| Variable   | Canonical function |
|------------|--------------------|
| SG         | -0.680             |
| R(1038)AV* | 0.291              |
| R(989)AV   | 0.271              |
| R(1058)AV  | 0.228              |
| R(1022)AV  | -0.167             |
| R(953)AV   | 0.129              |
| R(910)AV   | -0.123             |
| R(716)AV   | 0.116              |
| R(752)AV   | -0.077             |
| R(831)AV   | -0.073             |

\*R(i)AV = 2D absorbance of the average spectra scanned from four sides on each mangosteen fruit at different wavelength (i nm)

เมื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มด้วยวิธี Discriminant analysis and leave-one-out cross validation พบว่าหากใช้ตัวแปรทำนายกลุ่มคือ ข้อมูลการดูดกลืนแสงของเปลือกมังคุดทั้งช่วงความยาวคลื่น ให้ความถูกต้องในการจำแนกอยู่ในช่วง 81.3%-83.9% แต่จากการใช้เทคนิค PLS-DA คัดแยกเฉพาะความยาวคลื่นที่สำคัญมาใช้ในการวิเคราะห์ พบว่า ให้ความถูกต้องในการจำแนกอยู่ในช่วง 82.0%-83.9% อย่างไรก็ตามหากใช้ตัวแปรทำนายกลุ่มคือ ข้อมูลการดูดกลืนแสงของเปลือกมังคุดจากการใช้เทคนิค PLS-DA คัดแยกเฉพาะความยาวคลื่นที่สำคัญร่วมกับค่าความถ่วงจำเพาะ พบว่า ให้ความถูกต้องในการจำแนกอยู่ในช่วง 82.0%-84.8% โดยเฉพาะในส่วนของ การคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วอย่างเดียวมีความถูกต้องเพิ่มขึ้นจากที่ไม่สามารถคัดแยกได้ เป็น 14.3% ซึ่งต้องใช้ข้อมูลเฉลี่ยของเปลือกทั้ง 4 ด้าน

### สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มด้วยวิธี Discriminant analysis จากข้อมูลการดูดกลืนแสงของเปลือกมังคุด ทั้งช่วงความยาวคลื่นที่ปรับแต่งด้วยวิธี MSC สามารถคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วจากมังคุดปกติได้ดี 83.9% ส่วนการ จำแนกกลุ่มโดยความยาวคลื่นที่เลือกมาจากการทำ PLS-DA จากข้อมูลสเปกตรัมเต็ม สามารถให้ผลการจำแนกที่ดี 83.9% ในทุกด้าน และเมื่อใช้จำแนกกลุ่มด้วยความยาวคลื่นที่เลือกมาจากการทำ PLS-DA จากการปรับแต่งด้วยวิธี 2D ร่วมกับค่าความถ่วงจำเพาะ พบว่าให้ผลการจำแนกที่ดีที่สุด 84.8% ดังนั้นการใช้เทคนิค NIRS ร่วมกับการวัดค่า ความถ่วงจำเพาะของผลจะให้ค่าการจำแนกมังคุดเนื้อแก้วจากมังคุดปกติได้ดีขึ้น ถึงแม้ว่าความแม่นยำจะต่ำกว่าการใช้เทคนิค NIRS แบบสองผ่าน แต่วิธีที่ศึกษาใช้เครื่องมือที่ราคาต่ำกว่ามาก อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการ ดูดกลืนแสงของเปลือกมังคุดมีความสัมพันธ์กับอาการเนื้อแก้วในมังคุดซึ่งควรมีการศึกษาเพื่อนำพารามิเตอร์ที่สามารถวัดแบบไม่ทำลายอื่น ๆ มาวิเคราะห์ร่วมเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความแม่นยำของโมเดลต่อไปในอนาคต

### คำขอบคุณ

ขอขอบคุณหน่วยปฏิบัติการวิจัยเชี่ยวชาญเฉพาะทางวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวแปรสภาพและบรรจุภัณฑ์ ไม้ผล สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โครงการพัฒนานักศึกษาด้านเทคโนโลยีหลัง การเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาสับสนุนงบประมาณวิจัย และ มูลนิธิโครงการหลวงที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่อง NIR Spectrophotometer แบบพกพา

### เอกสารอ้างอิง

- ธนะชัย พันธุ์เกษมสุข. 2534. การศึกษาวิธีการคัดคุณภาพของผลมังคุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ปาริชาติ ราชมณี. 2550. การศึกษาการตรวจสอบเนื้อแก้วในมังคุดโดยการวัดการถ่ายเทความร้อนในเปลือก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รังสินันท์ พอดิ. 2541. วิธีการคัดแยกมังคุดเนื้อแก้วแบบไม่ทำลายผล โดยใช้ความถ่วงจำเพาะ และเอ็กซ์เรย์ คอมพิวเตอร์ โทโมกราฟี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วรภัทร ลัดคนทิวงค์. 2539. การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ความมีชีวิตของเซลล์และปัจจัยของน้ำที่มีผลต่อการเกิดเนื้อแก้วในผลมังคุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศรีสังวาลย์ ลายวิเศษกุล. 2537. ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอาการเนื้อแก้วในมังคุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2551. มังคุดสดแช่เย็นแช่แข็ง: ปริมาณและมูลค่าการส่งออกรายเดือน. ปริมาณและมูลค่าการส่งออกสินค้าเกษตรรายเดือน. แหล่งที่มา: <http://www.oae.go.th/statistic/export/1301Mug.xls>, 1 ตุลาคม 2551.
- Fu X., Ying Y., Lu H. and Xu H. 2007. Comparison of diffuse reflectance and transmission mode of visible-near infrared spectroscopy for detecting brown heart of pear. Journal of Food Engineering 83: 317-323.
- Pankasemsuk, T., J.O.Jr. Garner, F.B. Matta, and J.L. Silva, 1996. Translucent flesh disorder of mangosteen fruit (*Garcinia mangostana* L.). Hort Science 31(11). 112-113.



- Pathaveerat, S., Terdwongworakul, A. and Phaungsombut, A. 2008. Multivariate data analysis for classification of pineapple maturity. *Journal of Food Engineering* 89: 112-118.
- Teerachaichayut, S., Kil, K.Y., Terdwongworakul, A., Thanapase, W. and Nakanishi, Y. 2007. Non-destructive prediction of translucent flesh disorder in intact mangosteen by short wavelength near infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology* 43: 202-206.