



การจำแนกความแก่ส้มโอพันธุ์ทับทิมสยามแบบไม่ทำลาย

Non-destructive Classification for Maturity of Pomelo CV. Tubtim Siam

ทิพย์วรรณ สวัสดิ์พานิช¹, อนุปันต์ เทอดวงศ์วรกุล^{1*}, แก้วกานต์ พวงสมบัติ¹ และ อาทิตย์ พวงสมบัติ¹Thippawan Sawaspanich¹, Anupun Terdwongworakul^{1*}, Kaewkarn Phuangsombut¹, Arthit Phuangsombut¹¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

*Corresponding author: Tel: +66-86-775-1723, Fax: +66-34-351-896, E-mail: fengant@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIRS) สมบัติการสะท้อนแสงในย่านที่มองเห็นได้ และความถี่เสียงเคาะผล สำหรับการประเมินคุณภาพความแก่ส้มโอพันธุ์ทับทิมสยาม ในงานวิจัยได้สร้างสมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และสมการจำแนกกลุ่มตามความแก่ จากตัวอย่างส้มโอจำนวน 140 ตัวอย่าง 4 กลุ่มความแก่ ผลจากการสร้างสมการพบว่า การทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ด้วยสมการที่สร้างด้วยเทคนิค partial least squares regression ให้ผลการทำนายที่ดี (regression coefficient = 0.51, standard error of prediction = 0.59 °Brix และ Bias = 1.62E-02 °Brix) ส่วนการวิเคราะห์ด้วยวิธี Discriminant analysis (DA) เพื่อสร้างสมการจำแนกกลุ่มความแก่ พบว่า สมการที่เหมาะสมใช้ข้อมูลการดูดกลืนแสง NIR ที่มีการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี standard normal variate (SNV) โดยการเฉลี่ยสเปกตรัมจากตำแหน่งการวัด 4 ตำแหน่งรอบผลส้มโอ ร่วมกับสเปกตรัมการสะท้อนแสงย่านที่มองเห็นได้ที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี SNV โดยสามารถคัดแยกตัวอย่างช่วงอายุการเก็บเกี่ยวได้ถูกต้อง 100%

คำสำคัญ: ส้มโอพันธุ์ทับทิมสยาม, ความบิรูรณ์, สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

Abstract

This research studied the application of near infrared spectroscopy (NIRS) technique, visible (VIS) light reflectance and fruit audio frequency after tapping for evaluation of maturity of pomelo cv. Tubtim Siam. In this research equations to predict soluble solids content (SSC) and to discriminate samples into maturity classes using 140 samples from 4 groups of different maturity. After equation development, it was found that prediction of SSC using the equation derived by partial least squares regression technique resulted in low accuracy (regression coefficient = 0.51 standard error of prediction = 0.59 °Brix and Bias = 1.62E-02 °Brix). Regarding discriminant analysis to develop maturity classifying equation, the results showed that the optimal classifying equation was based on NIR absorbance data pretreated by standard normal variate (SNV), which was averaged from the measurements at four different positions around a sample, in combination with VIS reflectance spectra pretreated with SNV. The optimal classifying equation was able to separate all samples into correct maturity groups with accuracy of 100%.

Keywords: Pomelo cv. Tubtim Siam, Maturity, Near infrared spectroscopy

1 บทนำ

ส้มโอเป็นผลไม้ที่คนไทยนิยมปลูกและบริโภค มีรสชาติหวานหรือหวานอมเปรี้ยวโดยขึ้นอยู่กับพันธุ์ ทั้งยังมีคุณค่าทาง

โภชนาการสูง วิตามินซีสูง มีสรรพคุณเป็นยาระบายขับเสมหะ ขับลมในกระเพาะอาหาร บำรุงกระเพาะอาหาร ช่วยย่อย ทำให้เจริญอาหาร ส้มโอเป็นผลไม้ที่มีเปลือกหนาเก็บรักษาได้นานหลังการเก็บเกี่ยวโดยไม่เสียคุณภาพ ทนต่อการซ้ำในการขนส่ง ส้มโอ

Received: February 6, 2019

Revised: April 26, 2019

Accepted: April 26, 2019

Available online: June 11, 2019

เป็นผลไม้ที่มีการส่งออกทั้งในและต่างประเทศในรูปของผลสด และแปรรูปเพื่อพร้อมบริโภค

ส้มโอทับทิมสยาม (Tubtim Siam Pomelo) เป็นพันธุ์ที่กำลังได้รับความนิยมโดยได้รับการยอมรับว่าเป็นส้มโอที่มีรสชาติที่ดีที่สุด ผลส่วนบนมีลูก ก้นผลป้านว้าเล็กน้อย เปลือกผิวเรียบสีเขียววอลอมเหลือง ต่อม้ำมันละเอียดยาว เปลือกค่อนข้างบางเป็นมันมีขนาดเล็กๆ อ่อนนุ่มทั่วผล ส้มฝัสดก่ายก้ามเหย่ เปลือกชั้นในสีชมพูอ่อน เนื้อส้มโอมีสีชมพูเข้มคล้ายทับทิมจนถึงสีแดง เนื้อกึ่งมีขนาดเล็ก รสชาติหวานนุ่มหอม ระยะการเก็บเกี่ยวส้มโอที่เหมาะสม คือ นับวันหลังดอกบานประมาณ 8-9 เดือน โดยสังเกตต่อมน้ำมันรอบจุดสีน้ำตาลที่ก้นผลจะแห้งจนบริเวณก้นผลจะหายไป (กรมทรัพย์สินทางปัญญา, 2555) อย่างไรก็ตาม การนับวันหลังดอกบานยังมีความแม่นยำไม่มากพอในการเก็บเกี่ยว เนื่องจากอายุของต้นส้มโอ สภาพแวดล้อม ปริมาณการใส่ปุ๋ย รวมไปถึงปัจจัยต่างๆ ล้วนมีผลต่อระยะเวลาในการเก็บเกี่ยว ดังนั้นเกษตรกรจึงต้องอาศัยการสังเกตลักษณะทางกายภาพของส้มโอ มีข้อมูลเวลาที่ดอกบานและอายุต้น และต้องมีความเชี่ยวชาญและชำนาญเป็นอย่างมากในการเก็บเกี่ยวผลผลิต ปัญหาการเก็บเกี่ยวส้มโอทับทิมสยามมีมากกว่าส้มโอภาคกลางเนื่องจาก ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวสั้น และการเก็บเกี่ยวส้มโอที่อ่อนจะทำให้มีรสขมมากกว่าส้มโอภาคกลาง ถ้าเก็บเกี่ยวช้าเนื้อส้มจะพามซึ่งแตกต่างจากส้มโอภาคกลางที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการเก็บเกี่ยวล่าช้า

ปัจจุบันมีเทคนิคการตรวจสอบผลผลิตทางการเกษตรแบบไม่ทำลายหลากหลายวิธี ซึ่งวิธีสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy; NIRS) เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย NIRS เป็นวิธีที่รวดเร็ว แม่นยำในการวัดองค์ประกอบภายในของผลผลิตเกษตรและอาหารโดยไม่ทำลายตัวอย่าง (Fu et al., 2007; Terdwongworakul et al., 2012) มีงานวิจัยหลายงานที่ประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS เพื่อประเมินคุณภาพของส้มโอ (ปานมนัส, 2555; Phuangsombut et al., 2012) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวเกี่ยวข้องกับส้มโอภาคกลาง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิค NIRS สมบัติการสะท้อนแสงในย่านที่มองเห็นได้ (visible (VIS) light reflectance) และสมบัติเชิงเสียงในการคัดแยกความแก่ของส้มโอพันธุ์ทับทิมสยามแบบไม่ทำลาย

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ใช้ส้มโอพันธุ์ทับทิมสยามจากสวนส้มโออำเภอบางบาล จังหวัดนครราชสีมา ใช้ส้มโอจำนวน 140 ผล ส้มโอที่ใช้ศึกษาแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ช่วงอายุการเก็บเกี่ยว คือ 5 เดือน (Immature) 5 ½ เดือน (Early-mature) 6 เดือน (Late-mature) และ 6 ½ เดือน (Over-mature) เก็บเกี่ยวหลังการติดผล

โดยสุ่มเก็บมาจากต้นส้มโอหลายต้น จำนวนอายุละ 35 ผล ซึ่งช่วงอายุที่นิยมเก็บเกี่ยวในทางการค้าคือ 6 เดือน หลังการติดผล จากนั้นตัวอย่างทั้งหมดถูกนำมาเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 24 h ก่อนนำไปวัดเก็บข้อมูลการดูดกลืนแสงย่าน NIR และ VIS สมบัติทางเสียง และค่าทางเคมี

2.2 การวัดค่าการดูดกลืนแสง NIR และ การสะท้อนแสง VIS ของส้มโอพันธุ์ทับทิมสยาม

ส้มโอพันธุ์ทับทิมสยามถูกนำมาวัดการดูดกลืนแสงแบบ NIRS ในรูปแบบการวัดแบบสะท้อน (reflectance mode) โดยวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของส้มโอพันธุ์ทับทิมสยาม 4 ตำแหน่ง รอบผลตามแนวเส้นศูนย์สูตรโดยแต่ละตำแหน่งห่างกันประมาณ 90 องศา (Figure 1) ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา NIRscan Nano EVM (Texas Instruments, Dallas, Texas, USA) โดยมี Spectralon เป็นวัสดุอ้างอิงอยู่ภายในเครื่องมือ บันทึกความยาวคลื่นทุกๆ 3 nm ด้วยโปรแกรม DLP NIRscan Nano GUI (Texas Instruments, Dallas, Texas, USA) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 900 nm – 1700 nm (Figure 2) โดยใช้ integration time เท่ากับ 1.325 s ต่อจากนั้นนำมาวัดการสะท้อนแสง VIS ที่ตำแหน่งเดียวกันด้วยเครื่อง Spectrophotometer (spectro-guide sphere gloss BYK-Gardner GmbH, Germany) ที่บันทึกความยาวคลื่นทุก ๆ 10 nm ในช่วงความยาวคลื่น 400 nm – 700 nm และใช้ green standard (L*: 81.35, a*:-12.51, b*:10.63) เป็นวัสดุอ้างอิง ก่อนทำการวัดค่าการสะท้อนแสง VIS ของส้มโอ (Figure 3)

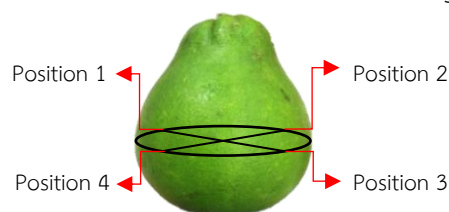


Figure 1 Positions on pomelo for measurements.

2.3 การวัดสมบัติทางเสียง

นำเครื่องวัดสมบัติทางเสียงเชื่อมกับคอมพิวเตอร์พร้อมเปิดโปรแกรม LabAcoustic ที่พัฒนาขึ้นจากซอฟต์แวร์ LabView (National Instruments Corp., Austin, TX, USA) จากนั้นทำการวัดสมบัติทางเสียง (Figure 4) ด้วยการเคาะส้มโอ 3 ตำแหน่งรอบผลแต่ละตำแหน่งห่างกันประมาณ 120 องศา โดยไม่ให้ตรงกับตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ พร้อมทั้งให้ส้มโอและไมโครโฟนอยู่ห่างกันประมาณ 2 cm บันทึกค่าความถี่เสียงเคาะที่คำนวณโดยโปรแกรม LabAcoustic



Figure 2 NIR spectral acquisition of pomelo in reflectance mode using NIRscan Nano EVM (Texas Instruments, Dallas, Texas, USA).



Figure 3 VIS spectral acquisition of pomelo in reflectance mode using spectrophotometer (spectro-guide sphere gloss BYK-Gardner GmbH, Germany).

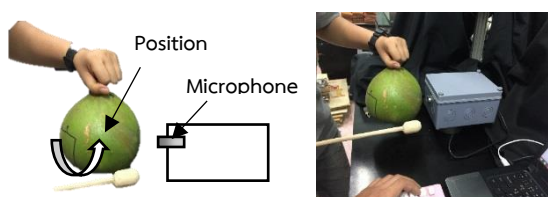


Figure 4 Frequency measurement of pomelo.

2.4 การหาปริมาณของแข็งที่ละลายได้

ปอกเปลือกผลส้มโอเพื่อนำเนื้อส้มโอกลีบที่ตรงกับตำแหน่งการวัดการดูดกลืนแสงมาทำการวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ โดยในหนึ่งกลีบถูกแบ่งเป็น 3 ส่วน (บน กลาง ล่าง) ในแต่ละส่วนนำมาคั้นและกรองได้น้ำส้มนำมาวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยใช้เครื่อง Refractometer แบบดิจิทัล (ATAGO PR-32, Japan) อ่านค่าที่ได้และบันทึกผล ($^{\circ}\text{Brix}$)

2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการประเมินปริมาณของแข็งที่ละลายได้

1. ในแต่ละโมเดลที่สร้างจะแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็นกลุ่มแคลิเบรชัน (calibration set) 92 ผล และกลุ่มพรีดิกชัน (prediction set) 48 ผล โดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่มให้มีการกระจายตัวของค่าทางเคมีที่ทำนายในลักษณะเดียวกันและตัวอย่างกลุ่มแคลิเบรชันจะต้องมีช่วงค่าทางเคมีครอบคลุมช่วงค่าทางเคมีของกลุ่มพรีดิกชัน

2. ใช้เทคนิควิเคราะห์ Partial Least Squares Regression (PLSR) (Unscrambler 9.8, Camo, Norway) สร้างสมการถดถอยพหุคูณโดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้เฉลี่ยที่วัด 4 จุดบริเวณกึ่งกลางผลเป็นตัวแปรอิสระ และใช้สมบัติทาง

เคมีเป็นตัวแปรตาม โดยสร้างโมเดลทำนายค่าทางเคมี (ปริมาณของแข็งที่ละลายได้) โดยใช้ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของการวัดทั้งสี่จุด โดยใช้ข้อมูลกลุ่มแคลิเบรชันมาสร้างโมเดลและกำหนดจำนวนแฟกเตอร์ในโมเดล ด้วยเทคนิค cross validation เมื่อได้โมเดลที่เหมาะสมจึงนำมาทดสอบความแม่นยำของโมเดลโดยใช้ข้อมูลกลุ่มพรีดิกชัน เปรียบเทียบความแม่นยำของแต่ละโมเดลด้วยพิจารณา ค่า Correlation coefficient (r), Standard error of prediction (SEP), Bias โดยโมเดลที่เหมาะสมที่สุดควรมีค่า r สูงค่า SEP และ Bias ต่ำ

3. ปรับปรุงความแม่นยำของโมเดลโดยลดผลกระทบจากตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้อง เช่น การกระเจิงแสง โดยนำข้อมูลการดูดกลืนแสง มาปรับ ด้วยเทคนิค Second derivative หรือ Multiplicative scatter correction หรือ Standard normal variate หรือ เทคนิคผสมตั้งแต่สองเทคนิคขึ้นไป แล้วนำข้อมูลการดูดกลืนแสงที่ปรับแล้วไปใช้เป็นตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์สร้างสมการ

4. ทำซ้ำในการสร้างโมเดลโดยเปลี่ยนตัวแปรอิสระเป็น พารามิเตอร์เชิงแสง และ สมบัติเชิงเสียง หรือ ใช้พารามิเตอร์ร่วมกันเป็นตัวแปรอิสระ

2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อสร้างสมการจำแนกกลุ่ม

ตัวแปรอิสระที่จะใช้สำหรับการจำแนกตัวอย่างส้มโอตามกลุ่มความแก่ ได้แก่ ค่าการดูดกลืนแสง NIR ค่าการสะท้อนแสง VIS และความถี่เสียงเคาะ ส่วนตัวแปรตาม คือ กลุ่มความแก่ 4 กลุ่ม

การวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการจำแนกกลุ่มจะแบ่งตัวอย่างในแต่ละกลุ่มความแก่ออกเป็นกลุ่มแคลิเบรชันย่อย (sub-calibration) สำหรับสร้างสมการ และกลุ่มทดสอบสมการย่อย (sub-validation) โดยทั้งสองกลุ่มมีการกระจายของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ใกล้เคียงกัน และกลุ่มแคลิเบรชันมีช่วงค่าครอบคลุมกลุ่มทดสอบสมการ แล้วนำตัวอย่างในกลุ่มย่อยทั้งสองจากแต่ละกลุ่มความแก่มารวมกันเป็นกลุ่มแคลิเบรชันจำนวน 92 ผล และกลุ่มทดสอบสมการจำนวน 48 ผล

ในการสร้างสมการจำแนกกลุ่มจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิค discriminant analysis โดยใช้ซอฟต์แวร์ SPSS version 16.0 (SPSS Inc., Chicago, IL) โดยใช้ตัวอย่างในกลุ่มแคลิเบรชันสร้างสมการ และทดสอบสมการด้วยตัวอย่างในกลุ่มทดสอบสมการ

สมการที่สร้างจะเปรียบเทียบสมรรถนะการจำแนกกลุ่ม (เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจำแนกกลุ่ม) ระหว่าง

1. สมการที่ใช้ตัวแปรอิสระเป็นค่าการดูดกลืนแสง NIR
2. สมการที่ใช้ตัวแปรอิสระเป็นค่าการดูดกลืนแสง NIR และค่าความถี่เสียงเคาะ
3. สมการที่ใช้ตัวแปรอิสระเป็นค่าการดูดกลืนแสง NIR และค่าการสะท้อนแสง VIS

สำหรับสเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR และสเปกตรัมการสะท้อนแสง VIS จะนำสเปกตรัมทั้ง 4 ตำแหน่งมาเฉลี่ยเป็น 1 สเปกตรัม ต่อหนึ่งตัวอย่าง

การสร้างสมการแต่ละสมการจะใช้เทคนิค stepwise method คัดเลือกตัวแปรอิสระที่เหมาะสมที่สุดเข้าสมการ

ข้อมูลการดูดกลืนแสง NIR และการสะท้อนแสง VIS ถูกนำมาลดสัญญาณรบกวน (noise) และลดผลกระทบจากปัจจัยทางกายภาพที่ทำให้เกิดการกระเจิงแสง เช่น ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่มีต่อสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการสะท้อนแสง ก่อนนำมาวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค การลด baseline shift และเทคนิคการแยกแถบสเปกตรัมที่ซ้อนทับออกจากกันด้วยวิธีต่างๆ เช่น วิธี second derivative แบบ Savitzky Golay (13 segments) หรือ วิธี standard normal variate (SNV)

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์กับความแก่

จากการศึกษาสัมพัทธ์กับทิมสยามที่อายุการเก็บเกี่ยว 5 เดือน 5 ½ เดือน 6 เดือน และ 6 ½ เดือน หลังการติดผล พบว่าความถี่ธรรมชาติมีค่าลดลงตามอายุการเก็บเกี่ยวที่มากขึ้น (Figure 5) สอดคล้องกับผลวิจัยโดย Terdwongworakul et al. (2009)

การวิเคราะห์ข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงย่าน NIR ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 900 – 1700 nm ในการคัดแยกสัมพัทธ์กับทิมสยาม (Figure 6) พบว่า ลักษณะสเปกตรัมทั้ง 4 ช่วงอายุการเก็บเกี่ยวมีแนวโน้มที่เหมือนกัน สเปกตรัมปรากฏพิกที่สังเกตได้ที่ช่วงความยาวคลื่น 960 nm 1143 nm และ 1440 nm โดยที่ความยาวคลื่น 960 nm อาจเป็นช่วงการดูดกลืนของน้ำและคาร์โบไฮเดรต แสดงถึงการสั่นของพันธะหมู่ OH ในน้ำ (Xie et al., 2009; Phuangsoombut et al., 2012) ที่ 1143 nm อาจเกิดจาก second overtone ของกลุ่ม C-H structure และมี material type เป็น Hydrocarbons, aromatic (Workman and Weyer, 2012) และที่ความยาวคลื่น 1440 nm อาจจะเกิดจาก first overtone ของกลุ่ม O-H structure ของโครงสร้างแป้ง (Phuangsoombut et al., 2016; Workman and Weyer, 2008) นอกจากนี้เพื่อให้สังเกตเห็นพิกต่างๆชัดเจนขึ้นจึงปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี second derivative แบบ Savitzky Golay (segment 11 nm) (Figure 7) พบว่า ปรากฏพิกต่างๆมากขึ้นที่เห็นได้ชัดที่ความยาวคลื่น 942 nm 1136 nm 1389 nm และ 1667 nm โดยที่ความยาวคลื่น 1389 nm เป็นความยาวคลื่นที่ค่า second derivative ของการดูดกลืนแสงเปลี่ยนแปลงเป็นลำดับตามอายุเก็บเกี่ยว โดยการดูดกลืนแสงจะลดลงเมื่ออายุเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น ซึ่งที่ความยาวคลื่น 1389 nm สัมพันธ์กับ function group เป็น C-H methyl มี spectral-structure เป็น C-H combination และมี material type เป็น Hydrocarbons, aliphatic (Workman and Weyer, 2012)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการสะท้อนแสง VIS ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 – 700 nm แสดงใน Figure 8 การสะท้อนแสงเพิ่มขึ้นตามความแก่ของส้มโอ และการสะท้อนแสงของส้มโอพันธุ์ทับทิมสยามจะน้อยกว่าการสะท้อนแสงของมะม่วง และเห็นพิกการสะท้อนที่ชัดเจนกว่าพิกของมะม่วง (Wanitchang et al., 2011) ลักษณะสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 550 nm เป็นพิกการสะท้อนแสงที่เด่น ส่วนพิกการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 680 nm เป็นช่วงคลื่นการดูดกลืนของคลอโรฟิลล์ (Jha et al., 2006)

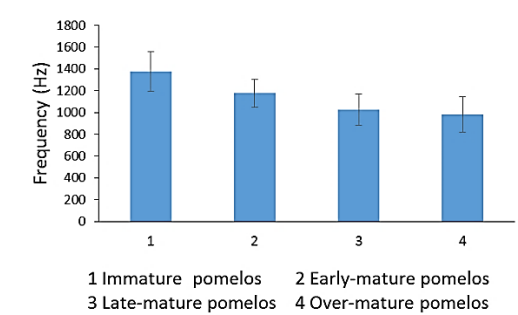


Figure 5 Averaged frequency of pomelo with each maturity.

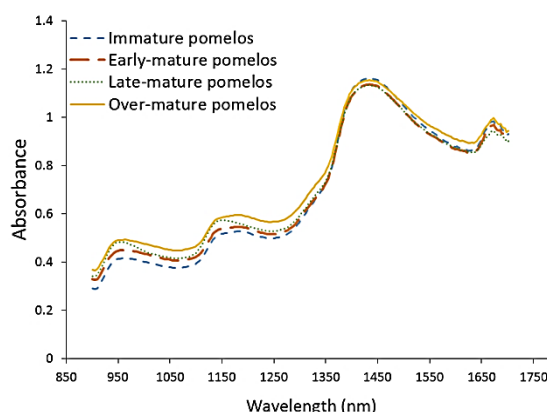


Figure 6 Spectral of 4 maturity of Tubtim Siam pomelo with each spectral representing an average of 35 samples.

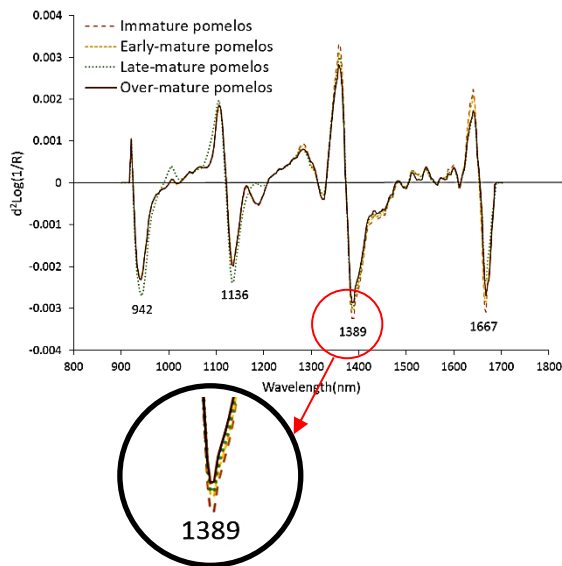


Figure 7 Second derivative of NIR absorbance of Tubtim Siam pomelo.

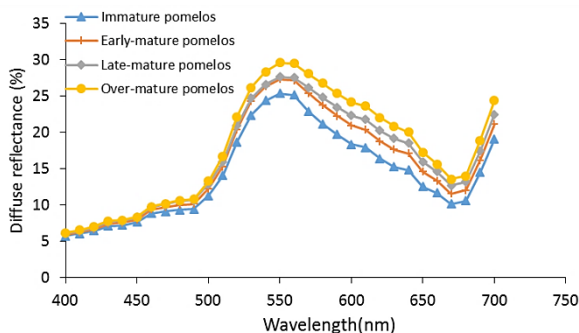


Figure 8 Variation of light reflectance spectra of pomelo from 400 to 700 nm at four maturity sets.

3.2 การประเมินปริมาณของแข็งที่ละลายได้

การทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของส้มโอบทิมสยาม ด้วยสมการที่สร้างจากพารามิเตอร์หลายรูปแบบ (Table 1) พบว่า สมการที่ทำนายได้ดีที่สุดในงานวิจัยนี้สร้างจากตัวแปรอิสระที่เป็น NIR ร่วมกับ VIS โดยไม่ผ่านการ pretreatment ด้วยค่า $r_p = 0.51$, $SEP = 0.59$ °Brix และ $Bias = 1.62E-02$ °Brix ซึ่งให้ผลการประเมินที่ต่ำ สาเหตุอาจเกิดจากความหนาของเปลือกส้มโอบนแต่ละผลมีความแตกต่างกัน และการเปลี่ยนแปลงค่าทางเคมีของเปลือกส้มโอบทิมสยามสัมพันธ์กับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของเนื้อส้มโอดำ

3.3 การจำแนกความแก่ส้มโอบทิมสยาม

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะการจำแนกกลุ่มของสมการทั้งสามแบบ พบว่า สมการที่ใช้ข้อมูลการดูดกลืนแสงย่าน NIR ร่วมกับการสะท้อนแสง VIS ที่ผ่านการ pretreatment แบบ SNV ให้ผลการจำแนกกลุ่มความแก่ได้ดีที่สุด โดยสามารถแยกกลุ่มความแก่ทุกกลุ่มได้ถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ (Table 2) กราฟสามมิติที่สร้างระหว่าง discriminant functions สาม

ฟังก์ชันแสดงให้เห็นกลุ่มตัวอย่างแคลิเบรชันที่แยกออกจากกันตามกลุ่มความแก่อย่างชัดเจน (Figure 9)

สำหรับสมการจำแนกกลุ่มที่สร้างจากค่าการดูดกลืนแสง NIR ที่ปรับด้วยวิธี SNV เพื่อลดผลกระทบจากการกระเจิงแสง และสมการจำแนกกลุ่มที่สร้างจากค่าการดูดกลืนแสง NIR ที่ปรับด้วยวิธี SNV ร่วมกับค่าความถี่เสียงเคาะนั้น สามารถจำแนกกลุ่มความแก่ระดับที่ 2, 3 และ 4 ได้ถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นกลุ่มความแก่ที่ 1 (กลุ่มส้มโอบที่อ่อน) จากการพิจารณาค่าความถี่ธรรมชาติของส้มโอบนแต่ละกลุ่มความแก่พบว่า มีค่าลดลงตามระดับความแก่ที่เพิ่มขึ้นและยังพบว่า ส้มโอบความแก่ระดับที่ 1 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความถี่ธรรมชาติที่สูงกว่าส้มโอบความแก่ระดับ 2, 3 และ 4 นอกจากนี้ ส้มโอบความแก่ระดับที่ 1 ยังมีช่วงการกระจายตัวของข้อมูลรอบค่าเฉลี่ยความถี่ธรรมชาติของส้มโอบนกลุ่มความแก่ระดับที่ 2 ดังนั้นจึงอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการจำแนกกลุ่มจากกลุ่มระดับความแก่ที่ 1 ไปเป็นระดับความแก่ที่ 2 ของส้มโอบ

Table 1 Statistical results of the prediction performance for soluble solid content (SSC) as affected by different pretreatment techniques.

Variables	Pretreatment	Factors	Calibration			Prediction		
			r	SEC	Bias	r	SEP	Bias
NIR	Raw spectra	11	0.74	0.44	-9.84E-07	0.50	0.60	7.44E-03
NIR	MSC	11	0.74	0.44	2.43E-07	0.46	0.63	1.45E-02
NIR	2D 1 st derivative segment 13 nm	6	0.54	0.55	5.66E-07	0.31	0.64	8.45E-03
NIR	SNV	11	0.74	0.44	9.53E-06	0.46	0.63	1.44E-02
NIR	SNV + 2D 1 st derivative segment 13 nm	13	0.78	0.41	2.83E-07	0.31	0.70	2.60E-02
NIR+frequency	Raw spectra	10	0.71	0.47	-1.27E-06	0.46	0.61	1.58E-02
NIR+frequency	MSC	12	0.74	0.44	3.68E-07	0.47	0.63	1.05E-02
NIR+frequency	2D 1 st derivative segment 13 nm	13	0.75	0.43	-7.24E-05	0.31	0.70	2.81E-02
NIR+frequency	SNV	12	0.74	0.44	9.90E-06	0.47	0.63	1.08E-02
NIR+frequency	SNV + 2D 1 st derivative segment 13 nm	12	0.71	0.46	1.66E-06	0.20	0.77	3.72E-02
NIR+VIS	Raw spectra	12	0.74	0.44	1.45E-06	0.51	0.59	1.62E-02
NIR+VIS	MSC	5	0.61	0.52	-4.97E-09	0.48	0.58	2.04E-03
NIR+VIS	2D 1 st derivative segment 13 nm	14	0.73	0.45	-4.10E-06	0.48	0.61	1.01E-02
NIR+VIS	SNV	10	0.74	0.44	-1.12E-06	0.50	0.59	1.53E-02
NIR+VIS	SNV + 2D 1 st derivative segment 13 nm	8	0.59	0.53	6.81E-07	0.38	0.63	1.62E-02

Table 2 Matrices showing performance of classification into four maturity sets based on non-destructive variables.

Model	Actual group	Correctly classified pomelos (%)	Predicted group				Total
			Immature pomelos	Early-mature pomelos	Late-mature pomelos	Over-mature pomelos	
A	Immature pomelos	83.3	10	2	0	0	12
	Early-mature pomelos	100	0	12	0	0	12
	Late-mature pomelos	100	0	0	12	0	12
	Over-mature pomelos	100	0	0	0	12	12
	Total	95.8	10	14	12	12	48
B	Immature pomelos	91.7	11	1	0	0	12
	Early-mature pomelos	100	0	12	0	0	12
	Late-mature pomelos	100	0	0	12	0	12
	Over-mature pomelos	100	0	0	0	12	12
	Total	97.9	11	13	12	12	48
C	Immature pomelos	100	12	0	0	0	12
	Early-mature pomelos	100	0	12	0	0	12
	Late-mature pomelos	100	0	0	12	0	12
	Over-mature pomelos	100	0	0	0	12	12
	Total	100	12	12	12	12	48

A = Model based on SNV treated NIR absorbance

B = Model based on SNV treated NIR absorbance and frequency

C = Model based on SNV treated NIR absorbance and SNV treated VIS reflectance

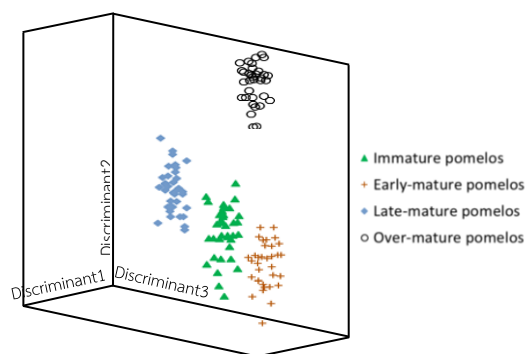


Figure 9 Scatter plot of pomelo at four maturity levels with respect to three discriminant functions derived from NIR absorbance and VIS reflectance variables selected by means of stepwise method.

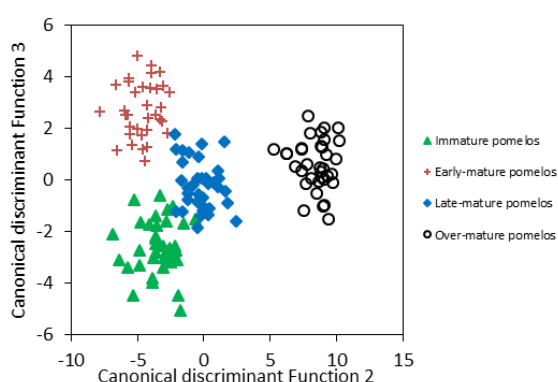


Figure 10 Scatter plot of pomelo samples at four maturity levels with respect to two canonical discriminant functions derived from NIR absorbance and VIS reflectance variables selected by means of stepwise method.

เมื่อพิจารณากราฟการกระจายของตัวอย่างเป็นกลุ่มความแก่ตาม discriminant function 2 กับ 3 (Figure 10) พบว่า discriminant function 2 สามารถแยกกลุ่มตัวอย่างออกเป็นสามกลุ่ม ได้แก่ ช่วงอายุ Over-mature Late-mature และช่วงอายุ Immature รวมกับ Early-mature โดยตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดในการจำแนกดังกล่าวได้แก่ การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 1315 nm ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับ discriminant function 2 มากที่สุด ดังค่า structure coefficients (Table 3) ที่เป็นค่าแสดงน้ำหนักการมีส่วนร่วมของตัวแปรต่างๆ ต่อ discriminant function

การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 1315 nm เป็น cellulose ซึ่งมักพบมากในเปลือก ใบ และเส้นใยในเนื้อผลไม้ (Maalouly and Jaillais, 2006; Sánchez et al., 2013) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่น่าจะมีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มตัวอย่างช่วงอายุ Over-mature Late-mature และ ช่วงอายุ Immature รวมกับ Early-mature

เมื่อพิจารณา Figure 10 เพิ่มเติมจะพบว่า กลุ่มตัวอย่างในช่วงความแก่ Immature กับ Early-mature จะเกาะกลุ่มแยกกันชัดเจนตาม discriminant function 3 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 985 nm (Table 3) ที่เกิดจากการดูดกลืนของน้ำ (Slaughter et al., 2003) นั่นแสดงว่า เมื่อส้มโอพัฒนาจากส้มโออ่อนมาเป็นส้มโอเริ่มแก่ที่เหมาะสม ส้มโอจะมีปริมาณน้ำที่แตกต่างกัน

Table 3 Structure coefficients between the discriminant score and wavelength of light absorbance used in classification showing contribution of each variable to the discriminant function.

Wavelength (nm)	Discriminant Function		
	1	2	3
933	-172.984	91.141	12.933
953	561.160	-135.448	-20.066
985	-433.797	108.633	182.157
1125	58.973	27.640	-12.463
1279	299.268	360.064	41.459
1315	-598.134	-1350.754	122.824
1326	213.586	1159.445	-99.977
1371	79.301	-60.911	50.810
1643	36.063	3.796	37.806
470	-6.585	-90.718	4.519
500	9.653	33.303	-5.470
540	20.074	-68.258	46.360
550	-17.041	79.322	-58.783
570	23.239	20.474	57.659
680	11.291	0.865	12.874
Explained variance(%)	88.6	10	1.4

4 สรุป

จากการวิจัยด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ การสะท้อนแสง และการวัดสมบัติทางเสียง ในการประเมินปริมาณของแข็งที่ละลายได้ พบว่าโมเดลที่ใช้สเปกตรัม NIR ร่วมกับ VIS โดยไม่ผ่านการ pretreatment ได้ค่า $r_p = 0.51$, $SEP = 0.59$ °Brix และ $Bias = 1.62E-02$ °Brix และการวิเคราะห์ Discriminant analysis สำหรับคัดแยกความแก่ส้มโอพันธุ์ทับทิมสยาม 4 กลุ่มช่วงอายุการเก็บเกี่ยว พบว่าโมเดลที่ดีที่สุดในการคัดแยกอายุเก็บเกี่ยวส้มโอได้ความถูกต้อง 100 % เมื่อใช้ NIR ร่วมกับ VIS โดยผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมแบบวิธี SNV (Table 2)

ดังนั้นการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ และสมบัติการสะท้อนแสงในย่านที่มองเห็นได้ สามารถนำไปใช้ในการคัดแยกแบบหยาบตามกลุ่มความแก่ของส้มโอพันธุ์ทับทิมสยามแบบไม่ทำลายได้

5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ 2560 รหัส ป-3.2(ด)118.61 ชื่อโครงการ การพัฒนาเทคนิคการวัดความแก่ส้มโอฟันธุ์ทับทิมสยามแบบไม่ทำลายเพื่อการเก็บเกี่ยว, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6 เอกสารอ้างอิง

Department of Intellectual Property. (2012).

Pakpanang Tubtim Siam pomelo (In Thai).

Fu, X., Ying, Y., Lu, H., 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(3), 317-323.

Jha, S.N., Kingsly, A.R.P., Chopra, S. 2006. Non-destructive determination of firmness and yellowness of mango during growth and storage using visual spectroscopy. *Biosystems Engineering* 94 (3), 397-402.

Maalouly, J., Jaillais, B., 2006. Glucides. In: Bertrand, D., Dufour, E. (Eds.), *La Spectroscopie Infrarouge et Ses Applications Analytiques* (pp. 175-227). Paris: TEC & DOC Editions.

Osborne, B., Fearn, T., Hindle, P.H. 1993. *Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis*. Harlow, UK: Longman Scientific and Technical.

Phuangsubut, A., Pathaveerat, S., Terdwongworakul, A., Phuangsubut, K. 2012. Evaluation of Internal quality of fresh-Cut pomelo using VIS/NIR transmission. *Journal of Texture Studies* 43, 445-452.

Phuangsubut, K., Suttiwittitukdee, N., Terdwongworakul, A. 2017. Nondestructive classification of mung bean seeds by single kernel Near-Infrared spectroscopy. *Journal of Innovative Optical Health Sciences* 10(3), 1-9.

Sirisomboon, P. 2012. Nondestructive Evaluation of Pomelo (Kao Numpung Variety) quality by Near Infrared Spectroscopy technique. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. (In Thai)

Sánchez, M., Garrido-Varo, A., Guerrero, J., Pérez-

Marín, D. 2013. NIRS technology for fast authentication of green asparagus grown under organic and conventional production systems. *Postharvest Biology and Technology* 85, 116-123.

Slaughter, D.C., Thompson, J.F., Tan, E.S. 2003.

Nondestructive determination of total and soluble solids in fresh prune using near infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology* 28(3), 437-444.

Terdwongworakul, A., Nakawajana, N., Teerachaichayut, S., Janhira, A. 2012. Determination of translucent content in mangosteen by means of near infrared transmission. *Journal of Food Engineering* 109(1), 114-119.

Terdwongworakul, A., Puangsombat, A., Pathaveerat, S. 2009. Qualitative and quantitative evaluation of pomelo maturity using multivariate combination of chemical and physical properties. *Journal of Texture Studies* 40(5), 584-605.

Wanitchang, P., Terdwongworakul, A., Wanitchang, J., Nakawajana, N. 2011. Non-destructive maturity classification of mango based on physical, mechanical and optical properties. *Journal of Food Engineering* 105(3), 477-484.

Workman, J., Weyer, L. 2008. *Practical Guide to Interpretive Near Infrared Spectroscopy*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.

Workman, J., Weyer, L. 2012. *Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near-Infrared Spectroscopy*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.

Xie, L.J., Ying, Y.B. Ying, T.J. 2009. Rapid determination of ethylene content in tomatoes using visible and short wave near-infrared spectroscopy and wavelength selection. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 97, 141-145.