

อุปกรณ์พกพาสำหรับประเมินความหวานผลแอปเปิลแบบไม่ทำลาย

A Portable Device for Non-destructively Assessing Apple Sweetness

ศุภชัย กุลมุตวิวัฒน์ และ อนุปันท์ เทอดวงศ์วรกุล *

Supachai Kulmutiwat and Anupun Terdwongworakul *

Received: 8 April 2021, Revised: 26 May 2021, Accepted: 22 June 2021

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน แอปเปิลที่ซื้อมาจากตลาดไม่มีการรับประกันความหวาน วิธีการวัดความหวานมาตรฐานจะใช้อุปกรณ์ที่วัดความหวานจากน้ำแอปเปิล งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้หลักการวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared, NIR) มาวัดความหวานแอปเปิลแบบไม่ทำลาย เพื่อนำมาพัฒนาอุปกรณ์วัดความหวานผลแอปเปิลแบบพกพาใช้งานร่วมกับสมาร์ทโฟน อุปกรณ์จะวัดการดูดกลืนแสงในโหมดสะท้อนกลับในช่วงความยาวคลื่น 900 ถึง 1700 นาโนเมตร อุปกรณ์ประกอบด้วย สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ติดตั้งในกล่องพลาสติก มีขนาดกว้าง 40 มิลลิเมตร ยาว 70 มิลลิเมตร สูง 60 มิลลิเมตร และแอปพลิเคชันทำงานบนสมาร์ทโฟน ในงานวิจัยได้สร้างสมการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (ความหวาน) จากความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสง NIR กับค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้อ้างอิงที่วัดจากเครื่องรีแฟร็กโตมิเตอร์ แอปพลิเคชันสมาร์ทโฟนถูกพัฒนาเพื่อทำหน้าที่เชื่อมต่อกับสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ผ่านบลูทูธ ควบคุมสั่งงานให้สแกนวัดการดูดกลืนแสง คำนวณค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และแสดงผล สมการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ถูกนำไปเขียนเป็นส่วนหนึ่งของชุดคำสั่งบนแอปพลิเคชัน

ในการทดสอบอุปกรณ์สำหรับวัดความหวานผลแอปเปิลที่ไม่เกี่ยวข้องกับการสร้างสมการจำนวน 50 ผล พบว่า อุปกรณ์สามารถทำนายความหวานด้วยความแม่นยำ ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.916 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ยในการทำนาย (Root Mean Square Error of Prediction, RMSEP) เท่ากับ 0.808 °Brix อุปกรณ์วัดความหวานแบบพกพาที่พัฒนาแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิคสเปกโตรสโกปี NIR ในการนำมาประยุกต์ใช้ทำนายค่าความหวานด้วยความรวดเร็ว ใช้เวลาประมาณ 5 วินาที โดยไม่ทำลาย

คำสำคัญ: แอปเปิล, ความหวาน, อินฟราเรดย่านใกล้, การวัดแบบไม่ทำลาย, อุปกรณ์พกพา

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): fengant@ku.ac.th

ABSTRACT

At present, an apple purchased from market is not guaranteed for sweetness. A standard method for determining the sweetness uses a device that measures the sweetness from apple juice. This research applied the principle of the near-infrared absorbance for non-destructive evaluation of apple to develop a portable device for determining the sweetness of an apple which operated with a smartphone. The device measured the absorbance in a reflectance mode at a wavelength range from 900 to 1700 nm. The device consisted of a spectrophotometer housed in a plastic box with width of 40 mm, length of 70 mm and height of 60 mm, and an application operated on the smartphone. A prediction equation for the soluble solids content (sweetness) was derived from the relationship between the near-infrared absorbance and the reference soluble solids content determined using a refractometer. The device operated by connecting the spectrophotometer via Bluetooth, controlling the spectrophotometer to scan for the near-infrared absorbance of the apple, calculating the soluble solids content, and displaying the sweetness result. The prediction equation for the soluble solids content was used to write the code for the sweetness calculation part of the application.

In testing the device for determining the sweetness of 50 apple, which were not used in the development of the prediction equation, the results showed that the device provided good accuracy for the sweetness prediction, yielding the correlation coefficient of 0.916 and the root mean square error of prediction (RMSEP) of 0.808 °Brix. The sweetness portable device developed in this research displayed the potential of the near-infrared spectroscopy technique for prediction of the sweetness with a determining speed of about 5 seconds without destroying the fruit.

Key words: apple, sweetness, near-infrared, non-destructive measurement, portable device

บทนำ

แอปเปิลเป็นผลไม้ที่มีประโยชน์ทางโภชนาการและได้รับการยอมรับ โดยมี กรดโฟลิก วิตามินและแร่ธาตุ เช่น วิตามินซี วิตามินบี 1 วิตามินเอ เป็นต้น ที่มีคุณค่าต่อสุขภาพ (Cho *et al.*, 1998) อย่างไรก็ตาม ในการเลือกซื้อแอปเปิลผู้บริโภคต้องการผลที่มีความหวานตามต้องการ แต่ในทางปฏิบัติผู้บริโภคสามารถคัดเลือกได้จากการพิจารณาลักษณะทางกายภาพภายนอก เช่น รูปร่าง รอยขีด สี หรือ ความแน่นเนื้อผล เป็นต้น ความหวานสามารถหาได้จากการวัดในห้องปฏิบัติการ ด้วยเครื่องมือที่

เรียกว่ารีแฟรกโตมิเตอร์ โดยต้องนำเนื้อแอปเปิลมาคั้นและนำน้ำแอปเปิลไปวัดค่าความหวานหรือปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีหน่วยเป็น °Brix ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ประกอบด้วย น้ำตาล เช่น ซูโครส ฟรุคโตส ฯลฯ กรดอินทรีย์ กรดอะมิโน และสารประกอบอื่นๆ เช่น ไขมัน แร่ธาตุ วิตามินต่างๆ เป็นต้น จากส่วนประกอบทั้งหมดน้ำตาลมีสัดส่วนมากที่สุดประมาณ 80% ดังนั้นค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้จึงใช้เป็นค่าวัดปริมาณน้ำตาลหรือความหวานในผลไม้ได้ ค่าความหวานสำหรับแอปเปิลที่ยอมรับโดยผู้บริโภคมีค่าเท่ากับ 13 °Brix (Trimble,

2019) ซึ่งหมายถึงผลแอปเปิลมีน้ำตาล 13% การเลือกซื้อผลแอปเปิลที่มีความหวานตามต้องการของผู้บริโภคในซูเปอร์มาร์เก็ตหรือในตลาดทั่วไปอาศัยการพิจารณาจากลักษณะภายนอก ดังนั้นจึงมีโอกาสมากที่จะทำให้ผู้บริโภคไม่ได้รับความพึงพอใจที่จะได้ผลแอปเปิลที่มีความหวานเป็นไปตามที่ต้องการ

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคต่างๆ ในการประเมินคุณภาพผลไม้แบบไม่ทำลาย เช่น คลื่นเหนือเสียง การวิเคราะห์ภาพ การวัดสี และเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (near infrared spectroscopy, NIRS) (Sharabiani *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตาม เทคนิค NIRS เป็นเทคนิคที่ให้ความแม่นยำมากที่สุด NIRS เป็นเทคนิคที่มีหลักการพื้นฐานจากการวัดการดูดกลืนแสง NIR ของผลไม้ โดยโมเลกุล C-H, O-H หรือ N-H ในผลไม้หรือวัสดุเกษตร จะทำอันตรกิริยากับแสง NIR เกิดการสั่นของพันธะในโมเลกุลและดูดกลืนแสง ปริมาณการดูดกลืนแสงสัมพันธ์กับปริมาณของโมเลกุลหรือความเข้มข้นของค่าทางเคมี ข้อดีของเทคนิค NIRS คือ วัดได้รวดเร็ว ไม่ทำลายตัวอย่าง และ เป็นการช่วยลดสารเคมีในการวิเคราะห์ มีการประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS ในการประเมินคุณภาพของผลแอปเปิลหลายงานวิจัย Guo *et al.* (2020) ศึกษาการใช้ NIRS ในการประเมินอาการน้ำและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของผลแอปเปิลด้วยวิธีการวัดแบบส่องผ่าน โดยรายงานความแม่นยำด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) และค่า RMSEP เท่ากับ 0.96 และ 1.34 °Brix สำหรับระดับอาการน้ำและ 0.98 และ 0.33 °Brix สำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ Ventura *et al.* (1998) พัฒนาสมการประเมินปริมาณของแข็งที่ละลายได้สำหรับแอปเปิล 2 พันธุ์ (Golden delicious และ Jonagold) จากค่าการดูดกลืนแสง NIR โดยสมการที่พัฒนามีความแม่นยำในการประเมินด้วยค่า r และ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานการทำนาย

(standard error of prediction) เท่ากับ 0.75 และ 1.14 °Brix ตามลำดับ ในงานวิจัยที่ศึกษาแอปเปิลพันธุ์ Golden delicious, Jha and Garg (2010) สร้างสมการประเมินปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ให้ค่าความแม่นยำ r และ SEP เท่ากับ 0.89 และ 0.75 °Brix ตามลำดับ สำหรับแอปเปิลพันธุ์ Empire delicious เทคนิค NIR สามารถประเมินปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้ง r และ SEP เท่ากับ 0.81 และ 0.5 °Brix (Lu and Ariana, 2002) Cho *et al.* (1998) สร้างสมการประเมินความหวานของผลแอปเปิลจากค่าการดูดกลืนแสง NIR ให้ผลการประเมินค่าฟรุกโตสด้วยค่า r และ SEP เท่ากับ 0.75 และ 0.86% ตามลำดับ

เครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับเทคนิค NIRS มีทั้งแบบที่ใช้ในห้องปฏิบัติการและแบบที่มีขนาดเล็กพกพาได้ โดยเครื่องมือแบบพกพาสามารถนำไปพัฒนาให้สามารถใช้วัดคุณภาพผลไม้ในสวนหรือในโรงงานได้ (Dos Santos *et al.*, 2013) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS มาพัฒนาอุปกรณ์วัดความหวานผลแอปเปิลพันธุ์ฟูจิแบบพกพา ควบคุมผ่านสมาร์ตโฟน เพื่อเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีด้าน NIRS ให้สามารถนำไปใช้งานจริงได้

วิธีดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์วัดความหวานผลแอปเปิลแบบพกพาที่พัฒนาประกอบด้วย สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (DLP NIR scan Nano, Texas Instruments, Dallas, Texas, USA) สมาร์ตโฟน และ แอปพลิเคชัน ขั้นตอนหลักในการพัฒนา คือ การสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Soluble Solids Content, SSC) เมื่อได้สมการดังกล่าวแล้วจะนำมาเป็นส่วนหนึ่งในการเขียนคำสั่งคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้างเป็นแอปพลิเคชันใช้งานบนสมาร์ตโฟน

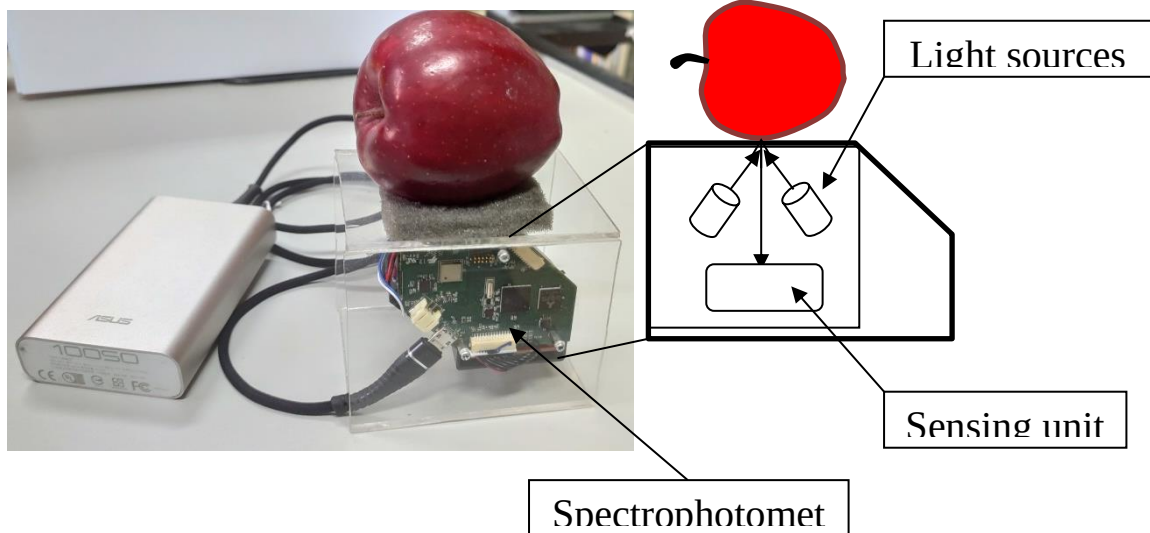
1. การจัดเตรียมตัวอย่างแอปเปิล

ตัวอย่างแอปเปิลพันธุ์ฟูจิที่ใช้ในการทดลอง ได้มาจากซูเปอร์มาเก็ต จำนวน 200 ผล โดยสุ่มเลือก สัปดาห์ละ 40 ผล จำนวน 5 สัปดาห์ ทั้งนี้เพื่อให้ ตัวอย่างมีค่า SSC ที่มีความแตกต่างกันในการทดลอง โดยไม่คำนึงถึงขนาดและสีผล เป็นตัวอย่างแอปเปิลที่ ผู้บริโภคจะเจอในการเลือกซื้อจริง

2. การวัดการดูดกลืนแสง NIR

ก่อนการวัดการดูดกลืนแสง นำแท่ง Spectralon ที่มีสมบัติสะท้อนแสง NIR ได้ 99% มา สแกนเป็นค่าอ้างอิงและบันทึกในสเปกโตรโฟโต มิเตอร์ การสแกนแท่ง Spectralon จะทำซ้ำหลังจาก วัดแอปเปิลครบทุกๆ 20 ผล ส่วนค่า dark reference ได้ถูกบันทึกไว้ในหน่วยความจำของสเปกโตรโฟโต มิเตอร์จากโรงงาน หลังจากนั้นนำแอปเปิลแต่ละผล มาวัดการดูดกลืนแสงด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ผล

ละ 2 ตำแหน่ง บริเวณแก้มผลด้านตรงข้ามกัน (ภาพที่ 1) ด้วยโปรแกรม DLP NIRscan Nano GUI (Version 2.1.0, Texas instrument, Texas, USA) สเปกโตร โฟโตมิเตอร์ที่ใช้มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดไฟ 2 หลอด ขนาด 1.4 วัตต์ ติดตั้งให้ส่องแสงทำมุม 45 องศา กับแนวการวัดแสงที่รับเข้ามาภายในสเปกโตร โฟโตมิเตอร์ เซ็นเซอร์เป็นไดโอดทำจาก InGaAs สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ติดตั้งอยู่ในกล่องพลาสติก ขนาดกว้าง 40 มิลลิเมตร ยาว 70 มิลลิเมตร สูง 60 มิลลิเมตร แอปเปิลจะถูกนำมาวางบนสเปกโตรโฟโต มิเตอร์ การวัดจะวัดในโหมดสะท้อนแสง ในช่วงความ ยาวคลื่นตั้งแต่ 900 นาโนเมตร ถึง 1700 นาโนเมตร แต่ละจุดของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงห่างกัน 3.5 นาโนเมตร หลังจากวัดผลแอปเปิลแต่ละผลนำ ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงนำไปสร้างสมการ ต่อไป



ภาพที่ 1 การวัดการดูดกลืนแสงของแอปเปิลด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3. การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้

ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า SSC เป็นค่าอ้างอิงความ หวาน ผลแอปเปิลที่ผ่านการวัดการดูดกลืนแสงจะ นำมาผ่าเอาเนื้อบริเวณที่วัดการดูดกลืนแสงมาคั้น

และกรองให้ได้น้ำแอปเปิล แล้วนำมาวัดค่า SSC ด้วย เครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ refractometer, PR-32, Palette Series, Atago Co., Ltd., Tokyo, Japan) โดยทำการวัด ซ้ำตำแหน่งละ 2 ครั้ง คำนวณค่าเฉลี่ย SSC ทั้งหมด

เป็นค่าความหวานของผลแอปเปิล เพื่อนำไปสร้างสมการต่อไป

4. การสร้างสมการ

ก่อนการสร้างสมการ นำสเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR มาปรับทางคณิตศาสตร์เพื่อลดผลกระทบจากปัจจัยความแปรปรวนด้านกายภาพของผิวแอปเปิล การปรับทางคณิตศาสตร์ใช้เทคนิค standard normal variate (SNV) ดังสมการที่ 1 โดย

$$SNVAbs(\lambda_i) = \frac{Abs(\lambda_i) - AvgAbs}{SDAbs} \quad (1)$$

โดยที่ $Abs(\lambda_i)$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น i นาโนเมตร

$AvgAbs$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยตลอดช่วงความยาวคลื่นของตัวอย่าง

$SDAbs$ คือ ค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการดูดกลืนแสงตลอดช่วงความยาวคลื่นของตัวอย่าง

ตัวอย่างทั้งหมดถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสร้างสมการ (150 ตัวอย่าง) และกลุ่มทดสอบสมการ (50 ตัวอย่าง) โดยตัวอย่างในกลุ่มสร้างสมการจะมีค่า SSC ครอบคลุมตัวอย่างกลุ่มทดสอบสมการ ข้อมูลของตัวอย่างในกลุ่มสร้างสมการจะถูกนำมาสร้างสมการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSC กับค่าการดูดกลืนแสง NIR ที่ปรับค่าด้วยเทคนิค SNV (SNVAbs) ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณแบบยกกกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Squares Regression, PLSR) เทคนิค PLSR เป็นเทคนิคที่นำค่าการดูดกลืนแสงมาสร้างเป็นตัวแปรใหม่ที่ไม่มีความสัมพันธ์กันก่อนนำไปวิเคราะห์ เพื่อกำจัดปัญหา Collinearity (Osborne and Fearn, 1986) โดยให้ค่าการดูดกลืนแสง SNVAbs เป็นตัวแปรอิสระและค่า SSC เป็นตัวแปรตาม การเลือกจำนวนแฟกเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสมการ PLSR ทำโดยวิธีครอสวาเลชัน (cross validation) ซึ่งมีขั้นตอนเริ่มจากการสร้างสมการที่มีแฟกเตอร์เพียงแฟกเตอร์เดียว แยกตัวอย่างที่หนึ่งออกจากกลุ่มทดสอบสมการแล้วนำตัวอย่างที่เหลือไปสร้างสมการ แล้วนำสมการที่ได้ไปทำนายค่า

เทคนิค SNV เป็นเทคนิคที่สามารถลดผลกระทบเชิงเส้นและผลกระทบเชิงคูณ และในงานวิจัยหลายงานพบว่า เป็นเทคนิคที่ทำให้ได้สมการที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายค่า SSC ในผลไม้อย่างแม่นยำ (Huang *et al.*, 2010) นอกจากนั้น SNV ยังเป็นเทคนิคที่นำไปเขียนเป็นชุดคำสั่งในการพัฒนาโปรแกรมต่อไปได้ง่ายกว่าเทคนิคอื่นๆ

SSC ของตัวอย่างที่แยกออกมา บันทึกค่าค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ยครอสวาเลชัน (Root Mean Square Error of Cross Validation, RMSECV) ทำซ้ำโดยแยกตัวอย่างที่สองออกจากกลุ่มทดสอบ จนกระทั่งทุกตัวอย่างถูกแยกออกและถูกทำนายค่า SSC ต่อจากนั้น ทำซ้ำขั้นตอนดังกล่าวทั้งหมด แต่เป็นการสร้างสมการที่มีแฟกเตอร์สองตัว และเพิ่มแฟกเตอร์ในสมการขึ้นเป็นลำดับจนถึงจำนวนแฟกเตอร์ที่กำหนด สมการ PLSR ที่มีจำนวนแฟกเตอร์ที่เหมาะสมคือ สมการที่ให้ค่า RMSECV ต่ำที่สุด (Williams and Norris, 2001)

5. การพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับสมาร์ตโฟน

พัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับสมาร์ตโฟน ด้วยซอฟต์แวร์ Android Studio Version 2.3 (Google, California, USA) เพื่อเชื่อมต่อกับสเปกโตรโฟโตมิเตอร์พกพาผ่านทางระบบบลูทูธ ควบคุมการทำงานอ่านค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ปรับค่าสเปกตรัมด้วยเทคนิค SNV คำนวณค่า SSC และแสดงผลบนหน้าจอสมาร์ตโฟน โดยในส่วนการคำนวณค่า SSC จะนำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r)

ของสมการที่ดีที่สุดมาเขียนเป็นชุดคำสั่งในแอปพลิเคชัน ในการใช้งานเพียงแต่วางผลแอปเปิลบนเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และเปิดแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน กดปุ่มติดต่อผ่านทางบลูทูธ เมื่อเชื่อมต่อสำเร็จแล้ว กดปุ่มสแกน ผลแอปเปิลจะถูกฉายแสง NIR แสงที่สะท้อนจะถูกบันทึกและแปลงเป็นค่าการดูดกลืนแสง ส่งมายังสมาร์ตโฟนซึ่งจะคำนวณค่าความหวานหรือ SSC แสดงผลบนหน้าจอ

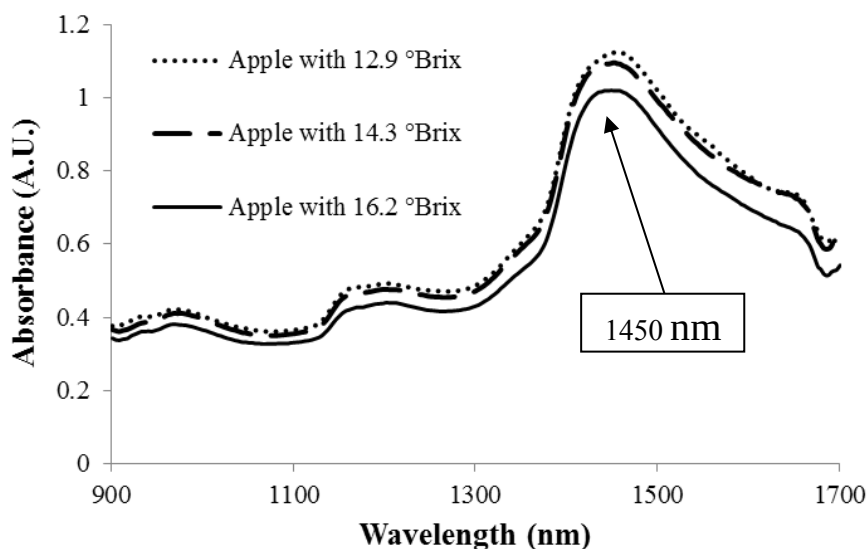
ในการทดสอบการใช้งาน นำผลแอปเปิลในกลุ่มทดสอบสมการซึ่งเป็นแอปเปิลที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้สร้างสมการ มาวัดค่า SSC ด้วยแอปพลิเคชัน บันทึกค่า SSC ที่ทำนาย จากนั้นนำผลแอปเปิลไปคั้นน้ำจากเนื้อบริเวณที่ถูกสแกน แล้วนำมาวัดค่า SSC ด้วยเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์เป็นค่าอ้างอิงมาตรฐาน คำนวณค่าที่ทำนายกับค่าที่อ้างอิงมาตรฐานแล้วนำมาคำนวณเป็นค่า RMSEP ทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วยเทคนิค Student's t-test

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

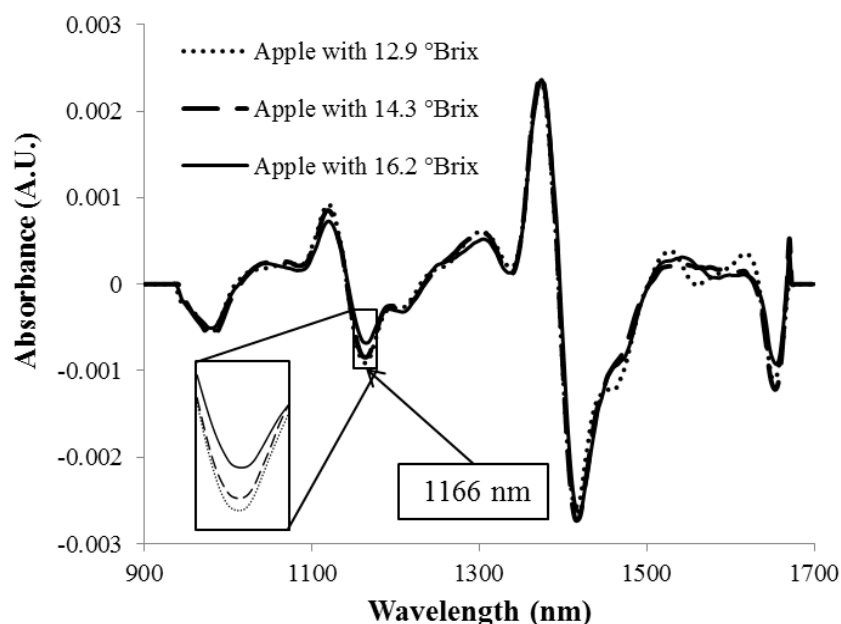
2. ลักษณะของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR ของผลแอปเปิล

ภาพที่ 2 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR ผลแอปเปิลที่มีค่า SSC ต่างกัน 3 ระดับ ผลแอปเปิลมีการดูดกลืนแสง NIR ที่เด่นชัดที่ตำแหน่ง

ความยาวคลื่น 1450 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงของน้ำ (Workman and Weyer, 2012) สอดคล้องกับการดูดกลืนแสงของแอปเปิลพันธุ์ Golden Delicious (Jha and Garg, 2010) เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ระดับค่า SSC ต่างๆ กัน พบว่า ผลแอปเปิลที่มีค่า SSC ต่ำ จะมีค่าการดูดกลืนแสงมากกว่าผลแอปเปิลที่มีค่า SSC สูง (ภาพที่ 2) อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของสเปกตรัมเกิดขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่น ซึ่งทำให้ไม่พบพิกัดการดูดกลืนแสงเฉพาะ จึงนำค่าการดูดกลืนแสงไปปรับทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิคอนุพันธ์อันดับสอง (Second Derivative, SD) ที่เป็นเทคนิคที่ทำให้สเปกตรัมมีพิกัดที่แหลมคมมากขึ้นและยังทำให้พิกัดแยกออกจากกันจากการเหลื่อมซ้อน (Huang *et al.*, 2010) ผลที่ได้แสดงในภาพที่ 3 สเปกตรัมที่ได้รับการปรับด้วย SD จะแสดงให้เห็นพิกัดที่สำคัญกลับลงด้านล่าง (Huang *et al.*, 2010) เมื่อพิจารณาภาพที่ 3 พิกัดด้านล่างที่มีค่าลดลงเป็นลำดับและมีความสัมพันธ์กับค่า SSC ที่เพิ่มขึ้นได้แก่ พิกัดความยาวคลื่น 1166 นาโนเมตร ซึ่งเป็นพิกัดการดูดกลืนแสงที่สำคัญในการทำนายค่า SSC ในผลแอปเปิลหลายพันธุ์ (Jha and Garg, 2010) และผลแอปเปิลคอก (Buyukcan and Kavdir, 2017)



ภาพที่ 2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR ผลแอปเปิ้ลที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ต่างกันสามระดับ

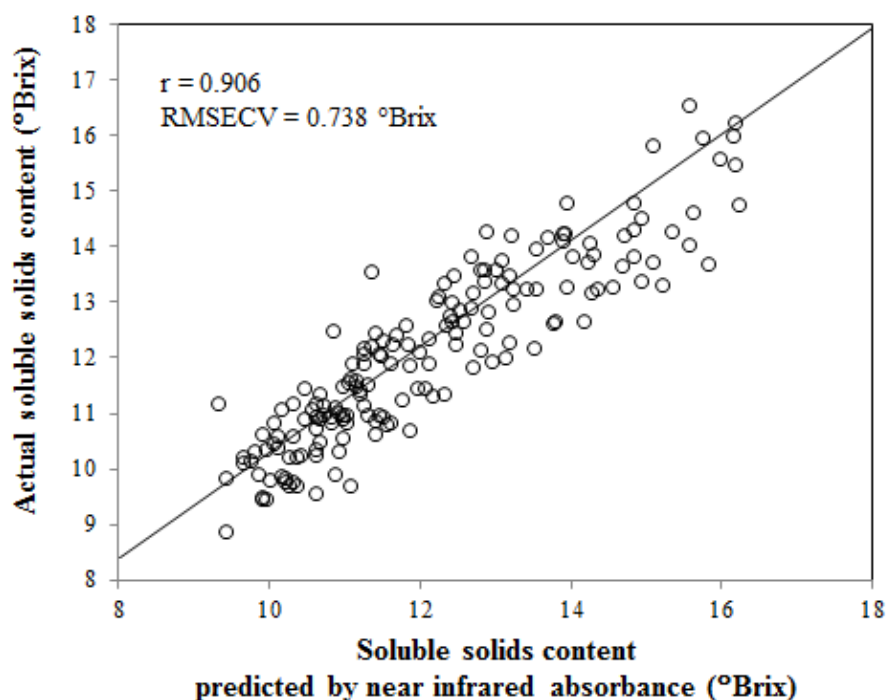


ภาพที่ 3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR ที่ผ่านการปรับด้วยเทคนิคอนุพันธ์อันดับสองแสดงให้เห็นพีคที่ชัดเจนขึ้น และแยกออกจากกัน

2. ผลการสร้างสมการทำนายค่า SSC

สมการทำนายค่า SSC ที่เหมาะสมที่สุด หลังจากการวิเคราะห์ PLSR ด้วยข้อมูลการดูดกลืนแสงที่ปรับด้วยวิธี SNV ประกอบด้วยแฟกเตอร์ 9 แฟกเตอร์ ให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่า SSC จากการทำครอสวาเลชัน ได้แก่ ค่า RMSECV เท่ากับ 0.738 °Brix และค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า

SSC ที่ทำนายจากสมการและค่า SSC อ้างอิงที่วัดจากเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ แสดงด้วยค่า r เท่ากับ 0.906 (ภาพที่ 4) ผลที่ได้มีความแม่นยำกว่าสมการที่สร้างจากข้อมูลการดูดกลืนแสงที่ไม่มีการปรับค่า ที่ประกอบด้วยแฟกเตอร์ 12 แฟกเตอร์ ให้ค่า r เท่ากับ 0.851 และ RMSECV เท่ากับ 0.801 °Brix



ภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้จากการวัดด้วยรีแฟรกโตมิเตอร์ (actual SSC) และค่าที่ทำนายจากการดูดกลืนแสง NIR (predicted SSC) ผลแอปเปิลกลุ่มสร้างสมการ

3. แอปพลิเคชันทำนายค่า SSC

แอปพลิเคชันสำหรับใช้กับสเปกโตรโฟโตมิเตอร์พกพาถูกพัฒนาด้วยโปรแกรม Android Studio ด้วยการนำชุดคำสั่งที่เป็นโอเพ่นซอร์ส จากเว็บไซต์ https://github.com/kstechnologies/NIRScanNano_Android มาปรับปรุง

แอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นทำหน้าที่ดังนี้

1. ติดต่อกับสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ผ่านบลูทูธ
2. สั่งให้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์สแกนวัด

แสงที่สะท้อนออกจากแอปเปิลและส่งมายังสมาร์ตโฟน

3. คำนวณค่า SNV ของค่าการดูดกลืนแสง

4. คำนวณค่า SSC หรือความหวานและแสดงผลบนหน้าจอสมาร์ตโฟน

ในส่วนการทำงานของแอปพลิเคชันที่เป็นการคำนวณค่า SSC นั้น เป็นการนำค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย (regression coefficients) ของสมการทำนาย SSC มาเขียนเป็นชุดคำสั่งให้คำนวณดังสมการที่ 2

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i A_i \quad (2)$$

โดยที่

y = ความหวานหรือปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (°Brix)

A_i = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น i นาโนเมตร

b_0 = สัมประสิทธิ์ถดถอยที่ค่า A_i เท่ากับศูนย์

b_i = สัมประสิทธิ์ถดถอยที่ค่า A_i ต่างๆ

การใช้งานแอปพลิเคชันเริ่มจากเปิดสัญญาณบลูทูธของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และสมาร์ตโฟน และดำเนินการดังนี้

1. กดปุ่ม CONNECT TO NIRSCAN บนแอปพลิเคชัน (ภาพที่ 5ก)

2. เมื่อสมาร์ตโฟนติดต่อกับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์สำเร็จ วางผลแอปเปิลบนสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นกดปุ่ม SCAN (ภาพที่ 5ข) สเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะฉายแสง NIR ไปยังแอปเปิล บันทึกการสะท้อนแสง และส่งข้อมูลสเปกตรัมการสะท้อนแสงมายังสมาร์ตโฟน (ภาพที่ 5ค) จากนั้นแอปพลิเคชันจะคำนวณค่าการดูดกลืนแสง แล้วปรับค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค SNV และนำค่าการดูดกลืนแสงที่ปรับด้วย SNV มาคำนวณค่า SSC ตามสมการ (2) และแสดงผลดังภาพที่ 5ง

4. ผลการทดสอบสมรรถนะการทำนายค่า SSC ของอุปกรณ์

ในการทดสอบสมรรถนะของอุปกรณ์ในการทำนายค่า SSC ของผลแอปเปิลทุกผลในกลุ่มทดสอบสมการซึ่งมีช่วงค่า SSC ตั้งแต่ 9.6 °Brix ถึง 16.2 °Brix ผลการทดสอบที่ได้แสดงในภาพที่ 6 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSC ที่ทำนายจากอุปกรณ์และค่า SSC อ้างอิง โดยมีค่า $r = 0.916$ และ $RMSEP = 0.808$ °Brix อุปกรณ์มีความแม่นยำใกล้เคียงกับการทำนายค่า SSC ของแอปเปิลพันธุ์ Golden delicious ที่ให้ค่า $r = 0.887$ (Jha and Garg, 2010) เมื่อทดสอบความแตกต่างทางสถิติระหว่างค่า SSC ที่ทำนายจาก

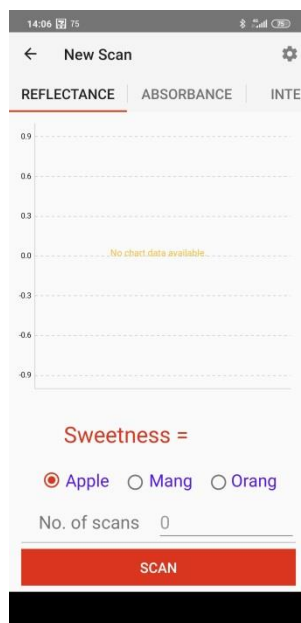
อุปกรณ์และค่า SSC อ้างอิง ด้วยเทคนิค Student's t-test แบบ paired two samples for means พบว่า ค่า SSC ทั้งสองชุดไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (p -value (two-tail) = 0.536)

มีข้อสังเกตคือ ในการทดสอบสมรรถนะการทำนายค่า SSC นี้ ค่า RMSEP มากกว่าการวิเคราะห์สร้างสมการแต่กลับให้ค่า r มากกว่าด้วยเหตุผลก็คือ ค่า r ไม่ได้เป็นค่าที่ใช้ประเมินความแม่นยำของสมการ และมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงข้อมูล ซึ่งมีการศึกษาโดย Davies and Fearn (2006) ที่พบว่า กลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม ที่มีค่า RMSEP เท่ากัน แต่กลับมีค่า r ไม่เท่ากัน เนื่องจากช่วงกว้างของข้อมูลของแต่ละกลุ่มตัวอย่างไม่เท่ากัน นอกจากนั้น ยังมีงานวิจัยที่มีผลการวิจัยสอดคล้องกับข้อสังเกตนี้ได้แก่ งานวิจัยของ Liu *et al.* (2015) ที่ศึกษาเปรียบเทียบสมการทำนายค่า SSC ในแอปเปิลที่สร้างจากสองเทคนิคและพบว่า ทั้งสองสมการให้ค่า r เท่ากับ 0.96 แต่ให้ค่า RMSEP แตกต่างกัน คือ 0.49 °Brix และ 0.45 °Brix

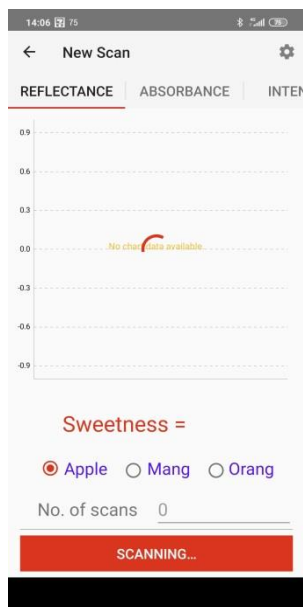
ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า อุปกรณ์วัด SSC ที่ใช้งานร่วมกับสมาร์ตโฟนที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีความแม่นยำในการวัด แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำไปใช้วัดความหวานผลแอปเปิลได้จริงโดยมีข้อดี คือ สามารถวัดได้โดยไม่ต้องทำลายตัวอย่างแสดงผลได้รวดเร็วภายใน 5 วินาที และมีขนาดเล็กพกพาได้ โดยสเปกโทรโฟโตมิเตอร์มีราคาประมาณ 50,000 บาท



ก)



ข)

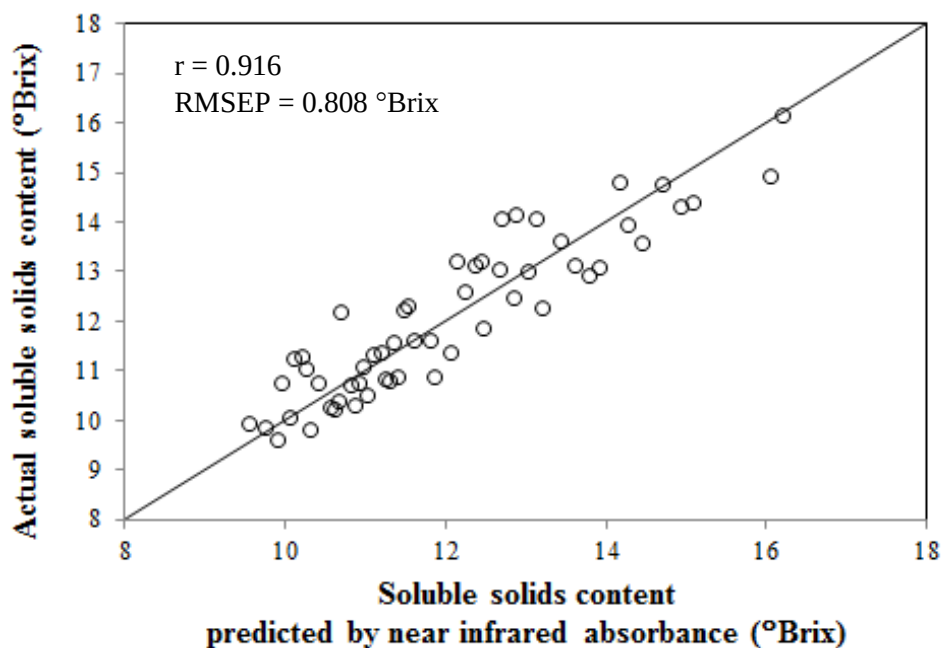


ค)



ง)

ภาพที่ 5 หน้าจอแอปพลิเคชันแสดงให้เห็น ก) หน้าจอสำหรับการติดต่อกับสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ข) หน้าจอสำหรับการสั่งทำงานสแกนผลแอปเปิ้ล ค) หน้าจอแสดงการทำงานขณะถ่ายโอนข้อมูลสเปกตรัม และ ง) หน้าจอแสดงผลค่า SSC



ภาพที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้จากการวัดด้วยรีแฟรคโตมิเตอร์ (actual SSC) และค่าที่ทำนายจากการดูดกลืนแสง NIR (predicted SSC) ผลแอปเปิลกลุ่มทดสอบสมการ

สรุป

งานวิจัยนี้พัฒนาอุปกรณ์วัดความหวาน แอปเปิลพันธุ์ฟูจิประกอบด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำงานร่วมกับสมาร์ตโฟนผ่านการติดต่อด้วยบลูทูธ อุปกรณ์มีขนาดเล็กพกพาได้ ส่วนสำคัญของอุปกรณ์ คือ ส่วนของชุดคำสั่งสำหรับการคำนวณเพื่อแสดงค่า SSC บนแอปพลิเคชัน ความแม่นยำในการทำนาย ขึ้นอยู่กับสมการทำนายที่สร้างจากความสัมพันธ์ ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง NIR กับค่า SSC อ้างอิงที่ วัดจากเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ อุปกรณ์สามารถแสดงผลได้ภายใน 5 วินาที และเมื่อนำมาทดสอบ สมรรถนะการทำนายค่า SSC กับกลุ่มแอปเปิลที่ไม่ เกี่ยวข้องกับการใช้สร้างสมการพบว่า อุปกรณ์ สามารถทำนายค่า SSC ได้แม่นยำเมื่อเทียบกับค่า SSC อ้างอิง ให้ค่า r และ $RMSEP$ เท่ากับ 0.916 และ $0.808 \text{ } ^\circ\text{Brix}$ ตามลำดับ โดยค่าทั้งสองชุดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นศักยภาพของเทคนิค NIRS ที่สามารถใช้วัดค่า SSC แบบไม่ทำลาย และสามารถนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์วัดแบบพกพาที่สามารถใช้งานจริงได้ โดยจะต้องออกแบบสร้างตัว อุปกรณ์ให้มีลักษณะเป็นกล่องบรรจุสเปกโตรโฟโต มิเตอร์ แบตเตอรี่ และมีสวิทช์สำหรับการใช้ งานบลูทูธ ขนาดกะทัดรัด ซึ่งจะทำให้สามารถ นำไปใช้งานได้จริง อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของ อุปกรณ์สามารถปรับปรุงให้สูงขึ้นได้ โดยต้องเก็บ ข้อมูลการดูดกลืนแสง NIR และค่า SSC อ้างอิงจาก ตัวอย่างในฤดูกาลอื่นๆ เพิ่มเติม แล้วนำไปรวมกับ ข้อมูลตัวอย่างเดิมที่มีอยู่ และนำข้อมูลที่รวมกันนี้มา วิเคราะห์ปรับปรุงสมการที่มีอยู่ ก็จะทำได้สมการ ที่มีความเสถียรมากขึ้นสามารถใช้วัดแสดงค่า SSC ผลแอปเปิลได้หลากหลายมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Buyukcan, M.B. and Kavdir, I. 2017. Prediction of some internal quality parameters of apricot using FT-NIR spectroscopy. **Journal of Food Measurement and Characterization** 11(2): 651-659.
- Cho, R.K., Sohn, M.R. and Kwon, Y.K. 1998. New observation of nondestructive evaluation for sweetness in apple fruit using near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 6(A): A75-A78.
- Davies, A.M.C. and Fearn, T. 2006. Back to basics: calibration statistics. **Spectroscopy Europe** 18(2): 31-32.
- Dos Santos, C.A.T., Lopo, M., Páscoa, R.N. and Lopes, J.A. 2013. A review on the applications of portable near-infrared spectrometers in the agro-food industry. **Applied spectroscopy** 67(11): 1215-1233.
- Guo, Z., Wang, M., Agyekum, A.A., Wu, J., Chen, Q., Zuo, M., El-Seedi, H.R., Tao, F., Shi, J., Ouyang, Q. and Zou, X. 2020. Quantitative detection of apple watercore and soluble solids content by near infrared transmittance spectroscopy. **Journal of Food Engineering** 279: 109955.
- Huang, J., Romero-Torres, S. and Moshgbar, M. 2010. Practical Considerations in Data Pre-treatment for NIR and Raman Spectroscopy. **American Pharmaceutical Review** 13: 116.
- Jha, S.N. and Garg, R. 2010. Non-destructive prediction of quality of intact apple using near infrared spectroscopy. **Journal of Food Science and Technology** 47(2): 207-213.
- Liu, R., Qi, S., Lu, J. and Han, D. 2015. Measurement of soluble solids content of three fruit species using universal near infrared spectroscopy models. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 23(5): 301-309.
- Lu, R. and Ariana, D. 2002. A near-infrared sensing technique for measuring internal quality of apple fruit. **Applied Engineering in Agriculture** 18(5): 585.
- Osborne, B.G. and Fearn T. 1986. **Near Infrared Spectroscopy in Food Analysis**. Longman Science & Technical, London.
- Sharabiani, V.R., Sabzi, S., Pourdarbani, R., Solis-Carmona, E., Hernández-Hernández, M. and Hernández-Hernández, J.L. 2020. Non-Destructive Prediction of Titratable Acidity and Taste Index Properties of Gala Apple Using Combination of Different Hybrids ANN and PLSR-Model Based Spectral Data. **Plants** 9(12): 1718.
- Trimble, S. 2019. **Brix as a metric of fruit maturity. Felix Instruments: Applied Food Science**. Available Source: <https://felixinstruments.com/blog/brix-as-a-metric-of-fruit-maturity/>, May 26, 2021.
- Ventura, M., de Jager, A., de Putter, H. and Roelofs, F.P. 1998. Non-destructive determination of soluble solids in apple fruit by near infrared spectroscopy (NIRS). **Postharvest Biology and Technology** 14(1): 21-27.
- Williams, P. and Norris, K. 2001. **Near Infrared Technology in Agricultural and Food Industries**. 2nd ed. American Association

of Cereal Chemists, Inc. St. Paul, Minnesota,
USA.

infrared spectroscopy. CRC press, Boca
Raton.

Workman Jr.J. and Weyer, L. 2012. **Practical guide
and spectral atlas for interpretive near-**