



เครื่องวัดความหวานผลแอปเปิลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

ศุภชัย กุลมุติวัดน์ และ อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล*

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 6775 1723 อีเมล: fengant@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.09.007

รับเมื่อ 3 สิงหาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 27 ตุลาคม 2563 ตอรับเมื่อ 1 ธันวาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 27 กันยายน 2564

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาเครื่องวัดความหวานของแอปเปิลแบบไม่ทำลายผลด้วยค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared; NIR) ที่วัดในแบบสะท้อนกลับ เครื่องเป็นแบบพกพามีขนาดกว้าง 23.6 ซม. ยาว 35 ซม. และสูง 25 ซม. ประกอบด้วยกล่องวางแอปเปิล แหล่งกำเนิดแสง สเปกโตรมิเตอร์ เส้นใยนำแสงสะท้อน และคอมพิวเตอร์ควบคุม ในการสร้างสมการประเมินความหวานสำหรับนำมาเขียนรหัสคำสั่งในโปรแกรมควบคุม ใช้แอปเปิลพันธุ์ฟูจิ 100 ผล มาวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ในช่วงความยาวคลื่น 900 ถึง 1700 นาโนเมตร และค่าความหวาน (ปริมาณของแข็งที่ละลายได้) แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Partial Least Squares Regression Analysis สมรรถนะของสมการทำนายความหวานที่สร้างให้ค่า Correlation Coefficient (r) เท่ากับ 0.81 และค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (Root Mean Square Error of Prediction; RMSEP) เท่ากับ 0.69 °Brix สำหรับการทดสอบความแม่นยำในการวัดความหวานผลแอปเปิลของเครื่องวัดความหวาน นำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากสมการประเมินความหวานมาเขียนรหัสคำสั่งในโปรแกรม แล้วทดสอบแอปเปิลพันธุ์ฟูจิที่ซื้อมาที่ช่วงเวลาแตกต่างจากแอปเปิลที่ใช้สร้างสมการ โดยนำมาวัดการดูดกลืนแสง NIR ด้วยเครื่องวัดความหวานพบว่าเครื่องให้ความแม่นยำการประเมินค่าความหวานเปรียบเทียบกับค่าความหวานอ้างอิง ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (RMSEP) เท่ากับ 0.75 °Brix เครื่องวัดความหวานด้วยการวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้สามารถวัดความหวานของแอปเปิลได้ภายในเวลา 5 วินาที

คำสำคัญ: ความหวาน การวัดแบบไม่ทำลาย สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้



A Device for Measuring Apple Sweetness Using Near Infrared Spectroscopy

Supachai Kulmutiwat and Anupun Terdwongworakul*

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

* Corresponding Author, Tel. 08 6775 1723, E-mail: fengant@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.09.007.

Received 3 August 2020; Revised 27 October 2020; Accepted 1 December 2020; Published online: 27 September 2021

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research developed an apple sweetness-measuring device without damaging the apple fruit by near-infrared absorbance measured in reflectance mode. The portable device was 23.6 cm wide, 35 cm long and 25 cm high. It consisted of a sample holder box, light source, spectrometer, reflectance carrying fiber optic, and controlling computer. In the development of the sweetness evaluation equation for coding in the controlling program, one hundred apples of Fuji cultivar were measured for Near-infrared (NIR) absorbance in a wavelength range of 900 to 1700 nm and sweetness in terms of soluble solids content, which were used to develop the sweetness evaluating equation by partial least squares regression analysis. The performance of the equation for sweetness evaluation was achieved with a correlation coefficient (r) of 0.81 and Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP) of 0.69 °Brix. For testing the accuracy of the sweetness-measuring device, the regression coefficients of the evaluation equation were coded as a part of the controlling program for sweetness evaluation. Apples purchased at a different time from those used in the equation development were tested by measuring the NIR absorbance on the device. The sweetness evaluation performance, comparing the evaluated sweetness and the reference sweetness showed accuracy with RMSEP of 0.75 °Brix. The sweetness-measuring device based on NIR absorbance could be used to evaluate the sweetness of an apple and show the sweetness result within 5 seconds.

Keywords: Sweetness, Non-destructive Evaluation, Near Infrared Spectroscopy



1. บทนำ

แอปเปิลเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการประกอบด้วยแร่ธาตุ และวิตามินที่มีประโยชน์อย่างมากต่อร่างกาย เช่น วิตามินเอ วิตามินบี 1 วิตามินซี กรดโฟลิก [1] แอปเปิลเป็นผลไม้ที่เหมาะกับสุขภาพ อย่างไรก็ตาม ผู้บริโภคจะชอบบริโภคแอปเปิลที่มีความหวานตามต้องการ แต่ในการเลือกซื้อสามารถพิจารณาได้เฉพาะลักษณะภายนอก เช่น สี รูปร่าง รอยขีด หรือความแน่นเนื้อผล ในทางปฏิบัติความหวานสามารถหาได้ด้วยการนำน้ำคั้นของแอปเปิลมาวัดด้วยเครื่องมือ ซึ่งไม่สามารถทำได้ในการเลือกซื้อในตลาดหรือซูเปอร์มาร์เก็ตเพราะต้องทำลายผล ในการเลือกซื้อผลแอปเปิลผู้บริโภคจึงต้องยอมรับความเสี่ยงที่จะได้แอปเปิลที่มีคุณภาพความหวานไม่ตรงกับที่ต้องการ

ในปัจจุบัน เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy; NIRS) เป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ในการนำมาประยุกต์ใช้วัดคุณภาพภายในของผลไม้ [2] โดย NIRS เป็นเทคนิคที่วัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณองค์ประกอบในตัวอย่างที่เป็นสารอินทรีย์ เป็นเทคนิคที่วัดได้รวดเร็วและไม่ทำลายตัวอย่าง การวัดการดูดกลืนแสง NIR ทำได้หลายรูปแบบ ถ้าต้องการวัดปริมาณคุณภาพที่เนื้อผลไม้ใกล้ผิวจะนิยมใช้รูปแบบการวัดแบบสะท้อน (Reflectance) เทคนิค NIRS ถูกนำมาวิจัยในการประเมินคุณภาพภายในของแอปเปิล เช่น ความหวาน หรือปริมาณของแข็งละลายได้ (Total Soluble Solids; TSS) และความเป็นกรด (Acidity) ด้วยรูปแบบการวัดแบบสะท้อน [3]–[7] ในกรณีที่มีปริมาณที่ต้องการวัดอยู่ลึกเข้าไปในผลจะต้องใช้รูปแบบการวัดแบบส่องผ่าน (Transmittance) ซึ่งมีการวิจัยที่นำเทคนิค NIRS มาใช้เพื่อหาปริมาณแกนน้ำ (Water Core) ในผลแอปเปิลด้วยการวัดแบบส่องผ่าน [8] เครื่องมือสำหรับเทคนิค NIRS มีทั้งเป็นแบบใช้งานในห้องปฏิบัติการและแบบพกพา โดยเครื่องแบบพกพาจะมีสมรรถนะด้อยหลักในด้าน Signal to Noise Ratio แต่ก็มีข้อได้เปรียบที่ราคาถูกกว่าและมีขนาดเล็ก [9] มีการวิจัยที่ใช้เครื่องแบบพกพาประเมินความหวานของแอปเปิล [10], [11] และแพร์ [12] เครื่องมือแบบพกพาเป็นเครื่องมือ

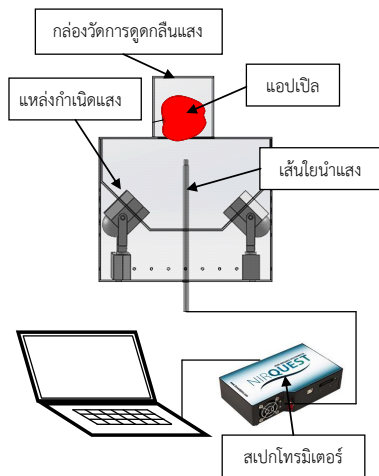
ที่มีศักยภาพในการนำไปพัฒนาเป็นเครื่องมือวัดคุณภาพผลไม้ในซูเปอร์มาร์เก็ตเพื่อลดความเสี่ยงผู้บริโภค ประเทศญี่ปุ่นมีเครื่องวัดความหวานผลไม้ติดตั้งให้ผู้บริโภคใช้งานในซูเปอร์มาร์เก็ต แต่ในประเทศไทยยังไม่มีการพัฒนาเครื่องประเภทนี้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาเครื่องวัดความหวานผลแอปเปิลอัตโนมัติด้วยเทคนิค NIRS โดยใช้ร่วมกับสเปกโตรมิเตอร์ NIR แบบพกพา

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 เครื่องวัดความหวานผลแอปเปิล

เครื่องวัดความหวานถูกออกแบบให้วัดผลไม้ในรูปแบบการสะท้อนกลับ ประกอบด้วย กล้องวัดการดูดกลืนแสง สเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา คอมพิวเตอร์พกพา และโปรแกรมควบคุม (รูปที่ 1) โดยขนาดของกล่องมีความกว้าง 23.6 ซม. ความยาว 35 ซม. ความสูง 25 ซม. ด้านบนเจาะช่องวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ซม. สำหรับวางผลแอปเปิลในขณะวัด (รูปที่ 1) เครื่องมีฝาครอบผลไม้ด้านบนเพื่อป้องกันแสงภายนอกเข้ามายังอุปกรณ์วัดการสะท้อนแสงแบบเส้นใยนำแสง ภายในกล่องติดตั้งหลอดไฟขนาด 50 วัตต์ 12 โวลต์ 2 หลอด ทำมุม 45 องศา กับแนวระดับ เพื่อให้แนวลำแสงส่องที่ด้านล่างของผลแอปเปิล อุปกรณ์วัดแสงสะท้อนแบบเส้นใยนำแสงถูกติดตั้งให้อยู่ด้านใต้ช่องวงกลมวางผลแอปเปิลห่างเป็นระยะ 2 ซม. ทำหน้าที่นำแสงสะท้อนจากแอปเปิลเข้าสู่สเปกโตรมิเตอร์เพื่อนำมาคำนวณการดูดกลืนแสง ตัวกล่องทำจากแผ่นอะคริลิกสีดำ เพื่อป้องกันแสงจากภายนอกส่องผ่านเข้ามาภายในตัวกล่องซึ่งจะทำให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงคลาดเคลื่อน

รูปที่ 1 แสดงเครื่องวัดความหวานประกอบด้วยกล่องวัดความหวาน ติดตั้งเส้นใยนำแสงเชื่อมต่อเข้ากับสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา (NIR Quest, USB2 0 0 0, Ocean Optics Co., Ltd., Dunedin, FL, USA) ที่มีตัวตรวจหา (Detector) เป็นแบบแถวลำดับไดโอดมีช่วงการวัดแสง NIR ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 900 ถึง 1700 นาโนเมตร มีความละเอียดความยาวคลื่นเท่ากับ 3 นาโนเมตร คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของสเปกโตรมิเตอร์ผ่านโปรแกรมควบคุมที่พัฒนาด้วยภาษา



รูปที่ 1 เครื่องวัดความหวานผลแอปเปิล

Visual C# 2010 Express (Microsoft, USA) โปรแกรมควบคุมประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของสเปกโตรมิเตอร์ได้แก่ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการวัด การสั่งให้เริ่มวัดการสะท้อนแสง และการอ่านค่าการสะท้อนแสง และส่วนที่สองทำหน้าที่คำนวณและแสดงผล โดยเป็นส่วนที่คำนวณค่าการดูดกลืนแสงจากค่าการสะท้อนแสงและคำนวณค่าความหวานที่เป็นผลลัพธ์เพื่อแสดงบนหน้าแสดงผลของคอมพิวเตอร์

2.2 การสร้างสมการวัดความหวาน

ส่วนสำคัญของโปรแกรมควบคุม คือ ส่วนที่ทำหน้าที่คำนวณผลลัพธ์ความหวานจากค่าการดูดกลืนแสงด้วยสมการประเมินความหวานที่เป็นสมการถดถอยพหุคูณ ดังสมการที่ (1)

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

โดย

y = ความหวานหรือปริมาณของแข็งละลายได้ ($^{\circ}$ Brix)

$A_{i,i}$ = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น i นาโนเมตร

b_0 = สัมประสิทธิ์ถดถอยที่ค่า $A_{i,i}$ เท่ากับศูนย์

b_i = สัมประสิทธิ์ถดถอยที่ค่า $A_{i,i}$ ต่างๆ

ค่าการดูดกลืนแสงคำนวณจากสมการที่ (2)

$$A = \log \left(\frac{I_R - I_D}{I_S - I_D} \right) \quad (2)$$

โดย

I_R = ค่าการสะท้อนแสงจากวัสดุอ้างอิงมาตรฐาน

I_D = ค่าการสะท้อนแสงเมื่อไม่มีแสง (Dark Current)

I_S = ค่าการสะท้อนแสงของตัวอย่าง

การสร้างสมการประเมินความหวานก็คือ การหาค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย โดยนำข้อมูลการดูดกลืนแสง และค่าความหวานหรือค่า TSS ของตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยการถดถอยพหุคูณแบบ Partial Least Squares Regression โดยมีรายละเอียดดังนี้

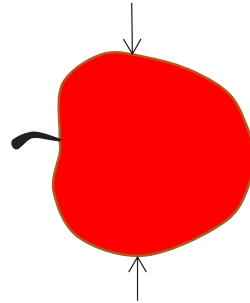
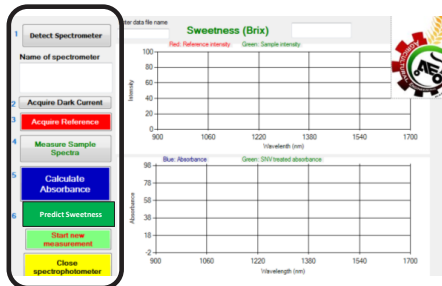
2.2.1 การเตรียมตัวอย่างผลแอปเปิล

ชื่อแอปเปิลพันธุ์ฟูจิจากซูเปอร์มาเก็ต อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ในช่วงเดือนสิงหาคม ถึง กันยายน พ.ศ. 2562 สัปดาห์ละ 25 ผล จำนวน 4 สัปดาห์ รวม 100 ผล เพื่อให้ได้ตัวอย่างแอปเปิลที่มีค่าความหวานที่หลากหลายและเป็นแอปเปิลที่มีการเก็บเกี่ยวจากหลายต้น นำผลแอปเปิลมาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม. ก่อนเก็บข้อมูล

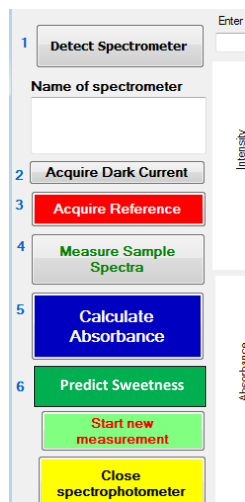
แอปเปิลกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่ใช้สร้างสมการประเมินความหวาน (Calibration Set) ซึ่งประเมินความแม่นยำของสมการด้วยเทคนิคครอสวาเลชัน (Cross Validation) [13], [14]

2.2.2 การวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้

บันทึกค่า I_D ของสมการ (2) โดยการปิดปลายสายเส้นใยนำแสงเพื่อไม่ให้แสงเข้าสู่สเปกโตรมิเตอร์แล้ว กดปุ่มบันทึกค่าที่โปรแกรมควบคุม (รูปที่ 2) ต่อมานำแท่งสเปกตราลอน (Spectralon) ที่มีสมบัติการสะท้อนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ที่สูงวางบนกล่องวัดการดูดกลืนแสงปิดฝาครอบ แล้วกดปุ่มบันทึกค่า I_R ที่โปรแกรมควบคุมเสร็จแล้ว นำผลแอปเปิลวางบนกล่องวัดโดยให้แกนขั้วอยู่ในแนวนอน (รูปที่ 2 และรูปที่ 3) ปิดฝาครอบและกดปุ่มบันทึกค่า I_S ที่โปรแกรมควบคุม โดยแต่ละครั้งจะบันทึกค่า I_S สองครั้งแล้วคำนวณค่าเฉลี่ยสำหรับนำไปวิเคราะห์สร้างสมการ



รูปที่ 3 ตำแหน่งการวัดการดูดกลืนแสงบนผลแอปเปิล



รูปที่ 2 โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องวัดความหวานผลแอปเปิล

แอปเปิลแต่ละผลจะถูกวัดสองครั้ง คือ ครั้งที่หนึ่งวัดที่ตำแหน่งบนแก้มผลตามรูปที่ 3 (ตำแหน่งตรงกลางระหว่างส่วนหัวและปลายผล) และครั้งที่สองที่ด้านตรงข้าม โดยหมุนผลแอปเปิลรอบแกนแนวซั้วผล 180 องศา และวางบนกล่องซึ่งจะทำให้ได้ค่า I_s เฉลี่ยสองค่า และโปรแกรมจะนำมาคำนวณเป็นค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 900 ถึง 1700 นาโนเมตร สำหรับแอปเปิลแต่ละผลจะได้สเปกตรัมเฉลี่ยสองค่า

2.2.3 การวัดค่าความหวาน

ตัดเนื้อแอปเปิลตรงบริเวณที่วัดการดูดกลืนแสงที่ความลึกจากผิว 2 ซม. ขนาด 2 ซม. × 2 ซม. × 2 ซม. นำมาห่อด้วยผ้าขี้สาลี ใช้อุปกรณ์คั้นน้ำผลไม้แบบมือโยกบีบกรองน้ำ

และนำน้ำที่ได้มาวัดความหวานหรือปริมาณของแข็งที่ละลายได้ด้วยเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ (Refractometer, PR-32, Palette Series, Atago Co., Ltd., Tokyo, Japan) จำนวน 2 ครั้ง แล้วนำค่ามาเฉลี่ย

2.2.4 การวิเคราะห์สร้างสมการประเมินความหวาน

ความแตกต่างทางลักษณะทางกายภาพของผิวแอปเปิลในแต่ละตัวอย่างมีผลกระทบต่อค่าการดูดกลืนแสงตลอดช่วงความยาวคลื่น เนื่องจากการกระเจิงแสงที่แตกต่างกัน [15] ดังนั้นก่อนที่จะนำข้อมูลการดูดกลืนแสงไปวิเคราะห์ จึงต้องนำมาปรับด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์เพื่อลดผลกระทบจากการกระเจิงแสง เทคนิคดังกล่าว ได้แก่ Second Derivative (SD), Multiplicative Scatter Correction (MSC) และ Standard Normal Variate (SNV) เทคนิค SD ปรับแก้ด้วยการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสองของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง เทคนิค MSC คำนวณสัมประสิทธิ์ปรับแก้โดยการวิเคราะห์ถดถอยระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ต้องการปรับกับค่าการดูดกลืนแสงอ้างอิง และเทคนิค SNV ปรับแก้โดยการคำนวณค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยและนำมาลบออกจากค่าการดูดกลืนแสงที่ต้องการปรับ ทั้งสามเทคนิคลดผลกระทบจากการกระเจิงแสงใกล้เคียงกัน [15], [16] อย่างไรก็ตาม การเขียนรหัสคำสั่งโปรแกรมคำนวณสำหรับเทคนิค SNV ใช้คำสั่งที่น้อยกว่าเทคนิคอื่น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกเทคนิค SNV ในการปรับข้อมูลการดูดกลืนแสง

ดังนั้นก่อนการวิเคราะห์จะนำข้อมูลการดูดกลืนแสงมาปรับด้วยวิธี SNV ตามสมการที่ (3) เพื่อลดอิทธิพลของการกระเจิงแสงที่เกิดจากผิวแอปเปิลแต่ละผลมีความเรียบ

ศุภชัย กุลมณีวัฒน์ และ อนุพันธ์ เทอดดวงศ์วรกุล, “เครื่องวัดความหวานผลแอปเปิลด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้.”

ไม่เท่ากันแล้วใช้ค่าที่ได้เป็นตัวแปรอิสระ (A_{xi}^*) และใช้ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้หน่วยเป็น องศาบริกซ์ ($^{\circ}\text{Brix}$) เป็นตัวแปรตาม (y) มาสร้างสมการประเมินความหวานด้วยการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณแบบ Partial Least Squares Regression โดยเลือกจำนวนแพกเตอร์ในสมการ และประเมินความแม่นยำของสมการด้วยเทคนิคครอสวาไลเดชัน [13], [14] ซึ่งเป็นเทคนิคที่เริ่มจากกำหนดให้สมการมีหนึ่งแพกเตอร์ ด้วยการดึงข้อมูลออกมาหนึ่งตัวอย่างแล้วนำข้อมูลที่เหลือมาสร้างสมการ เมื่อได้สมการแล้วจึงนำไปประเมินความหวานของตัวอย่างหนึ่งตัวอย่างที่ไม่ได้ใช้สร้างสมการดังกล่าวเพื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP) ตามสมการที่ (4) ต่อจากนั้นก็เปลี่ยนตัวอย่างที่ถูกดึงออกมาหนึ่งตัวอย่าง วิเคราะห์สร้างสมการซ้ำจากจำนวนตัวอย่างที่เหลือจนกระทั่งทุกตัวอย่างถูกดึงออกมาและถูกประเมินความหวานเพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยของ RMSEP ของสมการที่สร้าง การสร้างสมการเริ่มจากหนึ่งแพกเตอร์ คำนวณค่าเฉลี่ย RMSEP และเพิ่มจำนวนแพกเตอร์ในสมการจนกระทั่งได้จำนวนแพกเตอร์ที่ทำให้สมการมีค่าเฉลี่ย RMSEP ต่ำที่สุด จึงใช้เป็นสมการในการนำไปเขียนรหัสคำสั่งในโปรแกรมของเครื่องวัดความหวานต่อไป

$$A_{xi}^* = \frac{A_{xi} - \bar{A}}{SD} \quad (3)$$

โดย

A_{xi}^* = ค่าการดูดกลืนแสงที่ปรับด้วยเทคนิค SNV ที่ความยาวคลื่น i นาโนเมตร

A_{xi} = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น i นาโนเมตร

SD = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า A_{xi} ทุกความยาวคลื่น

$$RMSEP = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_n (\hat{y}_n - y_n)^2} \quad (4)$$

โดย

\hat{y}_n = ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ที่คำนวณจากสมการ

y_n = ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ที่วัดจากรีแฟรคโตมิเตอร์ (ค่าอ้างอิงหรือค่าจริง)

สัมประสิทธิ์ถดถอยของสมการประเมินความหวานที่ได้จากการวิเคราะห์จะถูกนำมาเขียนรหัสคำสั่งในโปรแกรมควบคุมในส่วนคำนวณแสดงผลพีชคณิตความหวาน โดยเมื่อต้องการทราบความหวานของผลแอปเปิลให้นำผลแอปเปิลมาวางบนกล่องวัดการดูดกลืนแสง ปิดฝาครอบ แล้วกดปุ่มคำนวณความหวานที่โปรแกรมควบคุมบนคอมพิวเตอร์ เครื่องวัดความหวานจะฉายแสงไปยังผลแอปเปิลและวัดค่าการสะท้อนแสง คำนวณค่าการดูดกลืนแสง คำนวณค่าการดูดกลืนแสงปรับด้วยเทคนิค SNV และนำมาป้อนในสมการที่ (1) ซึ่งจะนำค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยคูณกับค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความยาวคลื่นแล้วนำมารวมกันก็จะได้ค่าความหวาน โดยโปรแกรมจะแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์พกพา

2.3 การทดสอบค่าความหวานด้วยเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์

นำผลแอปเปิลพันธุ์ฟูจิ 30 ผล ที่ซื้อจากซูเปอร์มาเก็ตอำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2563 มาวัดความหวานบนเครื่องวัดความหวาน บันทึกค่าความหวาน หรือปริมาณของแข็งที่ละลายได้ที่แสดงเป็นผลลัพธ์ที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ จากนั้นนำผลแอปเปิลทั้งหมดมาตัดเนื้อบริเวณที่วัดความหวานมีขนาดดังในหัวข้อ 2.2.3 ขึ้นและกรองน้ำ และนำมาวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้จากเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ นำค่าที่คำนวณจากเครื่องวัดความหวานที่พัฒนาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์และคำนวณความแตกต่างเป็นค่า RMSEP

3. ผลการทดลอง

3.1 โปรแกรมควบคุม

โปรแกรมควบคุมการทำงานและแสดงผลเครื่องวัดความหวานพัฒนาด้วยภาษา C# Express 2010 มีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 ปุ่มสำหรับติดต่อกับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

เมื่อกดปุ่มนี้ (ปุ่ม Detect Spectrometer ในรูปที่ 2) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์จะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางสาย USB เมื่อคอมพิวเตอร์เชื่อมต่อกับสเปกโตรมิเตอร์สำเร็จจะแสดงรุ่นของสเปกโตรมิเตอร์ที่ช่องแสดงผลด้านใต้ปุ่ม



3.1.2 ปุ่มสแกนบันทึกความเข้มแสงเมื่อไม่มีสัญญาณก่อนใช้งานเครื่องจะต้องปิดปลายสายใยแก้วนำแสงสัญญาณ แล้วกดปุ่มสแกนเพื่อบันทึกค่าความเข้มแสงกรณีไม่มีสัญญาณ (I_D) (ปุ่ม Acquire Dark Current ในรูปที่ 2) ซึ่งจะส่งข้อมูลมาที่คอมพิวเตอร์และแสดงสเปกตรัมความเข้มแสงแบบไม่มีสัญญาณที่ส่วนแสดงกราฟด้านขวาส่วนบน

3.1.3 ปุ่มสแกนบันทึกความเข้มแสงวัสดุมาตรฐานบันทึกโดยนำแท่งสเปกตราลอนที่มีการสะท้อนแสงสูงมาวางบนเครื่องแล้วกดปุ่มบันทึกความเข้มแสงวัสดุมาตรฐาน (I_R) (ปุ่ม Acquire Reference ในรูปที่ 2) ซึ่งจะส่งข้อมูลมาที่คอมพิวเตอร์และแสดงสเปกตรัมความเข้มแสงวัสดุมาตรฐานที่ส่วนแสดงกราฟด้านขวาส่วนบน

3.1.4 ปุ่มสแกนตัวอย่าง

นำตัวอย่างวางบนเครื่องแล้วกดปุ่มสแกนตัวอย่าง (ปุ่ม Measure Sample Spectra ในรูปที่ 2) สเปกโทรมิเตอร์จะบันทึกความเข้มแสงที่สะท้อนจากผลแอปเปิล (I_s) ผ่านสายใยแก้วนำแสงเข้าสู่สเปกโทรมิเตอร์และส่งข้อมูลมาที่คอมพิวเตอร์และแสดงสเปกตรัมตัวอย่างที่ส่วนแสดงกราฟด้านขวาส่วนล่าง

3.1.5 ปุ่มคำนวณการดูดกลืนแสง

เมื่อกดปุ่มนี้ (ปุ่ม Calculate Absorbance ในรูปที่ 2) คอมพิวเตอร์จะนำค่าความเข้มแสงในข้อ 3.1.2, 3.1.3 และ 3.1.4 มาคำนวณตามสมการที่ (2) และแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ส่วนแสดงกราฟด้านขวาส่วนล่าง

3.1.6 ปุ่มประเมินความหวาน

กดปุ่มนี้ (ปุ่ม Predict Sweetness ในรูปที่ 2) เพื่อคำนวณค่าความหวานและแสดงผลในหน่วย °Brix โดยโปรแกรมจะนำค่าการดูดกลืนแสงมาปรับด้วยเทคนิค SNV แล้วนำมาคูณกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเพื่อให้ได้ค่าความหวาน และแสดงในช่อง Sweetness (°Brix) ในรูปที่ 2

3.1.7 ปุ่มเริ่มการวัดตัวอย่างใหม่

ปุ่มนี้ใช้สำหรับวัดตัวอย่างต่อไป (ปุ่ม Start New Measurement ในรูปที่ 2) เมื่อวางตัวอย่างที่ต้องการทราบความหวานบนเครื่อง ให้กดปุ่มประเมินความหวานโดยตรงและไม่ต้องกดปุ่มสำหรับติดต่อกับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ถึง

ปุ่มคำนวณการดูดกลืนแสงอีก เครื่องก็จะแสดงค่าความหวาน

3.1.8 ปุ่มปิดเครื่อง

ใช้สำหรับตัดการเชื่อมต่อกับสเปกโทรมิเตอร์เมื่อเสร็จสิ้นการใช้งาน (ปุ่ม Close Spectrophotometer ในรูปที่ 2)

ปุ่มสำหรับติดต่อกับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ ปุ่มสแกนบันทึกความเข้มแสงเมื่อไม่มีสัญญาณ และปุ่มสแกนบันทึกความเข้มแสงวัสดุมาตรฐานจะกดเพียงครั้งเดียวเมื่อเริ่มใช้งานจนเสร็จสิ้น โดยโปรแกรมจะเก็บค่าไว้สำหรับคำนวณค่าการดูดกลืนแสงครั้งต่อไป ส่วนปุ่มสแกนตัวอย่าง และปุ่มคำนวณการดูดกลืนแสงใช้สำหรับบันทึกข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างแอปเปิล เพื่อนำไปสร้างสมการประเมินความหวานร่วมกับค่าความหวานที่วัดจากเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์

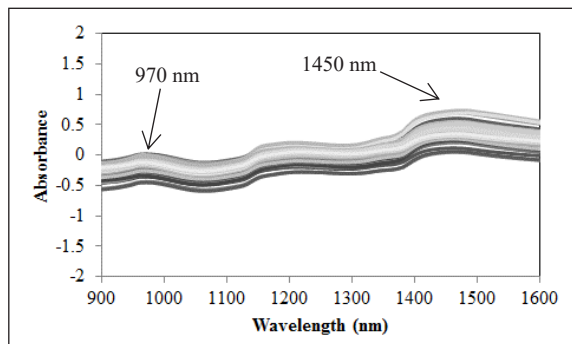
เมื่อได้สมการประเมินความหวาน และนำไปเขียนรหัสคำสั่งในโปรแกรมเรียบบร๊อย การใช้งานเครื่องจริงก็จะทำโดยกดปุ่มสำหรับติดต่อกับเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ ปุ่มสแกนบันทึกความเข้มแสงเมื่อไม่มีสัญญาณ และปุ่มสแกนบันทึกความเข้มแสงวัสดุมาตรฐานจะกดเพียงครั้งเดียว ต่อจากนั้นก็ใช้ปุ่มประเมินความหวานกับปุ่มเริ่มการวัดตัวอย่างใหม่เท่านั้นในการวัดความหวานผลแอปเปิลที่ต้องการ

3.2 การดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ของผลแอปเปิล

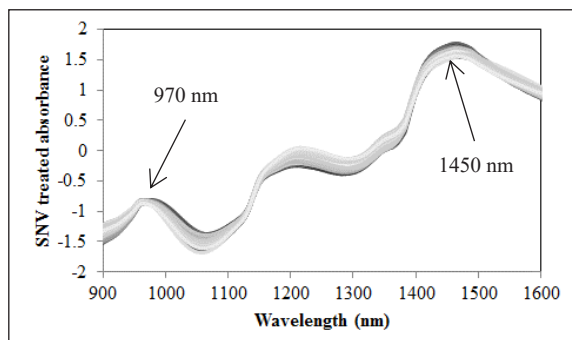
รูปที่ 4 (ก) แสดงสเปกตรากการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ของผลแอปเปิลก่อนการปรับแก้ซึ่งจะพบว่า แอปเปิลมีพีคการดูดกลืนแสงที่เกี่ยวข้องกับน้ำที่ความยาวคลื่น 970 นาโนเมตร และ 1450 นาโนเมตร [17] สอดคล้องกับสเปกตรากของแอปเปิลพันธุ์ 'Golden Delicious' [7] อย่างไรก็ตาม สเปกตรัมจะมีความแตกต่างในค่าการดูดกลืนแสงตลอดช่วงความยาวคลื่นซึ่งเกิดจากการกระเจิงแสงอันเนื่องมาจากความแตกต่างของผิวแอปเปิล เมื่อปรับแก้การกระเจิงแสงด้วยเทคนิค SNV จะพบว่า ความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสงจะลดลง และพีคการดูดกลืนแสงที่เกี่ยวข้องกับน้ำมีความเด่นชัดขึ้น

3.3 ผลการวิเคราะห์สร้างสมการประเมินความหวาน

แอปเปิลพันธุ์ฟูจิที่ใช้ในการสร้างสมการประเมินความหวานมีช่วงค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ตั้งแต่ 10.1 ถึง



(ก)



(ข)

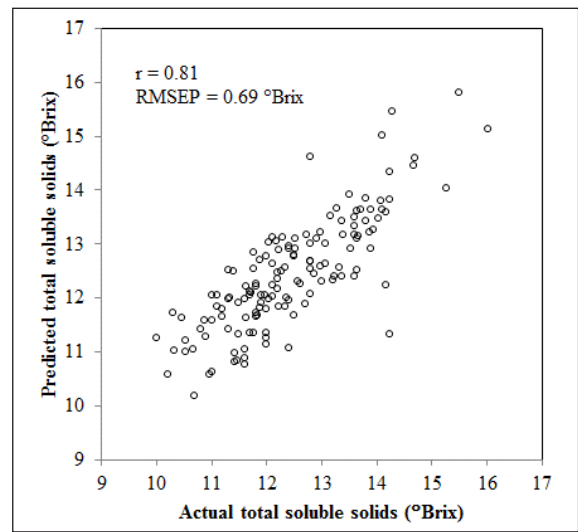
รูปที่ 4 (ก) สเปกตรากการดูดกลืนแสงก่อนการปรับแก้ และ (ข) สเปกตรากการดูดกลืนแสงหลังการปรับแก้ด้วยเทคนิค Standard Normal Variate

16.0 °Brix และมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 12.4 °Brix และ 1.2 °Brix ตามลำดับ (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ค่าสถิติพื้นฐานปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของตัวอย่างแอปเปิลพันธุ์ฟูจิที่ใช้ในการสร้างสมการ

ค่าสถิติพื้นฐาน	ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (°Brix)
ค่าน้อยที่สุด	10.1
ค่าเฉลี่ย	12.4
ค่ามากที่สุด	16.0
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.2

ในการวิเคราะห์หัตถดถอยพหุคูณเพื่อสร้างสมการประเมินความหวานด้วยเทคนิค Partial Least Squares Analysis



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้จากการวัดด้วยรีแฟรคโตมิเตอร์ และค่าที่ประเมินจากการดูดกลืนแสง

โดยใช้ค่าการดูดกลืนแสง NIR ที่วัดจากอุปกรณ์เป็นตัวแปรอิสระ และค่าความหวาน (ปริมาณของแข็งละลายได้) ที่วัดด้วยรีแฟรคโตมิเตอร์ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงเป็นตัวแปรตาม สมการที่เหมาะสมที่สุดเป็นสมการที่มีแฟกเตอร์เท่ากับ 12 แฟกเตอร์ โดยให้ค่าความแม่นยำในการประเมินค่าความหวาน (TSS) ของตัวอย่างตามวิธีโครสวาไลเดชันแสดงเป็นค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (RMSEP) เท่ากับ 0.69 °Brix (รูปที่ 5) โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้จากการวัดด้วยรีแฟรคโตมิเตอร์ (Actual TSS) และค่าที่ประเมินจากการดูดกลืนแสง (Predicted TSS) แสดงด้วยค่า Correlation Coefficient (r) เท่ากับ 0.81 (รูปที่ 5) โดยจากเกณฑ์ประเมินความแม่นยำในการประเมินสมการของ Williams [18] สมการที่ได้สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าอย่างหายๆ ผลความแม่นยำที่ได้มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Jha และ Garg [7] ที่สร้างสมการจากการดูดกลืนแสง NIR ในช่วงความยาวคลื่นเดียวกัน สำหรับแอปเปิลพันธุ์ ‘Golden Delicious’ และ ‘Red Delicious’ ซึ่งให้ผลความแม่นยำของค่า r และ $RMSEP$ เท่ากับ 0.89 และ 0.75 °Brix ตามลำดับ



อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับ การวัดความหวาน แอปเปิลพันธุ์ฟูจิเหมือนกัน ผลความแม่นยำที่ได้จากงานวิจัยนี้ ต่ำกว่าเครื่องวัดความหวานแอปเปิลแบบพกพาของ Fan และคณะ [11] ที่ใช้สเปกโตรมิเตอร์ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 550 ถึง 900 นาโนเมตร ซึ่งมีความแม่นยำให้ค่า r และ $RMSEP$ เท่ากับ 0.88 และ 0.56 °Brix ตามลำดับ เหตุผลส่วนหนึ่งที่ เครื่องวัดความหวานของ Fan และคณะ [11] มีความแม่นยำ สูงกว่า ได้แก่ การใช้โหมดการวัดแบบอินเทอร์แอคทีฟ (Interactance Mode) ที่มีหัววัดใยแก้วนำแสงแบบพิเศษ สามารถให้แสงเป็นแบบวงแหวน และแสงที่สะท้อนออกจาก ผลแอปเปิลเป็นแสงที่มีข้อมูลภายในผลแอปเปิลที่ลึกเข้าไป ในเนื้อมากกว่าการวัดแบบสะท้อนกลับของเครื่องในงานวิจัยนี้

3.4 ผลการทดสอบค่าความหวานด้วยเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์

นำผลการประเมินความหวานที่วิเคราะห์ได้มาเขียน รหัสคำสั่งเพิ่มในโปรแกรมควบคุม และทดสอบวัดความหวาน แอปเปิล 30 ผล ที่ซื้อมาจากซูเปอร์มาเก็ตที่เวลาต่างกับกับ แอปเปิลที่ใช้สร้างสมการ เมื่อคำนวณความแม่นยำด้วยค่า $RMSEP$ ที่แสดงความแตกต่างระหว่างค่าอ้างอิงหรือค่าความ หวานจากเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์และค่าที่วัดได้จากเครื่อง ของแอปเปิลแต่ละผล ได้ผล $RMSEP$ เท่ากับ 0.75 °Brix

ค่า $RMSEP$ ที่ได้จากการทดสอบเครื่องวัดความหวาน มีค่าสูงกว่าค่า $RMSEP$ ที่ได้จากการสร้างสมการ หรือ เกิดความคลาดเคลื่อนมากกว่า สาเหตุส่วนหนึ่งมาจาก ผล แอปเปิลที่ใช้ทดสอบเครื่องซื้อจากซูเปอร์มาเก็ตในช่วงที่ แตกต่างกับกับผลแอปเปิลที่ใช้สร้างสมการ

4. สรุป

เครื่องวัดความหวานที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการวัด การดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ สามารถใช้งานวัดความ หวานผลแอปเปิลแบบไม่ทำลายผล โดยแสดงผลค่าความ หวานภายในเวลา 5 วินาที ความแม่นยำในการวัดความ หวานขึ้นอยู่กับสมการประเมินความหวานที่พัฒนาขึ้น ดังนั้น การเพิ่มความแม่นยำของเครื่องวัดความหวานสามารถทำได้ โดยพัฒนาสมการประเมินความหวานเพิ่มเติม ด้วยการเพิ่ม

จำนวนตัวอย่างผลแอปเปิลพันธุ์ฟูจิที่มีความหลากหลายในฤดู เก็บเกี่ยวสำหรับสร้างสมการ แล้วนำข้อมูลค่าการดูดกลืนแสง อินฟราเรดย่านใกล้ และค่าความหวานของตัวอย่างใหม่ไป รวมกับข้อมูลเดิมเพื่อสร้างสมการใหม่ ก็จะทำให้สมการ ประเมินมีความเสถียรและความแม่นยำมากขึ้น

ข้อจำกัดของเครื่องมือคือ การใช้งานได้เฉพาะแอปเปิล พันธุ์ฟูจิจากซูเปอร์มาเก็ต อำเภอกำแพงแสน จังหวัด นครปฐม เท่านั้น การเพิ่มความสามารถของเครื่องให้ใช้ได้ กับแอปเปิลพันธุ์ฟูจิจากแหล่งอื่นๆ จะต้องปรับปรุงพัฒนา สมการประเมินความหวานด้วยการเพิ่มจำนวนตัวอย่าง แอปเปิลให้ครอบคลุมแหล่งเป้าหมายทั้งหมด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Medthai. (2020, July 19). *Apple 19 Items of Properties and Benefits of Apples*. [Online]. Available: <https://medthai.com/แอปเปิล>.
- [2] V. Cortés, J. Blasco, N. Aleixos, S. Cubero, and P. Talens, "Monitoring strategies for quality control of agricultural products using visible and near-infrared spectroscopy: A review," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 85, pp. 138–148, 2019.
- [3] R. K. Cho, M. R. Sohn, and Y. K. Kwon, "New observation of nondestructive evaluation for sweetness in apple fruit using near infrared spectroscopy," *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, vol. 6(A), pp. A75-A78, 1998.
- [4] M. Ventura, A. Jager, H. Putter, and F. P. M. M. Roelofs, "Nondestructive determination of soluble solids in apple fruit by near infrared spectroscopy," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 14, no. 1. pp. 21–27, 1998.
- [5] R. Lu and D. Ariana, "A Near Infrared sensing technique for measuring internal quality of apple fruit," *Applied Engineering in Agriculture*,



- vol. 18, no 5. pp. 585–590, 2002.
- [6] S. Saranwong, J. Sornsrivichai, and S. Kawano, “Predictions of ripen stage quality of apple fruit from its harvest quality measured non-destructively by near infrared spectroscopy,” *Postharvest Biology and Technology*, vol. 31, no. 2, pp. 137–145, 2004.
- [7] S. N. Jha and R. Garg, “Non-destructive prediction of quality of intact apple using near infrared spectroscopy,” *Journal of Food Science and Technology*, vol. 47, no. 2, pp. 207–213, 2010.
- [8] Z. Guo, M. Wang, A. A. Agyekum, J. Wu, Q. Chen, M. Zuo, H. R. El-Seedi, F. Tao, J. Shi, Q. Ouyang, and X. Zou, “Quantitative detection of apple watercore and soluble solids content by near infrared transmittance spectroscopy,” *Journal of Food Engineering*, vol. 279, pp. 109955, 2020.
- [9] C. A. T. Dos Santos, M. Lopo, R. N. Páscoa, and J. A. Lopes, “A review on the applications of portable near-infrared spectrometers in the agro-food industry,” *Applied Spectroscopy*, vol. 67, no. 11, pp. 1215–1233, 2013.
- [10] Y. B. Ying, X. Fu, and H. Lu, “Experiments on predicting sugar content in apples by FT-NIR technique,” *Journal of Food Engineering*, vol. 80, no. 3, pp. 986–989, 2007.
- [11] S. Fan, Q. Wang, X. Tian, G. Yang, Y. Xia, J. Li, and W. Huang, “Non-destructive evaluation of soluble solids content of apples using a developed portable Vis/NIR device,” *Biosystems Engineering*, vol. 193, pp. 138–148, 2020.
- [12] Y. Ying and Y. Liu, “Nondestructive measurement of internal quality in pear using genetic algorithms and FT-NIR spectroscopy,” *Journal of Food Engineering*, vol. 84, no. 2, pp. 206–213, 2008.
- [13] L. K. Sørensen and S. Dalsgaard, “Determination of clay and other soil properties by near infrared spectroscopy,” *Soil Science Society of America Journal*, vol. 69, no. 1, pp. 159–167, 2005.
- [14] N. M. Faber and R. Rajko, “How to avoid over-fitting in multivariate calibration—The conventional validation approach and an alternative,” *Analytica Chimica Acta*, vol. 595, no. (1–2), pp. 98–106, 2007.
- [15] K. Włodarska, I. Khmelinskii, and E. Sikorska, “Evaluation of quality parameters of apple juices using near-infrared spectroscopy and chemometrics,” *Journal of Spectroscopy*, pp. 1–8, 2018.
- [16] K. Sakulnarmrat and P. Jannok, “Study of the spectroscopic data analysis pretreatments for enhancing performance of NIR calibration model for determining the brix value of Japanese pear,” *Naresuan University Journal: Science and Technology (NUJST)*, vol. 25, pp. 32–40, 2017 (in Thai).
- [17] Jr. J. Workman and L. Weyer, *Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near-infrared Spectroscopy*. CRC press, 2012, pp. 63.
- [18] P. Williams, (2007). *Near-infrared Technology—Getting the Best out of Light Edition 5.0*. Inc., Nanaimo, Canada, 2007, pp. 69–102.