

การประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของผลแตงโมพันธุ์ซอนย่า
ด้วยเทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

Evaluation of Total Soluble Solid in Sonya Watermelon Fruits Using
Near Infrared Spectroscopy Hyperspectral Imaging Technique

พชร สืบสรวง^{1/} อนุปันท์ เทอดวงศ์วรกุล^{1/} อาทิตย์ พวงสมบัติ^{1/} อมรเดช พุทธิพิพัฒน์ขจร^{1/} แก้วกานต์ พวงสมบัติ^{1/*}
Pachara Subsueg^{1/} Anupun Terdwongworakul^{1/} Arthit Phuangsombut^{1/}
Amorndej Puttipatkajorn^{1/} Kaewkarn Phuangsombut^{1/*}

Received 30 Apr. 2025/Revised 8 Jul. 2025/Accepted 8 Jul. 2025

ABSTRACT

Near-infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI) is a rapid accurate, and non-destructive technique for analyzing the composition and internal quality of agricultural products. This study aimed to develop a method for assessing the internal quality of the 'Sonya' watermelon cultivar using NIR-HSI by constructing a predictive model for total soluble solids (TSS) content based on 100 watermelon samples. The reflectance spectra were measured in the wavelength range of 900–1700 nm. The obtained data were in the form of hypercube spectral data, and an equation was created to predict the total soluble solids content using the partial least squares regression technique. The best prediction equation had a correlation coefficient of 0.977, a root mean square error of 0.231 °Bx and a bias of 0.047, indicating that it was effective for quality assessment. Additionally, the absorbance values from each pixel of the hypercube data were used to create a map showing the distribution of TSS in the watermelon samples. The findings of this study demonstrate that NIR-HSI can effectively predict TSS content and visualize its spatial distribution within whole watermelons, highlighting its potential application in future automated systems for watermelon quality grading.

Keywords: total soluble solid; watermelon fruits; near infrared spectroscopy; hyperspectral imaging technique; near infrared spectroscopy

^{1/} คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

^{1/} Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand

* Corresponding author: fengkkb@ku.ac.th

บทคัดย่อ

เทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (near-infrared hyperspectral imaging, NIR-HSI) เป็นเทคนิคการตรวจสอบองค์ประกอบและคุณภาพภายในของผลิตผลเกษตรแบบไม่ทำลายตัวอย่างที่รวดเร็วและแม่นยำ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการประเมินคุณภาพภายในของแตงโมพันธุ์ซอนญาโดยใช้เทคนิค NIR-HSI พัฒนาแบบจำลองในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (total soluble solids, TSS) จากตัวอย่างแตงโม 100 ผล วัดสเปกตรัมการสะท้อนกลับของแสงในช่วงความยาวคลื่น 900–1,700 nm ข้อมูลที่ได้อยู่ในรูปแบบสเปกตรัมข้อมูลสามมิติ นำมาสร้างสมการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำด้วยเทคนิค partial least squares regression พบว่า สมการทำนายที่ดีที่สุดมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.977 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.231°Bx และค่า bias ที่ 0.047 ซึ่งบ่งบอกถึงสมการทำนายมีประสิทธิภาพสำหรับการประเมินคุณภาพได้ และสามารถนำค่าการดูดกลืนแสงของแต่ละพิกเซลจากข้อมูล hypercube มาแสดงแผนภาพการกระจายตัวของค่า TSS ของผลแตงโม ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิค NIR-HSI เพื่อทำนายค่า TSS และแสดงภาพการกระจายตัวของค่า TSS ของทั้งผลแตงโม จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบคัดแยกคุณภาพแตงโมในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต

คำสำคัญ: ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้; แตงโม; เทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้; สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

บทนำ

แตงโมเป็นหนึ่งในสินค้าที่สร้างรายได้เข้าสู่ประเทศเป็นอย่างมาก เป็นพืชที่ปลูกง่าย สามารถปลูกได้ตลอดปี ในการเก็บเกี่ยวผลผลิตแตงโมเพื่อ

จำหน่ายเกษตรกรและผู้ประกอบการทั้งในประเทศและต่างประเทศมักประสบปัญหาการคัดเลือกผลแตงโมที่มีคุณภาพตามมาตรฐานสินค้าเกษตร ผลแตงโมมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (total soluble solids, TSS) ต่ำกว่า 9°Bx หรือผลมีความผิดปกติด้านรูปทรง ผลมีรอยขีด และมีเนื้อข้างภายใน เป็นต้น (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2555) ซึ่งอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น พันธุ์ พื้นที่เพาะปลูกไม่เหมาะสม และมีแมลงศัตรูพืชรบกวน รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการขนส่ง เป็นต้น ดังนั้นแนวทางในการแก้ปัญหานี้ควรต้องมีการหาวิธีการตรวจสอบและคัดผลแตงโมให้ได้คุณภาพดี มีความหวาน ที่ตามกำหนด และเนื้อไม่ขำ

ปัจจุบันมีวิธีการตรวจสอบคุณภาพผลแตงโมโดยการสุ่มผลแตงโมในแต่ละรอบของการเก็บเกี่ยวมาเคาะเพื่อตรวจสอบความขำ (Simón-Portillo et al., 2023) การเคาะเพื่อตรวจสอบไส้ลมในแตงโม และผ่าผลเพื่อตรวจสอบความหวาน TSS หรือค่าบริกซ์ (°Bx) ซึ่งหมายถึงปริมาณของของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดที่ใช้บ่งชี้ความเข้มข้นของอาหารเหลว เช่น น้ำเชื่อม น้ำผลไม้เข้มข้น ในการวิเคราะห์หา TSS ทำได้โดยใช้น้ำแตงโมที่กรองแล้ววัดด้วยเครื่องรีแฟกโต (Torge et al., 1994; Chiatrakul et al., 2022) ซึ่งวิธีนี้ค่อนข้างยุ่งยากในเรื่องการเตรียมตัวอย่าง และเป็นการทดสอบแบบทำลายตัวอย่าง ทั้งยังต้องอาศัยความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นเพื่อเป็นการลดขั้นตอนและระยะเวลาในการวัดคุณภาพผลแตงโมในห้องปฏิบัติการ จึงมีการนำเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (near-infrared spectroscopy, NIRS) เข้ามาใช้ในการตรวจวัดคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรโดยไม่ทำลายตัวอย่าง เทคนิคนี้มีความรวดเร็ว และแม่นยำ เนื่องจากเทคนิค NIRS อาศัยหลักการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารประกอบอินทรีย์ที่มีพันธะ

C-H O-H หรือ N-H ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในผลผลิตเกษตรและอาหาร เทคนิคนี้เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการนำมาตรวจสอบคุณภาพภายในผลผลิตเกษตร (Workman and Weyer, 2012)

Vega-Castellote et al. (2022) ใช้เครื่อง NIR แบบ linear variable filters (LVF) ซึ่งเป็นแบบพกพาในการตรวจสอบความสุกของแตงโมแบบไม่ทำลายตัวอย่าง พบว่า ทำนายความหวานได้แม่นยำ โดยเฉพาะในแตงโมเปลือกเขียวเข้ม สามารถจำแนกความสุกได้ถูกต้องถึง 82.2% แสดงว่าเทคโนโลยีนี้สามารถใช้ช่วยตัดสินใจเก็บเกี่ยวแตงโมในไร่ได้จริง Vega-Castellote et al. (2023) ใช้เครื่อง NIR ตรวจสอบความสุกแตงโมแบบไม่ทำลายตัวอย่าง พบว่า สามารถทะลุได้ลึกสุด 11 มม. และทำนายค่าความหวานได้แม่นยำ ($R^2 = 0.81$) Tian et al. (2007) พัฒนารีวิววัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในแตงโมแบบไม่ทำลายตัวอย่างด้วยเทคนิค Vis/NIR diffuse transmittance (350–1,000 nm) วิเคราะห์สเปกตรัมด้วย PLS และ PCR พบว่า PLS กับสเปกตรัมอนุพันธ์ลำดับแรกให้ผลแม่นยำสูง ($r=0.918-0.954$ RMSEP=0.58–0.65 °Bx) วิธีนี้เหมาะสำหรับผลไม้เปลือกหนาและรูปทรงไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม การใช้เทคนิค NIRS ดังกล่าวข้างต้นยังมีข้อจำกัด เนื่องจากเป็นเพียงการตรวจสอบ TSS สามารถทำการวัดค่าได้ครั้งละ 1 ตำแหน่ง ได้ค่าสเปกตรัมออกมาเพียงค่าเดียว จึงมีการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ หรือภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัม (hyperspectral imaging: HSI) ซึ่งเป็นเทคนิคที่รวมการถ่ายภาพกับการวิเคราะห์สเปกตรัมในหลายช่วงความยาวคลื่นพร้อมกัน ทำให้สามารถตรวจสอบคุณภาพภายในของวัตถุได้แบบไม่ทำลาย โดยได้ข้อมูลทั้งด้านตำแหน่งภาพและองค์ประกอบทางเคมีในรูปแบบสามมิติ (hypercube) ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการ

วิเคราะห์มากกว่าการถ่ายภาพทั่วไปหรือสเปกตรัมเพียงอย่างเดียว (Manley, 2014) จากข้อได้เปรียบนี้ไม่เพียงแต่ NIR-HSI สามารถทำนายค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง กับคุณภาพได้ครอบคลุมพื้นที่ของตัวอย่างเท่านั้น ยังแสดงภาพของการกระจายตัวของค่าองค์ประกอบของตัวอย่างได้ด้วยการทำแผนที่ (mapping) ช่วยตรวจสอบประเมินตัวอย่างที่มีความต่างกัน และมีปริมาณมากได้ในเวลาเดียวกัน

ในอดีตมีงานวิจัยที่ประยุกต์ที่ใช้ NIR-HSI กับผลผลิตทางการเกษตร เช่น การวิเคราะห์การกระจายตัวของ TSS ในผลกีวี่ ซึ่ง Martinsen and Schaare (1998) พบว่า ตัวอย่างกีวี่ที่มี TSS ในอยู่ในช่วง 4.7–14.1 °Bx มีค่า SEP 1.2 °Bx นอกจากนี้ Rungpichayapichet et al. (2017) ทำการวัดคุณสมบัติภายในของผลมะม่วง ได้แก่ ความแน่นเนื้อ TSS และปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ พบว่า มีค่า R^2 0.81 0.50 และ 0.81 ตามลำดับ ค่า RMSE 2.83 นิวตัน 2.0 และ 0.24% ตามลำดับ แผนภาพการกระจายตัวแสดงให้เห็นถึงปริมาณ TSS มีค่ามากที่ตำแหน่งขั้วของผลมะม่วง นอกจากนี้ Bonifazi et al. (2022) ได้ใช้เทคนิค SWIR-HSI เพื่อวิเคราะห์จำแนกเมล็ดแตงโมที่งอกและไม่งอกแบบไม่ทำลายตัวอย่างด้วยโมเดล PLS-DA ได้ความแม่นยำในการจำแนกสูง (accuracy 96.4% sensitivity 0.72 specificity 0.98) แสดงว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถนำมาใช้คัดแยกเมล็ดก่อนเพาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อมา Qi et al. (2024) ได้ใช้เทคโนโลยีภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมร่วมกับโมเดล deep learning ได้แก่ LeNet GoogLeNet และ ResNet เพื่อจำแนกเมล็ดพันธุ์แตงโม 10 พันธุ์แบบไม่ทำลายและเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการรวมผลผ่านกลไกการให้คะแนน (scoring mechanism) ซึ่งช่วยลดข้อผิดพลาดของแต่ละโมเดลย่อย ซึ่งพบว่า โมเดลแบบรวม deep learning ทั้ง 3 รูปแบบร่วมกันให้ความแม่นยำสูงสุดถึง 87.9%

แสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้มีความเหมาะสมและแม่นยำในการคัดแยกเมล็ดพันธุ์แตงโม

จากข้อมูลข้างต้นชี้ว่าเทคนิค NIR-HSI สามารถนำมาใช้ในการประเมินและทำนายค่าองค์ประกอบ และตรวจสอบความเสียหายของผลผลิตทางการเกษตรได้ และการใช้เทคนิค NIR-HSI ในการสร้างแผนภาพการกระจายตัวของค่า TSS ของตัวอย่างแตงโมที่ไม่ผ่านการทำลายตัวอย่างมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบคุณภาพแบบรวดเร็วของผลแตงโม ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค NIR-HSI ในการทำนายค่า TSS ของผลแตงโมพันธุ์ขอนแก่น และสร้างแผนภาพการกระจายตัว เพื่อสามารถนำไปใช้เป็นตัวชี้ในการจัดเกรดผลผลิต และตัดสินความเหมาะสมในการเก็บเกี่ยวแตงโมพันธุ์ขอนแก่นในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่าง

สุ่มตัวอย่างผลแตงโมพันธุ์ขอนแก่นอายุ 70–85 วัน นับหลังจากวันที่เมล็ดงอกซึ่งเป็นระยะเก็บเกี่ยว (ธวัช, 2520) เนื่องจากในการสร้างสมการจำเป็นต้องให้มีความหลากหลายของตัวอย่างเพื่อให้สมการทำนายที่ได้ครอบคลุมกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบมากที่สุด จึงมีช่วงการเก็บเกี่ยวที่กว้างประมาณ 15 วัน โดยสุ่มตัวอย่างผลแตงโมพันธุ์ขอนแก่นจาก อ.อุทอง จ.สุพรรณบุรี 100 ผล น้ำหนัก 3-4 กก. นำตัวอย่างไปยังห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ทำการวัดคุณสมบัติทางกายภาพก่อนทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค NIR-HSI

2. การวัดค่าสเปกตรัมและข้อมูลภาพถ่าย

ทำการวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIR hyperspectral imaging (VLNIR-CL-100-N17E, SPECIM SisuCHEMA,

Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) มีช่วงบันทึกภาพ 320x256 พิกเซล และมีช่วงการวัดค่าที่ความยาวคลื่น 900-1,700 nm ความละเอียด (resolution) 3.2 nm มีชุดหลอดไฟทั้งสแตนฮาโลเจน (tungsten-halogen light sources) 20 W (DECOSTAR, Carrollton, GA, US.) 3 หลอดด้านหัว และอีก 3 หลอดด้านท้าย ทำมุม 45° กับตัวอย่างในแนวระดับ กล้องถ่ายภาพ CCD มีขนาด 320x256 พิกเซล (Xeva 992, Xenics Infrared Solution Ltd., Oulu, Finland) ก่อนการวัดตัวอย่างทุกครั้งต้องมีการวัดค่าอ้างอิงก่อนโดยการวัดค่า dark (0% reflectance) และ white (99.9% reflectance) ซึ่งการวัดค่าอ้างอิง dark ทำโดยการปิดชัตเตอร์เลนส์กล้อง CCD และการวัดค่าอ้างอิง white ทำโดยใช้แท่งสเปกทรานอน (spectranal) สีขาวที่มีขนาด 2.5x20x0.98 ซม. และชุดโปรแกรมควบคุมการทำงาน Specim's LUMO Software Suite (Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) นำตัวอย่างแตงโมวางบนแท่นหมุนซึ่งวางอยู่บนแพลตฟอร์ม (translational moving platform) และเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์รับแสง (Figure 1) ด้วยความเร็ว 10 mm/s เมื่อแตงโมเคลื่อนผ่านใต้กล้องอุปกรณ์จะหยุดใต้กล้อง และทำการหมุนแตงโมพร้อมกับบันทึกภาพจนครบหนึ่งรอบเพื่อให้ได้ข้อมูลครบรอบของผลแตงโม ข้อมูลความยาวคลื่น (spectral) และข้อมูลตำแหน่ง (spatial) ได้รับการรวบรวมและบันทึกอยู่ในรูปแบบของข้อมูล 3 มิติ โดยข้อมูลของตำแหน่งอยู่ในรูปของแกน x (ขนาด 320 พิกเซล) และแกน y ตามความยาวของวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านใต้เซนเซอร์รับภาพในแต่ละพิกเซลจะมีข้อมูลสเปกตรัม (แกน z) รวมทั้งสิ้น 256 ช่วงคลื่น ข้อมูลสเปกตรัมของค่าการดูดกลืนแสงในทุกตำแหน่งของพื้นผิวแตงโมนำมาเฉลี่ยก่อนทำการปรับแต่งข้อมูล และวิเคราะห์ผลเพื่อสร้างสมการทำนายค่า TSS

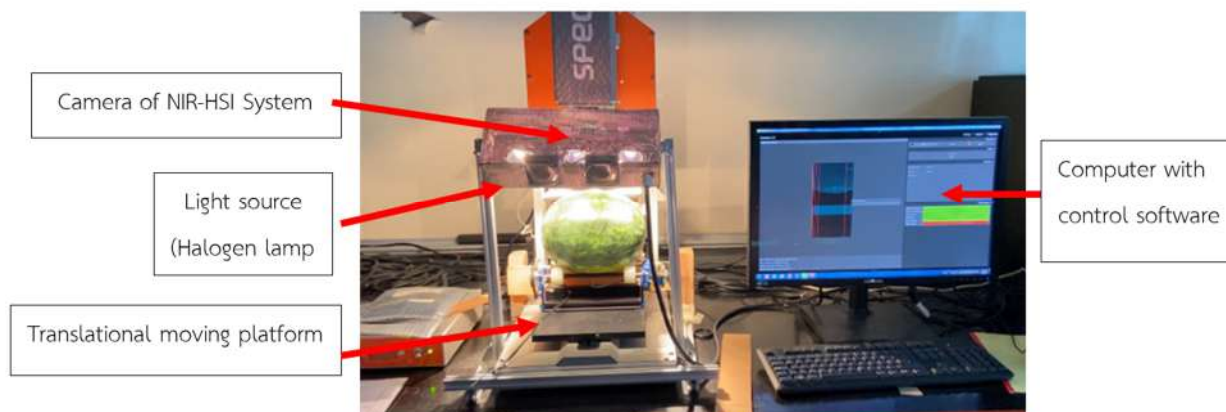


Figure 1 The operation of the watermelon rotation apparatus during measurement with the NIR-HSI device

3. การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

หลังจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงตัวอย่าง แดงโมด้วยเทคนิค NIR-HSI แล้ว นำตัวอย่างแดงโมไปวิเคราะห์หาค่า TSS จากน้ำคั้นของแดงโมทั้งผล โดยทำการวัดค่า 3 ซ้ำ การตรวจสอบหา TSS โดยใช้เครื่อง digital refractometer (Atago PAL-1 Brix Refractometer, Japan) ย่านการวัดในช่วง 0.0 ถึง 53.0%

4. การวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

ค่าสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงที่ได้จากเทคนิค NIR-HSI เฉพาะในส่วนพื้นผิวของแดงโม ถูกนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของบริเวณที่เลือกใช้เป็นตัวแทน โดยใช้โปรแกรม Evince (Prediktera, Ume, Sweden) เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์และสร้างสมการทำนายค่าคุณภาพของแดงโมด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR) โดยใช้โปรแกรม The Unscrambler 9.8 (Camo, Oslo, Norway)

จากข้อมูลแดงโม 100 ผล นำมาพัฒนาสมการทำนาย TSS แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม calibration 67 ตัวอย่าง และกลุ่ม validation 33 ตัวอย่าง ซึ่งมี TSS อยู่ในช่วง 6.21–12.00°Bx (Table 1) คัดเลือกตัวอย่างให้ครอบคลุมค่าต่ำสุดและสูงสุดของตัวแปร

ทั้งหมด และตัดช่วงสเปกตรัมที่อาจเกิดสัญญาณรบกวนออก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนาย เลือกใช้ช่วงความยาวคลื่น 900–1,700 nm ก่อนการสร้างสมการ มีการตรวจสอบค่าผิดปกติ (outliers) ของข้อมูล TSS โดยใช้วิธี Z-score ซึ่งพิจารณาจากเกณฑ์ $|Z| > 3$ ข้อมูลที่ไม่ใช่ outlier เท่านั้นที่นำมาใช้ในการสร้างสมการ เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของโมเดล ได้ทำการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมเพื่อลดสัญญาณรบกวน (noise) ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ วิธี smoothing แบบ Savitzky-Golay (Smt) first derivative (1D) second derivative (2D) แบบ Savitzky-Golay standard normal variate (SNV) และการรวมเทคนิคปรับแต่งสเปกตรัมผสมตั้งแต่สองเทคนิคขึ้นไป เพื่อเพิ่มความชัดเจนของพีคการดูดกลืนแสง

จากนั้นนำข้อมูลที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมไปพัฒนาเป็นสมการทำนายด้วยเทคนิค PLSR ประเมินโดยวิธี cross-validation โดยประเมินประสิทธิภาพความแม่นยำของสมการด้วยค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้และค่าจริง (correlation coefficient, r) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean squared error of prediction, RMSEP) และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการทำนาย (bias) โดยโมเดลที่เหมาะสมที่สุด

ควรมีค่า r สูง RMSEP ต่ำ bias ต่ำ และค่า factor ที่เหมาะสมที่สุดตามข้อมูลและโมเดลใน PLSR ที่

เหมาะสมควรเป็นค่าที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนจากการ cross-validation ต่ำที่สุด

Table 1 Description statistics of total soluble solid (TSS) in watermelon for calibration and validation set

Sample set	Number of samples	Min	Max	Standard deviation
Calibration	67	6.21	12.0	1.47
Validation	33	7.21	11.9	1.46

5. การกระจายตัวของค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้

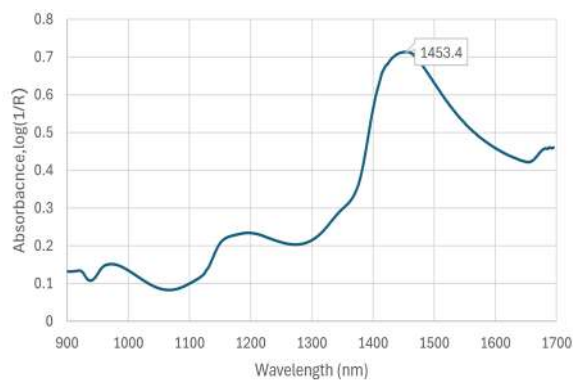
สมการทำนายที่สร้างมาจากข้อมูลการดูดกลืนของสเปกตรัมเฉลี่ยจาก NIR-HSI ที่ผ่านการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัม และข้อมูล TSS เฉลี่ย จากการวัดค่าด้วยวิธีการมาตรฐาน นำมาใช้ในการทำนายค่า TSS ในแต่ละพิกเซลของภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ด้วยการใช้โปรแกรม Matlab R2020b (MathWorks, Natick, MA, USA) ในการประมวลผล TSS แสดงเป็นสีต่างๆ (jet colormap) โดยสีแดงแสดงถึงปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ที่มีค่าสูง และสีน้ำเงินแสดงถึงปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ที่มีค่าต่ำ แผนภาพการกระจายตัวที่ได้สามารถเปรียบเทียบปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งของแตงโมเพื่อบ่งบอกถึงคุณภาพของแตงโมได้

ผลการทดลองและวิจารณ์

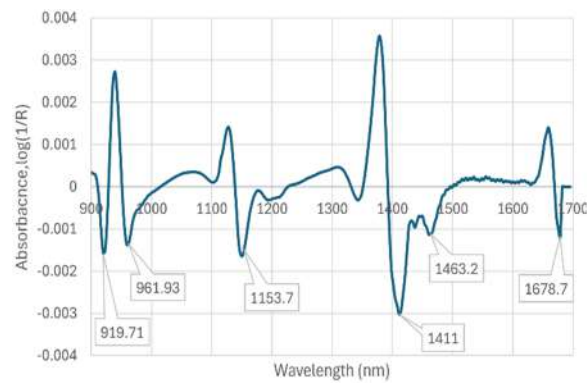
1. ค่าสเปกตรัมและข้อมูลภาพถ่าย

จากการวัดการดูดกลืนแสงของผลแตงโมในช่วง 900–1,700 nm ด้วยเครื่อง NIR-HSI พบว่าในช่วงความยาวคลื่น 1,400–1,500 nm มีการดูดกลืนแสงที่มากที่สุด ซึ่งแตงโมมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักสูงถึง 90–92% ทั้งในส่วนเปลือกและเนื้อ การวิเคราะห์คุณภาพภายในผลแตงโมด้วยเทคนิค NIR-HSI แสดงให้เห็นว่าในช่วง

ความยาวคลื่น 1,400–1,500 nm ซึ่งเป็นช่วงของโอเวอร์โทนอันดับหนึ่งของพันธะ O–H มีการดูดกลืนแสงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ความยาวคลื่น 1,450 nm ซึ่งสัมพันธ์กับการดูดกลืนของน้ำ และ 1,480 nm ซึ่งสัมพันธ์กับกลูโคส (Workman and Weyer, 2012) อย่างไรก็ตาม พิกในช่วงนี้มักทับซ้อนกันระหว่างน้ำและองค์ประกอบสำคัญอื่น ๆ ส่งผลให้การวิเคราะห์คุณภาพบางประการทำได้ไม่ชัดเจน จากการวิเคราะห์สเปกตรัมดิบในช่วง 900–1,700 nm พบว่า พิกที่เกี่ยวข้องกับน้ำบดบังพิกของน้ำตาลบางชนิด (Figure 2A) จึงมีการปรับแต่งข้อมูลด้วยเทคนิคอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savitzky-Golay เพื่อแยกพิกที่สำคัญได้ชัดเจนยิ่งขึ้น (Figure 2B) ซึ่งได้พิกเด่นที่ตำแหน่ง 919.7 961.9 1,153.7 1,411 1,463.2 และ 1,678.7 nm โดยพิกเหล่านี้สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C–H และ O–H ที่พบในโมเลกุลของน้ำและน้ำตาล (Workman and Weyer, 2012) จากข้อมูลองค์ประกอบของแตงโม พบว่า นอกจากน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักแล้ว ยังมีน้ำตาล 6–7% โยอาหาร 0.4–0.6% โปรตีน 0.5% และไขมัน 0.2% ชนิดของน้ำตาลที่พบมากที่สุด คือ ฟรุคโตส รองลงมาคือ กลูโคส และซูโครส (Maheshwari et al., 2022) ซึ่งสารเหล่านี้ล้วนมีโครงสร้างโมเลกุลที่ตอบสนองต่อคลื่นในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ และสามารถใช้เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพภายในของแตงโมได้อย่างแม่นยำ



(A)



(B)

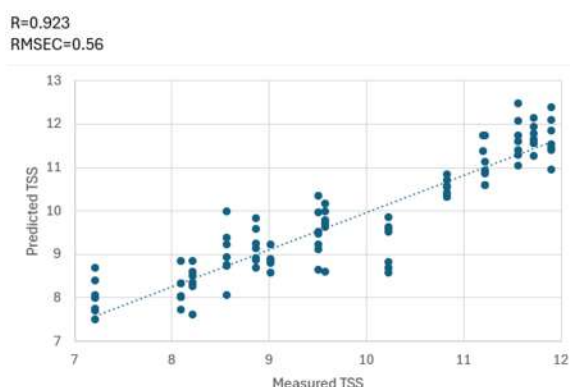
Figure 2 Original (A) and second derivative (B) spectra of watermelon

2. การทำนายค่า TSS

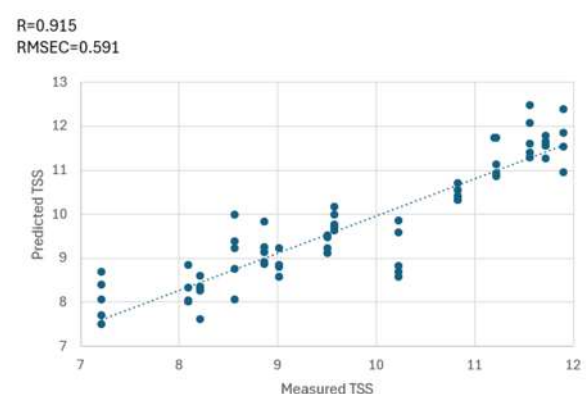
จากการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการทำนายค่า TSS (Table 2) พบว่า สมการที่มีการปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์แบบ smoothing ร่วมกับ second derivative และ standard normal variate (Smt+2D+SNV) ให้ค่าความแม่นยำมากที่สุดคือ $r = 0.977$ $RMSEP = 0.231$ $bias = 0.047$ และ $factors = 16$ เนื่องจากค่า r มีค่าสูงที่สุด $RMSEP$ ต่ำที่สุด มีค่า $bias$ น้อยและเข้าใกล้ศูนย์ จำนวน factor มีค่าสูงแสดงให้เห็นว่า ข้อมูลของตัวอย่างแต่งไม่มีความหลากหลาย จึงต้องใช้ข้อมูลสเปกตรัมจาก factor จำนวนมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ แก้วกานต์และคณะ (2560) ในการวิเคราะห์ภาพ NIR-HSI สำหรับการคัดแยกเมล็ดผิวเขียวโดยมีค่า $factors = 20$

ซึ่งให้ค่า r สูงสุด และ $RMSEP$ ต่ำสุด จากสมการที่ได้ควรมีการพัฒนาสมการโดยใช้ข้อมูลตัวอย่างหลากหลายฤดูกาลมากขึ้น จะทำให้สมการมีความครอบคลุมมากขึ้น

การกระจายตัวของข้อมูลในการสร้างสมการทำนายค่า TSS ระหว่างค่าที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนาย (Figure 3) โดย Figure 3(A) เป็นการแสดงให้เห็นการกระจายตัวของกลุ่มข้อมูลเทียบกับเส้นแนวโน้มของสมการทำนายมีค่า $r = 0.923$ ในกลุ่ม calibration และ Figure 3(B) เป็นการแสดงให้เห็นการกระจายตัวของกลุ่มข้อมูลเทียบกับเส้นแนวโน้มของสมการทำนายมีค่า $r = 0.915$ ในกลุ่ม validation



(A)



(B)

Figure 3 Scatter plots of measured versus predicted TSS values of watermelon in the calibration (A) and validation (B) sets

สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายค่า TSS พบว่า ความยาวคลื่นที่มีอิทธิพลสูง ได้แก่ 974.9 1,437.1 1,450.2 และ 1,476.3 nm (Figure 4) ซึ่งเป็นตำแหน่งของการสั่นแบบ overtone และ combination ของพันธะ O–H และ C–H ที่พบในน้ำและน้ำตาล โดย 974.9 nm (Büning-Pfaue, 2003) และ 1,450.2 nm (Golic et al., 2003) สัมพันธ์กับการดูดกลืนของน้ำจากการสั่นแบบ combination และ first overtone ของพันธะ O–H ขณะที่ 1,437.1 nm (Muncan et al., 2025) และ 1,476.3 nm (Burns and Ciurczak, 2008) เป็นช่วงที่สัมพันธ์กับซูโครสและกลูโคสจากการสั่นของพันธะ C–H ในโครงสร้างคาร์โบไฮเดรต ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความหวานของแตงโม จากการสร้างสมการใช้ตัวแปรความยาวคลื่นตลอดช่วงความยาวคลื่นทดสอบ ซึ่งแต่ละความยาวคลื่นที่กล่าวมาจาก Figure 4 มีอิทธิพลต่อการสร้างสมการ เนื่องจากมีค่า regression coefficient สูง

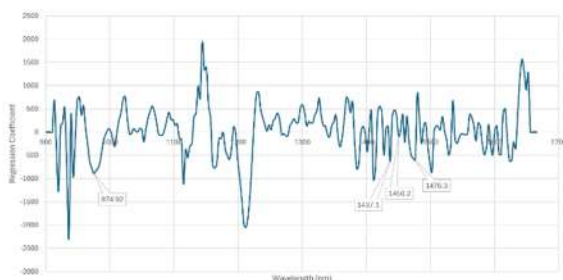


Figure 4 Regression coefficient of the calibration model for TSS prediction

3. แผนภาพการกระจายตัวของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้

สมการทำนายค่าความหวานนำไปใช้ในการทำนายค่าดูดกลืนแสงในแต่ละพิกเซลของข้อมูล hypercube ที่ได้จากเทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ เพื่อสร้างแผนภาพการกระจายตัวของพื้นที่ผิวแตงโม การกระจายตัวของค่าความหวาน (Figure 5) บนตัวอย่างแตงโม สีแดงแสดงค่าความหวานที่มีการทำนายเป็นค่าสูง ส่วนสีน้ำเงินแสดงถึงค่าความหวานที่มีการทำนายเป็นค่าต่ำ การแสดงการกระจายตัวของความหวาน

ส่วนตรงกลางของแตงโมมีค่า TSS เฉลี่ย 11.71°Bx เนื่องจากเนื้อแตงโมเป็นส่วนที่มีน้ำตาลและสารอาหารต่าง ๆ ที่ทำให้แตงโมมีรสชาติหวาน

การกระจายตัวที่สร้างขึ้นจากสมการทำนายพบการทำนายค่า TSS ที่สูงและต่ำกว่าค่าจริงเนื่องจากการเฉลี่ยข้อมูลสเปกตรัมเพื่อนำมาสร้างสมการทำนายได้ตัดข้อมูลสเปกตรัมออกไป รวมถึงบริเวณที่เป็นขอบของภาพตัวอย่างแตงโมที่เกิดจากผลของความโค้งของรูปร่างทรงกลมของแตงโม ที่ทำให้เกิดระยะห่างระหว่างแตงโมกับกล้องเมื่อเคลื่อนที่ผ่านไต่กล้อง ระยะห่างที่ไกลที่สุดระหว่างกล้องกับตัวอย่างแตงโม คือบริเวณขอบของแตงโม และระยะห่างที่ใกล้ที่สุดของแตงโมคือ บริเวณตรงกลางของแตงโม ซึ่งเป็นผลจากรูปร่างทรงกลมของแตงโม มีงานวิจัยที่มีลักษณะคล้ายกันในการวัดการดูดกลืนแสงรอบท่อนอ้อยด้วยวิธีการหมุนเพื่อลดผลกระทบจากผิวโค้ง (Chiatrakul et al., 2022) การแก้ปัญหาลดผลกระทบดังกล่าวอาจต้องปรับปรุงแก้ไขอุปกรณ์ให้สามารถหมุนได้มากกว่า 1 แกน การกระจายตัวที่สร้างขึ้นจากสมการทำนายค่า TSS ของผลแตงโม 2 ตัวอย่าง ในการสร้างสมการทำนายโดยได้ตัดข้อมูลสเปกตรัมบริเวณที่เป็นขอบของภาพตัวอย่างแตงโมที่เกิดจากความโค้งของรูปร่างทรงกลมของแตงโม ที่ทำให้เกิดระยะห่างระหว่างแตงโมกับกล้องเมื่อเคลื่อนที่ผ่านไต่กล้อง เนื่องจากเป็นข้อจำกัดการใช้งานที่ทำให้เกิดระยะห่างเครื่อง NIR-HSI กับแตงโมเมื่อเคลื่อนที่ผ่านไต่กล้อง การที่จะให้ค่าการดูดกลืนแสงที่แม่นยำ (Sun et al., 2024) ควรวางกล้องตัวอย่างอยู่ในระนาบเดียวกับเซนเซอร์ของอุปกรณ์ ควรใช้ส่วนที่มีข้อมูลเปรียบเทียบให้เห็น และควมมีระยะห่างเท่ากันทุกตัวอย่าง (Jie et al., 2014) จึงได้แสดงการกระจายตัวจากสมการทำนายค่า TSS บริเวณส่วนกลางผลที่มีรัศมีความโค้งน้อยและอยู่ส่วนกลางผล

Table 2 Statistical results for predicting total soluble solids from PLSR models using various pretreatments

Model	Pretreatment	Factors	Calibration (n = 67)				Prediction (n = 37)		
			R	RMSEC	R	RMSECV	R	RMSEP	Bias
1	2D	8	0.923	0.560	0.809	0.867	0.915	0.591	0.019
2	Smt+1D	10	0.929	0.284	0.770	0.500	0.815	0.492	0.051
3	Smt+2D+SNV	16	0.973	0.244	0.765	0.701	0.977	0.231	0.047
4	Smt+1D+SNV	4	0.863	0.894	0.830	0.988	0.876	0.934	0.043
5	Smt+2D+SNV	9	0.835	0.531	0.620	0.777	0.806	0.571	-0.029
6	Smt+1D	11	0.878	0.391	0.692	0.609	0.769	0.555	0.123
7	Smt	13	0.890	0.412	0.674	0.705	0.790	0.615	-0.072

Smt = Savitzky-Golay smoothing

1D = Savitzky-Golay first derivative

2D = Savitzky-Golay second derivative

SNV = Standard normal variate

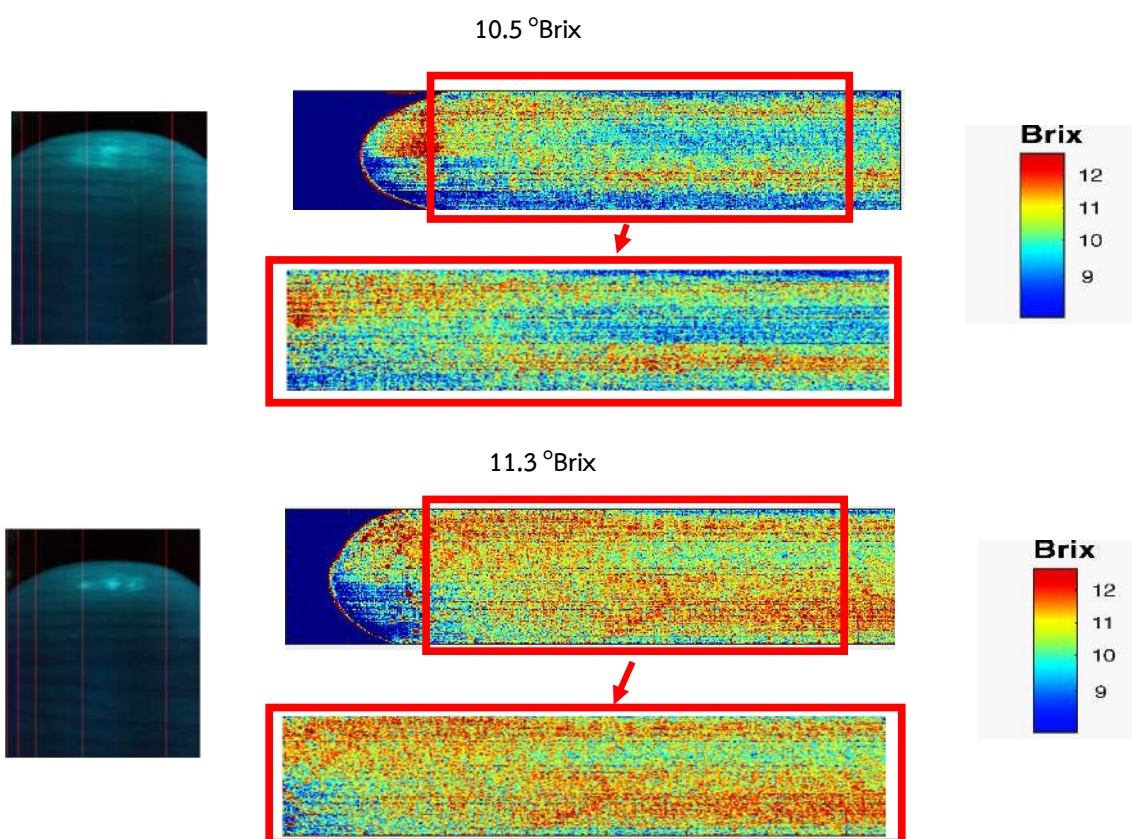


Figure 5 Total soluble solids mapping in watermelon using color illustrations from NIR-HSI system

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า NIR-HSI เป็นเทคนิคที่มีศักยภาพสูงในการประเมินคุณภาพภายในของแตงโมแบบไม่ทำลาย โดยเฉพาะการทำนายค่า TSS ซึ่งสามารถใช้เป็นดัชนีสำคัญในการจัดเกรด

ผลผลิตและตัดสินความเหมาะสมในการเก็บเกี่ยว อย่างไรก็ตาม การเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองควรดำเนินการเพิ่มเติมด้วยการใช้ตัวอย่างที่หลากหลายทั้งในด้านพื้นที่เพาะปลูก ฤดูเก็บเกี่ยว และช่วงอายุของ

แตงโม เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความสามารถในการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้เทคนิค NIR-HSI เพื่อทำนาย TSS โดยพัฒนาแบบจำลองการทำนายจากข้อมูลการสะท้อนแสงในช่วง 900–1,700 nm ร่วมกับการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยเทคนิค smoothing derivative และ SNV ทำนายค่า TSS ได้แม่นยำที่สุด คือ $r = 0.977$ $RMSEP=0.231$ และค่า bias=0.047 ภาพการกระจายตัวของค่า TSS ที่ได้จากการประมวลผลด้วยสมการที่พัฒนาแสดงแนวโน้มความแตกต่างของค่าดังกล่าวตามตำแหน่งบนพื้นผิวแตงโม โดยการกระจายตัว TSS ในบริเวณตรงกลางมีการกระจายตัวสีแดงมากที่สุด รองลงมาคือ ส่วนใกล้ขั้วผลและน้อยที่สุดที่ส่วนท้ายผล ความแม่นยำลดลงในบริเวณขอบของแตงโมซึ่งมีความโค้งมากกว่าบริเวณกลางผล อันเนื่องจากระยะห่างที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างกล้องกับพื้นผิวตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่า NIR-HSI เป็นเทคนิคที่มีศักยภาพสูงในการประเมินคุณภาพภายในของแตงโมแบบไม่ทำลายสามารถทำนายค่า TSS ซึ่งสามารถใช้เป็นดัชนีสำคัญในการจัดเกรดผลผลิตและตัดสินความเหมาะสมในการเก็บเกี่ยว

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเกษตร และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

แก้วกานต์ พวงสมบัติ อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล ธีรภรณ์ สุทธิวิจิตรภักดี อาทิตย์ พวงสมบัติ Satoru Tsuchikawa Tetsuya Inagaki และ Te Ma. 2560. การจำแนกเมล็ดถั่วเขียวสำหรับการเพาะงอกด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปี

และการวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 23(1): 23-29.

ธวัช ลวะเปารยะ. 2520. การปลูกแตงโม. วารสารพืชสวน. 13(1): 1-14.

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2555. มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 20-2555: แตงโม (Watermelon). กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. แหล่งข้อมูล: <https://www.acfs.go.th/standard/detail/231>. สืบค้น: 20 พฤษภาคม 2568.

Bonifazi, G., S. Serranti and R. Gasbarrone. 2022. Watermelon seeds germination study by shortwave infrared-based hyperspectral imaging techniques. pp. 9-35. In: Proceedings of the 11th UBT Annual International Conference on Mechatronics, System Engineering and Robotics; 2022 Oct 29–30; Pristina.

Bünig-Pfaue, H. 2003. Analysis of water in food by near infrared spectroscopy. Food Chemistry. 82(1): 107-115.

Burns, D.A. and E.W. Ciurczak, eds. 2008. Handbook of Near-Infrared Analysis. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press. 834 p.

Chiatrakul, J., K. Phuangsombut, A. Terdwongworakul and A. Phuangsombut. 2022. The evaluation of total soluble solid on sugar cane stalk using near infrared spectroscopy hyperspectral imaging technique. Thai Agricultural Research Journal. 40(3): 276-287.

Golic, M., K. Walsh and P. Lawson. 2003. Short-wavelength near-infrared spectra of sucrose, glucose, and fructose with respect to sugar concentration and temperature. Applied Spectroscopy. 57(2): 139-145.

Jie, D., L. Xie, X. Rao and Y. Ying. 2014. Using visible and near infrared diffuse transmittance technique to predict soluble solids content of watermelon in an on-line detection system. Postharvest Biology and Technology. 90: 1-6.

- Maheshwari S., V. Kumar, G. Bhadauria and A. Mishra. 2022. Immunomodulatory potential of phytochemicals and other bioactive compounds of fruits: A review. *Food Frontiers*. 3(2): 221–238
- Manley, M. 2014. Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials. *Chemical Society Reviews*. 43(24): 8200–8214.
- Martinsen, P. and P. Schaare. 1998. Measuring soluble solids distribution in kiwifruit using near-infrared imaging spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*. 14(3): 271–281.
- Muncan, J., M. Yamaguchi, I. Kashiwakura and R. Tsenkova. 2025. Non-invasive estimation of absorbed ionizing radiation dose in mice using near-infrared spectroscopy (NIRS) and aquaphotomics. *Radiation Physics and Chemistry*. 229: 112554.
- Qi H., M. He, Z. Huang, J. Yan and C. Zhang. 2024. Application of hyperspectral imaging for watermelon seed classification using deep learning and scoring mechanism. *Journal of Food Quality*. 2024(1): 7313214.
- Rungpichayapichet, P., M. Nagle, P. Yuwanbun, P. Khuwjitjaru, B. Mahayothee and J. Müller. 2017. Prediction mapping of physicochemical properties in mango by hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*. 159: 109–120.
- Simón-Portillo, F.J., D. Abellán-López, M. Fabra-Rodríguez, R. Peral-Orts and M. Sánchez-Lozano. 2023. Detection of hollow heart disorder in watermelons using vibrational test and machine learning. *Journal of Agriculture and Food Research*. 14: 100779. 10 p.
- Sun, J., A. Nirere, K.D. Dusabe, Z. Yuhao and G. Adrien. 2024. Rapid and nondestructive watermelon (*Citrullus lanatus*) seed viability detection based on visible near-infrared hyperspectral imaging technology and machine learning algorithms. *Journal of Food Science*. 89(7): 4403–4418.
- Tian, H.Q., Y.B. Ying, H.S. Lu, X.P. Fu and H.Y. Yu. 2007. Measurement of soluble solids content in watermelon by Vis/NIR diffuse transmittance technique. *Journal of Zhejiang University Science B*. 8(2): 105–110.
- Torge, R., E. Morgenbrod and T. Thomas. 1994. High-precision interference refractometer for length measurements. pp. 1–6. In: *Proceedings of SPIE, Conference on Interference Refractometry*, April 11–12, 1994, Bellingham, WA, USA. Bellingham, WA: SPIE.
- Vega-Castellote, M., M.T. Sánchez, I. Torres, M.J. de la Haba and D. Pérez-Marín. 2022. Assessment of watermelon maturity using portable new generation NIR spectrophotometers. *Scientia Horticulturae*. 304: 111328.
- Vega-Castellote, M., M.T. Sánchez, J.P. Wold, N.K. Afseth and D. Pérez-Marín. 2023. Near infrared light penetration in watermelon related to internal quality evaluation. *Postharvest Biology and Technology*. 204(5): 112477.
- Workman, Jr., J. and L. Weyer. 2012. *Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near-Infrared Spectroscopy*. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 326 p.