

การพัฒนาเทคนิคการทำนายค่าปริมาณไนเตรทในใบว่านทางจระเข้
โดยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

Development of Nitrate Content Prediction Technique of Aloe Vera Leaves
using Nondestructive Technique by Near Infrared Spectroscopy

สุวิทย์ บุตรเสน^{1/} อนุปันท์ เทอดวงศ์วรกุล^{1/} อาทิตย์ พวงสมบัติ^{1/} แก้วกานต์ พวงสมบัติ^{1/*}
Suwit Bootsens^{1/} Anupun Terdwongworakul^{1/} Arthit Phuangsombut^{1/} Kaewkarn Phuangsombut^{1/*}

Received 28 Feb. 2024/Revised 25 Mar. 2024/Accepted 9 Apr. 2024

ABSTRACT

This study examined the use of near-infrared spectroscopy to assess nitrate concentration of freshly harvested aloe vera leaves. Equations for predicting nitrate concentration of aloe vera leaves were developed in this work, based on the analysis of 80 samples. The NIR spectra were collected from different positions on the outer rind, specifically the apex, center, and base. Subsequently, the outer layer of the corresponding sites was removed and the concentration of nitrate in the aloe vera gel was examined by nitrate ion meter. The partial least squares regression (PLSR) method was employed to create a prediction equation for the nitrate content. The equation derived from the spectra obtained at the central position demonstrated the highest accuracy, as indicated by a correlation coefficient of prediction of 0.98 and root mean squared error of prediction of 3.50 ppm. The regression coefficients of the nitrate prediction equations were dominated at the wavelengths of 957, 1104 and 1154 nm. Therefore, it is possible to use the NIRS technique to predict the nitrate content of aloe vera leaves without destroying the sample. This technique will allow a quick and accurate measurement of the nitrate content in aloe vera leaves.

Keywords: nitrate; aloe vera; near infrared spectroscopy

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

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

* Corresponding author: fengkkb@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ใบว่านหางจระเข้ที่มีคุณภาพต้องมีปริมาณสารไนเตรทต่ำ และจำเป็นต้องมีการตรวจสอบก่อนนำเข้าสู่กระบวนการแปรรูป เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIRS) สามารถวัดองค์ประกอบทางเคมีภายในของผลผลิตเกษตรโดยไม่ทำลายตัวอย่าง งานวิจัยนี้จึงพัฒนาเทคนิค NIRS เพื่อนำมาใช้ในการทำนายปริมาณไนเตรทในใบว่านหางจระเข้สดแบบไม่ทำลายตัวอย่าง โดยทำการทดลองเพื่อสร้างสมการทำนายปริมาณไนเตรทจากตัวอย่างใบว่านหางจระเข้ทั้งหมด 80 ตัวอย่าง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่บริเวณผิวเปลือกตรงตำแหน่งหลังใบทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ได้แก่ โคนใบ กลางใบ และปลายใบ แล้วนำมาปอกเปลือกตัดเอาส่วนที่เป็นเนื้อเจลบริเวณที่ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงแต่ละตำแหน่งมาหาค่าปริมาณไนเตรท และสร้างสมการทำนายค่าปริมาณไนเตรท ด้วยวิธี partial least squares regression พบว่า สมการที่สร้างจากข้อมูลสเปกตรัมของตำแหน่งกลางใบให้ความแม่นยำในการทำนายสูงที่สุด โดยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการทำนายมีค่า 0.98 ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย 3.50 พีพีเอ็ม และสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายที่มีความสัมพันธ์กับค่าไนเตรต ได้แก่ ความยาวคลื่น 957 1,104 และ 1,154 นาโนเมตร ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเทคนิค NIRS มาใช้ในการทำนายค่าปริมาณไนเตรทของใบว่านหางจระเข้แบบไม่ทำลายตัวอย่าง ซึ่งจะช่วยให้การวัดปริมาณสารไนเตรทในใบว่านหางจระเข้สามารถทำได้แม่นยำและรวดเร็วขึ้น

คำสำคัญ: ไนเตรท; ว่านหางจระเข้; สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

บทนำ

ว่านหางจระเข้ (*Aloe vera* (L.) Burm.f.) เป็นพืชสมุนไพรที่นิยมปลูกไว้ใช้ประโยชน์ในครัวเรือน มีลักษณะใบหนาอวบน้ำ เมื่อผ่าใบออกจะพบส่วนที่เป็นเนื้อวุ้นใส อุดมไปด้วยสารสำคัญต่าง ๆ มีสรรพคุณทางยาที่ทำหน้าที่ฆ่าเชื้อและสมานแผล และเป็นตัวกระตุ้นเซลล์เนื้อเยื่อให้เจริญเติบโต ทำให้แผลหายเร็วขึ้น (วิวัฒน์และคณะ, 2538) ว่านหางจระเข้ยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีศักยภาพสูงจากการศึกษาฐานข้อมูลผลิตภัณฑ์เปิดตัวใหม่ทั่วโลก GNPD (global new products database) พบว่า ในช่วงปี พ.ศ. 2561 – 2566 มีผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของว่านหางจระเข้เฉพาะที่รับประทานได้จำนวน 2,581 รายการ กลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีว่านหางจระเข้เป็นส่วนผสมมากที่สุด 3 อันดับแรก คือน้ำผลไม้ ผลิตภัณฑ์ดูแลสุขภาพ และผลิตภัณฑ์นม ตามลำดับ สำหรับกลุ่มเครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์ดูแลร่างกาย มีการรายงานผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของว่านหางจระเข้จำนวน 127,866 รายการ โดยผลิตภัณฑ์กลุ่มเครื่องสำอางที่มีว่านหางจระเข้เป็นส่วนผสมมากที่สุด 3 อันดับแรก คือ ผลิตภัณฑ์ดูแลผิว ผลิตภัณฑ์สำหรับอาบน้ำและสบู่ และผลิตภัณฑ์สำหรับเส้นผม ตามลำดับ (สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า, 2566) อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารสำคัญในใบว่านหางจระเข้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น สภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น แสง และแร่ธาตุในดิน (Suga and Hirata, 1983) ซึ่งอาจรวมไปถึงพื้นที่เพาะปลูก ฤดูกาลเก็บเกี่ยว และอายุของใบด้วย

ว่านหางจระเข้ปลูกมากใน จ.ประจวบคีรีขันธ์ มีพื้นที่ปลูก 4,923 ไร่ จากสถิติการผลิตปี พ.ศ. 2565 มีจำนวนเกษตรกรผู้ปลูกว่านหางจระเข้ ทั่วประเทศ 610 ราย พื้นที่ปลูก 5,248 ไร่ ผลผลิตรวม 186,120 ตัน

ตลาดส่งออกที่สำคัญ ได้แก่ จีน พม่า สิงคโปร์ ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา เวียดนาม กัมพูชา ตะวันออกกลาง ฮองกง ไต้หวัน เกาหลี และอังกฤษ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาเกษตรกรพบกับปัญหาภัยแล้งทำให้ผลผลิตที่ได้มีปริมาณไม่เพียงพอกับความต้องการของตลาด เกษตรกรจึงใช้วิธีการให้ปุ๋ยเคมีเพื่อเร่งการเจริญเติบโตของว่านทางจระเข้ ทำให้ผลผลิตไม่ได้มาตรฐานสำหรับภาคอุตสาหกรรม (สำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร, 2566) เนื่องจากว่านทางจระเข้มีการเจริญเติบโตทางใบอย่างรวดเร็วทำให้ผลผลิตที่ได้มีอายุไม่ถึงเกณฑ์ในการเก็บเกี่ยว และมีการสะสมของปริมาณไนเตรทที่ใบว่านทางจระเข้ในปริมาณสูง หากมีการบริโภคในปริมาณมาก อาจเกิดอันตรายต่อผู้บริโภคได้ เนื่องจากสารไนเตรทเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกรีดิวส์เป็นไนไตรท์ และเมื่อทำปฏิกิริยากับเอมีนหรือเอไมด์ทำให้เกิดสารประกอบเอ็นไนโตรโซที่เป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง (Santamaria, 2006) ปัจจุบันยังไม่ทราบปริมาณไนเตรทที่มีผลกระทบต่อร่างกายที่แน่ชัด อย่างไรก็ตามองค์การอนามัยโลกได้กำหนดปริมาณไนเตรทที่ยอมรับได้ต่อวัน (acceptable daily intake, ADI) ไว้ที่ 3.7 มก./น้ำหนักตัว 1 กก.ของผู้บริโภค (WHO, 2002) ใบว่านทางจระเข้ที่มีคุณภาพจะต้องมีปริมาณสารไนเตรทต่ำเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบปริมาณสารไนเตรทก่อนนำเข้าสู่กระบวนการแปรรูปในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งการตรวจสอบปริมาณไนเตรทส่วนใหญ่ใช้วิธีการตรวจสอบโดยการใช้ nitrate test strip เนื่องจากสามารถใช้งานได้สะดวกและรวดเร็ว แต่การตรวจสอบด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องทำลายตัวอย่างใบว่านทางจระเข้ทำให้เกิดความสูญเสีย ทั้งผลตรวจสอบยังมีความละเอียดต่ำ และมีค่าใช้จ่ายสูง

ปัจจุบันเทคนิคการตรวจสอบผลผลิตทางการเกษตรแบบไม่ทำลายตัวอย่างด้วยวิธีสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (near infrared spectroscopy, NIRS) ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย โดย NIRS เป็นวิธีที่รวดเร็ว มีความแม่นยำในการวัดองค์ประกอบทางเคมีภายในของผลผลิตเกษตรและอาหาร (Fu et al., 2007; Terdwongworakul et al., 2012) ใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบสั้น ประหยัดแรงงาน ลดการใช้สารเคมีในการตรวจวิเคราะห์ และต้นทุนต่ำ (Osborne et al., 1993; Williams and Norris, 1987) ประเทศไทยมีการใช้เทคนิค NIRS ในการวัดปริมาณไนเตรทของผลผลิตเกษตร เช่น สับปะรด (Srivichien et al., 2015) แต่ยังไม่พบการใช้เทคนิค NIRS ในการวัดปริมาณไนเตรทของใบว่านทางจระเข้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS ในการทำนายค่าปริมาณไนเตรทในใบว่านทางจระเข้แบบไม่ทำลายตัวอย่าง ที่ทำได้รวดเร็วกว่า และมีความแม่นยำสูง

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

สุ่มตัวอย่างใบว่านทางจระเข้ จากไร่ซัพพลายเออร์ของห้างหุ้นส่วนจำกัด บางกอกโกลที่ได้จากแหล่งเพาะปลูกในพื้นที่ จ. กาญจนบุรี จำนวน 4 ไร่ ไร่ละ 20 ใบ รวมทั้งหมด 80 ใบ นำตัวอย่างไปยังห้องปฏิบัติการสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จากนั้น ทำความสะอาดตัวอย่างโดยการล้างด้วยน้ำสะอาด แล้วนำมาวางผึ่งให้แห้งในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25° ซ เป็นเวลา 24 ชม. เพื่อปรับอุณหภูมิ

ใบว่านหางจระเข้ก่อนการวัดค่าการดูดกลืนแสง การวัดค่าการดูดกลืนแสง

นำใบว่านหางจระเข้ทั้งหมดมาวัดค่าการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด บริเวณผิวเปลือกตรงตำแหน่งหลังใบ 3 ตำแหน่ง คือ โคนใบ กลางใบ และปลายใบ โดยแต่ละส่วนวัดมีขนาดพื้นที่กว้างยาว 3x3 ซม. (Figure 1) ด้วยเครื่อง NIRS (DLP NIR scan Nano, Texas Instruments, Dallas, Texas,

USA) ใช้โหมดการวัดแบบสะท้อนกลับ (reflectance mode) ที่ช่วงความยาวคลื่น 900 - 1700 นาโนเมตร เก็บความยาวคลื่นทุก ๆ 3 นาโนเมตร ด้วยโปรแกรม DLP NIR scan Nano GUI (Texas Instruments, Dallas, Texas, USA) สอบเทียบเครื่อง NIRS โดยการสแกน Spectralon® white reference ก่อนวัดค่าการดูดกลืนแสงของใบว่านหางจระเข้

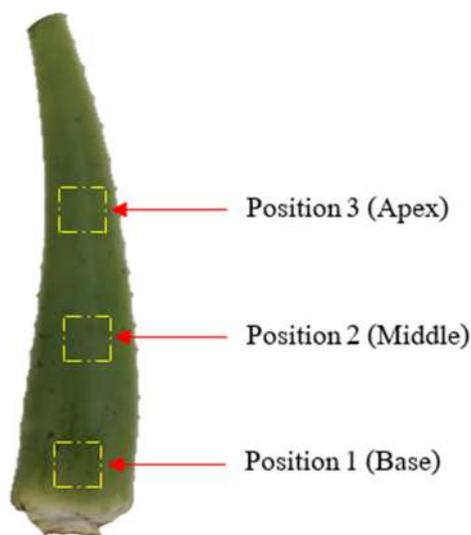


Figure 1 Positions made on the outer rind of an aloe vera leaf for acquiring near infrared spectra

การวิเคราะห์ค่าปริมาณไนเตรท

นำตัวอย่างที่ผ่านการวัดค่าการดูดกลืนแสง มาวิเคราะห์ปริมาณไนเตรท โดยปอกเปลือกตัดเอาส่วนที่เป็นเนื้อเจลบริเวณที่ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงแต่ละตำแหน่งมาบดละเอียดด้วยเครื่อง crusher (Wonder Blender, WB-1, Osaka Chemical Co., Ltd., Osaka, Japan) เพื่อให้ได้ตัวอย่างเนื้อว่านหางจระเข้ขนาดประมาณ 1 x 1 มม. จากนั้นนำตัวอย่างที่เป็นส่วนผสมทั้งน้ำและเนื้อว่านหางจระเข้มาวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทด้วยเครื่อง nitrate ion meter (LAQUAtwin, N03-11, HORIBA

Advanced Techno Co., Ltd., Kyoto, Japan) ที่มีช่วงการวัดตั้งแต่ 6 - 9,900 ไมโครกรัม/ก. ตำแหน่งละ 2 ซ้ำ ก่อนนำไปคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยปริมาณไนเตรทของแต่ละตำแหน่ง

การวิเคราะห์ทางสถิติ

หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าปริมาณไนเตรท โดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มสร้างสมการทำนาย (calibration set) จำนวน 60 ตัวอย่าง และกลุ่มทดสอบสมการทำนาย (prediction set) จำนวน 20 ตัวอย่าง โดยให้ตัวอย่างทั้งสองกลุ่มมีการกระจายตัวค่าปริมาณ

ไนเตรทใกล้เคียงกัน และค่าปริมาณไนเตรทต่ำสุด และสูงสุดอยู่ในกลุ่มสร้างสมการทำนาย นำข้อมูลสเปกตรัมของการดูดกลืนค่าแสงที่ได้ (raw data) มาตรวจสอบตัดข้อมูลที่ผิดปกติ (outlier) โดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ univariate analysis และ multivariate analysis (Leys et al., 2019) และปรับแต่งสเปกตรัมเพื่อลดสัญญาณรบกวน (noise) ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ smoothing แบบ Savitzky-Golay, first derivative (1D), second derivative (2D) แบบ Savitzky-Golay, standard normal variate (SNV) และการรวมเทคนิคปรับแต่งสเปกตรัมผสมตั้งแต่สองเทคนิคขึ้นไป แล้วนำไปสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR) โดยใช้โปรแกรม the Unscambler version 9.8 (Camo, Oslo, Norway) สร้างโมเดลเพื่อทำนายค่าปริมาณไนเตรทของตัวอย่างในกลุ่มทดสอบ สมการทำนายความแม่นยำของโมเดลพิจารณาจากค่าตัวแปรทางสถิติที่ได้จากสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์การทำนาย (correlation coefficient of prediction, R) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean squared error of prediction, RMSEP) โดยโมเดลที่เหมาะสมที่สุดควรมีค่า R สูง และ ค่า RMSEP ต่ำ (ประสาน, 2552)

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากข้อมูลการดูดกลืนแสงที่ได้จากตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านการปรับแต่งในช่วงความยาวคลื่น 900–1,700 นาโนเมตร (Figure 2A) พบว่ามีพีคสำคัญในช่วงความยาวคลื่น 1,400–1,500 นาโนเมตร เป็นโอเวอร์โทนอันดับที่หนึ่งของพันธะ O-H ของกรดคลอโรจีนิก น้ำ แอลกอฮอล์ และคาร์โบไฮเดรต (Correia et al., 2018) แต่หลังการปรับแต่งเพื่อลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี second derivative แบบ Savitzky-Golay ทำให้ตำแหน่งของพีคชัดเจนขึ้น (Figure 2B) ที่ความยาวคลื่น 957 1,154 1,408 และ 1,660 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยที่ความยาวคลื่น 1,408 นาโนเมตร เป็นช่วงการดูดกลืนของน้ำ (Mainali et al., 2014) และที่ความยาวคลื่น 1,660 นาโนเมตร เป็นโอเวอร์โทนอันดับที่หนึ่งของพันธะ C-H ของลิกนิน สตาร์ช โปรตีน และไนโตรเจน (Fourty et al., 1996) โดยทั่วไป องค์ประกอบทางเคมีของเจลจากใบว่านทางจระเข้ประกอบด้วยน้ำ 99.19% (ก่องกาญจน์, 2536) ซึ่งอาจจะไปบดบังหรือลดบทบาทการดูดกลืนแสงขององค์ประกอบอื่นๆ ได้เนื่องจากน้ำมีความสามารถในการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดได้ดี (วารุณี และคณะ, 2555)

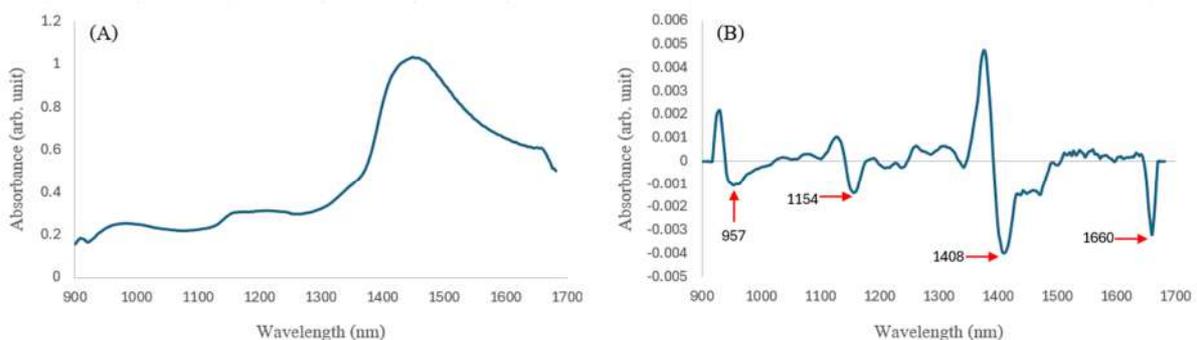


Figure 2 Original (A) and second derivative (B) spectra of aloe vera leaves

การสร้างสมการทำนายค่าปริมาณไนเตรทด้วยเทคนิค NIRS จากการวัดแบบสะท้อนกลับพบว่า การใช้ตัวอย่างค่าการดูดกลืนแสงตรงตำแหน่งที่ 2 (กลางใบ) ให้ผลดีที่สุด โดยมีความหนาเปลือกเฉลี่ยที่ตำแหน่งโคนใบ กลางใบ และปลายใบ 2.10 1.80 และ 1.59 มม. ตามลำดับ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาเปลือก 0.15 0.12 และ 0.13 ตามลำดับ ซึ่งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่บริเวณกลางใบมีค่าน้อยกว่าบริเวณอื่น สอดคล้องกับเหตุผลที่ว่า ส่วนกลางใบมีความหนาสม่เสมอมากกว่า จากข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความหนาของเปลือกแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน โครงสร้างของใบว่านทางจรจะเข้าบริเวณกลางใบมีความหนาที่

สม่เสมอมากกว่าเมื่อเทียบกับตำแหน่งโคนใบและปลายใบ ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงจากตำแหน่งกลางใบให้ผลดีที่สุด โดย R ของค่าจริงและค่าที่ทำนายได้มีค่า 0.75 RMSEP มีค่า 14.10 ไมโครกรัม/ก. และ bias มีค่า -0.46 ไมโครกรัม/ก. ส่วนการใช้ตัวอย่างค่าการดูดกลืนแสงจากตำแหน่งที่ 3 (ปลายใบ) ให้ผลน้อยที่สุด R มีค่า 0.49 RMSEP มีค่า 17.71 ไมโครกรัม/ก. และ bias มีค่า -0.27 ไมโครกรัม/ก. (Table1) ดังนั้น จึงเลือกใช้ค่าการดูดกลืนแสงจากตำแหน่งกลางใบ เพื่อนำไปปรับแต่งสเปกตรัมในการสร้างโมเดลทำนายค่าปริมาณไนเตรท เนื่องจากให้ค่า R สูงที่สุด และ RMSEP bias ต่ำที่สุด

Table 1 Calibration and validation results of PLSR based on preprocessed spectra for predicting nitrate content in different positions of aloe vera leaf

Position	Factors	Calibration		Validation		
		R	RMSEC (µg/g)	R	RMSEP (µg/g)	Bias (µg/g)
Base	9	0.95	6.66	0.57	20.14	-2.43
Middle	11	0.98	3.71	0.75	14.10	-0.46
Apex	3	0.63	15.54	0.49	17.71	-0.27
Average	17	0.98	3.68	0.72	15.68	-0.81

RMSEC = Root mean squared error of calibration

RMSEP = Root mean squared error of prediction

สำหรับโมเดลที่ทำนายค่าปริมาณไนเตรทได้ดีที่สุด คือ สมการที่ปรับแต่งสเปกตรัมโดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี smoothing แบบ Savitzky-Golay ร่วมกับวิธี second derivative แบบ Savitzky-Golay สมการให้ค่า R สูงสุด 0.98 ค่า RMSEP 3.50 ไมโครกรัม/ก. มีค่าแพกเตอร์ 16 (Table 2) ซึ่งเป็นจำนวนแพกเตอร์ที่มีค่าสูง แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างของตัวอย่างใบว่านทางจรจะเข้ามีความซับซ้อนและ

ตัวอย่างมีความหลากหลาย มาจากแหล่งเพาะปลูกหลายแหล่ง จึงต้องใช้ข้อมูลสเปกตรัมจากแพกเตอร์จำนวนมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย ของแก้วกานต์ และคณะ (2560) ในการวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR-HSI) สำหรับการคัดแยกเมล็ดถั่วเขียวโดยมีค่าแพกเตอร์ 20 ซึ่งให้ค่า R สูงสุด และ RMSEP ต่ำสุด

Table 2 Statistical results for predicting nitrate content from PLSR models using various pretreatments

Pretreatment	Factors	Calibration (n = 60)			Prediction (n = 20)		
		R	RMSEC ($\mu\text{g/g}$)	R	RMSECV ($\mu\text{g/g}$)	R	RMSEP ($\mu\text{g/g}$)
Original	4	0.66	15.93	0.53	18.19	0.67	15.77
SMT	17	0.98	3.39	0.73	15.42	-0.07	53.68
1D	13	0.98	3.02	0.76	14.00	0.47	41,821.04
2D	11	0.98	3.71	0.75	14.10	0.58	9,236.74
SNV	2	0.64	16.38	0.56	17.73	0.62	17.32
1D + SNV	11	0.98	4.18	0.74	14.36	0.09	1,259.93
2D + SNV	8	0.96	5.35	0.72	14.85	-0.33	874.70
SMT + 1D	12	0.97	5.11	0.79	13.42	-0.01	64,004.13
SMT + 2D	16	0.98	3.50	0.95	5.99	0.98	3.50
SMT + SNV	14	0.97	4.63	0.72	15.75	0.11	598.23
SMT + 1D + SNV	11	0.96	5.35	0.78	13.73	0.09	651.55
SMT + 2D + SNV	12	0.97	4.73	0.79	13.24	0.03	193.43

SMT = Savitzky-Golay smoothing
 1D = Savitzky-Golay first derivative
 2D = Savitzky-Golay second derivative
 SNV = Standard normal variate

การกระจายตัวของข้อมูลในการสร้างสมการทำนายค่าระหว่างปริมาณไนเตรทที่วัดได้จริง

เปรียบเทียบกับปริมาณไนเตรทที่ทำนายแสดงใน Figure 3

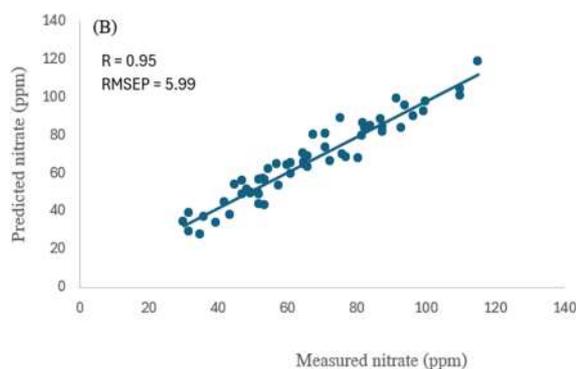
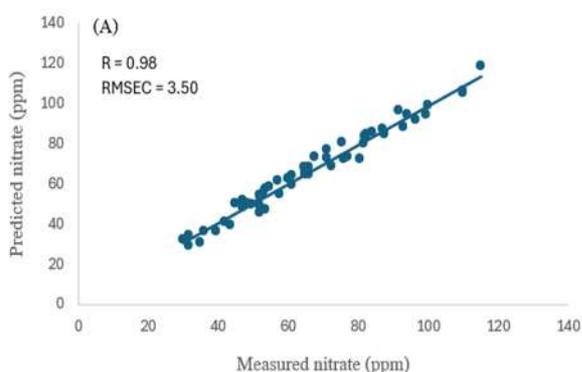


Figure 3 Scatter plots of measured nitrate content versus predicted nitrate content of aloe vera leaves in the calibration model (A) and validation model (B)

สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายที่มีอิทธิพล ได้แก่ ความยาวคลื่น 957 1,104 และ 1,154 นาโนเมตร (Figure 4) ผลการศึกษาที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Srivichien

et al. (2015) ที่ได้ทำการวัดค่าสเปกตรัมตัวอย่างโพแทสเซียมไนเตรท (Merck-99%) แล้วพบว่า พีคของไนเตรทอยู่ที่ความยาวคลื่น 963 1,096 และ 1,160 นาโนเมตร สัมประสิทธิ์การถดถอยของ

สมการทำนายที่มีอิทธิพลอื่น ๆ ได้แก่ความยาวคลื่น 976 นาโนเมตร เป็นตำแหน่งการดูดกลืนของน้ำ และความยาวคลื่น 1,430 นาโนเมตร เป็นตำแหน่งการดูดกลืนของพันธะ N-H จากเอไมด์ปฐมภูมิ (Workman and Weyer, 2012)

ในการเพิ่มประสิทธิภาพ และความเสถียรของสมการในการทำนายค่าปริมาณไนเตรทในใบว่านหางจระเข้แบบไม่ทำลายตัวอย่างโดยใช้

เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ อาจทำได้ โดยการใช้ตัวอย่างใบว่านหางจระเข้ที่มีความหลากหลายและมีความแตกต่างในด้านต่าง ๆ ได้แก่ พื้นที่ปลูก ฤดูกาลเก็บเกี่ยว อายุของใบ และจำนวนตัวอย่างที่นำมาทดสอบ (Phuangsoambut et al., 2023) เพื่อให้ข้อมูลครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงที่กว้างขึ้น

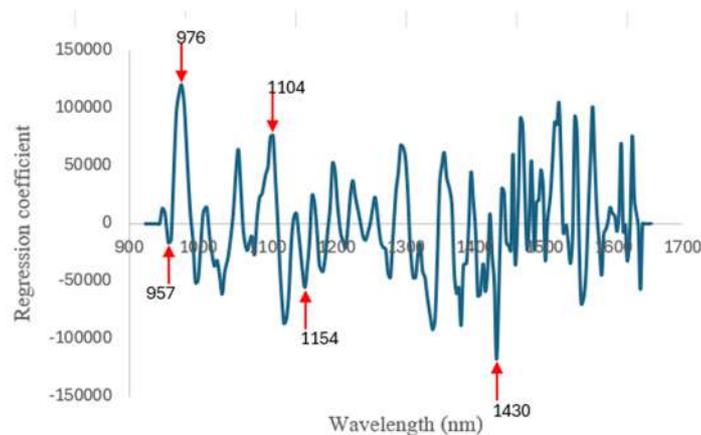


Figure 4 Regression coefficient of the calibration model for nitrate prediction

สรุปผลการทดลอง

การใช้เทคนิค NIRS ทำนายปริมาณไนเตรทในใบว่านหางจระเข้สดแบบไม่ทำลายตัวอย่างพบว่า การทำนายค่าปริมาณไนเตรทในใบว่านหางจระเข้ที่มีการวัดแบบสะท้อนกลับได้สมการทำนายที่ดีที่สุด โดยการใช้วิธีปรับแต่งสเปกตรัมแบบวิธี smoothing แบบ Savitzky-Golay ร่วมกับวิธี second derivative แบบ Savitzky-Golay ได้ค่า R สูงสุด 0.98 และ ค่า RMSEP 3.50 ไมโครกรัม/ก. แสดงให้เห็นว่าเทคนิค NIRS มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการทำนายค่าปริมาณไนเตรทของใบว่านหางจระเข้แบบไม่ทำลายตัวอย่าง การเพิ่มประสิทธิภาพและ

ความเสถียรของสมการทำนายควรใช้ตัวอย่างใบว่านหางจระเข้ที่มีความหลากหลาย จากพื้นที่เพาะปลูกที่แตกต่างกัน ฤดูกาลเก็บเกี่ยว อายุของใบ รวมทั้งจำนวนตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณ ห้างหุ้นส่วนจำกัด บางกอก อโกล ที่ให้การสนับสนุนตัวอย่างใบว่านหางจระเข้ และงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

- แก้วกานต์ พวงสมบัติ อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล อนุรักษ์ สุธวิจิตรภักดี อาทิตย์ พวงสมบัติ Satoru Tsuchikawa Tetsuya Inagaki และ Te Ma. 2560. การจำแนกเมล็ดถั่วเขียวสำหรับการเพาะงอก ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีและการวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 23(1): 23-29.
- กองกัญจน์ อังสุภาณี. 2536. การศึกษากรรมวิธีการผลิตว่านหางจระเข้ผง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 152 หน้า.
- ประสาน เหล่าทรัพย์เจริญ. 2552. การศึกษาเชิงทดลองการใช้ข้อมูลสเปกตรัมเปลือกปรับปรุงการวัดคุณภาพภายในของส้มและมะม่วงด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 168 หน้า.
- วารุณี ณะแพสย์ คุมาพร เกษมสำราญ ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล ปิติพร ฤทธิเรืองเดช ชงชัย สุวรรณสินธุ์ และรณฤทธิ์ ฤทธิธิน. 2555. เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม (Near-Infrared technology and applications in industries). สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. 270 หน้า.
- วิวัฒน์ วิสุทธิโกศล บวรศิลป์ เชาวชื่น เสาวภา สุวรรณรัตน์ ศิริพร ศรีอุไรรัตน์ และวิจิตร บุญพรคนาวิก. 2538. รายงานการศึกษาว่านหางจระเข้ต่อบาดแผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก. วารสารจดหมายเหตุทางแพทย์ แพทยสมาคมแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 78(8): 403-409.
- สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า. 2566. ว่านหางจระเข้สมุนไพรศึกษาของไทย. แหล่งข้อมูล: <https://tpso.go.th/news/2310000000075>. สืบค้น: 11 พฤศจิกายน 2566.
- สำนักส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร. 2566. สถานการณ์การผลิตว่านหางจระเข้. แหล่งข้อมูล: <http://www.agriman.doae.go.th/home/news/year2566.html>. สืบค้น: 13 พฤศจิกายน 2566.
- Correia, R.M., F. Tosato, E. Domingos, R.R.T. Rodrigues, L.F.M. Aquino, P.R. Filgueiras, V. Lacerda Jr. and W. Romão. 2018. Portable near infrared spectroscopy applied to quality control of Brazilian coffee. *Talanta*. 176: 59-68.
- Fourty, T., F. Baret, S. Jacquemoud, G. Schmuck and J. Verdebout. 1996. Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition: Direct and inverse problems. *Remote Sensing of Environment*. 56(2): 104-117.
- Fu, X., Y. Ying, H. Lu and H. Xu. 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.
- Lays, C., M. Delacre, Y. L. Mora, D. Lakens and C. Ley. 2019. How to classify, detect, and manage univariate and multivariate outliers, with emphasis on pre-registration. *International Review of Social Psychology*. 32(1): 1-10.
- Mainali, D., J. Li, P. Yehl and N. Chetwyn. 2014. Development of a comprehensive near infrared spectroscopy calibration model for rapid measurements of moisture content in multiple pharmaceutical products. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 95: 169-175.
- Osborne, B.G., T. Fearn and P.H. Hindle. 1993. *Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis*. Longman Scientific and Technical, Harlow. 227 p.
- Phuangsombut, A., K. Phuangsombut, J. Meetim and A. Terdwongworakul. 2023. Application of

- miniaturized near-infrared spectrometer for indirectly determining flesh thickness of intact polished coconut. *Postharvest Biology and Technology*. 198(5): 112224.
- Santamaria, P. 2006. Nitrate in vegetables: Toxicity, content, intake and EC regulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 86(1): 10-17.
- Srivichien, S., A. Terdwongworakul and S. Teerachaichayut. 2015. Quantitative prediction of nitrate level in intact pineapple using Vis-NIRS. *Journal of Food Engineering*. 150: 29-34.
- Suga, T. and T. Hirata. 1983. The efficacy of the aloe plants chemical constituents and biological activities. *Cosmetics and Toiletries*. 98(6): 105-108.
- Terdwongworakul, A., N. Nakawajana, S. Teerachaichayut and A. Janhiran. 2012. Determination of translucent content in mangosteen by means of near infrared transmittance. *Journal of Food Engineering*. 109(1): 114-119.
- Williams, P. and K. Norris. 1987. *Near-infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, Minnesota. 330 p.
- Workman Jr., J. and L. Weyer. 2012. *Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near-infrared Spectroscopy*. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, Florida. 326 p.
- World Health Organization (WHO). 2002. *Evaluation of Certain Food Additives: Fifty-ninth Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA)*. Geneva. 161 p.