

การประเมินค่าโพลาไรเซชันท่อนอ้อยแบบไม่ทำลายด้วย ภาพไฮเปอร์สเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้

Non-destructive Evaluation of Polarization in Sugarcane Stalk Using Near Infrared Hyper Spectral Imaging

จิรวาสต์ เจียตระกุล แก้วกานต์ พวงสมบัติ อาทิตย์ พวงสมบัติ และ อนุปันท์ เทอดวงศ์วรกุล *

Jirawat Chiatrakul, Kaewkarn Phuangsombut, Arthit Phuangsombut and Anupun Terdwongworakul *

Received: 3 February 2022, Revised: 24 August 2022, Accepted: 13 September 2022

บทคัดย่อ

เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เป็นเทคนิคที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประเมินค่าโพลาไรเซชันหรือโพลาไรซ์แบบไม่ทำลายได้ ตลอดระยะเวลาในการประเมินเมื่อเทียบกับวิธีการปกติในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตาม เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เป็นการวัดเฉพาะจุดบนท่อนอ้อยได้เท่านั้น ไม่ครอบคลุมพื้นผิวของตัวอย่าง งานวิจัยนี้จึงเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคภาพไฮเปอร์สเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ ที่สามารถสแกนได้ทั่วพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ และสามารถสร้างภาพในการตรวจสอบค่าโพลาไรเซชันบนพื้นที่ระนาบของผิวท่อนอ้อย ในการศึกษาใช้ท่อนอ้อยพันธุ์ขอนแก่น 3 จำนวน 300 ตัวอย่าง ที่มีอายุการเก็บเกี่ยวระหว่าง 8-11 เดือน จากแปลงในจังหวัดสุพรรณบุรี มีค่าโพลาไรซ์ในช่วง 4.93-23.38 เปอร์เซ็นต์ นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 900-1700 นาโนเมตร โดยตัวอย่างท่อนอ้อยแต่ละท่อนเคลื่อนที่ผ่านไดคัลลิ่งบันทึกลค่าการดูดกลืนแสงของระบบไฮเปอร์สเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ โดยนำเทคนิค partial least squares regression มาใช้ในการวิเคราะห์สร้างสมการทำนายค่าโพลาไรเซชัน และศึกษาผลกระทบของไขมันผิวท่อนอ้อย ผลการศึกษาพบว่า สมการที่สร้างจากตัวอย่างท่อนอ้อยที่ผ่านการทำความสะอาดพื้นผิวให้สมบูรณ์ในการทำนายดีที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดเท่ากับ 0.83 ข้อผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายเท่ากับ 1.52 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำสมการนี้ไปสร้างภาพการกระจายของค่าโพลาไรซ์บนพื้นที่ระนาบของผิวท่อนอ้อย โดยการทำนายค่าโพลาไรซ์ในแต่ละพิกเซลของภาพไฮเปอร์สเปกตรัม ภาพแสดงการกระจายตัวของโพลาไรซ์แสดงปริมาณโพลาไรซ์ที่สัมพันธ์กันบนพื้นที่ระนาบของผิวท่อนอ้อย และทำให้พบว่า ท่อนอ้อยบริเวณด้านบนลำต้นมีค่าโพลาไรซ์

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

น้อยกว่าท่อนอ้อยที่บริเวณด้านล่างลำต้น ผลจากการศึกษานี้แสดงถึงศักยภาพของเทคนิคภาพไฮเปอร์สเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ในการนำไปพัฒนาเป็นเครื่องตรวจวัดค่าโพลาไรเซชันเร็วและไม่ทำลายได้ในอนาคต

คำสำคัญ: อ้อย, โพลาไรเซชัน, อินฟราเรดย่านใกล้, การวัดแบบไม่ทำลาย, ภาพไฮเปอร์สเปกตรัม

ABSTRACT

Near-infrared spectroscopy can be applied to assess polarization (Pol) non-destructively. It can reduce the analysis time compared to conventional methods in the laboratory. However, assessment by near-infrared spectroscopy is a spot measurement on the sugarcane, not covering the surface of the sample. This research applied non-destructive quality analysis using near-infrared hyper spectral imaging technique that can cover the whole surface in scanning to create an image to evaluate the Pol value on the plane area of sugarcane surface. This is an advantage compared to near-infrared spectroscopy techniques. In the study, 300 sugarcane stalks of cultivar Khon Kaen 3 used were harvested at age between 8-11 months from Suphan Buri province. The Pol values of the samples were in the range of 4.93-23.38%. The absorbance of each stalk was measured for in the range of 900-1700 nm. Each cane sample was scanned and measured by placing it on a translational moving platform which conveyed the samples past under the absorbance recording camera of the near-infrared hyperspectral system. The partial least squares regression technique was used to create a Pol prediction equation by studying the effects of wax on the surface of sugarcane. The results showed that the optimal models developed from surface-cleaned sugarcane samples provided the best predictive performance. The determination coefficient was 0.83 and the standard error of prediction was 1.52%. When using the best equation to predict the Pol value of each pixel of the hyperspectral image to create color-mapped image, the color-mapped image visually showed the polarization distribution map with corresponding color over the plane area of the stalk surface. The pol color mapped image revealed that sugarcane at the bottom of the stem had higher Pol value than cane at the top of the stem. The results of this study demonstrated the potential of near-infrared hyperspectral imaging techniques for the future development of fast and non-destructive polarization probes.

Key words: sugar cane, polarization, near infrared, non-destructive measurement, hyperspectral imaging

บทนำ

ค่าโพลาไรเซชัน (Polarization, Pol) หรือค่าร้อยละของน้ำตาลซูโครส เป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพอ้อย เพื่อใช้

คำนวณ ค่า ซี.ซี.เอส. (Commercial Cane Sugar, C.C.S.) ซึ่งหมายถึง ปริมาณร้อยละของน้ำตาลซูโครสบริสุทธิ์ ที่สามารถผลิตเป็นการค้าเชิงพาณิชย์ได้ ซึ่งเป็นสูตรคำนวณตามมาตรฐานสากล คำนวณ

จากน้ำอ้อยที่ได้จากการหีบอ้อย กระบวนการวิเคราะห์หาค่าโพลนั้นเป็นวิธีการที่ต้องทำในห้องปฏิบัติการ โดยเริ่มจากการหีบสกัดน้ำอ้อย กรองและนำน้ำอ้อยมาวัดค่าด้วยเครื่องโพลาริมิเตอร์ที่ค่อนข้างมีความยุ่งยากในเรื่องของการเตรียมตัวอย่างน้ำอ้อย ขั้นตอนการใช้สารเคมี ต้องอาศัยความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน และยังเป็นกระบวนการที่ต้องมีการทำลายตัวอย่าง ในปัจจุบันมีการนำเทคนิคในการตรวจวัดคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรโดยไม่ต้องทำลายตัวอย่าง คือ เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (near-infrared spectroscopy; NIRS) เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณต่าง ๆ ที่เป็นค่าสำหรับบ่งบอกถึงคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตร เป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก และรวดเร็วกว่าวิธีการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการแบบเดิม

เทคนิค NIRS เป็นเทคนิคที่อาศัยการฉายพลังงานแสงจำเพาะไปที่ตัวอย่าง ทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลและเกิดการดูดกลืนพลังงานที่แตกต่างกันไปตามความยาวคลื่นของพลังงาน โมเลกุลของสารที่มีพันธะ C-H, O-H หรือ N-H ที่เป็นองค์ประกอบหลักในผลผลิตเกษตรและอาหารจะมีอันตรกิริยากับพลังงานแสงในย่าน NIR เทคนิค NIRS เป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการใช้ตรวจสอบคุณภาพภายในผลผลิตเกษตร มีความรวดเร็วกว่าวิธีการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีการประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS กับการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบทางเคมีในอ้อยในรูปแบบแตกต่างกัน มีการใช้ NIRS ทำนายค่าซี.ซี.เอส. ในน้ำอ้อยด้วยรูปแบบการวัดแบบส่องผ่าน (Kirasak *et al.*, 2015) และ Taira *et al.* (2010) ได้พัฒนาการวิเคราะห์ค่าโพลจากตัวอย่างชานอ้อยบดละเอียดแทนการวิเคราะห์จากตัวอย่างน้ำอ้อยพบว่า สามารถลดระยะเวลาในการเตรียมตัวอย่าง

และวิเคราะห์ผลลงได้จาก 22 นาที เหลือเพียง 3 นาที และมีค่า SEP เท่ากับ 0.23 เปอร์เซ็นต์ Kamwilaisak *et al.* (2021) ใช้ NIRS เพื่อประเมินคุณภาพอ้อยบดในอ้อยสองพันธุ์ คือพันธุ์ลำปาง 92-11 และขอนแก่น 3 โดยทำการวัดปริมาณ Brix, โพล, ไฟเบอร์ และ ซี.ซี.เอส. มีค่า R^2 เท่ากับ 0.97, 0.90, 0.86 และ 0.82 ตามลำดับ มีค่า RMSEP ของ Brix, โพล, ไฟเบอร์ และ ซี.ซี.เอส. เท่ากับ 0.246 °Brix, 0.512%, 0.353% และ 0.542% ตามลำดับ มีงานวิจัยที่วิเคราะห์คุณภาพอ้อยโดยการไม่ทำลายตัวอย่าง เช่น Taira *et al.* (2021) ได้ศึกษาการใช้เครื่อง NIR แบบพกพาเพื่อตรวจสอบค่าโพลในช่วงความยาวคลื่น 600-1,100 นาโนเมตร พบว่า มีค่า SEP เท่ากับ 1.1% ถึงแม้การวัดด้วยเทคนิค NIRS จะเป็นวิธีการที่รวดเร็ว และไม่ทำลายตัวอย่าง แต่ก็ยังมีข้อจำกัดคือ สามารถวัดการดูดกลืนแสงได้ครั้งละหนึ่งตำแหน่งบนตัวอย่าง ซึ่งไม่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของตัวอย่างได้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคภาพไฮเปอร์สเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Hyper Spectral Imaging, NIR-HSI) ซึ่งเป็นการรวมกันของเทคนิค NIRS และเทคนิคของการถ่ายภาพ เพื่อให้ได้ทั้งข้อมูลทางสเปกโตรสโกปีและข้อมูลเชิงพื้นที่ของตัวอย่างที่สแกน NIR-HSI จะทำงานโดยได้ภาพและข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัมในทุกตำแหน่งของตัวอย่างที่ถูกสแกน (Manley, 2014) เทคนิค NIR-HSI มีข้อได้เปรียบเหนือเทคนิค NIRS โดยให้ข้อมูลสเปกตรัมของทุกจุดบนภาพของตัวอย่างจากการสแกนครั้งเดียว เนื่องจากภาพ NIR-HSI มีทั้งข้อมูลสเปกตรัมและเชิงพื้นที่ จึงสามารถสร้างเป็นภาพการกระจายของค่าทางเคมีบนพื้นที่ผิวระนาบของตัวอย่างได้ด้วยการทำแผนที่ภาพ

มีการศึกษาที่ประยุกต์ใช้ NIR-HSI กับอ้อยเพื่อพัฒนาระบบสำหรับการระบุความแตกต่าง

ระหว่างส่วนต่าง ๆ ของต้นอ้อย (Aparatana *et al.*, 2020) โดยสามารถจำแนกได้ 98.2% โดยใช้ Support Vector Machine (SVM) ในการวิเคราะห์ งานวิจัยของ Maraphum *et al.* (2020) ศึกษาการใช้เทคนิค NIR-HSI เพื่อสร้างแผนที่การกระจายตัวของค่าปริมาตรและค่าความชื้นในต้นอ้อย มีค่า R^2 เท่ากับ 0.68% และ 0.70% ตามลำดับ การสแกนเป็นแบบหน้าตัดจากการผ่าครึ่งตัวอย่างต้นอ้อยตามแนวยาวซึ่งเป็นการวัดแบบทำลาย พบว่าความหนาแน่นในการกระจายตัวมีค่าที่ต่ำในบริเวณของส่วนที่เป็นข้อตาอ้อย

อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานการใช้เทคนิค NIR-HSI ในการสร้างภาพการกระจายตัวของค่าโพลาไรเซชันในตัวอย่างต้นอ้อยแบบไม่ทำลาย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค NIR-HSI ในการทำนายค่าปริมาณโพลาไรเซชัน และสร้างภาพการกระจายตัวบนพื้นที่ผิวระนาบต้นอ้อย เพื่อสำหรับใช้ตรวจสอบแบบรวดเร็ว และศึกษาผลกระทบของไบนารีฟิวทอนอ้อยต่อการดูดกลืนแสง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างโดยการเก็บเกี่ยวต้นอ้อยที่มีอายุระหว่าง 8 ถึง 11 เดือน พันธุ์ขอนแก่น 3 จากพื้นที่ อ.หนองหญ้าไซ จ.สุพรรณบุรี (พิกัด 14.827506, 99.760037) จำนวน 100 ลำ โดยสุ่มเลือกให้มีความยาวของลำอ้อยไม่น้อยกว่า 150 เซนติเมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 29.59 มิลลิเมตร สุ่มตัวอย่างต้นอ้อยในแปลง โดยทำการตัดเหนือจากพื้นดินประมาณ 10 เซนติเมตรและตัดใบอ้อยออก จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปยังห้องปฏิบัติการที่ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน แบ่งตัวอย่างอ้อย 1 ลำออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนโคน ส่วนกลาง และส่วนปลาย ความ

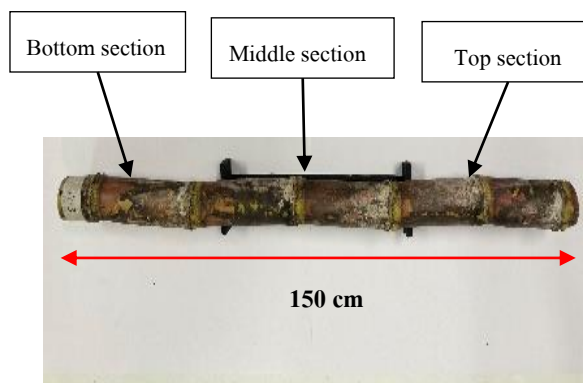
ยาวของแต่ละส่วน 50 เซนติเมตร (ภาพที่ 1) รวมจำนวน 300 ตัวอย่าง เก็บตัวอย่างต้นอ้อยแต่ละส่วนไว้ในที่อุณหภูมิห้อง 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมงเพื่อให้มีอุณหภูมิคงที่ ก่อนที่จะนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค NIR-HSI

2. การวัดการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค NIR-HSI

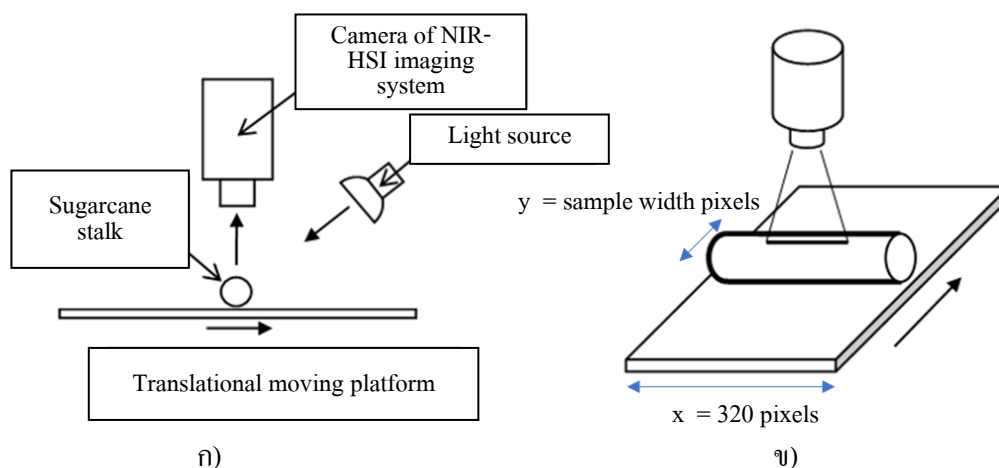
งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของไบนารีฟิวทอนอ้อยต่อการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสแกนตัวอย่างต้นอ้อยแต่ละตัวอย่าง 2 แบบ คือ ต้นอ้อยที่ยังไม่ได้ทำความสะอาดผิว และต้นอ้อยที่ผ่านการทำความสะอาดผิวแล้ว การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค NIR-HSI ใช้เครื่อง NIR hyperspectral imaging (VLNIR-CL-100-N17E, SPECIM SisuCHEMA, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) ที่ติดตั้งชุดหลอดไฟทั้งสเปกตรัมฮาโลเจนขนาด 20 วัตต์ (DECOSTAR, Carrollton, GA, United States) 3 หลอด กล้องถ่ายภาพ CCD (Xeva 992, Xenics Infrared Solution Ltd., Oulu, Finland) และชุดโปรแกรมควบคุมการทำงาน (Specim's LUMO Software Suite, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) รูปแบบการสแกนเป็นแบบ Push-broom โดยสแกนตัวอย่างเป็นแนวเส้นที่ประกอบไปด้วยค่าการดูดกลืนแสง 320 ค่า เมื่อตัวอย่างเคลื่อนผ่านไปด้านใต้กล้อง แนวการสแกนเป็นเส้นดังกล่าวก็จะถูกนำมาต่อกันเป็นภาพสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ดังแสดงในภาพที่ 2ก กล่าวคือ ตัวอย่างต้นอ้อยถูกวางอยู่บนถาดเลื่อน (Translational moving platform) ของเครื่อง ถาดเลื่อนจะนำต้นอ้อยเคลื่อนที่ผ่านใต้กล้องที่มีเซนเซอร์รับแสง มีความเร็วในการเคลื่อนที่ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะห่างระหว่างตัวอย่างต้นอ้อยถึงกล้องถ่ายภาพเท่ากับ 29 เซนติเมตร ข้อมูลการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ และข้อมูลตำแหน่งของตัวอย่างจะถูกรวบรวมและบันทึกอยู่ในรูปแบบของข้อมูล 3 มิติ (Hypercube) โดยข้อมูลของ ตำแหน่งจะอยู่ในรูปของ แกน x (ขนาด 320 Pixel) และแกน y

(ตามความยาวของวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านได้เซนเซอร์รับภาพ) (ภาพที่ 2ข) และในแต่ละพิกเซลจะมีข้อมูลสเปกตรัม (แกน λ) ในช่วงความยาวคลื่น 900 ถึง 1700 นาโนเมตร แต่ละค่าการดูดกลืนแสงห่างกันตามความยาวคลื่นเท่ากับ 3.2 นาโนเมตร รวมทั้งสิ้น 256 ความยาวคลื่น ท่อนอ้อยในแต่ละแบบจะถูก

สแกน 2 ครั้ง โดยหมุนท่อนอ้อยรอบแกน 180 องศา เพื่อสแกนครั้งที่สอง ข้อมูลการดูดกลืนแสงจากการสแกนทั้งสองครั้งในทุกตำแหน่งของพื้นผิวตัวอย่างท่อนอ้อยจะถูกเฉลี่ย เป็นตัวแทนค่าการดูดกลืนแสงหนึ่งตัวอย่าง เพื่อนำไปวิเคราะห์สร้างสมการต่อไป



ภาพที่ 1 ตัวอย่างท่อนอ้อยที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 2 ก) ไดอะแกรมแสดงภาพด้านข้างของ NIR-HIS และ ข) ภาพสามมิติของภาคเลื่อนวางตัวอย่าง

3. การวิเคราะห์ค่าปริมาณโพล

หลังจากที่ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงตัวอย่างท่อนอ้อยด้วยเทคนิค NIR-HSI ตัวอย่างท่อนอ้อยจะถูกนำไปวิเคราะห์หาค่าโพลที่ห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยพืชไร่สุพรรณบุรี กรมวิชาการเกษตร

อ.อุทัย จ.สุพรรณบุรี ด้วยวิธีการสกัดน้ำอ้อยจากตัวอย่างท่อนอ้อย กรองน้ำอ้อยโดยใช้สารช่วยกรอง Celite (Filter Aid) ผ่านเครื่องกรองความดันสูงที่มีความดัน 3.5 บาร์ ด้วยกระดาษกรอง (Whatman No. 91) จนได้น้ำอ้อยปริมาตร 100-120 มิลลิลิตร นำ

ตัวอย่างน้ำอ้อยไปแช่ในเครื่องทำความเย็น อุณหภูมิคงที่ที่ 20 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าโพลด้วยเครื่องโพลาริมิเตอร์ (Saccharomat 202, Schmidt+Haensch, SCHMIDT+HAENSCH GmbH & Co., Berlin, Germany) ดังแสดงลำดับการวิเคราะห์ในภาพที่ 3 (ก-ฉ) ดังนี้

ก) เตรียมตัวอย่างท่อนอ้อย ข) หีบสกัดตัวอย่างน้ำอ้อย ค) ตัวอย่างน้ำอ้อยจากการสกัด

ง) กรองตัวอย่างน้ำอ้อยด้วยการอัดผ่านกระดาษกรอง จ) ตัวอย่างน้ำอ้อยหลังการกรอง ช) แช่ตัวอย่างน้ำอ้อยในเครื่องทำความเย็น และ ฉ) วิเคราะห์หาค่าโพลด้วยเครื่องโพลาริมิเตอร์

หาค่าโพลของท่อนอ้อยแต่ละท่อน 2 ครั้ง แล้วนำค่าเฉลี่ยไปเป็นตัวแทนสำหรับการวิเคราะห์สร้างสมการ



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณโพล

4. การวิเคราะห์ข้อมูลสร้างสมการ

นำภาพการดูดกลืนแสงที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค NIR-HSI มาเลือกเฉพาะในส่วนพื้นผิวอ้อย ไม่รวมในส่วนขอบบริเวณที่เป็นข้อตาอ้อยและพื้นหลัง และคำนวณค่าการดูดกลืนเฉลี่ยของส่วนที่เลือกใช้เป็นตัวแทนค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างท่อนอ้อย โดยใช้โปรแกรม Evince (Prediktera, Umeå, SWEDEN) ในการเลือกส่วนดังกล่าว การวิเคราะห์สร้างสมการทำนายค่าโพลใช้เทคนิค Partial Least Squares Regression (PLSR) โดยใช้โปรแกรม

The Unscrambler (Camo, Norway Version 9.8) ก่อนการวิเคราะห์นำตัวอย่างมาแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มที่ 1 คือ กลุ่มสร้างสมการ (calibration set) จำนวน 200 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ 2 คือ กลุ่มทดสอบสมการ (validation set) จำนวน 100 ตัวอย่าง โดยให้ตัวอย่างทั้งสองกลุ่มมีการกระจายตัวของค่าโพลใกล้เคียงกัน นำค่าการดูดกลืนแสง (ตัวแปรอิสระ) และค่าโพล (ตัวแปรตาม) ของตัวอย่างในกลุ่มสร้างสมการมาสร้างสมการ จากนั้นหาจำนวนแฟกเตอร์ที่เหมาะสมของสมการใช้เทคนิคครอสวาเลชัน

สมการถดถอยวิเคราะห์สร้างจำนวน 2 สมการ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะ โดยสร้างจากค่าการดูดกลืนแสงของท่อนอ้อยที่ไม่ได้กำจัดใบ และจากค่าการดูดกลืนแสงของท่อนอ้อยที่กำจัดใบออกแล้วซึ่งเป็นตัวอย่างท่อนอ้อยชุดเดิม แต่ละสมการจะใช้ค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นมาปรับเพื่อลดผลของการกระเจิงแสงในสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ เช่น การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard normal variate, SNV), การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (multiplicative scatter correction, MSC), การทำให้สเปกตรัมเรียบด้วยการเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average smoothing, MAS) (3 point), การทำให้สเปกตรัมเรียบแบบ Savitzky-Golay (3 point), การทำอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งแบบ Savitzky-Golay (1D) และ การทำอนุพันธ์อันดับที่สองแบบ Savitzky-Golay (segment = 15) (2D) นำสมการที่วิเคราะห์ในทุกกรณีไปใช้ทำนายค่าโพลของตัวอย่างในกลุ่มทดสอบสมการจากค่าการดูดกลืนแสง ในการเลือกสมการที่มีสมรรถนะดีที่สุดจะประเมินจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการทำนาย (standard error of prediction, SEP) และค่า RPD (ratio of standard error of prediction to standard deviation ของตัวอย่างในกลุ่มทดสอบสมการ) (Williams *et al.*, 2019) โดยค่า R^2 และค่า RPD ควรจะมีค่าสูง และค่า SEP ควรจะมีค่าต่ำ

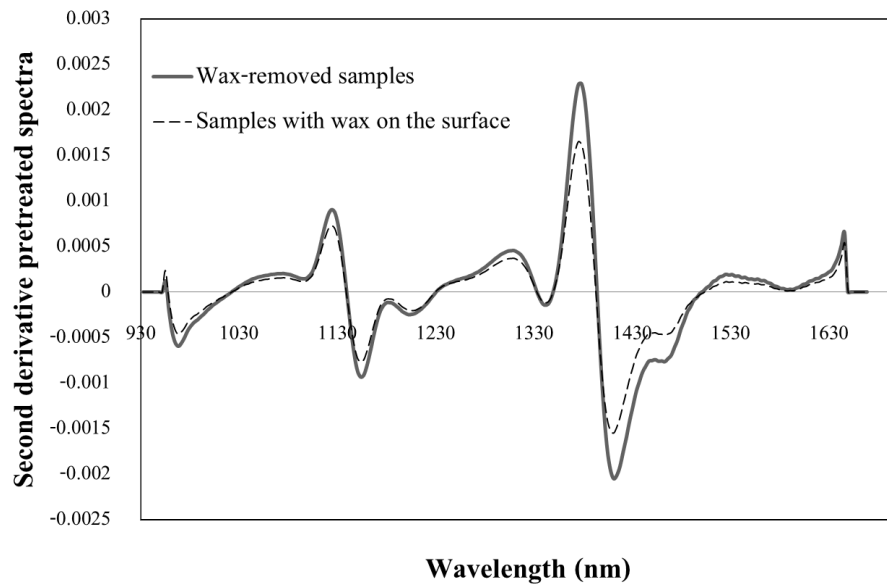
5. การสร้างแผนภาพการกระจายตัวของค่าโพล

ภาพ NIR-HSI ประกอบด้วย พิกเซล และแต่ละพิกเซลจะมีค่าการดูดกลืนแสงตามความยาวคลื่นตั้งแต่ 900 ถึง 1700 นาโนเมตร นำภาพ NIR-HSI มาสร้างแผนภาพแสดงการกระจายตัวของค่าโพลด้วยการนำสมการที่มีสมรรถนะดีที่สุดมาทำนายค่าโพลของแต่ละพิกเซลจากค่าการดูดกลืนแสงของพิกเซลนั้น ๆ แล้วเปลี่ยนค่าโพลเทียบสเกลเป็นระดับสีต่าง ๆ ก็จะได้ภาพการกระจายตัวของค่าโพลการสร้างภาพการกระจายโพลใช้โปรแกรม Matlab R2020b. (MathWork; Co.; U.S.) (License: Kasetsart University) ในการประมวลผล

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ลักษณะของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR ของท่อนอ้อย

โดยทั่วไปสเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR จะมีพีคโค้งมนและไม่เด่นชัด ดังนั้นเพื่อให้พีคมีความเด่นชัดขึ้นจึงนำค่าการดูดกลืนแสงมาปรับด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ การทำอนุพันธ์อันดับที่สอง ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำให้พีคมีความแหลมมากขึ้น และยังทำให้พีคที่ใกล้กัน แยกตัวออกจากกันให้เห็นชัดเจนขึ้น อย่างไรก็ตาม พิกของสเปกตรัมที่ได้จากการปรับด้วยการทำอนุพันธ์อันดับที่สองจะกลับหัวลงด้านล่าง (Miyazawa and Sonoyama, 1998) ภาพที่ 4 แสดงสเปกตรัมที่ผ่านการปรับด้วยการทำอนุพันธ์อันดับที่สอง โดยเปรียบเทียบตัวอย่างที่มีใบและไม่มีใบ



ภาพที่ 4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงปรับด้วยเทคนิคอนุพันธ์อันดับที่สองเปรียบเทียบท่อนอ้อยมีไขและไม่มีไข

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4 พบว่า การทำอนุพันธ์อันดับที่สองช่วยให้สามารถเห็นตำแหน่งของพีคที่ชัดเจนขึ้นที่ตำแหน่ง 968, 1156, 1410 และ 1440 นาโนเมตร ตำแหน่งของพีคในช่วงความยาวคลื่น 968 เกิดจากโอเวอร์โทนอันดับ 2 ของพันธะ O-H ขององค์ประกอบที่เป็นน้ำ ตำแหน่งของพีคในช่วงความยาวคลื่น 1410 และ 1440 นาโนเมตร เป็นโอเวอร์โทนอันดับที่ 1 ของพันธะ O-H ในโครงสร้างของแอลกอฮอล์และน้ำตาล (ซูโครส) (Osborne *et al.*, 1993) เมื่อพิจารณาอิทธิพลของไขมันผิวท่อนอ้อยพบว่า ไขมันส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างท่อนอ้อยที่ไม่มีไข ทั้งนี้สาเหตุมาจากไขมันทำให้เกิดการกระเจิงแสงมากขึ้น (Sanseechan *et al.*, 2018) เป็นสาเหตุให้แสง NIR ส่องผ่านเข้าไปในตัวอย่างไม่ค่อยลง มีการสะท้อนกลับออกมามากขึ้น จึงเกิดการดูดกลืนแสงน้อยลง

2. การเปลี่ยนแปลงค่าโพลที่สัมพันธ์กับตำแหน่งการวัดและอายุเก็บเกี่ยว

ค่าโพลของตัวอย่างท่อนอ้อยจำนวน 300 ตัวอย่าง ช่วงอายุการเก็บเกี่ยวระหว่าง 8-11 เดือน

พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 4.93-23.38 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบค่าโพลของตัวอย่างที่มีอายุเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกันและตำแหน่งการวัดตามความยาวท่อนอ้อยที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2) พบว่าค่าโพลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากอายุ 8 ไปจนถึง 10 เดือน นอกจากนั้น ค่าโพลมีการเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งตามความสูงของท่อนอ้อย โดยในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 8-9 เดือน ค่าโพลจะมีค่าสูงที่บริเวณโคน และมีค่าลดลงที่ตำแหน่งกลาง และปลายตามลำดับ และค่าจะเพิ่มขึ้นตามอายุการเก็บเกี่ยวของอ้อยอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่ออ้อยมีอายุการเก็บเกี่ยวตั้งแต่ 10 เดือน ค่าโพลที่ตำแหน่งส่วนโคนและกลางจะไม่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่บริเวณส่วนปลายนั้นยังคงมีค่าต่ำกว่าส่วนโคนและส่วนกลาง ดังแสดงในตารางที่ 2 เนื่องจากอ้อยเป็นพืชมีการเจริญเติบโตจากด้านล่างขึ้นบน การเจริญเติบโตและการสะสมน้ำตาลของอ้อยนั้น ไม่ได้เกิดขึ้นพร้อมกัน อ้อยที่มีการเจริญเติบโต เริ่มต้นจะมีการสะสมน้ำตาลน้อย เมื่ออ้อยมีอายุมากขึ้นการเจริญเติบโตจะลดลงก็จะทำให้

มีการสะสมน้ำตาลมากขึ้น ในระยะเจริญเติบโต (elongation phase) (อายุ 8-9 เดือน) ส่วนบนของต้น อ้อยจึงมีปริมาณน้ำตาลซูโครสต่ำกว่าส่วนอื่นเพราะ เป็นส่วนที่มีการเจริญเติบโต ในขณะที่ส่วนด้านล่าง ของต้นอ้อยที่เจริญเติบโตมาแล้วจะมีการสะสม ปริมาณซูโครสมากขึ้น (Zhu, 1997) เมื่ออ้อยมีอายุ

ตั้งแต่ 10 เดือนจนถึงเก็บเกี่ยว เป็นช่วงที่อ้อยอยู่ใน ระยะของการแก่และสุก (maturity and ripening phase) ต้น อ้อยมีการเจริญเติบโตที่ช้าลง การ เจริญเติบโตจะอยู่ที่บริเวณปลายหรือยอด จึงส่งผลให้ ปริมาณน้ำตาลไม่มีความแตกต่างกันในบริเวณโคน และกลางลำต้น

ตารางที่ 1 ค่าสถิติพื้นฐานค่าโพล (%) ของตัวอย่างท่อนอ้อยในกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการ

กลุ่มตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง	ค่าน้อยที่สุด	ค่ามากที่สุด	ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
กลุ่มสร้างสมการ	200	4.93	23.38	17.76±3.63
กลุ่มทดสอบสมการ	100	8.36	23.27	17.72±3.65

ตารางที่ 2 ความแตกต่างค่าโพล (%) เฉลี่ย ตามตำแหน่งความยาวต้นอ้อยและอายุอ้อย

	อายุเก็บเกี่ยว (เดือน)			
	8	9	10	11
ส่วนล่างลำต้น	18.53 a	20.47 a	22.36 a	22.30 a
ส่วนกลางลำต้น	16.62 b	19.57 b	22.29 a	22.07 a
ส่วนบนลำต้น	13.07 c	15.99 c	21.11 b	21.07 b
ค่าเฉลี่ย	16.07	18.68	21.92	21.82
F-test	$p<0.01$	$p<0.01$	$p<0.01$	$p<0.01$
Coefficient of variation (%)	7.57	7.84	2.49	3.85

3. ผลการวิเคราะห์การสร้างสมการทำนายค่าโพล

ผลการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่า สมการ ทำนายค่าโพลของตัวอย่างอ้อยที่ไม่มีไขให้ผลการ ทำนายที่ดีกว่าสมการที่สร้างจากค่าการดูดกลืนแสง ตัวอย่างอ้อยที่มีไข สาเหตุคือ ตัวอย่างที่ไม่มีไขให้ สเปกตรัมที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงกว่า หรือให้ข้อมูล สเปกตรัมที่มากกว่าตัวอย่างที่มีไข ผลการศึกษา สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sanseechan *et al.* (2018) ที่พบว่าสมการทำนายที่สร้างจากตัวอย่างท่อนอ้อยที่ ผ่านการนำเอาไขที่เคลือบผิวออกไปนั้น มี

ประสิทธิภาพในการทำนายค่าความหนาแน่นของ ท่อนอ้อยมากกว่าสมการที่สร้างมาจากตัวอย่างที่ ไม่ได้ทำการนำไขเคลือบออก

ดังนั้น การวิเคราะห์การสร้างสมการจึงเน้น เฉพาะตัวอย่างที่ไม่มีไขเท่านั้น ผลการวิเคราะห์ สมรรถนะของสมการเปรียบเทียบระหว่างการปรับ สเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ แสดงใน ตารางที่ 3 โดยสมการสำหรับการทำนายค่าโพลที่ สร้างมาจากค่าการดูดกลืนแสงที่ปรับด้วย SNV ร่วมกับ 1D มีความสามารถในการทำนายตัวอย่าง

ในกลุ่มทดสอบสมการที่ดีที่สุดมีค่า $R^2 = 0.83$ SEP = 1.52% และ RPD = 2.33 (ตารางที่ 3) และ ค่าอัตราส่วนระหว่าง SEP ต่อ SEC เท่ากับ 1.15 ซึ่งน้อยกว่า 1.3 แสดงว่า จำนวนแฟกเตอร์ 8 แฟกเตอร์ ของสมการมีความเหมาะสม ไม่ทำให้เกิดการ Overfitting (Cantor *et al.*, 2011) ผลการทำนายค่าโพลงในงานวิจัยนี้ ให้ค่า R^2 สูงกว่างานวิจัยที่ทำนายค่าโพลงจากอ้อยที่เตรียมเป็นเส้นใยละเอียด ซึ่งให้ค่า $R^2 = 0.71$ (Kirasak *et al.*, 2015) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยโดย Kamwilaisak *et al.* (2021) ให้ค่า $R^2 = 0.93$ และค่า RPD = 3.17 ซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่า ทั้งนี้สาเหตุหนึ่งเนื่องมาจากงานวิจัยของ Kamwilaisak *et al.* (2021)

เตรียมตัวอย่างเป็นอ้อยสับละเอียด ในขณะที่งานวิจัยนี้ ตัวอย่างที่ใช้เป็นท่อนอ้อยสด ซึ่งเปลือกอ้อยส่งผลให้แสง NIR ผ่านไปถึงเนื้ออ้อยได้น้อยลง

ค่าโพลงที่ได้จากห้องปฏิบัติการและค่าโพลงจากการทำนาย ของกลุ่มข้อมูลสร้างสมการ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.87 ค่า SEC เท่ากับ 1.32% และกลุ่มข้อมูลทดสอบสมการ ค่า R^2 เท่ากับ 0.83 ค่า SEP เท่ากับ 1.52% ดังแสดงในภาพที่ 5 โดยค่า R^2 ที่อยู่ในช่วง 0.82-0.90 นั้น บ่งบอกถึงสมการทำนายมีประสิทธิภาพสำหรับการใช้ตรวจสอบคุณภาพได้ (Williams *et al.*, 2019)

ตารางที่ 3 ค่าทางสถิติแสดงสมรรถนะในการทำนายของสมการในการทำนายค่าโพลงจากการดูดกลืนแสงที่ปรับด้วยเทคนิคคณิตศาสตร์แบบต่าง ๆ

เทคนิคที่ใช้ปรับค่าการดูดกลืนแสง*	จำนวนตัวแฟกเตอร์	กลุ่มสร้างสมการ		กลุ่มทดสอบสมการ			RPD
		R^2	SEC (%)	R^2	SEP (%)	Bias (%)	
SM	10	0.86	1.34	0.83	1.53	0.310	2.32
SNV	8	0.87	1.31	0.83	1.54	0.209	2.30
SNV+1D	8	0.87	1.32	0.83	1.52	0.343	2.33
SNV+2D	6	0.83	1.49	0.78	1.61	0.316	2.20
1D	7	0.84	1.44	0.78	1.63	0.298	2.17
2D	6	0.84	1.46	0.79	1.58	0.290	2.24
MAS	10	0.86	1.34	0.81	1.54	0.293	2.31
MAS+1D	7	0.84	1.44	0.78	1.53	0.294	2.31
MAS+2D	6	0.83	1.48	0.79	1.58	0.297	2.24
SM+1D	8	0.85	1.41	0.79	1.61	0.290	2.20
SM+2D	7	0.85	1.43	0.80	1.55	0.293	2.29
SM+SNV	9	0.86	1.37	0.80	1.56	0.326	2.27
MSC	8	0.87	1.31	0.82	1.54	0.266	2.29

*SM = Savitzky-Golay smoothing with 3 smoothing points.

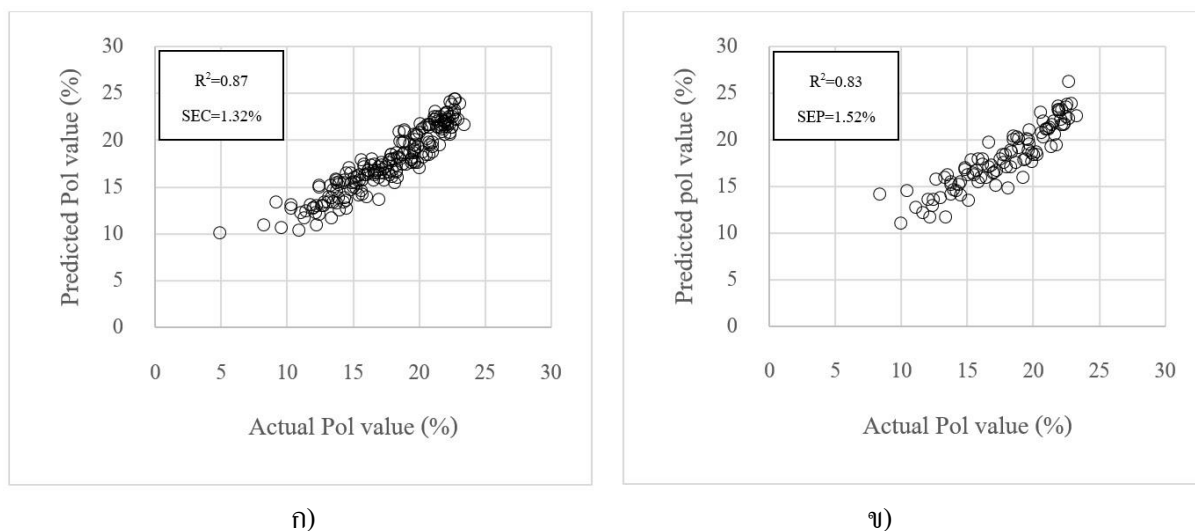
SNV = Standard normal variate.

1D = Savitzky-Golay 1st derivative with 15 smoothing points.

2D = Savitzky-Golay 2nd derivative with 15 smoothing points.

MAS = moving average smoothing with 3 smoothing points.

MSC = multiplicative scatter correction.



ภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลที่วัดจากห้องปฏิบัติการและค่าโพลที่ทำนายจากสมการที่สร้างจากค่าการดูดกลืนแสงปรับด้วยเทคนิคการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานและการทำอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของ ก) กลุ่มสร้างสมการ และ ข) กลุ่มทดสอบสมการ

4. แผนภาพการกระจายตัวของค่าโพล

สมการทำนายค่าโพลในท่อนอ้อยที่ดีที่สุดถูกนำมาใช้ทำนายค่าโพลในแต่ละฟักเซลจากการดูดกลืนแสงที่ปรับด้วย SNV และ 1D ของฟักเซลนั้นและแปลงค่าโพลที่ได้เป็นค่าสีตามสเกลที่กำหนด ดังแสดงบางตัวอย่างในภาพที่ 6 ซึ่งจะเห็นการกระจายตัวของค่าโพลบนตัวอย่างท่อนอ้อย เปรียบเทียบตัวอย่างท่อนอ้อยที่วัดที่ตำแหน่งแตกต่างกันตามความสูง การกระจายตัวของค่าโพลบนตัวอย่างท่อนอ้อย 1 ลำประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนโคน ส่วนกลาง และส่วนปลาย โดยแสดงทั้งสองด้านของตัวอย่างท่อนอ้อย

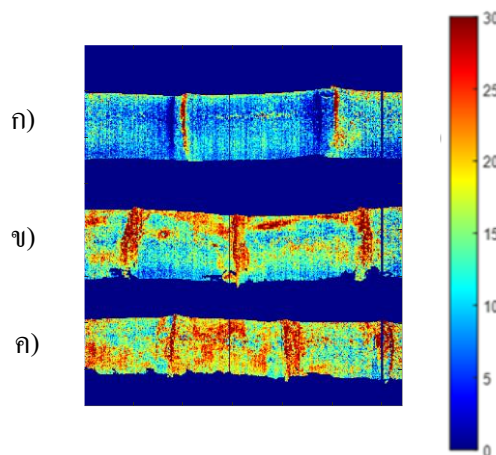
ตัวอย่างในภาพที่ 6 แสดงให้เห็นถึงส่วนโคนของต้นอ้อยเป็นส่วนที่มีค่าโพลสูงที่สุด (19.98%) เนื่องจากเป็นบริเวณที่ต้นอ้อยใช้สำหรับการกักเก็บอาหาร (น้ำตาล) รองลงมาได้แก่

ส่วนกลาง (16.68%) ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่ออ้อยมีอายุการเก็บเกี่ยวที่มากขึ้น และมีค่าน้อยที่สุดบริเวณส่วนปลาย (9.23%) การแสดงการกระจายตัวของค่าโพลนั้น มีแนวโน้มของการกระจายตัวไม่แตกต่างกันทั่วบริเวณพื้นที่ผิวของท่อนอ้อย แต่จะพบการทำนายค่าโพลที่อาจผิดพลาดบริเวณตำแหน่งที่เป็นข้อตาอ้อย และบริเวณพื้นผิวที่มีคราบสีดำ หรือบริเวณที่ถูกแมลงศัตรูอ้อยทำลาย เนื่องจากในขั้นตอนของการจัดการเฉลี่ยข้อมูลของการดูดกลืนแสงนั้น ได้ทำการตัดในส่วนของบริเวณข้อตาอ้อย และรอยเปื้อนออกไป นอกจากนั้น ยังมีความคลาดเคลื่อนของค่าโพลที่ทำนายบริเวณขอบของภาพตัวอย่าง ที่เป็นส่วนของผิวโค้งของตัวอย่างท่อนอ้อย เนื่องจากความโค้งของรูปทรงกระบอกของตัวอย่างท่อนอ้อยที่ทำให้ระยะห่างมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อ

ตัวอย่างอ้อยเคลื่อนที่ผ่านได้กล้อง ระยะห่างที่ไกลที่สุดจะอยู่ที่บริเวณขอบของท่อนอ้อยทั้งสองด้าน

แผนภาพการกระจายตัวของค่าโพลมีประโยชน์ ช่วยให้สามารถพิจารณาเปรียบเทียบค่าโพลได้ทุกตำแหน่งบนตัวอย่าง ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นข้อดีของเทคนิค NIR-HSI ที่เหนือกว่าเทคนิค NIRS ทั่วไป อย่างไรก็ตาม เครื่องมือ NIR-HSI ที่ใช้ในการศึกษาถูกออกแบบมาสำหรับตัวอย่างที่มีพื้นผิวเรียบ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการสร้างภาพการกระจายได้สำหรับตัวอย่างที่มีผิวโค้ง ตัวอย่างงานวิจัยที่แก้ปัญหาคือการใช้เทคนิค NIR-HSI กับท่อนอ้อย ได้แก่งานของ Maraphum *et al.* (2020) ซึ่งทำ

ให้ตัวอย่างท่อนอ้อยมีผิวหน้าเรียบด้วยการผ่าครึ่ง ท่อนอ้อยตามความยาวก่อนนำมาสแกน ซึ่งช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่าทางเคมีบริเวณขอบท่อนอ้อยได้ แต่ก็เพิ่มกระบวนการเตรียมตัวอย่างที่ต้องนำท่อนอ้อยมาผ่าด้วยเช่นกัน ดังนั้น เพื่อให้การวัดค่าสามารถทำได้โดยไม่มีการทำลายตัวอย่าง หรือการเตรียมตัวอย่าง และลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากผิวโค้งของตัวอย่างรูปทรงกระบอก ควรมีการพัฒนาเทคนิคของการสแกนด้วยการหมุนตัวอย่างรูปทรงกระบอกเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากตัวอย่างที่มีผิวโค้ง



ภาพที่ 6 แผนภาพการกระจายค่าโพลของท่อนอ้อยที่ตำแหน่ง ก) ส่วนบนลำต้น (ค่าเฉลี่ยโพล= 9.23%)
ข) ส่วนกลางลำต้น (ค่าเฉลี่ยโพล= 16.68%) และ ค) ส่วนล่างลำต้น (ค่าเฉลี่ยโพล= 19.98%)

สรุป

เทคนิค NIR-HSI ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายค่าปริมาณของค่าโพลหรือค่าร้อยละของน้ำตาลซูโครสในตัวอย่างท่อนอ้อย สมการ PLSR ที่พัฒนามาจากตัวอย่างท่อนอ้อยที่ผ่านการทำความสะอาดพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการทำนายที่ดีมากกว่าสมการทำนายที่พัฒนามาจากตัวอย่างท่อนอ้อยที่ไม่ผ่านการทำความสะอาดพื้นผิว เนื่องมาจาก

ผลของการสะท้อนและการกระเจิงแสงของคราบไไขที่เคลือบพื้นผิวท่อนอ้อย การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิค NIR-HSI สร้างแผนภาพการกระจายของค่าโพลของตัวอย่าง ซึ่งช่วยให้สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าโพลได้ทุกตำแหน่งบนตัวอย่างได้อย่างรวดเร็ว และยังสามารถพัฒนาต่อยอดไปใช้กับผลผลิตทางการเกษตรอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ควรมีการพัฒนาเทคนิคการสแกนเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากตัวอย่างที่มี

ผิวโค้ง งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นศักยภาพของเทคนิค NIR-HSI ในการนำมาทำนายค่าโพลจากท่อนอ้อยสดโดยตรง

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากโครงการปริญญาเอกเฉลิมพระเกียรติทรงครองราชย์ 70 ปี จากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) (ARDA) ขอขอบคุณภาคีวิทยาศาสตร์เกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และศูนย์วิจัยพืชไร่สุพรรณบุรี กรมวิชาการเกษตร สำหรับการสนับสนุนห้องปฏิบัติการ สิ่งอำนวยความสะดวก และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Aparatana, K., Saengprachatanarug, K., Izumikawa, Y., Nakamura, S. and Taira, E. 2020. Development of sugarcane and trash identification system in sugar production using hyperspectral imaging. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 28(3): 133-139.

Cantor, S.L., Hoag, S.W., Ellison, C.D., Khan, M.A. and Lyon, C R. 2011. NIR spectroscopy applications in the development of a compacted multiparticulate system for modified release. **Aaps Pharmscitech** 12(1): 262-278.

Kamwilaisak, K., Jutakradsada, P., Iamamornphanth, W., Saengprachatanarug, K., Kasemsiri, P., Konyai, S. and Chindaprasit, P. 2021. Estimation of sugar content in sugarcane (*Saccharum* spp.) variety lumpang 92-11 (lk 92-11) and khon kaen 3 (kk 3) by near

infrared spectroscopy. **Engineering Journal** 25(3): 69-83.

- Kirasak, K., Sansayawichai, T., Ponragdee, W. and Thipyawat, A. 2015. Determination of commercial cane sugar (ccs) using near infrared spectroscopy. **Thai Agricultural Research Journal** 33(2): 159-168. (in Thai).
- Manley, M. 2014. Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials. **Chemical Society Reviews** 43(24): 8200-8214.
- Maraphum, K., Saengprachatanarug, K., Aparatana, K., Izumikawa, Y. and Taira, E. 2020. Spatial mapping of Brix and moisture content in sugarcane stalk using hyperspectral imaging. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 28(4): 167-174.
- Miyazawa, M. and Sonoyama, M. 1998. Second derivative near infrared studies on the structural characterization of proteins. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 6(A): A253-A257.
- Osborne, B.G., Fearn, T. and Hindle, P.H. 1993. **Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis**. Longman Scientific and Technical, Harlow.
- Sanseechan, P., Panduangnate, L., Saengprachatanarug, K., Wongpichet, S., Taira, E. and Posom, J. 2018. A portable near infrared spectrometer as a non-destructive tool for rapid screening of solid density stalk in a sugarcane breeding program. **Sensing and Bio-sensing Research** 20: 34-40.

- Taira, E., Ueno, M. and Kawamitsu, Y. 2010. Automated quality evaluation system for net and gross sugarcane samples using near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 18(3): 209-215.
- Taira, E., Ueno, M., Saengprachatanarug, K. and Kawamitsu, Y. 2013. Direct sugar content analysis for whole stalk sugarcane using a portable near infrared instrument. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 21(4) : 281-287.
- Williams, P., Manley, M. and Antoniszyn, J. 2019. **Near infrared technology: getting the best out of light**. African Sun Media, Stellenbosch.
- Zhu, Y.J., Komor, E. and Moore, P.H. 1997. Sucrose accumulation in the sugarcane stem is regulated by the difference between the activities of soluble acid invertase and sucrose phosphate synthase. **Plant Physiology** 115(2): 609-616.