

**การประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้บนท่อนอ้อยด้วยเทคนิคภาพ
สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้**
**The Evaluation of Total Soluble Solid on Sugar cane Stalk using Near Infrared
Spectroscopy Hyperspectral Imaging Technique**

จิรวาส์ เจียรทะกุล¹ แก้วกานต์ พวงสมบัติ¹ อนุปันท์ เทอดวงศ์วรกุล¹ อาทิตย์ พวงสมบัติ^{1*}
Jirawat Chiatrakul¹ Kaewkarn Phuangsombut¹ Anupun Terdwongworakul¹ Arthit Phuangsombut^{1*}

Received 5 May.2022/Revised 16 Jun. 2022/Accepted 4 Jul. 2022

ABSTRACT

Near-infrared hyperspectral imaging technique (NIR-HSI) is an inspection method that is applied to evaluate the quality of agricultural materials without the need to destroy the sample. It is also accurate and fast. In this study, near infrared hyperspectral imaging technique was performed to develop the total soluble solid (TSS) predicting model from Khon Kaen 3 variety sugar cane stalk aged 8-11 months. The obtained data were in the form of three-dimensional spectral data (Hypercube) within wavelength of 900-1,700 nm which were derived from reflectance measurement. TSS data from the reference method were used to create a calibration model with Partial Least Squares Regression (PLSR). The sugar cane samples were measured for absorbance before and after stalk's surface wax removal. It was found that the predicting model from samples without wax had the best predictive results, providing coefficient of determination (R^2) of 0.87, standard error of prediction (SEP) of 0.97 °Brix, and RPD of 2.77. This indicated that the predictive equations were effective for use in quality evaluation. The model was thereafter applied to the absorbance data of each pixel in the hypercube data, and the distribution of TSS values on the sugar cane stalk surface was obtained. The distribution map was able to visualise only for the upper half of the cane sample, which was the limitation of this method when measuring a cylindrical object. This still requires further development of appropriate measurements. However, the results showed the feasibility of using NIR-HSI to evaluate the total soluble solid (TSS), which can be used instead of conventional methods in laboratories. It could also be used for visually detecting the right maturity of the sugar cane in the field

Keywords: total soluble solid, sugar cane stalk, near infrared spectroscopy hyperspectral imaging technique

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ. นครปฐม 73140

¹ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140

* corresponding author : fengatp@ku.ac.th

บทคัดย่อ

เทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR-HSI) เป็นเทคนิคการตรวจสอบองค์ประกอบที่บ่งบอกถึงคุณภาพภายในของพืชผลเกษตรโดยไม่ทำลายตัวอย่าง เป็นวิธีการที่แม่นยำและรวดเร็ว โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเทคนิค NIR-HSI เพื่อพัฒนาแบบจำลองการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total soluble solid :TSS) จากตัวอย่างท่อนอ้อยพันธุ์ขอนแก่น 3 อายุเก็บเกี่ยว 8-11 เดือน ข้อมูลที่ได้อยู่ในรูปแบบสเปกตรัมข้อมูลสามมิติ (hypercube) ที่ช่วงความยาวคลื่น 900-1,700 นาโนเมตร รูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ และนำข้อมูลปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จากห้องปฏิบัติการมาสร้างสมการทำนายด้วยเทคนิค Partial Least Squares Regression (PLSR) ตัวอย่างอ้อยที่ใช้ในการทดลองมีการวัดค่าการดูดกลืนแสงก่อนและหลังการทำความสะอาดไขเคลือบ (wax) ออก พบว่าสมการทำนายจากตัวอย่างที่ผ่านการทำความสะอาดให้ผลการทำนายที่ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.87 ข้อผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย (SEP) ที่ 0.97 ˚บริกซ์ และ RPD ที่ 2.77 ซึ่งบ่งบอกถึงสมการทำนายมีประสิทธิภาพสำหรับการประเมินคุณภาพได้ และจากการนำสมการที่ได้มาทำนายค่าการดูดกลืนแสงแต่ละพิกเซลของข้อมูล hyper cube แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของค่า TSS บนพื้นผิวท่อนอ้อย แผนภาพการแสดงผลการกระจายตัวนั้นสามารถที่จะแสดงผลภาพได้เพียงครั้งเดียวของตัวอย่างท่อนอ้อยซึ่งเป็นข้อจำกัดของวัตถุรูปร่างทรงกระบอก ซึ่งยังต้องมีการพัฒนารูปแบบการวัดค่าที่เหมาะสมต่อไป อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิค NIR-HSI ในการทำนายค่าปริมาณ TSS ซึ่งสามารถนำมาใช้แทนวิธีการแบบเดิมในห้องปฏิบัติการ อีกทั้งยังแสดงผลภาพเพื่อตรวจสอบความสุกแก่ของอ้อยในแปลงได้

คำสำคัญ: ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้, ท่อนอ้อย, เทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

บทนำ

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทราย การซื้อขายจะคิดตามคุณภาพตามค่า C.C.S. (commercial cane sugar) ซึ่งหมายถึงปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ในอ้อยที่สามารถหีบสกัดออกมาได้เป็นน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ ตามมาตรฐาน C.C.S. กำหนดให้อ้อยมีค่า 10 C.C.S (คณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2560) การคำนวณค่า C.C.S. เป็นขั้นตอนและวิธีการที่ทำในห้องปฏิบัติการ ได้มาจากการคำนวณค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (total soluble solid: TSS) ค่าโพล (soluble sucrose) และปริมาณเส้นใย (insoluble solid content) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้หรือค่าบริกซ์ (Brix) หมายถึงปริมาณของของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดที่ใช้บ่งชี้ความเข้มข้นของอาหารเหลว เช่น น้ำเชื่อม น้ำผลไม้เข้มข้น การวิเคราะห์หาค่า TSS ได้มาจากการหีบสกัดน้ำอ้อย และกรอง แล้ววัดค่าโดยเครื่องรีแฟกโตมิเตอร์ (James, 1995) ที่ค่อนข้างมีความยุ่งยากในเรื่องของการเตรียมตัวอย่างน้ำอ้อยเป็นการทดสอบแบบทำลายตัวอย่าง ต้องอาศัยความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน เพื่อลดขั้นตอนและระยะเวลาในการวัดคุณภาพในห้องปฏิบัติการ จึงได้มีการนำเทคนิคในการตรวจวัดคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรโดยไม่ทำลายตัวอย่าง มีความรวดเร็ว และแม่นยำในการตรวจวัด เช่น เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (near-infrared spectroscopy; NIRS) เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณ TSS และค่าตัวแปรอื่น ๆ ในการประเมินค่าคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตร (Martinsen and Schaare, 1998)

เทคนิค NIRS อาศัยหลักการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารประกอบอินทรีย์ที่มีพันธะ C-H, O-H หรือ N-H ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักใน

ผลผลิตเกษตรและอาหาร เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการนำมาตรวจสอบคุณภาพภายในผลผลิตเกษตร มีการใช้เทคนิค NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพโดยตรงจากน้ำอ้อย เช่น การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลซูโครสในตัวอย่างน้ำอ้อย (Tewari *et al.*, 2003) การทำนายค่า C.C.S. ในน้ำอ้อยด้วยรูปแบบการวัดแบบส่องผ่าน (transmission) (Kirasak *et al.*, 2015) แม้ว่าการวิเคราะห์ด้วย NIRS จะมีความรวดเร็วในการวิเคราะห์ แต่ตัวอย่างน้ำอ้อยที่นำมาใช้ก็ยังคงต้องผ่านขั้นตอนของการเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับวิธีการปกติในห้องปฏิบัติการ ซึ่งใช้ระยะเวลา และเป็นการทดสอบแบบทำลายตัวอย่าง การลดขั้นตอนและระยะเวลาในการเตรียมตัวอย่าง มีการใช้เทคนิค NIRS ในการวิเคราะห์และทำนายค่าจากตัวอย่างชานอ้อยบดละเอียด แทนการวิเคราะห์จากตัวอย่างน้ำอ้อย (Berdning *et al.*, 1991) การวัดค่าจากชานอ้อยบดสามารถลดระยะเวลาในการเตรียมตัวอย่างและวิเคราะห์ผลลงได้จาก 22 นาที เหลือเพียง 3 นาที และมีค่า SEP เท่ากับ 0.23 % (Taira *et al.*, 2010)

ปัจจุบันได้มีการศึกษาการตรวจวัดคุณภาพท่อนอ้อยโดยที่ไม่ต้องมีการเตรียมหรือทำลายตัวอย่าง Nawi *et al.* (2014) ได้สแกนท่อนอ้อยด้วยเครื่อง NIR ด้วยรูปแบบการวัดแบบสะท้อนแสง แต่การวัดด้วยเทคนิค NIRS ยังมีข้อจำกัด กล่าวคือสามารถทำการวัดค่าได้ครั้งละ 1 ตำแหน่ง ได้ค่าสเปกตรัมออกมาเพียงค่าเดียวเท่านั้น ซึ่งไม่ครอบคลุมพื้นที่ของตัวอย่าง ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคนิคภาพสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ หรือที่เป็นที่รู้จักในชื่อภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัม (HSI) ที่ประกอบไปด้วยข้อมูลสเปกโตรสโกปีและข้อมูลเชิงพื้นที่ของตัวอย่างที่สแกน และครอบคลุมพื้นที่ผิวทุกตำแหน่งของตัวอย่างมาใช้ในการประเมินค่าคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตร (Manley, 2014) ข้อมูลที่ได้นั้นจะอยู่ในรูปแบบของข้อมูลสามมิติ

หรือ Hypercube ทุก ๆ พิกเซล จะมีข้อมูลสเปกตรัมเป็นของตัวเอง จากข้อได้เปรียบนี้ ไม่เพียงแต่ NIR-HSI จะสามารถทำนายค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพได้ครอบคลุมพื้นที่ของตัวอย่างเท่านั้น แต่ยังแสดงภาพของการกระจายตัวของค่าองค์ประกอบของตัวอย่างได้ด้วยการทำแผนที่ (mapping) และยังสามารถตรวจสอบประเมินตัวอย่างที่มีความต่างกัน และตัวอย่างในปริมาณมากได้ในเวลาเดียวกัน

งานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้ NIR-HSI กับผลผลิตทางการเกษตร เช่น การวิเคราะห์การกระจายตัวของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในผลกีว Martinsen and Schaare, (1998) พบว่า ตัวอย่างกีวที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในอยู่ในช่วง 4.7–14.1 °บrix มีค่า SEP เท่ากับ 1.2 °บrix Caporaso *et al.* (2018) ใช้ HSI ในการพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายปริมาณโปรตีน และแสดงการกระจายตัวเชิงพื้นที่ในเมล็ดข้าวสาลีแบบสะท้อนแสง Singh *et al.* (2012) ได้ประยุกต์ใช้ NIR-HSI ในช่วงความยาวคลื่น 700-1,100 นาโนเมตร เพื่อระบุเมล็ดข้าวสาลีที่ได้รับความเสียหายจากเชื้อรา โดยสามารถจำแนกเมล็ดข้าวสาลีด้วยความแม่นยำ 97.3-100% Rungpichayapichet *et al.* (2017) ทำการวัดคุณสมบัติภายในของผลมะม่วง ได้แก่ ความแน่นเนื้อ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (TA) พบว่า มีค่า R^2 เท่ากับ 0.81, 0.50 และ 0.81 ค่า RMSE เท่ากับ 2.83 นิวตัน 2.0% และ 0.24% ตามลำดับ แผนภาพการกระจายตัวแสดงให้เห็นถึงปริมาณค่า TSS จะมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งหัวของผลมะม่วง Aparatana *et al.*, 2020 ใช้การถ่ายภาพแบบ NIR-HSI เพื่อพัฒนาระบบสำหรับการระบุความแตกต่างระหว่างส่วนต่าง ๆ ของต้นอ้อย กับส่วนที่ไม่ต้องการ ได้แก่ ใบอ้อยสด ใบอ้อยแห้ง หิน และดิน โดยสามารถจำแนกได้ 98.2% ด้วยวิธี support vector machine (SVM) ในการวิเคราะห์ Maraphum

et al. (2020) ศึกษาการใช้เทคนิค NIR-HSI เพื่อสร้างแผนที่การกระจายตัวของค่าปริมาตรและค่าความชื้นในตัวอย่างพ่อน้อยที่ปลูกเตรียมตัวอย่างด้วยการผ่าครึ่งตามแนวยาว

เทคนิค NIR-HSI นั้นสามารถนำมาใช้ในการประเมิน และทำนายค่าองค์ประกอบ และตรวจสอบความเสียหายของผลผลิตทางการเกษตรรวมในน้อยได้อย่างรวดเร็ว การใช้เทคนิค NIR-HSI ในการสร้างแผนภาพการกระจายตัวของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของตัวอย่างพ่อน้อยที่ไม่ผ่านการทำลายตัวอย่าง จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบคุณภาพแบบรวดเร็วของน้อยในแปลงได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงเป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค NIR-HSI ในการทำนายค่าปริมาณ และสร้างแผนภาพการกระจายตัว โดยศึกษาถึงผลกระทบของไซที่เคลื่อนอยู่บนผิวพ่อน้อยร่วมด้วย

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การเตรียมตัวอย่าง

สุ่มตัวอย่างน้อยพันธุ์ขอนแก่น 3 มีอายุระหว่าง 8 ถึง 11 เดือน จากแปลงปลูกพื้นที่ อ.หนองหญ้าไซ จ. สุพรรณบุรี จำนวน 100 ลำ มีความยาวของลำไม่น้อยกว่า 150 ซม. มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 29.59 มม. โดยตัดเหนือจากพื้นดินประมาณ 10 ซม. และตัดใบน้อยออกจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปยังห้องปฏิบัติการที่ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ตัวอย่างน้อย 1 ลำ จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนโคน ส่วนกลาง และส่วนปลาย ความยาวของแต่ละส่วน 50 ซม. (Figure 1) เก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 °C เป็นระยะเวลา 1-2 ชม. หรือจนกว่าตัวอย่างพ่อน้อยจะมีอุณหภูมิคงที่ก่อนที่จะทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR-HSI) ตัวอย่างพ่อน้อยจะถูกสแกน 2 ครั้ง ก่อนและหลังทำความสะอาดส่วนที่เป็นไซเคลื่อนออกจากผิวของตัวอย่าง

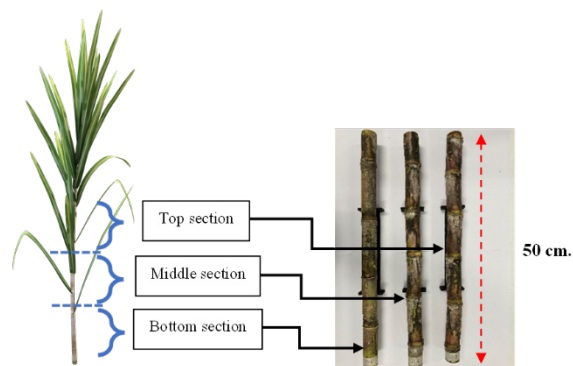


Figure 1 Sugar cane stalk was sectioned as top, middle, and bottom sub-stalks with 50 cm in length

การวัดค่าสเปกตรัมและข้อมูลภาพถ่าย

ทำการวัดค่าสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIR-HSI โดยการสแกนตัวอย่างในแนวเส้นตรงแบบ push-broom ด้วยเครื่อง NIR hyperspectral imaging (VLNIR-CL-100-N17E, SPECIM SisuCHEMA, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) มีช่วงการวัดค่าที่ความยาวคลื่น 900 ถึง 1,700 นาโนเมตร (ความละเอียด 3.2 นาโนเมตร) พร้อมด้วยชุดหลอดไฟทั้งสแตนด์ฮาลोजенขนาด 20 วัตต์ (DECOSTAR, Carrollton, GA, United States) กล้องถ่ายภาพ CCD (Xeva 992, Xenics Infrared Solution Ltd., Oulu, Finland) และชุดโปรแกรมควบคุมการทำงาน (Specim's LUMO Software Suite, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) ตัวอย่างพ่อน้อยที่เตรียมไว้ถูกวางอยู่บนแพลตฟอร์ม (translational moving platform) ของเครื่องวัดฯ และเคลื่อนที่ผ่านใต้เซนเซอร์รับแสง ดังแสดงใน Figure 2 ด้วยความเร็ว 10 มม./วินาที มีระยะห่างระหว่างตัวอย่างพ่อน้อยถึงกล้องถ่ายภาพ 29 ซม. (Figure 3) ข้อมูลความยาวคลื่น (spectral) และข้อมูลตำแหน่ง (spatial) ถูกรวบรวมและบันทึกอยู่ในรูปแบบของข้อมูล 3 มิติ โดยข้อมูลของตำแหน่งจะอยู่ในรูปของแกน x (ขนาด 320 pixel) และแกน y ตามความยาวของวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านใต้เซนเซอร์

รับภาพ ในแต่ละพิกเซลจะมีข้อมูลสเปกตรัม (แกน λ) รวมทั้งสิ้น 256 ช่วงคลื่น (Figure 4) ข้อมูลสเปกตรัมของค่าการดูดกลืนแสงในทุกตำแหน่งของพื้นผิวตัวอย่างท่อนอ้อยจะถูกเฉลี่ย ไม่รวมบริเวณตำแหน่งที่เป็นข้อตาอ้อย (node) ก่อนทำการปรับแต่งข้อมูล และวิเคราะห์ผล เพื่อสร้างสมการทำนายค่า TSS

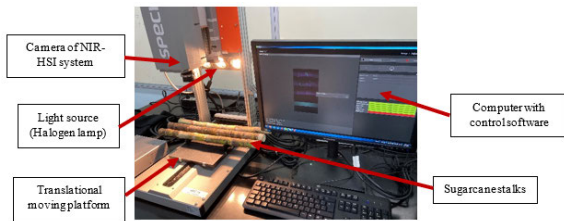


Figure 2 NIR hyperspectral imaging system

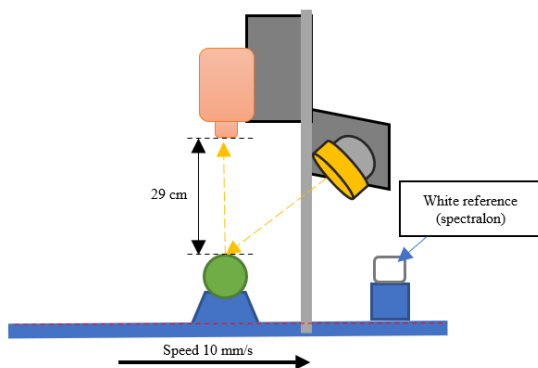


Figure 3 Reflectance measurement of HSI system equipped with translational moving platform

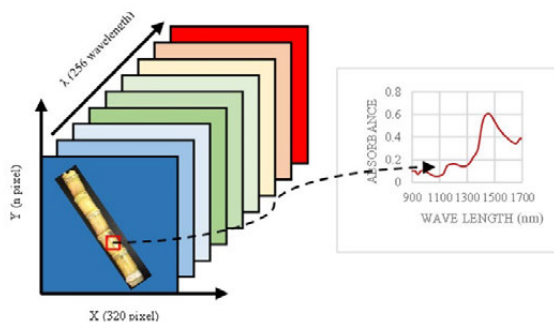


Figure 4 Three-dimensional data (3D-hypercube) of sugar cane stalk obtained from NIR-HSI system

การวิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

หลังจากที่ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง ตัวอย่างท่อนอ้อยด้วยเทคนิค NIR-HSI ตัวอย่างท่อนอ้อยจะถูกนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ TSS ที่ห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยพืชไร่นาสุพรรณบุรี กรมวิชาการเกษตร อ. อุทอง จ. สุพรรณบุรี ทำการสกัดน้ำอ้อยจากตัวอย่าง แล้วกรองน้ำอ้อยโดยใช้สารช่วยกรอง Celite (Filter Aid) ผ่านเครื่องกรองความดันสูงที่ความดัน 3.5 บาร์ ด้วยกระดาษกรอง (Whatman No. 91) ได้น้ำอ้อยปริมาตร 100-120 มล. นำตัวอย่างน้ำอ้อยไปแช่ในเครื่องทำความเย็น (Cooling Bath) จนตัวอย่างมีอุณหภูมิคงที่ที่ 20 °C. จากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่า TSS ด้วยเครื่อง digital refractometer (ATR-SW plus, Schmidt+Haensch, SCHMIDT+HAENSCH GmbH & Co., Berlin, Germany)

การวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

ค่าสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค NIR-HSI เฉพาะในส่วนพื้นผิวอ้อยถูกคำนวณและเฉลี่ยด้วยโปรแกรม Evince (Prediktera, Ume, SWEDEN) และนำมาสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR) โดยใช้โปรแกรม The Unscrambler (Camo, Norway Version 9.8) ข้อมูลถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มสำหรับสร้างสมการสอบเทียบ (calibration set) จำนวน 200 ตัวอย่าง และกลุ่มสำหรับทดสอบสมการ (validation set) จำนวน 100 ตัวอย่าง โดยให้ตัวอย่างทั้งสองกลุ่มมีการกระจายตัวค่า TSS ใกล้เคียงกัน และค่า TSS น้อยสุดและมากที่สุดจะต้องอยู่ในกลุ่ม calibration set การวิเคราะห์ องค์ประกอบหลัก (principal component analysis, PCA) ใช้ข้อมูลสเปกตรัมเพื่อตรวจหาค่าผิดปกติ (outliers) ของสเปกตรัม จากนั้นปรับแต่งข้อมูล

สเปกตรัมของการดูดกลืนค่าแสงที่ได้ (raw data) เพื่อลดผลของการกระเจิงแสงในสเปกตรัมด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่น Standard normal variate (SNV), multiplicative scatter correction (MSC), moving average smoothing (MAS) (3 point), Smoothing Savitzky-Golay (3 point), Savitzky-Golay 1st derivative และ Savitzky-Golay second derivative (segment = 15) แล้วนำไปสร้างสมการด้วยเทคนิค PLSR เพื่อใช้ในการทำนายค่า TSS ของตัวอย่างท่อน้อยใน validation set ความแม่นยำของสมการประเมินจากค่า coefficient of determination (R^2) และค่า root mean square error of prediction (RMSEP) โดยค่า R^2 ควรจะมีค่าสูง และค่า RMSEP ควรมีค่าต่ำ การประเมินความสามารถของสมการ ทำนายค่า TSS อธิบายได้จากค่า RPD (ratio of standard error of performance to standard derivation) เป็นสัดส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าทางเคมี และค่า SEP (standard error of prediction) ของกลุ่มตัวอย่างในการทดสอบความแม่นยำ ค่า RPD สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$RPD = \frac{SD_y}{SEP} \quad (1)$$

เมื่อ SD_y = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขององค์ประกอบทางเคมีในชุดทดสอบสมการ

SEP = ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย

การกระจายตัวของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

สมการทำนายที่สร้างมาจากข้อมูลการดูดกลืนของสเปกตรัมเฉลี่ยจากสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ NIR-HSI ช่วงความยาวคลื่น 932-1,668 นาโนเมตร ที่ผ่านการปรับแต่งข้อมูลและข้อมูลปริมาณ TSS เฉลี่ยจากการวัดค่าด้วยวิธีการมาตรฐาน ถูกนำมาใช้ในการทำนายค่า TSS ในแต่ละพิกเซลของภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ด้วยการใช้โปรแกรม Matlab R2020b.

(MathWork Co. U.S.) ในการประมวลผลปริมาณของ TSS จะถูกแสดงเป็นสีต่าง ๆ (colormap แบบ jet) สีแดงแสดงถึง TSS ที่มีค่าสูง และสีน้ำเงินแสดงถึง TSS ที่มีค่าต่ำ โดยแผนภาพการกระจายตัวที่ได้สามารถเปรียบเทียบปริมาณของ TSS ที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งของท่อน้อยเพื่อบ่งบอกถึงคุณภาพของน้อยได้

ผลการทดลองและวิจารณ์

การวัดค่าสเปกตรัมและข้อมูลภาพถ่าย

ผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก น้อยเป็นหนึ่งในพืชที่มีปริมาณน้ำเป็นส่วนประกอบที่สูง ผลจากการที่มีปริมาณน้ำเป็นส่วนประกอบทำให้เกิดการซ้อนทับกันของพีดการดูดกลืนแสงของน้ำและพีดการดูดกลืนแสงขององค์ประกอบสำคัญอื่น ๆ ที่สำคัญต่อการวิเคราะห์ ในช่วงความยาวคลื่นที่ 1,400-1,500 นาโนเมตร แสดงองค์ประกอบสำคัญของซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส และน้ำในน้อย ดังแสดงใน Figure 5(A) ซึ่งเป็นข้อมูลการดูดกลืนค่าแสงที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง หลังการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้นดังกล่าว ข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการอนุพันธ์อันดับ 2 (Savitzky-Golay second derivative) แสดงตำแหน่งของพีดที่ชัดเจนขึ้น ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ 1,410 และ 1,460 นาโนเมตร เกิดโอเวอร์โทนอันดับที่ 1 ของพันธะ O-H ในโครงสร้างของซูโครส และกลูโคส อีกทั้งพบความยาวคลื่นของน้ำที่ 1,450 นาโนเมตร ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้อย (Osborne *et al.*, 1993) จากผลค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้อยที่ยังไม่ได้ทำความสะอาดพื้นผิว (wax) จะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำกว่าตัวอย่างน้อยที่ผ่านการทำความสะอาดไขเคลือบพื้นผิว (without wax) เนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพของ wax ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวน้อยทำให้เกิดการกระเจิงของแสง จึงไม่สามารถทะลุเข้าไปในตัวอย่างน้อยน้อยได้ดีเท่าที่ควร Figure 5(B)

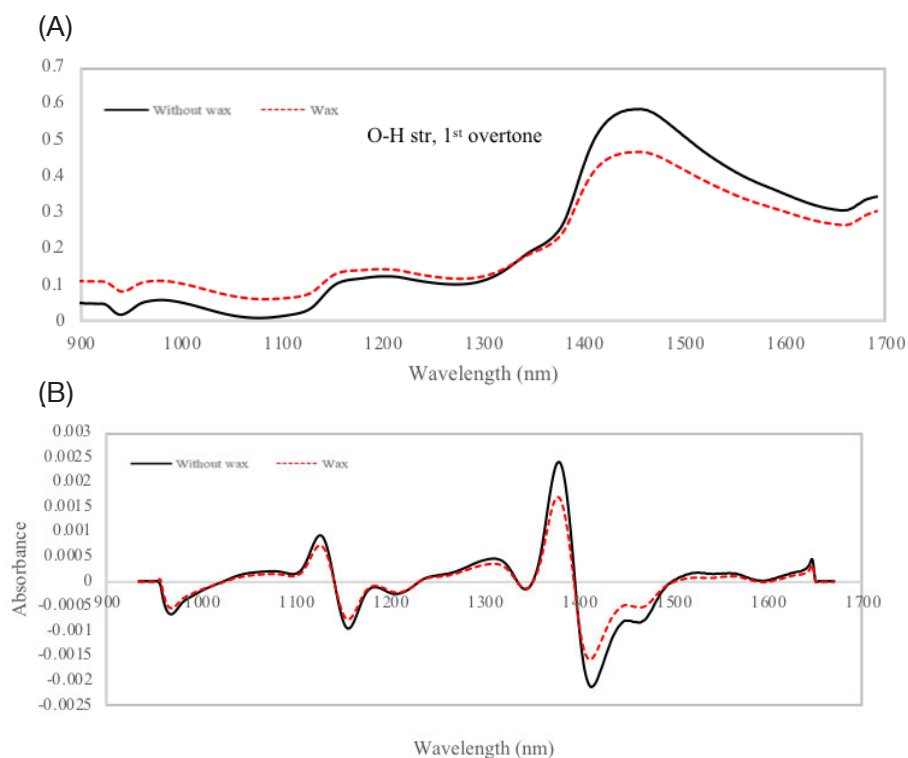


Figure 5 Original (A) and second derivative (B) spectra of sugar cane stalks with and without wax on stalk's surface

Table 1 Descriptive statistics of total soluble solids (TSS) in sugar cane stalks for calibration and validation sets

	Sample set	Number of samples	Min	Max	Means standard deviation
TSS (°Brix)	Calibration	200	11.35	24.26	19.822.74
	Validation	100	13.26	24.02	19.862.69

Table 2 Total soluble solids (°Brix) in sugar cane stalk derived from different position and age

Position	Age (months)			
	8	9	10	11
Bottom	20.30 a	21.46 a	23.24 a	23.24 a
Mid	19.31 b	21.08 b	23.29 a	23.21 a
Top	17.10 c	18.72 c	22.57 b	22.53 b
Average	18.90	20.42	23.03	22.99
CV. (%)	4.57	5.32	2.23	2.84

Means in the same column follow by a common letter are not significantly different at the 5% level by DMRT

การกระจายตัวของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้บนท่อนอ้อย

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของตัวอย่างท่อนอ้อย จำนวน 300 ตัวอย่าง พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 11.35-24.26 °บrix (Table 1) ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความยาว (ความสูง) ของต้นอ้อย โดยจะมีค่าสูงที่บริเวณโคน และมีค่าลดลงที่ตำแหน่งกลางและปลาย ตามลำดับ และค่าจะเพิ่มขึ้นตามอายุการเก็บเกี่ยวของอ้อยอย่างมีนัยสำคัญ ในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 8-9 เดือน และเมื่ออ้อยมีอายุการเก็บเกี่ยวตั้งแต่ 10 เดือน ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่ตำแหน่งโคนและกลางจะไม่มีค่าแตกต่างกัน แต่บริเวณส่วนปลายนั้นยังคงมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่ำกว่าส่วนอื่น ๆ เนื่องจากอ้อยมีการเจริญเติบโตจากด้านล่างขึ้นบน ส่วนที่อ่อนของลำต้นจะมีปริมาณน้ำตาลซูโครสต่ำ ในขณะที่ส่วนที่เจริญเติบโตมาแล้วจะมีการสะสมปริมาณซูโครสมากขึ้น (Zhu, 1997) ดังแสดงใน Table 2

การสร้างสมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

สมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้พบว่า การวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างท่อนอ้อยผ่านการทำความสะอาดไซเคลือบ มีความสามารถในการทำนายที่ดีกว่าตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านการทำความสะอาดพื้นผิว (Table 3) โดยตัวอย่างท่อนอ้อยที่ผ่านการทำความสะอาดพื้นผิวปรับแต่งข้อมูลด้วยวิธีการ Savitzky-Golay first derivative (1D) 15 point มีค่าจำนวนแฟกเตอร์ = 8, มีค่า $R^2 = 0.87$, SEP = 0.97 °บrix และ RPD = 2.77 ตัวอย่าง ท่อนอ้อยที่ไม่ผ่านการทำความสะอาดพื้นผิวปรับแต่งข้อมูลด้วย Savitzky-Golay smoothing (SM) 3 point มีค่าจำนวนแฟกเตอร์ = 12, มีค่า $R^2 = 0.84$, SEP = 1.30 องศาบrix และ RPD = 2.31 การที่มีจำนวนแฟกเตอร์เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจากการจัดกลุ่มตัวแปรของสมการทำนายที่ได้จากท่อนอ้อยที่ไม่ผ่านการทำความสะอาดพื้นผิว มีความซับซ้อนกว่า

แบบผ่านการทำความสะอาดพื้นผิว (Table 3) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sanseechan *et al.* (2018) พบว่า สมการทำนายที่สร้างจากตัวอย่างท่อนอ้อยที่ผ่านการเอาไซเคลือบผิวออกไปนั้น มีประสิทธิภาพในการทำนายค่าความหนาแน่นของท่อนอ้อยมากกว่าสมการที่สร้างมาจากตัวอย่างที่ไม่ได้เอาไซเคลือบออก เป็นผลมาจากการสะท้อนและการกระเจิงแสงที่เกิดจากรอยเปื้อนและไซที่เคลือบอยู่บนพื้นผิว ทำให้แสง NIR ถูกกระเจิงที่ผิวและส่องเข้าไปในท่อนอ้อยได้น้อย จึงเกิดการดูดกลืนแสงน้อยและไม่สม่ำเสมอ เช่นเดียวกับการศึกษาของ (Maraphum *et al.*, 2018) ที่พบว่า สมการทำนาย polarization (pol) ที่สร้างมาจากตัวอย่างอ้อยที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว มีค่า R^2 ในช่วง 0.73-0.84 และค่า RMSEP ในช่วง 1.2-1.5% ขณะที่สมการทำนายจากตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านการทำความสะอาดมีค่า R^2 ในช่วง 0.09-0.82, RMSEP 1.2-3.0% ดังนั้น การทำความสะอาดพื้นผิวท่อนอ้อยจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายได้

การทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จากสมการทำนายที่ปรับแต่งข้อมูลด้วย Savitzky-Golay first derivative (1D) 15 point ค่า TSS ที่ได้จากห้องปฏิบัติการและค่า TSS จากการทำนายของกลุ่มข้อมูล calibration set มีค่า R^2 เท่ากับ 0.90 ค่า SEC (standard error of calibration) เท่ากับ 0.86 °บrix และกลุ่ม Validation set ค่า R^2 เท่ากับ 0.87 ค่า SEC เท่ากับ 0.97 °บrix (Figure 6) โดยค่า R^2 ที่อยู่ในช่วง 0.82-0.90 และค่า RPD อยู่ในช่วง 2.4 – 3.0 แสดงว่า สมการทำนายมีประสิทธิภาพสำหรับการใช้ตรวจสอบคุณภาพ และการแบ่งระดับปริมาณได้ (Williams, 2004) การทดลองนี้พบว่า สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายที่มีอิทธิพลที่ความยาวคลื่น 970 นาโนเมตร เป็นตำแหน่งการดูดกลืนของน้ำ 1,200, 1,390 นาโนเมตร เป็นตำแหน่งการดูดกลืนของพันธะ CH_2 และ 1,440 นาโนเมตร เป็นตำแหน่งการดูดกลืนของซูโครส (Figure 7)

Table 3 Calibration and validation results of total soluble solids (TSS) in sugar cane stalks with and without surface waxes

Method	Pretreatment*	No. of latent variables	Calibration (n = 200)		Validation (n = 100)			RPD
			R	SEC (°Brix)	R	SEP (°Brix)	Bias (%)	
Wax	SM	12	0.84	1.25	0.81	1.30	-0.138	2.31
Without wax	1D	8	0.90	0.86	0.87	0.97	0.122	2.77

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

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

SEC = standard error of calibration

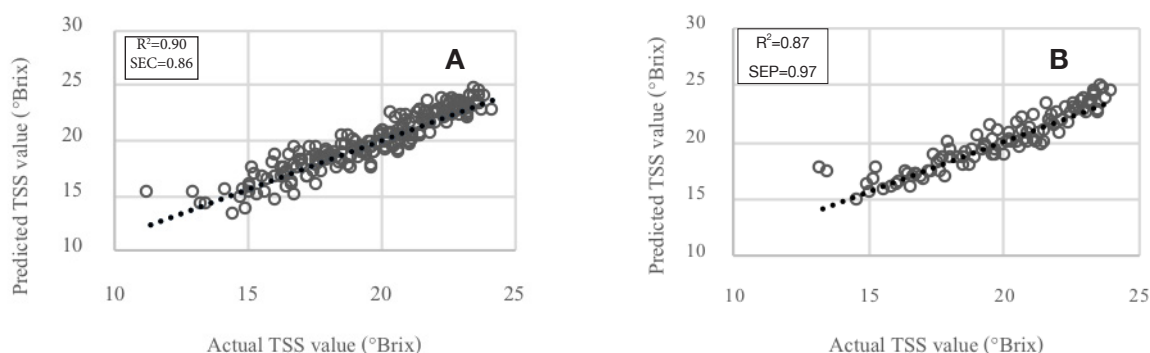


Figure 6 Scatter plots of calibration (A) and validation (B) results of total soluble solids (TSS) from partial least squares (PLS) model obtained from wax-removed sugar cane stalks

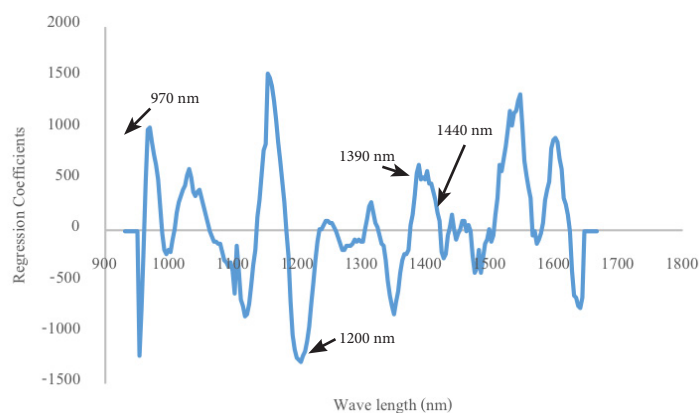


Figure 7 Regression coefficient of the model obtained from wax-removed sugar cane stalks

การกระจายตัวของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

สมการสำหรับทำนายค่า TSS ในท่อนอ้อยถูกใช้ในการทำนายค่าการดูดกลืนแสงในแต่ละพิกเซลของข้อมูล hypercube ที่ได้จากเทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ เพื่อสร้างแผนภาพการกระจายตัวบนพื้นผิวท่อน

อ้อย (Figure 8) การกระจายตัวของค่า TSS บนตัวอย่างท่อนอ้อย 1 ลำ ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนโคน ส่วนกลาง และส่วนปลาย สีแดงแสดงถึงค่า TSS ที่มีการทำนายเป็นค่าสูง สีน้ำเงินแสดงถึง TSS ที่มีการทำนายเป็นค่าต่ำ การแสดงการกระจายตัวของค่า TSS นั้นมีแนวโน้มของการกระจายตัวไม่แตกต่างกันทั่วบริเวณพื้นที่ผิว

ของท่อนอ้อย ส่วนโคนของต้นอ้อยเป็นส่วนที่มีค่า TSS สูงที่สุด เฉลี่ย 21.15 °บริกซ์ เนื่องจากเป็นบริเวณที่ต้นอ้อยใช้สำหรับการกักเก็บอาหาร (น้ำตาล) รองลงมาได้แก่ส่วนกลางเฉลี่ย 18.64 °บริกซ์ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่ออ้อยมีอายุการเก็บเกี่ยวที่มากขึ้น และมีย่าน้อยที่สุดบริเวณส่วนปลายเฉลี่ย 13.52 °บริกซ์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีใบอ้อยที่มีกิจกรรมทางสรีรวิทยาสำคัญ คือ การหายใจโดยนำน้ำตาลไปใช้เป็นสารตั้งต้น

แผนที่การกระจายตัวที่สร้างขึ้นมาจากสมการทำนายพบการทำนายค่า TSS ที่สูงหรือต่ำกว่าค่าจริงที่บริเวณตำแหน่งที่เป็นข้อตาอ้อย และบริเวณพื้นผิวที่มีคราบสีดำ หรือบริเวณที่ถูกแมลงศัตรูอ้อยทำลาย เนื่องจากในการเฉลี่ยข้อมูลสเปกตรัมเพื่อนำมาสร้างสมการทำนายนั้น ได้ทำการเลือกตัดข้อมูลสเปกตรัมบริเวณดังกล่าวออกไป รวมถึงบริเวณบางส่วนของขอบภาพตามแนวยาวของตัวอย่างท่อนอ้อยที่เกิดจากผลของความโค้งงอของรูปทรงกระบอกของตัวอย่างท่อนอ้อย ที่ทำให้ระยะห่างระหว่างพื้นผิวของตัวอย่างท่อนอ้อยกับเซนเซอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตัวอย่างอ้อย

เคลื่อนที่ผ่านได้กล้อง ระยะห่างที่ไกลที่สุดจะอยู่ที่บริเวณขอบของท่อนอ้อยทั้งสองด้าน และระยะที่ใกล้ที่สุด คือ บริเวณตรงกลางของท่อนอ้อย แต่ด้วยข้อจำกัดของเทคนิค NIR-HSI ที่มีลักษณะการสแกนที่เหมาะสมกับตัวอย่างที่แบน ไม่เหมาะสมกับตัวอย่างที่มีรูปร่างทรงกระบอก จึงมีแนวคิดในการปรับปรุงการทำนายจากตัวอย่างที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก เพื่อลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากความโค้ง Maraphum *et al.* (2020) ได้ทำการปรับปรุงแผนที่การกระจายตัวของค่าบริกซ์และค่าความชื้นของท่อนอ้อยโดยทำการสแกนหน้าตัดตามความยาวของท่อนอ้อยที่ถูกผ่าครึ่งตามแนวยาว เพื่อลดข้อผิดพลาดในการทำนายที่จะเกิดขึ้นจากความโค้งของรูปทรงกระบอก พื้นที่ผิวในการสแกนจึงเป็นหน้าตัดที่เรียบ ไม่มีผลของความโค้งของพื้นผิวเกิดขึ้น และยังพบว่า การกระจายตัวบนพื้นที่บริเวณส่วนที่เป็นตำแหน่งของข้อตาอ้อยมีค่าการทำนายที่ต่ำ เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีปริมาณของเส้นใยมาก ซึ่งแตกต่างจากแผนภาพการกระจายตัวของท่อนอ้อยในการศึกษานี้ ที่เป็นการกระจายตัวผ่านพื้นผิวภายนอกของท่อนอ้อยที่มีปัจจัยรบกวนมากกว่า

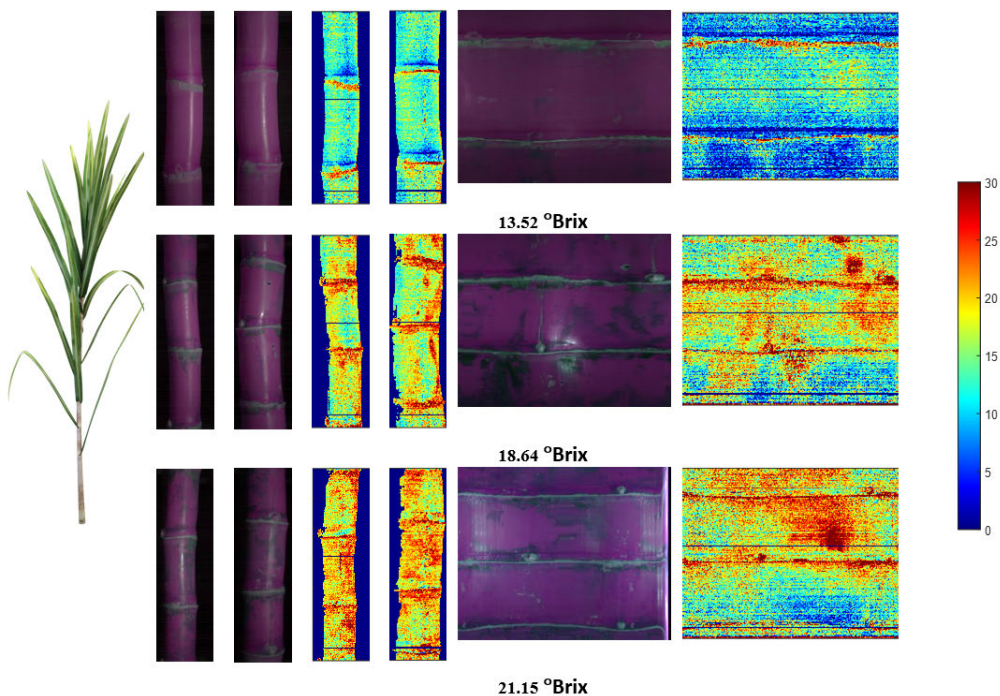


Figure 8 Total soluble solids (TSS) mapping in sugar cane stalks using color illustrations from NIR-HSI system

สรุปผลการทดลอง

เทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ หรือ NIR-HSI ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในตัวอย่างท่อนอ้อย สมการทำนายจากตัวอย่างท่อนอ้อยที่ผ่านการทำความสะอาดพื้นผิว มีประสิทธิภาพในการทำนายที่ดี ($R^2 = 0.87$, SEP = 0.97 °บrix และ RPD = 2.77) มากกว่าสมการทำนายจากตัวอย่างท่อนอ้อยที่ไม่ผ่านการทำความสะอาดพื้นผิว ($R^2 = 0.81$, SEP = 1.30 °บrix และ RPD = 2.31) เนื่องจากผลของการสะท้อนและการกระเจิงแสงที่ไม่สม่ำเสมอของคราบไซท์เคลือบพื้นผิวท่อนอ้อยแสงจึงไม่สามารถทะลุเข้าไปในตัวอย่างท่อนอ้อยได้ดีเท่าที่ควร การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการสร้างแผนภาพการกระจายตัว จากสมการทำนายที่พัฒนาขึ้นเพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่า TSS ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาว (ความสูง) อายุการเก็บเกี่ยวของอ้อยเพื่อป้องกันคุณภาพที่เหมาะสมสำหรับการเก็บเกี่ยวด้วยกล้อง NIR-HSI แบบพกพา รวมถึงตรวจประเมินคุณภาพสำหรับการซื้อขาย และยังอาจพัฒนาเทคนิค NIR-HSI ในการทำนายค่า Pol, %fiber และค่า C.C.S. ดังนั้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนาย และลดข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับแผนภาพการกระจายตัว จึงควรมีการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับการสแกนที่เหมาะสมกับตัวอย่างหรือผลผลิตทางการเกษตรที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกต่อไป

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) (ARDA) สำหรับการสนับสนุนทางการเงิน ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และศูนย์วิจัยพืชไร่สุพรรณบุรี กรมวิชาการเกษตร สำหรับการจัดหาสิ่งอำนวยความสะดวกและอุปกรณ์ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- คณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. 2560. ประกาศคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย พ.ศ. 2560. เรื่อง กำหนดปริมาณมาตรฐานในการผลิตน้ำตาลทรายของโรงงาน. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 134 ตอนพิเศษ 254 ง หน้า 36. แหล่งข้อมูล: www.ratchakitch.soc.go.th. สืบค้น: 6 มิถุนายน 2565.
- Aparatana, K., K. Saengprachatanarug, Y. Izumikawa, S. Nakamura and E. Taira. 2020. Development of sugar cane and trash identification system in sugar production using hyperspectral imaging. *J. Near Infrared Spectros.* 28(3): 133-139.
- Berding, N., G.A. Brotherton, D.G. Le Brocq and J.C. Skinner. 1991. Near infrared Reflectance spectroscopy for analysis of sugar cane from clonal evaluation trials: I. Fibrated cane. *Crop Sci.* 31(4): 1017-1023.
- Caporaso, N., M.B. Whitworth and I.D. Fisk . 2018. Protein content prediction in single wheat kernels using hyperspectral imaging. *Food Chemistry.* 240: 32-42.
- James, C.S. 1995. *Analytical Chemistry of Foods*. Blackie Academic & Professional, London, 178 p.
- Kirasak, K., T. Sansayawichai, W. Ponragdee and A. Thipyawat 2015. Determination of commercial cane sugar (ccs) using near infrared spectroscopy. *Thai Agricultural Research Journal.* 33(2): 159-168.
- Manley, M. 2014. Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials. *Chem. Soc. Rev.* 43(24): 8200-8214.

- Maraphum, K., S. Chuan-Udom, K. Saengprachatanarug, S. Wongpichet, J. Posom, A. Phuphaphud and E. Taira. 2018. Effect of waxy material and measurement position of a sugar cane stalk on the rapid determination of Pol value using a portable near infrared instrument. *J. Near Infrared Spectros.*, 26(5): 287-296.
- Maraphum, K., K. Saengprachatanarug, K. Aparatana, Y. Izumikawa and E. Taira. 2020. Spatial mapping of Brix and moisture content in sugar cane stalk using hyperspectral imaging. *J. Near Infrared Spectros.* 28(4): 167-174.
- Martinsen, P. and P. Schaare. 1998. Measuring soluble solids distribution in kiwifruit using near-infrared imaging spectroscopy. *Post-harvest Biol. Technol.* 14(3): 271-281.
- Nawi, N.M., M.R. Kamal, G. Chen and T. Jensen. 2014. Prediction of Sugar cane Quality Parameters Using Visible shortwave Near Infrared Spectroradiometer. *Agric. Agric. Sci. Procedia* 2: 136-143.
- Osborne, B.G., T. Fearn. and P.H. Hindle. 1993. *Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis*. Harlow, Longman Scientific and Technical.
- Rungpichayapichet, P. M. Nagle, P. Yuwanbun, P. Khuwijitjaru, B. Mahayothee and J. Miller. 2017. Prediction mapping of physicochemical properties in mango by hyperspectral imaging. *Biosyst. Eng.* 159: 109-120.
- Sanseechan, P., L. Panduangnate, K. Saengprachatanarug, S. Wongpichet, E. Taira and J. Posom, 2018. A portable near infrared spectrometer as a non-destructive tool for rapid screening of solid density stalk in a sugarcane breeding program. *Sens. Bio-Sens. Res.* 20: 34-40.
- Singh, C. B., D. S. Jayas, J. Paliwal, and N. D. G. White. 2012. Fungal damage detection in wheat using short-wave near-infrared hyperspectral and digital colour imaging. *Int. J. of Food Props.* 15(1): 11-24.
- Taira, E., M. Ueno and Y. Kawamitsu, 2010. Automated quality evaluation system for net and gross sugar cane samples using near infrared spectroscopy. *J. Near Infrared Spectros.* 18(3):209-215
- Tewari, J., R. Mehrotra and J. Irudayaraj. 2003. Direct near infrared analysis of sugar cane clear juice using a bre-optic transmittance probe. *J. Near Infrared Spectros.* 11(5), 351-356.
- Williams, P. 2004. Near-infrared technology: getting the best out of light: a short course in the practical implementation of near-infrared spectroscopy for the user. PDK Projects, Incorporated.
- Zhu, Y. J., E. Komor and P. H. Moore. 1997. Sucrose accumulation in the sugar cane stem is regulated by the difference between the activities of soluble acid invertase and sucrose phosphate synthase. *Plant Physiol.* 115(2): 609-616.