



เครื่องวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อยแบบพกพาด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้

Portable Commercial Cane Sugar Analyzer by Near Infrared Technique

ลลิตา ออมสิน¹, รณฤทธิ์ ฤทธิธิน^{1*}, วีระศักดิ์ สุระเรืองชัย², รัชดาภรณ์ หนูทัศน³Lalita Aomsin¹, Ronnarit Rittiron^{1*}, Werasak Surareungchai², Rutchadaporn Nootas³¹ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม, 73140¹Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Nakhon Pathom, 73140²คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, 10140²Faculty of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140³บริษัท มิตรผลวิจัยพัฒนาอ้อยและน้ำตาล จำกัด, ชัยภูมิ, 36110³Mitr Phol Innovation & Research Center, Chaiyaphum, 36110

*Corresponding author: Tel: +66-8-5917-1017, Fax: +66-34-281-098, E-mail: fengror@ku.ac.th

บทคัดย่อ

อ้อยเป็นพืชอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งราคาการซื้อขายจะอาศัยค่า CCS (Commercial cane sugar) เป็นตัวกำหนด การซื้อขายอ้อยด้วยระบบ CCS นั้น ยังเป็นวิธีที่ยังยาก ใช้เวลานาน และไม่สามารถทำการวัดค่า CCS ในไร่เพื่อทราบปริมาณน้ำตาลได้ในทันที ทำให้เกษตรกรไม่สามารถทำการเก็บเกี่ยวอ้อยในระยะเวลาเหมาะสมเพื่อให้ค่า CCS สูงที่สุดได้ เทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared) จึงเป็นเทคนิคที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นเทคนิคการตรวจสอบคุณภาพโดยไม่ทำลายตัวอย่าง ไม่ใช้สารเคมี ใช้งานง่าย และรวดเร็ว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการสร้างเครื่องวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อยแบบพกพาด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ในระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ ที่ความยาวคลื่น 800–1200 nm และสร้างสมการเทียบมาตรฐานวิเคราะห์ค่า CCS ซึ่งเครื่องวิเคราะห์ที่สร้างมีจอแสดงผลเป็นแบบสัมผัส ใช้แหล่งพลังงานเป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุ 9800 mAh จากผลของการทดสอบเครื่องวิเคราะห์ พบว่าสามารถทำงานภาคสนามด้วยแบตเตอรี่ได้ต่อเนื่องกว่า 6 h และสมการเทียบมาตรฐานวิเคราะห์ค่า CCS ที่สร้างจากอ้อยปล้อง 150 ตัวอย่าง มีความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย (SEP) เท่ากับ 1.97% และค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias) เท่ากับ 0.10% โดยเครื่องวิเคราะห์ที่สร้างวิเคราะห์ค่า CCS ได้ไม่แตกต่างกับค่าที่วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

คำสำคัญ: เครื่องวิเคราะห์คุณภาพอ้อย, อินฟราเรดย่านใกล้, ค่า CCS

Abstract

Sugarcane is an important industrial crop for Thailand's economy. Sugarcane trading is based on its sweetness quality which is measured by Commercial Cane Sugar (CCS). Sugarcane trading by CCS method is complicated and cannot analyze the CCS content promptly. Therefore, farmers do not know the appropriate time to harvest for high purchasing price. Near Infrared (NIR) technique is an interesting method because NIR is nondestructive internal quality analysis, no chemicals, simple and rapid method. This research aimed to develop portable commercial cane sugar analyzer by NIR technique in reflectance mode at wavelength region of 800–1200 nm and developed the calibration equation for CCS content. The developed analyzer was assembled with touch screen display and battery of capacity 9800 mA h. From the results of performance test, it was found that the analyzer could be operated in the field continuously more than 6 h in battery mode. The developed calibration equation obtained from 150 sugarcane stalks could predict the CCS content with Standard Error of Prediction (SEP) = 1.97% and Bias = -0.10%. The results of CCS content values predicted by the invented analyzer were not significantly different from actual values at 95% confidence level.

Received: January 30, 2019

Revised: April 29, 2019

Accepted: April 30, 2019

Available online: June 10, 2019

1 บทนำ

อ้อย เป็นพืชอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เพราะเป็นผู้ส่งออกน้ำตาลทรายรายใหญ่เป็นอันดับ 2 ของโลก รองจากประเทศบราซิล โดยการผลิตน้ำตาลทรายในปี 2561 มีการเก็บเกี่ยวอ้อยเข้าโรงงานน้ำตาลจำนวน 134.93 ล้านตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2561) สามารถผลิตน้ำตาลทรายได้ปริมาณ 14.68 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่าจากการจำหน่ายน้ำตาลทราย 315,620 ล้านบาท ซึ่งการซื้อขายอ้อยในประเทศไทยได้มีการซื้อขายตามคุณภาพความหวานหรือใช้ระบบ Commercial Cane Sugar หรือ CCS เป็นตัวกำหนดราคา โดยหากอ้อยมีค่า CCS สูง หมายความว่าราคาอ้อยจะสูงขึ้นตามไปด้วย โดยค่า CCS สามารถคำนวณได้จากค่าเปอร์เซ็นต์โพลาไรเซชัน (Polarization; Pol) และเปอร์เซ็นต์บริกซ์ (%Brix) ของน้ำอ้อยที่ได้จากลูกทึบชุดแรก รวมถึงเปอร์เซ็นต์เยื่อใย (Fiber) ในอ้อยด้วย (กาญจนาและคณะ, 2558)

ค่า CCS นั้นมีวิธีการวิเคราะห์ที่ยุ่งยาก เนื่องจากต้องทำการวิเคราะห์ค่า Brix pol และ Fiber ในอ้อย จากนั้นจึงนำค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้มาทำการคำนวณเพื่อให้ได้ค่า CCS ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องใช้แรงงานและใช้เวลานาน ทำให้ไม่สามารถทราบปริมาณน้ำตาลได้ในทันที หากมีวิธีการที่สามารถวัดค่า CCS ของอ้อยได้แบบทันที (Real time) จะช่วยให้เกษตรกรสามารถเก็บเกี่ยวอ้อยได้ในระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะทำให้อ้อยมีค่า CCS สูงที่สุด และเนื่องจากค่า CCS นั้นเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำตาลทรายที่จะผลิตได้ หากอ้อยมีค่า CCS สูง ก็จะส่งผลให้โรงงานสามารถผลิตน้ำตาลทรายได้มากขึ้นด้วย เทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared spectroscopy; NIR) จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอ้อย เนื่องจากเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง ใช้งานง่าย รวดเร็ว ไม่ใช้สารเคมี และสามารถลดต้นทุนในการตรวจสอบคุณภาพได้อีกด้วย

เทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่น 800–2500 nm มีศักยภาพในการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายตัวอย่าง โดยอาศัยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางเคมีขององค์ประกอบภายในตัวอย่างกับการดูดกลืนพลังงานขององค์ประกอบภายในตัวอย่างที่สัมพันธ์กับพันธะทางเคมีที่ตำแหน่งความยาวคลื่นจำเพาะในย่าน NIR นั้น ซึ่งเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้เป็นเทคนิคการตรวจสอบที่มีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง ทั้งในอุตสาหกรรมอาหารและยา อุตสาหกรรมเกษตร และอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล เป็นต้น

โดยธนฤทธิและคณะ (2556) ได้ศึกษาการประเมินปริมาณน้ำมันในทะลายปาล์มด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ ซึ่งจากผล

การศึกษาพบว่าเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้สามารถใช้ในการกำหนดราคาซื้อขายทะลายปาล์มในเชิงพาณิชย์ได้ในปีต่อมา ยูนันท์และคณะ (2557) ได้ศึกษาการคัดแยกความผิดปกติของเมล็ดข้าวโพดโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ ประสบผลสำเร็จในการคัดแยกสูงถึง 89% และ Rittiron and Seehalak (2014) และ Narongwongwana and Rittiron (2015) พบว่าเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ สามารถวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในยางพาราแบบแผ่น และปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางพาราได้อย่างแม่นยำ มีประสิทธิภาพสูง สำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ในการวิเคราะห์คุณภาพของอ้อย Nawi et al. (2014) ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิคในการวิเคราะห์ค่า Brix ของลำอ้อยด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (Reflectance mode) พบว่าเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้มีประสิทธิภาพสามารถวิเคราะห์ค่าคุณภาพของอ้อยเบื้องต้นได้ ต่อมากาญจนาและคณะ (2558) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ค่า CCS ของน้ำอ้อยด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ ในระบบการวัดแบบส่องทะลุผ่าน (Transflectance mode) พบว่าให้ผลการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสูง แต่งานวิจัยดังกล่าวยังต้องมีการเตรียมตัวอย่างลำอ้อยให้เป็นน้ำอ้อย ทำให้ไม่สามารถทราบค่า CCS ได้ในภาคสนามทันที อีกทั้งเครื่องที่ใช้เป็นเครื่องในเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการสร้างเครื่องวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อยแบบพกพาด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ ในระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (Reflectance mode) ที่ช่วงความยาวคลื่น 800–1200 nm และสร้างสมการเทียบมาตรฐานวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อย โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial least squares regression)

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การออกแบบและสร้างเครื่องวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อยแบบพกพาด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบเครื่องวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อยให้มีลักษณะเป็นกระเปาะ เพื่อให้พกพาไปใช้วิเคราะห์ในไร่ได้สะดวก มีสายวัดซึ่งเป็นเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber optic) ขนาดยาว 1 m หัววัดมีขนาดเล็กเพื่อให้สามารถทำการวัดอ้อยได้อย่างสะดวก นอกจากนั้นแล้วยังมีอุปกรณ์เสริมหัววัดที่จะถูกออกแบบขึ้นเฉพาะสำหรับการวัดลำอ้อย เพื่อป้องกันแสงรบกวนจากภายนอกขณะทำการวัด โดยอุปกรณ์เสริมหัววัดมีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 40 x 50 mm รัศมีความโค้งของอุปกรณ์เสริมหัววัด เท่ากับ 20 mm และช่องสำหรับใส่หัววัดมีความกว้าง 12.5 mm แสดงดัง Figure 1

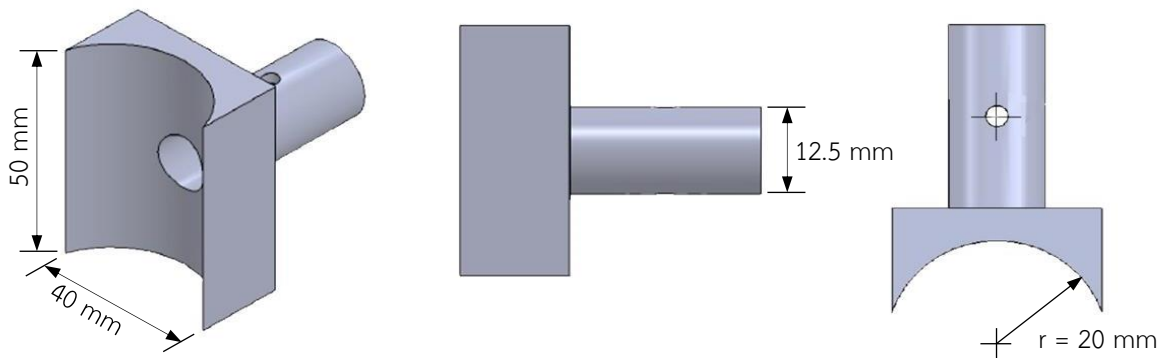
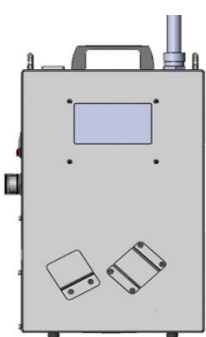
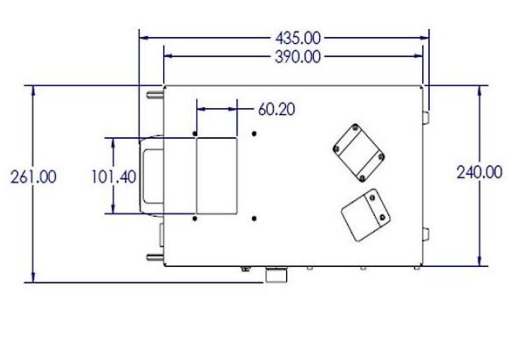
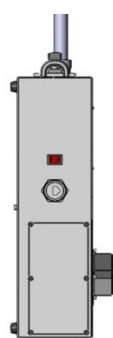
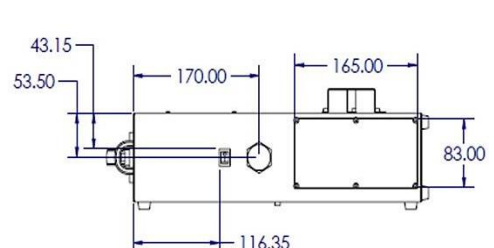


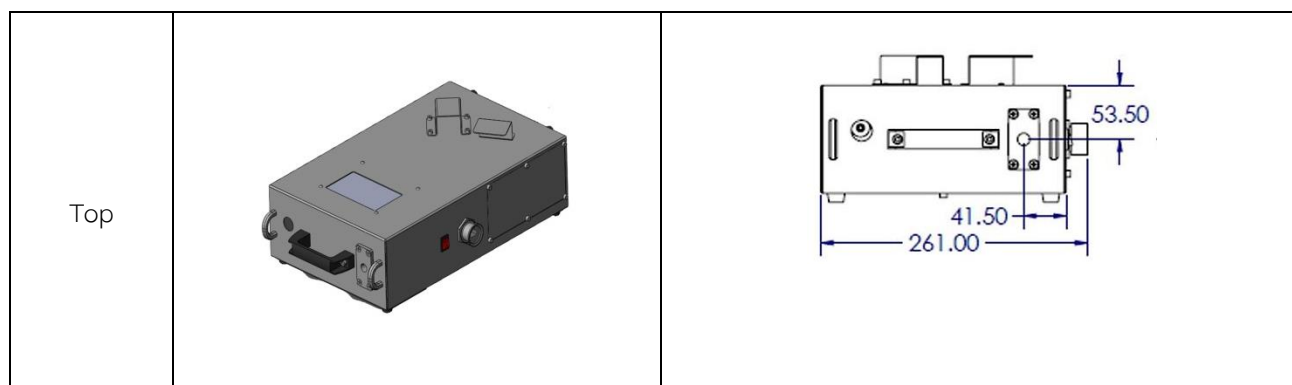
Figure 1 Specially designed measuring head for spectral acquisition of sugarcane stalk.

ในการวิเคราะห์สามารถนำหัววัดไปสัมผัสที่ลำอ้อยแล้วกดสวิตช์เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงผลออกมาทางหน้าจอแสดงผล โดยจอแสดงผลเป็นแบบสัมผัสเพื่อให้สะดวกกับการทำงาน เครื่องวิเคราะห์จะใช้แหล่งพลังงานเป็นแบตเตอรี่ ความตํ่าศักย์ 12V ที่ความจุ 9800 mAh แบบร่างและขนาดของเครื่องวิเคราะห์แสดงดัง Table 1 โดยเครื่องวิเคราะห์ที่จะสร้างมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้คือสามารถวัดการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่น 800–1200 nm โดยมี

แหล่งกำเนิดแสงเป็น Tungsten halogen lamp กำลังไฟ 7 W มีอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง (Detector) ที่ทำหน้าที่วัดความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนคือ Hamamatsu S10420 มีอัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio) เท่ากับ 450:1 มีความละเอียด (A/D resolution) 16 bit และเครื่องวิเคราะห์จะใช้ integration time 30,000 ms ในการวัดค่าการดูดกลืนพลังงาน โดยมีการเฉลี่ยการวัด 2 ครั้ง

Table 1 Dimension of portable commercial cane sugar analyzer by near infrared technique.

Side	Drafts of analyzer	Size of analyzer (mm)
Front		
Side		



การสร้างเครื่องวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อย มีกระบวนการอยู่ 3 ขั้นตอน คือการสร้างตัวเครื่อง (Body) การประกอบฮาร์ดแวร์

(Hardware) และการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานและการประมวลผล โดยเครื่องวิเคราะห์ที่สร้างจะมีลักษณะดัง Figure 2



Figure 2 Drafts of portable commercial cane sugar analyzer by near infrared technique.

เครื่องวิเคราะห์ที่สร้างนั้นจะมีปุ่มเปิด-ปิดเครื่อง มี port สำหรับถ่ายโอนข้อมูล (LAN port) และช่องสำหรับใส่แบตเตอรี่ที่บริเวณฐานด้านข้างของเครื่อง โดยใช้แผ่นเซรามิกเป็นวัสดุอ้างอิง (Reference material) การดูดกลืนพลังงานของอ้อย และเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน จึงได้มีการออกแบบให้มีช่องสำหรับวัดวัสดุอ้างอิงอยู่ที่ตัวเครื่องวิเคราะห์ โดยแผ่นเซรามิกจะอยู่ด้านล่างของ

ช่องวัด ในการวัดวัสดุอ้างอิงสามารถนำหัววัดใส่ลงไปในช่องเพื่อทำการวัดวัสดุอ้างอิงได้โดยตรง โดยค่าการดูดกลืนพลังงานที่ได้จะเท่ากับ $\log(\text{reference/sample})$ ซึ่งการวัดวัสดุอ้างอิงนั้นจะต้องทำการวัดทุกครั้งหลังจากทำการเปิดเครื่องวิเคราะห์ขึ้นใหม่ หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ที่สร้างแสดงดัง Figure 3

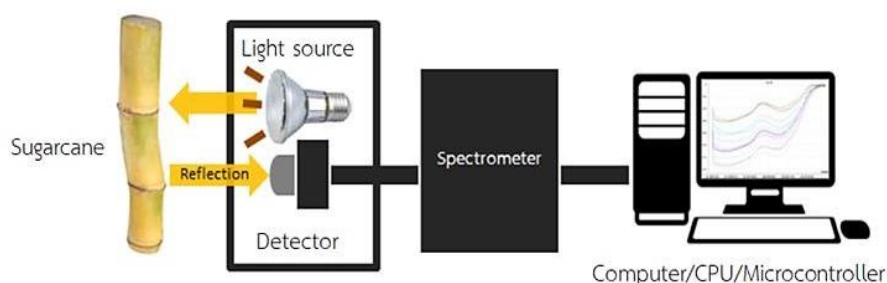


Figure 3 Principle of developed portable commercial cane sugar analyzer by near infrared technique

จาก Figure 3 แสดงหลักการทำงานของเทคนิค NIR โดยการฉายแสงจาก Tungsten halogen lamp ที่มีความยาวคลื่นอินฟราเรดย่านใกล้ส่องเข้าไปยังตัวอย่างอ้อย ทำให้โมเลกุลขององค์ประกอบภายในดูดกลืนพลังงานแล้วเกิดการสั่นสะเทือนคลื่นแสงที่เหลือจะสะท้อนออกมา (Reflection) และถูกตรวจวัด

ความเข้มแสงด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง (Detector) จากนั้นนำมาประมวลผลเป็นค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ เกิดเป็นสเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะตัวในแต่ละตัวอย่าง ซึ่งสเปกตรัมในช่วงคลื่น NIR ที่ได้จะถูกนำมาประมวลผลและหาความสัมพันธ์กับค่า CCS ของอ้อยที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมี

ที่ได้มาตรฐาน จนได้สมการเทียบมาตรฐาน (Calibration equation) เพื่อใช้ทำนายค่า CCS ของอ้อยต่อไป

2.2 การสร้างสมการเทียบมาตรฐานวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อย
ตัวอย่างอ้อยที่ใช้ในการสร้างสมการได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท มิตรผลวิชัย พัฒนาอ้อยและน้ำตาล จำกัด โดยจะทำการสุ่มเก็บค่าการดูดกลืนพลังงานของตัวอย่างอ้อยพันธุ์ขอนแก่น 3 อุณหภูมิ 483 และ สุพรรณบุรี 50 ที่มีอายุอยู่ในช่วง 10–12 month จำนวน 200 ตัวอย่างปล้องอ้อย จากแปลงทดลองงานปรับปรุงพันธุ์อ้อยที่อำเภอภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ สมการเทียบมาตรฐานจะถูกสร้างขึ้นจากตัวอย่างอ้อยปล้องจำนวน 110 ตัวอย่าง (Calibration set) จากนั้นจะทำการตรวจสอบความถูกต้องและเลือกสมการเทียบมาตรฐานที่ดีที่สุดด้วยตัวอย่างอ้อยปล้องจำนวน 40 ตัวอย่าง (Validation set) และขั้นตอนสุดท้ายสมการเทียบมาตรฐานที่ดีที่สุดจะถูกทดสอบประสิทธิภาพด้วยตัวอย่างกลุ่มใหม่ (Prediction set) ที่เก็บคนละช่วงเวลากับตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างและทดสอบความถูกต้องของสมการ จำนวน 50 ตัวอย่าง โดยในแต่ละกลุ่มจะมีการกระจายพันธุ์อ้อยและช่วงอายุในสัดส่วนที่เท่ากัน การสร้างสมการเทียบมาตรฐานวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อย มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.2.1 วัดค่าการดูดกลืนพลังงานของอ้อยด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่สร้าง

นำเครื่องวิเคราะห์ที่สร้างไปวัดค่าการดูดกลืนพลังงานของอ้อยในไร่ อ้อยหนึ่งลำจะถูกนำมาใช้เป็นตัวอย่างเพียง 3 ปล้อง (1

ปล้อง ต่อ 1 ตัวอย่าง) คือตัวอย่างปล้องอ้อยในส่วนปลาย ส่วนกลาง และส่วนโคน โดยแต่ละปล้องจะได้ค่าการดูดกลืนพลังงานที่เป็นตัวแทนของหนึ่งตัวอย่าง ซึ่งอ้อยแต่ละปล้องจะมีความยาวประมาณ 10-15 cm ในการวัดค่าการดูดกลืนพลังงานนั้นจะทำการวัดบริเวณกลางปล้องอ้อย ก่อนการวัดค่าการดูดกลืนพลังงานอ้อยจะถูกดึงเปลือกและชูดแก้วซีด้วยมีดตัดอ้อยออกก่อนการวัด

2.2.2 วิเคราะห์ค่าทางเคมีของอ้อย

หลังจากทำการวัดค่าการดูดกลืนพลังงานแล้ว ให้นำตัวอย่างอ้อยไปวิเคราะห์ค่าทางเคมี โดยค่าทางเคมีที่ใช้สร้างความสัมพันธ์กับค่าการดูดกลืนพลังงาน จะเป็นค่าทางเคมีของอ้อยปล้องนั้นๆ ขั้นแรกจะทำการตัดตัวอย่างลำอ้อยตรงตำแหน่งปล้องที่ทำการวัดการดูดกลืนพลังงานด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่สร้าง ตามความยาวของปล้องอ้อยนั้นๆ ประมาณ 10–15 cm คั้นน้ำอ้อยด้วยเครื่องคั้นน้ำอ้อย แยกส่วนที่เป็นน้ำอ้อยและกากอ้อยออกจากกัน นำส่วนน้ำอ้อยไปวิเคราะห์หาค่า Brix ด้วยเครื่อง Automatic table refractometer (รุ่น schmidt haensch, Germany) วิเคราะห์ค่า Polarization ด้วยเครื่อง Polarimeter (รุ่น schmidt haensch, Germany) และ นำส่วน กากอ้อยไปวิเคราะห์ค่า Fiber โดยวิธีการอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 h และคำนวณเป็นปริมาณเส้นใยจากสมการ (1) ซึ่งค่า CCS สามารถคำนวณได้จากสมการ (2) (กาญจนา และคณะ, 2558)

$$\%Fiber = \frac{(\text{น้ำหนักสด} - \text{น้ำหนักแห้ง})}{\text{น้ำหนักสด}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\%CCS = \frac{3 \times \%Polarization}{2} \left(1 - \frac{\%Fiber + 5}{100\%} \right) - \frac{\%Brix}{2} \left(1 - \frac{\%Fiber + 3}{100\%} \right) \quad (2)$$

เมื่อ Polarization คือ ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำตาลซูโครสที่ละลายอยู่ในน้ำอ้อย (%)

Fiber คือ ปริมาณเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ (%)

Brix คือ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (%)

2.2.3 สร้างสมการเทียบมาตรฐาน

ข้อมูลการดูดกลืนพลังงานของตัวอย่างอ้อย และค่า CCS ของอ้อยที่ได้จากวิธีมาตรฐานจะถูกนำมาสร้างสมการเทียบมาตรฐาน โดยตัวอย่างอ้อยจะถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) จำนวน 110 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ใช้ทดสอบความถูกต้องของสมการเทียบมาตรฐาน (Validation set) จำนวน 40 ตัวอย่าง ซึ่งกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของสมการจะเป็นอิสระจากกลุ่มที่ใช้ในการสร้างสมการ โดยสมการเทียบมาตรฐานจะถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial least squares regression; PLS)

2.2.4 ประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานด้วย

มาตรฐาน ISO 12099: 2017

สมการเทียบมาตรฐานที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดจะถูกนำมาประเมินศักยภาพด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017 (รณฤทธิ์, 2560) โดยจะทำการประเมินค่าทางสถิติดังต่อไปนี้ คือ ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย (Standard error of prediction; SEP), ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias) และค่าความชัน (Slope)

2.2.4.1 การตรวจสอบ Bias

โดยการคำนวณค่า bias confidence limit (T_b) ตามสมการ (3) หากค่า Bias น้อยกว่า T_b แสดงว่า Bias หรือค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการทำนายไม่มีนัยสำคัญ

$$T_b = \pm \frac{t_{(1-\alpha/2)} \times SEP}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

โดย T_b คือ Bias confidence limit

$t_{(1-\alpha/2)}$ คือ ค่า t value ของการทดสอบ 2 ทาง ด้วย degree of freedom ที่สอดคล้องกับ SEP ซึ่งมีค่าเท่ากับ n-1

SEP (Standard error of prediction) คือ ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่ม Validation set

n คือ จำนวนตัวอย่างในกลุ่ม Validation set

2.2.4.2 การตรวจสอบ SEP

โดยการคำนวณค่า The unexplained error confidence limit (T_{UE}) ตามสมการ (4) หากค่า SEP น้อยกว่า T_{UE} แสดงว่า SEP หรือ ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการไม่มีนัยสำคัญ

$$T_{UE} = SEC \sqrt{F_{(\alpha, v, M)}} \quad (4)$$

T_{UE} คือ The unexplained error confidence limit

SEC (Standard error of calibration) คือ ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการสร้างสมการของกลุ่ม calibration set

$F_{(\alpha, v, M)}$ คือ ค่า F value

α คือ ระดับความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดชนิดที่ 1 (type I error) โดยทั่วไปคือ 5%

v คือ $n_{\text{validation set}} - 1$ (degree of freedom ที่สอดคล้องกับ SEP) M คือ $n_{\text{calibration set}} - p - 1$ (degree of freedom ที่สอดคล้องกับ SEC)

2.2.4.3 การตรวจสอบความชัน

Slope หรือความชัน ในที่นี้เป็นความชันของกราฟการกระจาย (Scatter plots) ระหว่างค่าทางเคมีจริงที่เป็นค่าอ้างอิง (แกน Y) และค่าที่ทำนายจากสมการเทียบมาตรฐาน (แกน X) ซึ่งจะสอดคล้องกับสมการเส้นตรง $y = a + by$ โดยมีค่า Slope b และ Intercept a คำนวณได้ตามสมการ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$b = \frac{S_{yy}}{S_y^2} \quad (5)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (6)$$

โดย S_{yy} คือ ความแปรปรวนร่วมระหว่างค่าทำนายและค่าจริง (Covariance)

S_y^2 คือ ความแปรปรวนของค่าทำนายในกลุ่ม validation set

$\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าที่ทำนายจากสมการเทียบมาตรฐาน

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าอ้างอิงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน

จากนั้นทดสอบความชันที่คำนวณได้โดยใช้ t-test ตามสมการ (7) และ (8)

$$S_{res} = \sqrt{\frac{\sum y_i - (a + by_i)^2}{n-2}} \quad (7)$$

$$t_{obs} = |b - 1| \sqrt{\frac{S_y^2(n-1)}{S_{res}^2}} \quad (8)$$

โดย S_{res} คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ residual

t_{obs} คือ The observed t value

n คือ จำนวนตัวอย่างในกลุ่ม validation set

y_i คือ ค่าอ้างอิงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน

$\hat{y}_i$ คือ ค่าที่ทำนายได้จากวิธีอินฟราเรดย่านใกล้

หากค่า t_{obs} น้อยกว่า $t_{(1-\alpha/2)}$ แสดงว่าความชันของกราฟการกระจายระหว่างค่าทางเคมีจริงที่เป็นค่าอ้างอิง และค่าที่ทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานไม่แตกต่างจาก 1 อย่างมีนัยสำคัญ

2.3 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวิเคราะห์ที่สร้าง

ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวิเคราะห์ที่สร้าง โดยสมการเทียบมาตรฐานที่ดีที่สุดจะถูกทดสอบประสิทธิภาพด้วยตัวอย่างอ้อยกลุ่มใหม่ (Prediction set) จำนวน 50 ตัวอย่าง จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ มาเปรียบเทียบกับค่า CCS จริง เพื่อนำมาคำนวณเป็นค่าทางสถิติ

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการสร้างเครื่องวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อยแบบพกพาด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องวิเคราะห์ออกมาในรูปแบบกระเป๋าพกพา เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ได้ สะดวกกับการนำไปใช้ในภาคสนาม มีสายวัดยาวติดกับตัวเครื่อง มีช่องสำหรับวัดวัสดุ อ้างอิงติดอยู่ที่ตัวเครื่อง หัววัด (Probe) สำหรับวัดการดูดกลืนอ้อยมีขนาดเล็ก แสดงดัง Figure 4 ซึ่งในการตรวจวัดค่า CCS ของอ้อยนั้น สามารถนำหัววัดไปแนบกับลำอ้อยแล้วทำการกดวัดได้ทันที ซึ่งค่า CCS ที่เครื่องวิเคราะห์ที่สร้างทำนายได้จะแสดงที่จอแสดงผล

จอแสดงผลเป็นแบบสัมผัส (Touch screen) ขนาดของจอแสดงผลมีขนาด $10 \times 6 \text{ cm}^2$ และเครื่องวิเคราะห์ที่สร้างสามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ได้ โดยแบตเตอรี่ที่ใช้มีขนาดเล็กแบบ Super lithium polymer battery

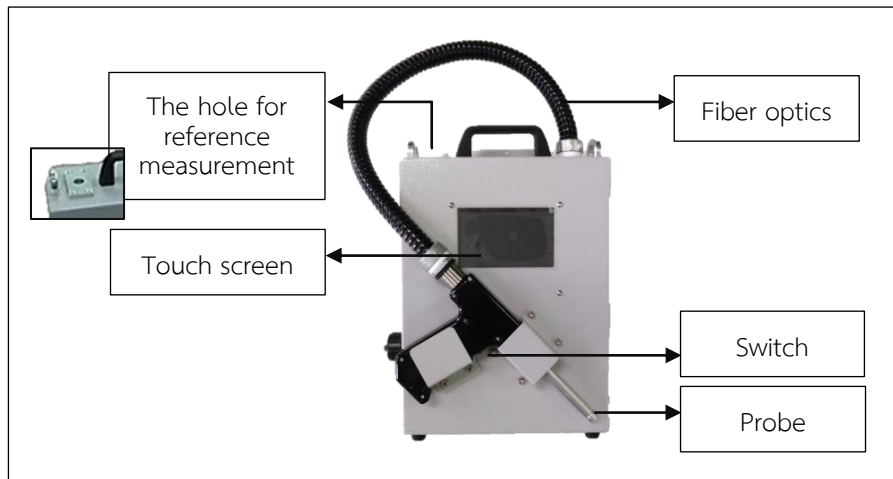


Figure 4 Developed portable commercial cane sugar analyzer by near infrared technique.

สำหรับการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ที่สร้าง เมื่อทำการกดปุ่มวัดแล้ว อุปกรณ์จ่ายไฟ (Power Supply) จะทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้แหล่งกำเนิดแสง จากนั้นแสงจะส่องเข้าไปยังตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างจะทำการดูดกลืนคลื่นแสงไว้ส่วนหนึ่ง และแสงที่เหลือจะสะท้อนกลับไปยัง Detector เพื่อทำการประมวลผลเป็นค่าการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ในกรณีที่มีสมการเทียบมาตรฐานวิเคราะห์ค่า CCS แล้วนั้น Controller board จะทำหน้าที่ในการคำนวณและประมวลผล ซึ่งค่า CCS ที่วัดได้จะ

แสดงผลทางหน้าจอแสดงผล นอกจากนี้แล้วยังสามารถเชื่อมต่อสายแลนจากเครื่องวิเคราะห์เข้าสู่คอมพิวเตอร์ เพื่อถ่ายโอนข้อมูลการวิเคราะห์หรือข้อมูลการดูดกลืนพลังงาน

จากการทดสอบการใช้พลังงานของเครื่องวิเคราะห์ที่สร้างพบว่าในขณะที่วัดสเปกตรัมของอ้อย เครื่องใช้กระแส 1.6 A โดยใช้ความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ 12V ความจุ 9800 mAh ดังนั้นสามารถเปิดเครื่องทำงานได้อย่างต่อเนื่องมากกว่า 6 h

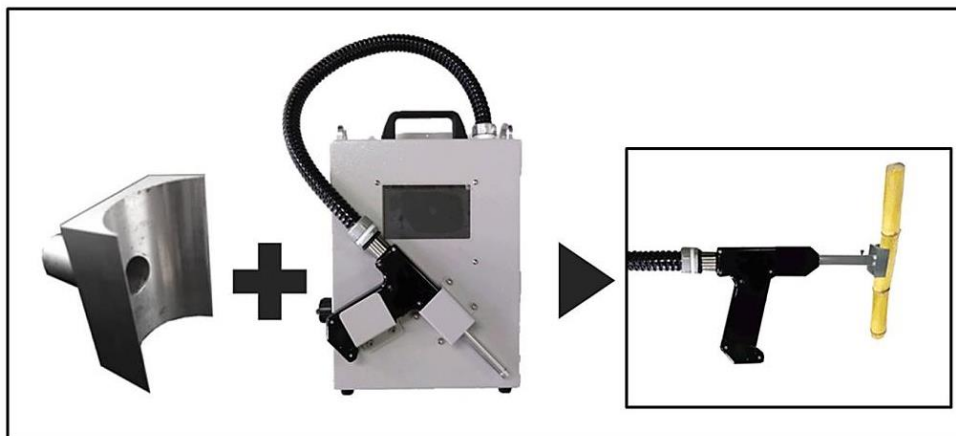


Figure 5 Spectral acquisition of sugarcane stalk by specially designed measuring head.

3.2 ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

การวัดการดูดกลืนพลังงานของลำอ้อยนั้นจะใช้อุปกรณ์เสริมหัววัดที่ออกแบบเฉพาะสำหรับลำอ้อย โดยสามารถนำอุปกรณ์เสริมสวมเข้าไปยังหัววัดแล้วยึดด้วยน็อต จากนั้นนำหัววัดที่ติดอุปกรณ์เสริมแล้วไปแนบกับลำอ้อยเพื่อทำการวัดค่า

การดูดกลืนพลังงานตาม Figure 5 ข้อมูลการดูดกลืนพลังงานตั้งต้นของอ้อยที่วัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่สร้างแสดงดัง Figure 6 โดยแกนนอน (X-axis) แสดงความยาวคลื่น และแกนตั้ง (Y-axis) แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของอ้อย

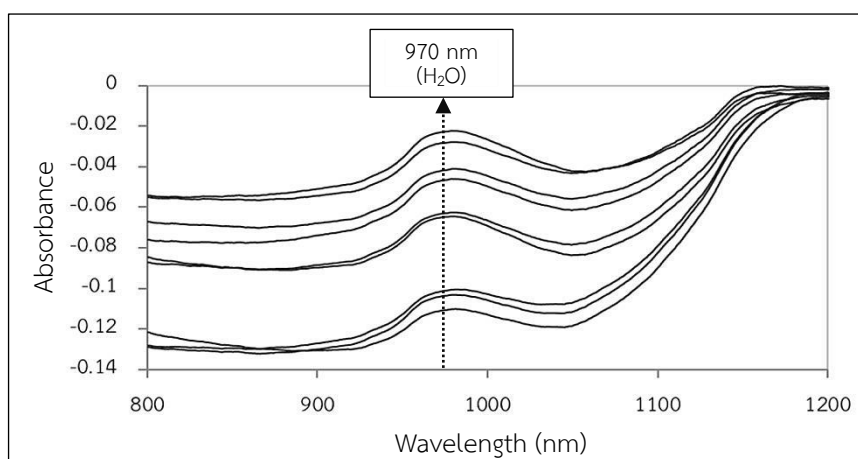


Figure 6 Original spectrum of sugarcane from NIR portable bag at wavelength region of 800–1200 nm.

จาก Figure 6 สามารถสังเกตเห็นตำแหน่งการดูดกลืนพลังงานชัดเจนที่ 970 nm เป็นตำแหน่งการดูดกลืนพลังงานของพันธะ OH ของน้ำ (Osborne et al, 1993) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของอ้อย

การสร้างสมการเทียบมาตรฐานวิเคราะห์ค่า CCS จะถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial least

squares regression) โดยก่อนการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่าการดูดกลืนพลังงานของอ้อยจะถูกปรับแต่งด้วยการทำ Smoothing และ First derivative ซึ่งการสร้างสมการเทียบมาตรฐานวิเคราะห์ค่า CCS อ้อยมีผลทางสถิติแสดงดัง Table 2

Table 2 Statistical results of calibration equation for CCS measurement at wavelength region of 800–1200 nm.

Calibration set (110 samples)		Validation set (40 samples)			Range (%)		SD ^E (%)	Factors
R _C ^A	SEC ^B (%)	R _V ^C	SEP ^D (%)	Bias* (%)	Minimize	Maximum		
0.81	1.76	0.82	1.97	-0.10	2.16	19.02	3.38	11

^A Correlation coefficient of calibration set.

^B Standard error of calibration.

^C Correlation coefficient of validation set.

^D Standard error of prediction.

^E Standard deviation of validation set.

* Average of difference between actual CCS values and predicted CCS values.

จาก Table 2 พบว่าสมการเทียบมาตรฐานวิเคราะห์ค่า CCS ที่ถูกสร้างขึ้นจากข้อมูลการดูดกลืนพลังงานในช่วง 800–1200 nm มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient; R) ในกลุ่ม Calibration set เท่ากับ 0.81 และกลุ่ม Validation set

เท่ากับ 0.82 ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย (Standard error of prediction; SEP) เท่ากับ 1.97% และมีค่า Bias เท่ากับ 0.10% โดยมีสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ของสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างแสดงดัง Figure 7

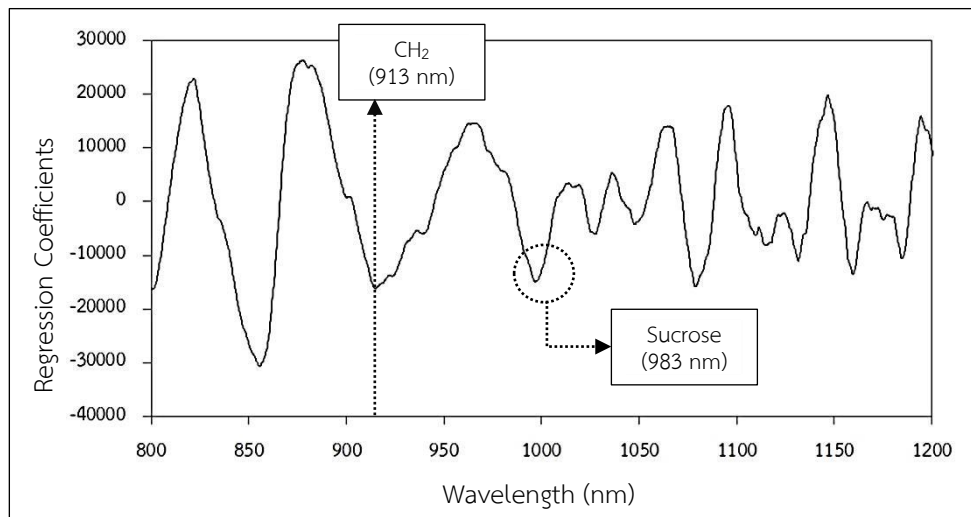


Figure 7 Regression coefficient plot of calibration model for CCS content in sugarcane developed by Partial Least Squares (PLS) Regression.

จาก Figure 7 แสดง Regression coefficient ของสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้น จะสังเกตเห็นว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อย แสดงอยู่ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 913 nm ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งการดูดกลืนพลังงานของ CH₂ อันเป็นพันธะหลักของน้ำตาล (Osborne et al, 1993) และอีกตำแหน่งที่ 983 nm ซึ่งสอดคล้องกับการดูดกลืนของน้ำตาล

ทรายขาวบริสุทธิ์ (น้ำตาลซูโครส) ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นด้วยอุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 h โดยวัดได้จาก FT-NIR spectrometer (MPA model, Bruker optics, Germany) ที่เป็นเครื่องเชิงพาณิชย์ แสดงดัง Figure 8 ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานแสดงดัง scatter plots ใน Figure 9

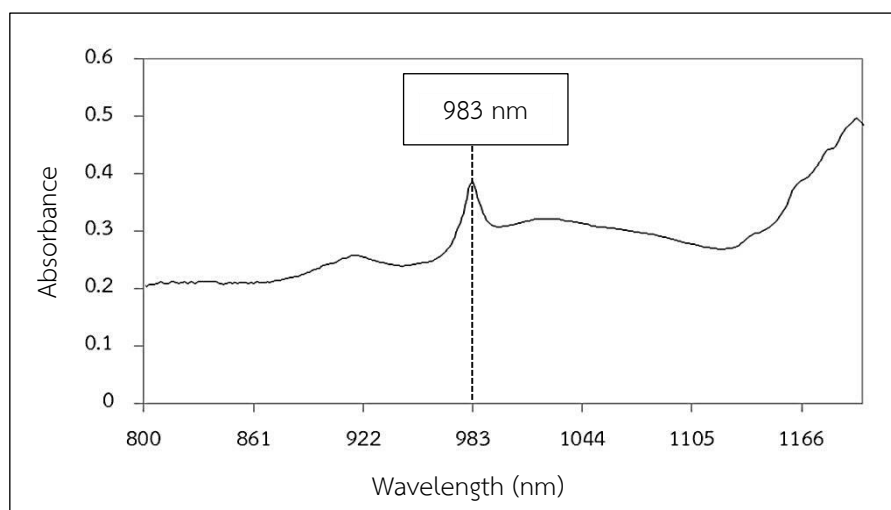


Figure 8 Original spectrum of granulated sugar from NIR spectrometer at wavelength region of 800-1200 nm.

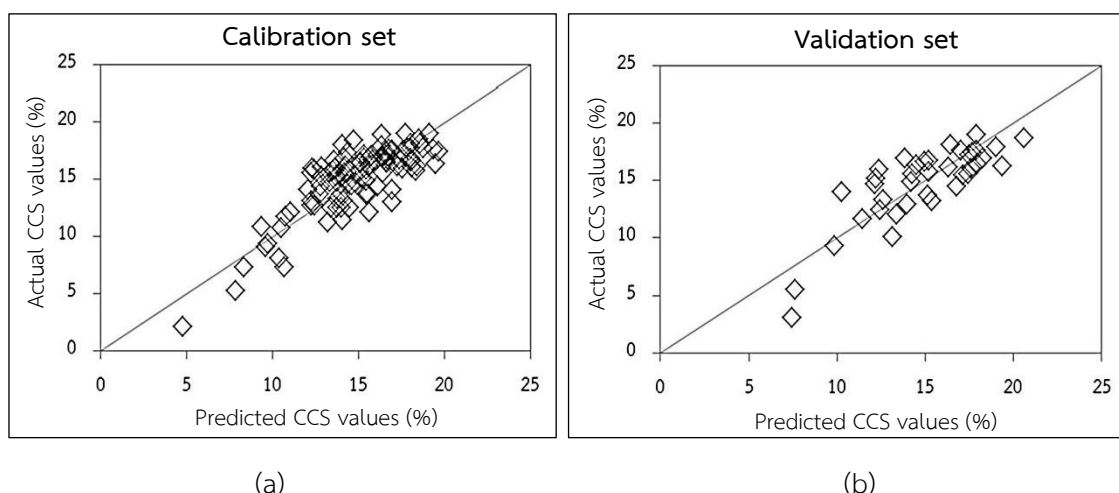


Figure 9 Scatter plots of predicted and actual CCS content from developed analyzer in (a) calibration set (b) validation set.

จาก Figure 9 พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่กระจายอยู่รอบเส้นทแยงมุม (Target line) ซึ่งเป็นเส้นที่บ่งบอกว่าค่าที่ได้จากการทำนายเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิงมาตรฐานมีค่าเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าค่าที่ทำนายได้จากเครื่องมือมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง โดยมีค่า CCS ที่ทำนายด้วยเครื่อง เบี่ยงเบนจากค่า CCS จริงอยู่บ้าง อาจเนื่องมาจากความผิดพลาดจากการวิเคราะห์ค่า CCS มาตรฐาน โดยเฉพาะค่า Pol ที่ใช้วิธีทางโพลาไรเมตริก อาศัยการหักเหของแสงในการหาปริมาณซูโครส จะมีผลการวิเคราะห์ผิดพลาดสูง (A.KRÜSS Optronic, 2019) เมื่อเทียบกับวิธีวิเคราะห์ HPLC ที่มีความจำเพาะสูงกว่า พบว่าวิธีทางโพลาไรเมตริกมีความคลาดเคลื่อน -88.63-21.22% (สำนักงานกองทุน

อ้อยและน้ำตาลทราย, 2562) อย่างไรก็ดีเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Paired t-test พบว่าค่า CCS ที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่สร้างขึ้น ไม่แตกต่างจากค่าจริงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

นอกจากนั้นแล้วสมการเทียบมาตรฐานวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อยที่สร้างขึ้น จะถูกนำมาประเมินศักยภาพด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เทคนิค Near infrared spectroscopy ในการหาปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ภายในตัวอย่าง ผลการประเมินศักยภาพแสดงดัง Table 3

Table 3 Statistics performance measurement of developed calibration equation for CCS content according to ISO 12099: 2017.

Terms	Calculated value	Criterion	Result
Bias ^A (%)	-0.10	$\pm T_b^B$ (%) = 0.65	pass
SEP ^C (%)	1.97	T_{UE}^D (%) = 2.18	pass
t_{obs}^E	1.35	$t_{(1-\alpha/2)}^F$ = 2.03	pass

^A Average of difference between the actual CCS values and the predicted CCS values.

^B The calculation of the bias confidence limits.

^C Standard error of prediction.

^D The unexplained error confidence limits.

^E The observed t value.

^F The t value.

จาก Table 3 แสดงผลการประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานในการทำนายค่า CCS ของอ้อย ตามระบบมาตรฐาน ISO 12099: 2017 โดยทำการตรวจสอบค่าทางสถิติ SEP Bias และ Slope พบว่าค่า SEP หรือค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย มีค่าน้อยกว่าค่า T_{UE} กล่าวคือ ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายต่ำเพียงพอที่จะยอมรับได้ มีค่า Bias หรือค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของทุกตัวอย่างน้อยกว่า T_b ซึ่ง

แสดงว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการทำนายไม่มีนัยสำคัญหรือเทียบเท่ากับศูนย์ กล่าวคือค่าจริงและค่าที่ได้จากการทำนายไม่แตกต่างกัน และจากการตรวจสอบค่า Slope หรือค่าความสัมพันธ์ของค่าจริงกับค่าที่ได้จากการทำนาย ซึ่งจะใช้ค่า t_{obs} ในการตรวจสอบ Slope พบว่า ค่า t_{obs} มีค่าน้อยกว่า ค่า $t_{(1-\alpha/2)}$ กล่าวคือ Slope มีค่าไม่แตกต่างจาก 1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวิเคราะห์ที่สร้าง

เครื่องวิเคราะห์และสมการเทียบมาตรฐานวิเคราะห์ค่า CCS ที่สร้างขึ้น จะถูกทดสอบประสิทธิภาพด้วยตัวอย่างชุดใหม่จำนวน 50 ตัวอย่าง ซึ่งผลการทดสอบประสิทธิภาพแสดงดัง Figure 10

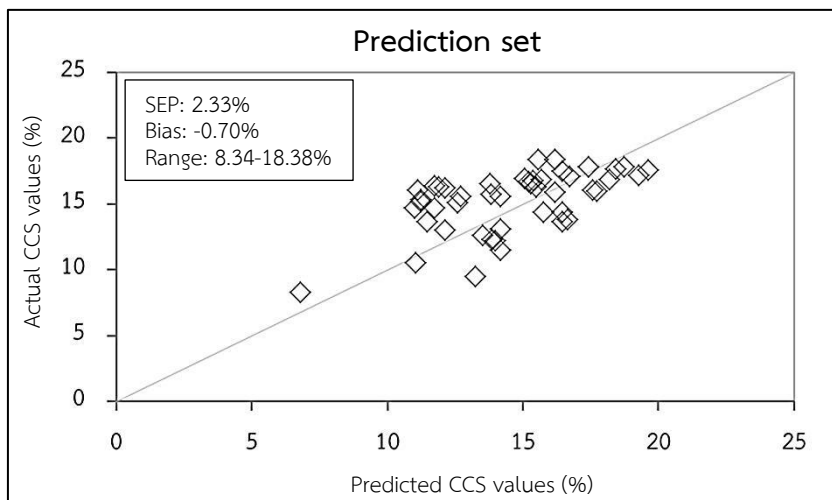


Figure 10 Scatter plots of predicted and actual CCS content in prediction set for checking performance of developed analyzer.

จาก Figure 10 พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่กระจายอยู่รอบเส้นทแยงมุม ซึ่งเป็นเส้นที่บ่งบอกว่าค่าที่ได้จากการทำนายเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิงมาตรฐานมีค่าเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าค่าที่ทำนายได้จากเครื่องมือมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง มีความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย หรือ SEP เท่ากับ 2.33% ซึ่งสูงกว่าค่า SEP จากกลุ่ม Validation set เล็กน้อย ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับ SEP จากกลุ่ม Validation set (1.97%) โดยมีค่า Bias เท่ากับ -0.70% และเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Paired t-test พบว่า ค่า CCS ที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ที่สร้างไม่แตกต่างจากค่า CCS จริงที่วิเคราะห์ได้จากวิธีอ้างอิงมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นเครื่องวิเคราะห์ที่สร้างสามารถนำไปใช้งานเพื่อวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อย ในภาคสนามได้

4 สรุป

เครื่องวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อยแบบพกพาด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานในไร่ได้จริง วัดค่า CCS ได้ทันที เครื่องวิเคราะห์สามารถเปิดใช้งานได้ต่อเนื่องมากกว่า 6 h โดยสมการเทียบมาตรฐานวิเคราะห์ค่า CCS ที่สร้างด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial least squares regression; PLS) สามารถวิเคราะห์ได้ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับค่าจริงที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ที่สนับสนุนทุนในงานวิจัย และบริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด ที่สนับสนุนตัวอย่างในงานวิจัย

6 เอกสารอ้างอิง

- กาญจนา กิระศักดิ์, ทักษิณา ศันสยะวิชัย, วีระพล พลรักดี, อัมกาญจนา กิระศักดิ์, ทักษิณา ศันสยะวิชัย, วีระพล พลรักดี, อัมรารวรรณ ทิพย์วัฒน์. 2558. การวัดค่าความหวานของอ้อยด้วยแสงย่านใกล้อินฟราเรด. วารสารวิชาการเกษตร ปีที่ 33 ฉบับที่ 2, 159-168.
- ยุรพันธ์ บรรทัดจันทน์, รณฤทธิ์ ฤทธิธรม, เวรูกา มานะวิจิตวนิช, สุริพร ฌรณวงศ์วัฒนา, ศุทธหทัย โภชนากรณ์. 2557. การคัดแยกความผิดปกติของเมล็ดข้าวโพดโดยใช้เทคนิค. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 45:3/1 (พิเศษ), 293-296.
- รณฤทธิ์ ฤทธิธรม, พรทิพา เจือกโวัน, กรรณก ตั้งกาญจนานุกุล, ธนาพร ลิขิตธีรทรัพย์, ปาริชาติ ช่างชุบ, ศุทธหทัย โภชนากรณ์. 2556. การประเมินปริมาณน้ำมันในทะลายปาล์มด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 44:3 (พิเศษ), 434-437.
- รณฤทธิ์ ฤทธิธรม. 2560. การสร้างระบบ Near Infrared Spectroscopy ตามมาตรฐานสากล. นครปฐม: ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กำแพงแสน, นครปฐม.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2561. รายละเอียดสถานการณ์ผลิตและการตลาด. แหล่งข้อมูล: <http://www.oae.go.th>. เข้าถึงเมื่อ 30 กันยายน 2561.
- สำนักงานกองทุนอ้อยและน้ำตาลทราย. 2562. งานวิจัยต่างๆ. แหล่งข้อมูล: <http://www.ocsf.or.th/Research/research71.doc>. เข้าถึงเมื่อ 17 เมษายน 2562.

A.KRÜSS Optronic. 2019. What is a polarimeter. Available at: <https://www.kruess.com/en/campus/polarimetry/what-is-a-polarimeter/>. Accessed on 17 April 2019.

Nawi, N.M., Kamal, M.R., Chen, G., Jensen, T. 2014. Prediction of Sugarcane Quality Parameters Using Visible-shortwave Near Infrared Spectroradiometer. Agriculture and Agricultural Science Procedia 2, 136–143.

Narongwongwana, S., Rittiron, R., Lim, C.H. 2015. Rapid determination of alkalinity (ammonia content) in Para rubber latex using portable and Fourier transform-near infrared spectrometer. Journal of Near Infrared Spectroscopy 23 (3), 181-185.

Osborne, B.G., Fearn, T., Hindle, P.H. 1993. Practical NIR spectroscopy: with application in food and beverage analysis (2nd ed.) (pp 29–33). Singapore: Longman Singapore Publishers Ltd.

Rittiron, R., Seehalak, W. 2014. Moisture Content in Raw Rubber Sheet Analyzed by Transflectance Near Infrared Spectroscopy. Journal of Innovative Optical Health Sciences 7 (4), 1350068-1–1350068-6.