

การทำนายองค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพดหลังเก็บฝักอ่อนโดยใช้เทคนิค Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS)

เฉลา พิทักษ์สินสุข^{2/}

สุรนนท์ น้อยอุทัย^{1/}

จริยา บุญจรัส^{1/}

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการสำหรับเครื่อง Near infrared spectrophotometer (NIR) โดยใช้เทคนิค Near infrared spectroscopy (NIRS) ในการทำนายองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ค่าวัตถุแห้ง (Dry matter, DM) โปรตีน (Crude protein, CP) ไขมัน (Ether extract, EE) เถ้า (Ash) ผนังเซลล์ (Neutral detergent fiber, NDF) ลิกโนเซลลูโลส (Acid detergent fiber, ADF) และลิกนิน (Acid detergent lignin, ADL) ของต้นข้าวโพดฝักอ่อน ใช้ตัวอย่างทั้งหมดจำนวน 197 ตัวอย่าง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 1,100-2,500 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง NIR หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของต้นข้าวโพดฝักอ่อนกับค่าวิเคราะห์ทางเคมี โดยใช้โปรแกรม WINISI IV และวิเคราะห์เชิงสถิติแบบ PLS (Partial least square regression) และ MPLS (Modified partial least squares regression) ที่มีการปรับแต่งสเปกตรัมแบบใช้และไม่ใช้ SNV (Standard normal variate) และ Detrend ร่วมกับ Derivative, Gap, Smoothing, Second smoothing และ Math treatment 10 รูปแบบ จากการศึกษาพบว่าสมการทำนายค่า วัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน เถ้า NDF ADF และ ADL มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.93-0.98 มีค่า RPD เท่ากับ 5.28 7.69 4.00 3.81 5.70 6.75 และ 5.12 ตามลำดับ สมการทำนายค่า วัตถุแห้ง โปรตีน NDF ADF และ ADL เป็นสมการที่อยู่ในชั้นคุณภาพยอดเยี่ยม (Excellent) ส่วนสมการทำนายค่า ไขมัน และ เถ้า เป็นสมการที่อยู่ในชั้นดีมาก (Very good) และเมื่อประเมินศักยภาพตามมาตรฐาน ISO 12099:2017 ของค่าวัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน เถ้า NDF ADF และ ADL มีค่า Bias เท่ากับ 0.01 0.03 0.00 0.01 -0.02 0.03 และ 0.01 ตามลำดับ มีค่า SEP เท่ากับ 0.28 0.27 0.04 0.23 0.56 0.48 และ 0.15 ตามลำดับ และมีค่า Slope ซึ่งผ่านมาตรฐาน แสดงว่า สมการเทียบมาตรฐานที่ได้สามารถทำนายค่าได้ไม่แตกต่างกับค่าจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพเพียงพอที่ทางห้องปฏิบัติการสามารถนำไปใช้ทำนายองค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพดฝักอ่อนด้วยเทคนิค NIRS ได้ เพื่อเพิ่มความรวดเร็วในการวิเคราะห์ และลดการใช้สารเคมี

คำสำคัญ: เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ต้นข้าวโพดฝักอ่อน

เลขทะเบียนวิชาการ : 66(2)-0214-024

^{1/} กลุ่มวิจัยและพัฒนาการวิเคราะห์อาหารสัตว์ สำนักพัฒนาอาหารสัตว์ ถ.ติวานนท์ ต.บางกะดี อ.เมือง จ.ปทุมธานี

^{2/} ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ลำปาง ต.เวียงตาล อ.ห้างฉัตร จ.ลำปาง

Prediction of Chemical Composition Using Near Infrared Reflectance Spectroscopy in Baby Corn Stover.

Suranant Noiuthai^{1/}

Chalao Pitaksinsuk^{1/}

Jariya Booncharatcha^{2/}

Abstract

The purpose of this research was to create an equation for the Near Infrared Spectrophotometer (NIR) by Near Infrared Spectroscopy (NIRS) to predict the chemical composition of dry matter (DM), crude protein (CP), fat (Ether Extract ; EE), ash (Ash), cell wall (Neutral Detergent Fiber ; NDF), lignocellulose (Acid Detergent Fiber ; ADF) and Acid detergent lignin (ADL) in baby corn stover. A total of 197 samples were used and the absorbance was measured at a wavelength of 1,100-2,500 nm with the NIR instrument. Determine the relationship between the absorbance of baby corn stover and the chemical analysis values using WINISI IV program and statistical analysis of PLS (Partial least square regression) and MPLS (Modified partial least squares regression) with SNV (Standard normal variate) and non-SNV (Standard normal variate) spectra modulated and detrend with derivative, gap , smoothing, second smoothing and math treatment 10 patterns. From the study it showed that the equation for DM, CP, EE, Ash, NDF, ADF and ADL have R^2 values in the range of 0.93-0.99, the RPD values were 5.28, 7.69, 4.00, 3.81, 5.70, 6.75, and 5.12 respectively. The predictive equations for DM, CP, NDF, ADF, and ADL were in the excellent class, while the EE and Ash prediction equation was in the very good class. When evaluating potential by standards ISO 12099:2017 values of DM, CP, NDF, ADF and ADL found that the Bias values were 0.01 0.03 0.00 0.01 -0.02 0.03 and 0.01 respectively. SEP values were 0.28 0.27 0.04 0.23 0.56 0.48 and 0.15 respectively and slope respectively. Found that values passed the standard indicating showed that the obtained standardization equations could predict the values was not significantly different from the actual value at 95 percentage confidence level and was sufficiently effective for laboratory to predict the chemical composition of baby corn stover by NIRS technique, for using to speed up the chemical composition analysis and reduce the use of chemicals.

Keywords: Near Infrared Spectroscopy, baby corn stover

Registered No : 66(2)-0214-024

^{1/} Feed Analysis Research and Development Section, Bureau of Animal Nutrition Development, Department of Livestock Development, Tiwanon road, Bang-Kadi, Mueang Pathum Thani District, Pathumthani Province.

^{2/} Lampang Animal Nutrition Research and Development Center, Wiang Tan, Hang Chat, Lampang.

คำนำ

ข้าวโพดฝักอ่อน (Baby corn) เป็นข้าวโพดที่ปลูกสำหรับเก็บฝักอ่อน สามารถปลูกได้ทุกพื้นที่ที่มีแหล่งน้ำเพียงพอ มีอายุการเก็บเกี่ยว ประมาณ 55 – 60 วัน มีผลผลิตตลอดทั้งปี พื้นที่ปลูกส่วนใหญ่อยู่ในภาคกลางและภาคเหนือ ทั้งประเทศมีพื้นที่ปลูกต้นข้าวโพดฝักอ่อนประมาณ 151,198 ไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2564) จากรายงานผลการศึกษาวิจัยต้นข้าวโพดฝักอ่อนลูกผสมหลังเก็บเกี่ยวฝัก ให้ผลผลิตน้ำหนักฝักสดทั้งเปลือก 1,049 ต่อไร่ และให้ผลผลิตน้ำหนักต้นสด ประมาณ 6,496 กิโลกรัมต่อไร่ (สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2566) ดังนั้นจึงคาดการณ์ว่ามีส่วนของลำต้นข้าวโพดฝักอ่อนไม่น้อยกว่า 982,000 ตันน้ำหนักสดต่อปี ส่วนของต้นข้าวโพดฝักอ่อน พบว่า ยังคงมีส่วนของใบและลำต้นสมบูรณ์ มีสภาพสด สัตว์ชอบกิน มีคุณค่าทางอาหารที่ดี และเกษตรกรนิยมนำไปใช้เลี้ยงสัตว์ และใช้เป็นส่วนผสมของอาหารผสมเสร็จ (Total mixed ration, TMR) สำหรับเป็นอาหารโค (จันทกานต์ และคณะ, 2563)

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี เช่น คาร์โบไฮเดรตแห้ง (Dry matter, DM) โปรตีนหยาบ (Crude protein, CP) ไขมัน (Ether extract, EE) เถ้า (Ash) ผนังเซลล์ (Neutral detergent fiber, NDF) ลิกโนเซลลูโลส (Acid detergent fiber, ADF) และ ลิกนิน (Acid detergent lignin, ADL) เพื่อนำไปประกอบสูตรอาหารเพื่อใช้เลี้ยงสัตว์ จะดำเนินการวิเคราะห์ทางเคมีในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีมาตรฐานซึ่งมีขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ที่ยุ่งยาก ใช้เวลานาน อีกทั้งยังมีการใช้สารเคมีในการวิเคราะห์ซึ่งส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อมและสุขภาพของผู้วิเคราะห์อีกด้วย ดังนั้นในการที่จะทราบผลได้อย่างรวดเร็วเพื่อทันต่อการนำไปใช้งาน จะมีกระบวนการหนึ่งคือการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy, NIRS) ที่สามารถทำนายค่าองค์ประกอบทางเคมีในอาหารสัตว์ได้อย่างรวดเร็ว ใช้เวลาเพียง 1-2 นาที ให้ผลเที่ยงตรงและแม่นยำ วิเคราะห์ได้หลายค่าในการสแกนเพียงครั้งเดียว เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง ไม่ใช้สารเคมี เป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ปลอดภัยต่อผู้ใช้งานและสภาพแวดล้อม และลดค่าใช้จ่ายได้ในระยะยาว หลักการวิเคราะห์ด้วย NIRS คือ การใช้คลื่นแสงในช่วง NIR คือ 800-2,500 นาโนเมตร ส่องเข้าไปในตัวอย่าง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานของพันธะของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดกลืนคลื่น NIR (NIR absorber) เกิดอิเล็กตรอนิกแทรนซิชันและการสั่นสะเทือน (Vibration) จากนั้นตรวจวัดปริมาณแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนไว้ด้วยอุปกรณ์สำหรับตรวจวัด แล้วแปลงเป็นสัญญาณเข้าสู่ส่วนประมวลผล เทคนิคนี้ต้องอาศัยการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ คือ เคมีเมตริก (Chemometrics) แบบต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ทางสถิติกับข้อมูลของตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมี หรือวิธีอื่นๆ ที่ได้ค่ามาตรฐาน จะได้สมการเทียบมาตรฐาน (Calibration equation) เพื่อใช้ทำนายค่าปัจจัยคุณภาพของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดได้ทั้งเชิงปริมาณ (Quantitative) และเชิงคุณภาพ (Qualitative) ซึ่งสมการที่ได้นี้จะผ่านขั้นตอนการทวนสอบความใช้ได้ของสมการ (Validation) เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของสมการว่ามีความเหมาะสมหรือแม่นยำเพียงใด จึงจะนำไปใช้ทำนายค่าทางเคมีของตัวอย่าง การเก็บรวบรวมตัวอย่างที่เป็นตัวแทนที่ดีควรครอบคลุมค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ต้องการทำนาย กล่าวคือ มีค่าการกระจายอย่างสม่ำเสมอตั้งแต่ระดับต่ำสุดถึงสูงสุด ดังนั้น ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการสร้างสมการจะต้องมาจากการสุ่มเก็บตัวอย่างที่มีความหลากหลายเพื่อให้เป็นตัวแทนของพื้นที่การปลูก ฤดูกาล และกระบวนการที่ได้มา เพื่อให้มีค่าทางเคมีที่กระจายครอบคลุมค่าของตัวอย่างนั้นๆ สำหรับนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในห้องปฏิบัติการ และใช้ในการสแกนด้วยเครื่อง NIR Spectrometer เพื่อเก็บสเปกตรัม และนำไปใช้สร้างเป็นสมการทำนายค่าต่อไป (จันทกานต์ และคณะ, 2553)

ปัจจุบันยังไม่มีสมการทำนายองค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพดฝักอ่อน โดยใช้เทคนิค NIRS ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้ จึงทำการสร้างสมการเพื่อทำนายองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างต้นข้าวโพดฝักอ่อน โดยใช้เทคนิค NIRS โดยรวบรวมตัวอย่างที่มีความหลากหลายของพื้นที่ปลูก ฤดูกาล และแหล่งที่มาต่างๆ ซึ่งจะทำให้เกษตรกรได้รับผลวิเคราะห์ที่มีความถูกต้อง แม่นยำ รวดเร็ว ประหยัดเวลา และลดการใช้สารเคมีในการวิเคราะห์ ในการนำไปใช้ในการประกอบสูตรอาหารสัตว์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ดำเนินการทดลองและสร้างสมการทำนายค่า วัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน เถ้า NDF ADF และ ADL ของต้นข้าวโพดฝักอ่อน โดยใช้เทคนิค NIRS ณ ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ลำปาง

ตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

รวบรวมตัวอย่างต้นข้าวโพดฝักอ่อน จากเกษตรกรในพื้นที่จังหวัด เชียงราย เชียงใหม่ กำแพงเพชร กาญจนบุรี นครปฐม ราชบุรี และนครราชสีมา ในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้ง จำนวน 197 ตัวอย่าง ซึ่งเก็บทั้งฤดูฝนและฤดูแล้งโดยสุ่มเก็บตัวอย่างประมาณ 2 กิโลกรัมแล้วนำมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 1.5-2 เซนติเมตร นำมาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง บันทึกน้ำหนักก่อนอบและหลังอบ จากนั้นนำมาบดให้มีขนาด 1 มิลลิเมตร สำหรับการวิเคราะห์ค่า วัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน เถ้า NDF ADF และ ADL และบดให้มีขนาด 0.5 มิลลิเมตร สำหรับวิเคราะห์ค่าโปรตีน

การวัดสเปกตรัมและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

1. นำตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้วมาวัดสเปกตรัมโดยใช้เครื่อง NIR Spectrometer ยี่ห้อ FOSS รุ่น DS2500 (Foss Analytical A/S, Denmark) ที่ความยาวคลื่น 400-2,500 นาโนเมตร โดยใช้โปรแกรม ISScan NOVA เครื่องจะวัดสเปกตรัมแต่ละจุดห่างกัน 0.5 นาโนเมตร โดยบรรจุตัวอย่างในเซลล์ตัวอย่าง (Sample cell) เคลี่ยตัวอย่างให้กระจายอย่างสม่ำเสมอ ทำการวัด 2 ซ้ำต่อตัวอย่าง (Duplicates) การวัดแต่ละครั้งจะแสดงรายการองค์ประกอบทางเคมี จำนวน 7 รายการได้แก่ ค่าวัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน เถ้า NDF ADF และ ADL นำค่าแต่ละรายการที่ได้จากการวัดมาเฉลี่ยเพื่อแสดงผลออกมาเป็นเส้นสเปกตรัม 1 เส้นต่อรอบ ซึ่งค่าที่ได้เรียกว่า ค่าการดูดกลืน (Absorbance)

2. นำตัวอย่างต้นข้าวโพดฝักอ่อนที่ผ่านการวัดสเปกตรัม มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ โดยวิธีทางเคมี (Wet chemical analysis) ได้แก่ ค่าความชื้น ตามวิธีที่ 930.15 (AOAC, 2016) และคิดเป็นเปอร์เซ็นต์วัตถุแห้ง (Dry matter, DM) โปรตีน ด้วยเครื่อง Combustion ตามวิธีที่ 990.03 (AOAC, 2016) ไขมัน ตามวิธีที่ 11085 (ISO, 2015) เถ้า ตามวิธีที่ 942.05 (AOAC, 2016) NDF ตามวิธีที่ 2002.04 (AOAC, 2016) ADF และ ADL ตามวิธีที่ 973.18 (AOAC, 2016) โดยวิเคราะห์ 2 ซ้ำต่อตัวอย่าง ค่าที่ได้เรียกว่าค่าจริง (Actual value)

3. ทำการวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการหรือ SEL (Standard error of laboratory) ด้วยวิธี Duplicate blind test เพื่อจะนำค่าไปประเมินสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างได้ โดยค่า SEL ต้องมากกว่าค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย (Standard error of prediction, SEP) สองเท่า (SA, 2017) ทำการวิเคราะห์โดยใช้ตัวอย่างต้นข้าวโพดฝักอ่อน จำนวน 10 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างแบ่งออกเป็นตัวอย่างย่อยที่ 1 และตัวอย่างย่อยที่ 2 กำหนดหมายเลขตัวอย่างไม่ให้ซ้ำกัน แล้วส่งวิเคราะห์เป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 ประกอบด้วยตัวอย่างย่อยที่ 1 ของตัวอย่างที่ 1 ถึง 10 และชุดที่ 2 ประกอบด้วยตัวอย่างย่อยที่ 2 ของตัวอย่างที่ 1 ถึง 10 แต่ละชุดวิเคราะห์ตัวอย่างละ 1 ซ้ำ จากนั้นนำผล

วิเคราะห์ของแต่ละองค์ประกอบทางเคมี คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของวัตถุแห้ง และคำนวณหาค่า SEL โดยใช้สมการ

$$SEL = \sqrt{\frac{\sum (D)^2}{n}}$$

D = ผลต่างผลวิเคราะห์ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ของแต่ละตัวอย่าง

n = จำนวนตัวอย่าง (10)

การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและการทวนสอบความใช้ได้ของสมการ

1. การสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

นำข้อมูลสเปกตรัมและค่าองค์ประกอบทางเคมี มาหาความสัมพันธ์ด้วยวิธี Partial least square regression (PLSR) โดยใช้โปรแกรม WIN ISI IV แบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่มที่เป็นอิสระต่อกัน คือ กลุ่มที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) ทำนายค่าวัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน เถ้า NDF ADF และ ADL และกลุ่มทวนสอบความใช้ได้ของสมการ (Validation set) ในสัดส่วนกลุ่มสมการเทียบมาตรฐาน ต่อกลุ่มทวนสอบความใช้ได้ของสมการ เท่ากับ 80 ต่อ 20 เปอร์เซ็นต์ การสร้างสมการเป็นการสร้างแบบเต็มช่วงความยาวคลื่น (Full spectrum method) ด้วยวิธี Partial least squares (PLS) และ Modified partial least squares (MPLS) ร่วมกับการไม่มีการปรับแต่งสเปกตรัม และปรับแต่งสเปกตรัมแบบ SNV-Detrend เพื่อลดความแปรปรวนและสิ่งรบกวนอื่นๆ ที่อาจทำให้ข้อมูลสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงไป และใช้ Derivative mathematics หรือ Math treatment ที่ใช้ค่า Derivative number, Gap, Smoothing and Second smoothing จำนวน 10 แบบ ดังนี้ (1,4,4,1) (2,4,4,1) (1,8,4,1) (2,8,4,1) (1,8,8,1) (2,8,8,1) (1,5,5,1) (2,5,5,1) (1,10,10,1) (2,10,10,1) โดยใช้ตามคำแนะนำในคู่มือการใช้เครื่อง NIRS (Infrasoft international, 2005) จะได้สมการเทียบมาตรฐานของแต่ละรายการจำนวน 40 สมการ

หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงกับค่าทำนาย (Coefficient of determination, R^2) ซึ่งควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการสร้างสมการ (Standard error of calibration, SEC) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพิสูจน์แบบไขว้ (Standard error of cross validation, SECV) ซึ่งควรมีค่าต่ำ (Infrasoft international, 2005)

ในการพิจารณาการเลือกสมการเทียบมาตรฐานที่ดีที่สุด จะพิจารณาจากค่า R^2 ที่มีค่าสูง และค่าผลต่างของ SEC และ SECV ที่มีค่าต่ำ จากสมการเทียบมาตรฐาน 40 สมการ จะเลือกสมการที่ดีที่สุดมา 3 สมการ เพื่อนำมาทวนสอบความใช้ได้ของสมการต่อไป

2. การทวนสอบความใช้ได้ของสมการ

นำสมการที่คัดเลือกมาจำนวน 3 สมการมาทวนสอบความใช้ได้ของสมการเพื่อวัดประสิทธิภาพของสมการว่าสามารถใช้ในการประเมินค่าได้แม่นยำมากน้อยเพียงใด โดยนำสเปกตรัมของตัวอย่างกลุ่มทวนสอบ ประเมินความถูกต้องแม่นยำโดยใช้ค่าสถิติต่างๆ ได้แก่ ค่า SEP ควรมีค่าน้อยกว่าสองเท่าของ SEL ($SEP < 2 SEL$) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยระหว่างค่าที่ได้จากวิธีทางเคมีและค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง NIR (Bias) ควรมีค่าน้อยกว่า 0.55 เท่า SEC ($Bias < 0.55 SEC$) ค่า Standard Error of Prediction correction ($SEP(C)$) น้อยกว่า 1.29 SEC ($SEP(C) < 1.29 SEC$) ค่าความชันใกล้ 1 ($Slope \sim 1$) ตามวิธีการของ (SA, 2017) นอกจากนี้ ได้พิจารณาระดับชั้นคุณภาพของสมการด้วยค่า RPD (Ratio of performance to deviation) ตามวิธีการของ Williams (2019) ดังแสดงใน Table 1 เกณฑ์ที่ใช้ในการคัดเลือกสมการ

ตามที่ได้กล่าวถึง จะเลือกสมการเทียบมาตรฐานที่ดีที่สุดเพียง 1 สมการ สำหรับนำไปใช้ในการทำนายองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง NIRS ต่อไป

Table 1 Criteria of prediction efficiency : Williams (2019)

RPD Value	Classification	Application
0.0 - 1.9	Very poor	Not recommended
2.0 - 2.4	Poor	Rough screening
2.5 - 2.9	Fair	Screening
3.0 - 3.4	Good	Quality control
3.5 - 4.0	Very good	Process control
> 4.1	Excellent	Any application

RPD = ratio of standard error of validation to standard deviation

3. สมการเทียบมาตรฐานที่คัดเลือกมา 1 สมการ (ข้อที่ 2) นำมาประเมินประสิทธิภาพตามมาตรฐาน ISO 12099:2017 (ISO, 2017) ดังนี้

3.1 การตรวจสอบค่า Bias โดยการคำนวณค่า Bias confidence limit (T_b) ตามสมการ ถ้าค่า Bias มีค่าน้อยกว่า T_b แสดงว่า ค่า Bias ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า T_b คำนวณได้ ดังนี้

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

T_b คือ ค่า Bias confidence limit

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

SEP คือ Standard Error of Prediction (ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มทดสอบ)

n คือ จำนวนตัวอย่างในกลุ่มทดสอบ

3.2 การตรวจสอบค่า SEP เป็นการคำนวณค่า T_{UE} (The unexplained error confidence limit) หากค่า SEP น้อยกว่า T_{UE} แสดงว่า ค่า SEP ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า T_{UE} คำนวณได้ ดังนี้

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

T_{UE} คือ The unexplained error confidence limit

$F_{(\alpha, v, M)}$ คือ ค่า F Value

SEC คือ Standard Error of Calibration (ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการสร้างสมการของกลุ่มสร้างสมการ)

- α คือ ระดับความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดชนิดที่ 1 (type I error) โดยทั่วไป คือ 5%
- v คือ $n_{\text{validation set}} - 1$ (degree of freedom ที่สอดคล้องกับ SEP)
- M คือ $n_{\text{validation set}} - p - 1$ (degree of freedom ที่สอดคล้องกับ SEC) โดย p คือ number of terms หรือ PLS factors of the model)

3.3 การตรวจสอบ Slope เป็นความชันของกราฟการกระจาย (Scatter plots) ระหว่างค่าองค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริงเป็นค่าอ้างอิง (แกน y) กับค่าที่ทำนายที่ได้จากสมการเทียบมาตรฐาน ด้วยเครื่อง NIRS (แกน x) ซึ่งจะสอดคล้องกับสมการเส้นตรง โดยมีค่า Slope b และ Intercept a คำนวณได้ตามสมการ

$$y = a + b\bar{y}$$

$$b = \frac{S_{\bar{y}y}}{S_{\bar{y}}^2}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{\bar{y}}$$

$S_{\bar{y}y}$ คือ ความแปรปรวนร่วมระหว่างค่าทำนายกับค่าจริง (Covariance)

$S_{\bar{y}}^2$ คือ ความแปรปรวนของค่าทำนายในกลุ่มทดสอบ

$\bar{\bar{y}}$ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าที่ทำนายจากสมการเทียบมาตรฐาน

$\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าอ้างอิงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน

จากนั้นทดสอบค่า Slope ที่คำนวณได้โดยใช้ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ดังสมการ

$$S_{res} = \sqrt{\frac{\sum [y_i - (a + b\bar{y}_i)]^2}{n-1}}$$

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

S_{res} คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Residual

t_{obs} คือ The observed value

n คือ จำนวนตัวอย่างในกลุ่มทดสอบ

y_i คือ ค่าอ้างอิงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน

$\bar{y}_i$ คือ ค่าที่ทำนายได้จากสมการเทียบมาตรฐาน

หากค่า t_{obs} น้อยกว่า $t_{(1-\alpha/2)}$ แสดงว่า ความชันของกราฟมีการกระจายระหว่างค่าทางเคมีกับค่าที่ทำนายได้จากสมการเทียบมาตรฐานไม่แตกต่างจาก 1 แสดงว่าค่า Slope ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองและวิจารณ์

องค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพดฝักอ่อน

ตัวอย่างต้นข้าวโพดฝักอ่อนได้จากการรวบรวมตัวอย่างจากเกษตรกร ในพื้นที่จังหวัด เชียงราย เชียงใหม่ กำแพงเพชร กาญจนบุรี นครปฐม ราชบุรี และนครราชสีมา มีการใช้พันธุ์แปซิฟิก271 แปซิฟิก321 แปซิฟิก322 แปซิฟิก571 แปซิฟิก468 SG17 และช้างแดง18 ซึ่งเก็บทั้งฤดูฝนและฤดูแล้งเพื่อให้ครอบคลุมและมีความหลากหลายของตัวอย่างสำหรับสร้างสมการทำนายองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ค่าวัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน เถ้า NDF ADF และ ADL ซึ่งจะแสดงจำนวนตัวอย่าง ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า SEL ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Total sample, nutritive value and standard error of baby corn stover.

Parameter	N	Minimum	Maximum	Average	±SD	SEL
DM, %	197	85.26	94.38	90.61	1.54	0.19
CP, %	188	3.10	12.82	8.78	1.92	0.18
EE, %	171	0.53	1.55	0.94	0.16	0.04
Ash, %	194	4.26	10.63	6.37	1.08	0.37
NDF, %	196	56.54	73.83	67.09	3.35	0.71
ADF, %	183	32.13	49.22	38.84	2.94	0.27
ADL, %	188	1.05	5.96	2.42	0.92	0.09

N, Number of sample; SD, Standard deviation; SEL, Standard error of laboratory; DM, Dry Matter; CP, Crude Protein; EE, Ether Extract; NDF, Neutral detergent fiber; ADF, Acid detergent fiber; ADL, Acid detergent lignin

ข้อมูลในการทดลองนี้มีค่าองค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพดฝักอ่อน คือ ค่าโปรตีน ไขมัน เถ้า NDF ADF และ ADL ครอบคลุมค่าที่แสดง ในรายงานของ คณะกรรมการความต้องการโภชนาโคณมในประเทศไทย (2563) ซึ่งมีค่าโปรตีน ไขมัน เถ้า NDF ADF และ ADL เท่ากับ 8.40 1.20 5.93 62.25 36.77 และ 4.74 เปอร์เซนต์ตามลำดับ และครอบคลุมค่าในรายงานของ รัชณี (2560) ซึ่งมีค่า วัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน เถ้า NDF ADF และ ADL อยู่ในช่วง 88.48-94.61 4.24-4.91 0.81-0.94 4.52-5.34 53.94-65.64 36.34-40.71 และ 4.63-6.07 เปอร์เซนต์ตามลำดับ ยกเว้นค่า NDF และ ADL ที่มีค่าต่ำสุดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากมาจากการเก็บตัวอย่างที่ฤดูกาล พื้นที่ การดูแลการจัดการปลูก อายุ และพันธุ์ข้าวโพด ที่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ (SEL) ดังแสดงใน Table 2 จะเห็นว่าค่า SEL มีค่าต่ำ แสดงว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อย โดยเมื่อนำค่า SEL ไปประเมินความใช้ได้ของสมการในขั้นตอนการทวนสอบสมการจะมีค่าเป็นสองเท่าของค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย (SA, 2017)

การสร้างและทวนสอบความใช้ได้ของสมการเทียบมาตรฐาน

วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างต้นข้าวโพดฝักอ่อน ด้วยวิธีวัดแบบสะท้อนกลับ (Reflectance) โดยใช้ความยาวคลื่นในการสร้างสมการในช่วง 1,100-2,500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นในช่วงเนียร์อินฟราเรด โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม Calibration set และ Validation set ใช้สัดส่วนการ

เลือกตัวอย่างแบบเว้นช่วงตัวอย่างตามที่กำหนดคือกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและจำนวนตัวอย่างที่ต้องการเว้นช่วงเพื่อแบ่งกลุ่ม ซึ่งใช้แบบเว้นช่วง 1,5 สำหรับสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่าโปรตีน ADF และ ADL และใช้แบบเว้นช่วง 3,5 สำหรับสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่าวัตถุแห้ง ไขมัน เถ้า และ NDF เมื่อนำกลุ่ม Calibration set มาทำสมการเทียบมาตรฐานโดยใช้หลักการ Principal component analysis (PCA) และใช้หลักการคำนวณค่ามหาโนบิส (Mahalanobis distance) เพื่อตัดตัวอย่างที่มีค่าอยู่นอกกลุ่มออก ซึ่งค่าที่ผิดปกตินี้อาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การสแกนที่ผิดพลาดหรือความผิดปกติของ สเปกโตรมิเตอร์ เช่น มีความชื้นสูง หรืออุณหภูมิสูง (ปานมนัส, 2564) ดังนั้น ทำให้เหลือกลุ่มตัวอย่างสำหรับ Calibration set ค่าวัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน เถ้า NDF ADF และ ADL จำนวน 152 140 126 148 147 141 และ 149 ตัวอย่าง ตามลำดับ มีค่าองค์ประกอบทางเคมี อยู่ในช่วงค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด เท่ากับ 86.28-94.13 3.29-12.32 0.64-1.28 3.35-9.32 56.88-73.78 32.31-48.38 และ 1.56-5.02 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และกลุ่มตัวอย่างสำหรับ Validation set มีค่าองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในช่วง ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด เท่ากับ 88.21-93.82 3.32-12.32 0.71-1.28 4.74-8.91 57.66-73.05 32.94-45.71 และ 1.91-5.01 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 3 ซึ่งจะเห็นว่าชุดข้อมูลของแต่ละค่าในกลุ่มตัวอย่างสำหรับ Calibration set ครอบคลุมค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของกลุ่มตัวอย่างสำหรับ Validation set โดยตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่ม มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน

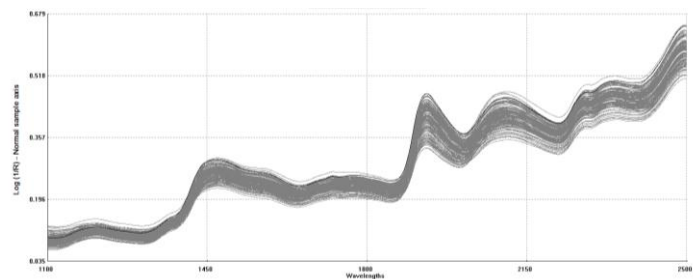
Table 3 Number of sample and nutritive value of calibration set and validation set of baby corn stover.

Parameter	Calibration set					Validation set				
	N	Min.	Max.	Mean	SD	N	Min.	Max.	Mean	SD
DM, %	152	86.28	94.13	90.70	1.47	32	88.21	93.82	90.72	1.49
CP, %	140	3.29	12.32	8.81	1.84	30	3.32	12.32	8.57	2.09
EE, %	126	0.64	1.28	0.93	0.14	26	0.71	1.28	0.95	0.15
Ash, %	148	3.35	9.32	6.34	0.99	30	4.74	8.91	6.36	0.91
NDF, %	147	56.88	73.78	67.09	3.32	31	57.66	73.05	67.28	3.48
ADF, %	141	32.31	48.38	38.84	2.93	28	32.94	45.71	38.88	3.23
ADL, %	149	1.56	5.02	3.79	0.74	38	1.91	5.01	3.72	0.76

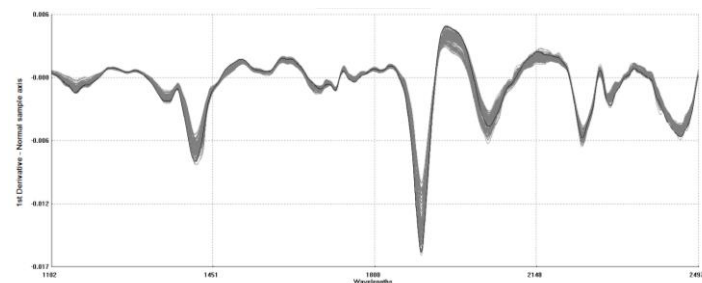
N, Number of sample; SD, Standard deviation; DM, Dry Matter; CP, Crude Protein; EE, Ether Extract; NDF, Neutral detergent fiber; ADF, Acid detergent fiber; ADL, Acid detergent lignin

จากนั้นนำกลุ่มตัวอย่างสำหรับ Calibration set มาสร้างสมการเทียบมาตรฐานโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป WINISI IV ร่วมกับการใช้หลักสถิติ PLS regression แบบ Full cross validation และ MPLS แบบปรับแต่งและไม่ปรับแต่ง เพื่อให้ได้สมการที่ดีที่สุดในการทำนายองค์ประกอบทางเคมีแต่ละค่า โดยจะพิจารณาจากสมการที่มีค่า SEC และ SECV ต่ำ ค่า R^2 และ 1-VR มีค่าสูง (Guo *et al*, 2021) พบว่าข้อมูลสเปกตรัมที่ยังไม่มีการปรับแต่ง มีลักษณะกว้างและมีการกระจายตัวของสเปกตรัม มีจุดยอด (Peak) ที่

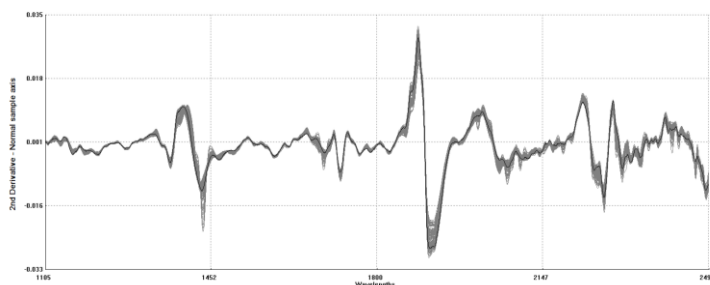
เหลื่อมซ้อนกัน ตาม Figure 1(A) เนื่องจากความแตกต่างของอนุภาคตัวอย่าง รวมทั้งระดับเยื่อใยชนิดต่างๆ ส่งผลให้การกระเจิงแสงแตกต่างกัน ทั้งนี้เมื่อทำการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยเทคนิคคณิตศาสตร์ สามารถช่วยลดปัจจัยดังกล่าวได้ คือ ลดสัญญาณรบกวน ลดการกระเจิงของแสงและลดความโค้งของแต่ละสเปกตรัม ตาม Figure 1(B) และ 1(C) โดยการใช้วิธี SNV และ Detrend ร่วมกับการใช้ 1st derivative และ 2nd derivative ที่อยู่ในรูปของ Derivative, Gap, Smoothing, Second smoothing ทำให้สามารถแยกจุดที่เหลื่อมซ้อนกันในสเปกตรัมออกจากกัน และลดผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่น (อนุพันธ์, 2548) ซึ่งจะเห็นว่าจากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยเทคนิคข้างต้นจะช่วยขยายสัญญาณให้ชัดเจนมากขึ้นและลดความแปรปรวนที่อาจเกิดขึ้นจากการกระเจิงแสงของตัวอย่าง (Kasemsumran *et al*, 2004)



(A) Original spectra



(B) 1st derivative spectra



(C) 2nd derivative spectra

Figure. 1 Original spectra (A) and 1st derivative spectra (B) and 2nd derivative spectra (C)

Table 4 Statistical analysis of Calibration set and Validation set.

Parameter	Treatment			Calibration set				Validation set				
				N	R ²	SEC	SECV	N	R ²	SEP	Bias	RPD
DM, %	MPLS	SNV+Detrend	2,8,4,1	152	0.97	0.25	0.35	32	0.96	0.28	0.01	5.28
CP, %	PLS	NONE	1,5,5,1	140	0.97	0.32	0.38	30	0.98	0.27	0.03	7.69
EE, %	MPLS	NONE	2,4,4,1	126	0.93	0.04	0.08	26	0.93	0.04	0.00	4.00
Ash, %	MPLS	SNV+Detrend	2,8,4,1	148	0.96	0.20	0.35	30	0.93	0.23	0.01	3.81
NDF, %	MPLS	NONE	2,8,4,1	147	0.98	0.48	0.75	31	0.97	0.56	-0.02	5.70
ADF, %	MPLS	SNV+Detrend	2,8,8,1	141	0.98	0.38	0.59	28	0.98	0.48	0.03	6.75
ADL, %	MPLS	NONE	2,4,4,1	149	0.97	0.13	0.21	38	0.96	0.15	0.01	5.12

N, Number of sample; R², coefficient of determination; SEC, standard error of calibration; SECV, standard error of cross validation; SEP, Standard Error Prediction; RPD, Ratio of prediction to deviation; DM, Dry Matter; CP, Crude Protein; EE, Ether Extract; NDF, Neutral detergent fiber; ADF, Acid detergent fiber; ADL, Acid detergent lignin.

จากสมการเทียบมาตรฐานที่ดีที่สุดของแต่ละรายการทำนายองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ของต้นข้าวโพดฝักอ่อน แสดงใน Table 4 พบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่ดีที่สุดของแต่ละค่า มีค่า R² อยู่ในช่วง 0.93 – 0.98 และเมื่อทวนสอบความใช้ได้ของสมการ พบว่ามีค่า R² อยู่ในช่วง 0.93 – 0.98 เช่นกัน ซึ่งค่า R² อยู่ในเกณฑ์ดีถึงยอดเยี่ยม บ่งบอกถึงว่าสมการที่ได้สามารถนำไปใช้ทำนายในงานวิจัย งานประกันคุณภาพ จนถึงใช้ได้กับทุกงาน (Williams, 2019) และมีค่า Bias ต่ำหรือเท่ากับ 0 ซึ่งค่า Bias ควรมีค่าไม่แตกต่างจาก 0 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ดังนั้น สมการเทียบมาตรฐานที่ได้มีค่า Bias ต่ำ บ่งบอกว่าค่าที่ทำนายด้วย NIR ไม่แตกต่างจากค่าจริงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี

เมื่อพิจารณาความใช้ได้ของสมการจากค่า RPD พบว่า สมการเทียบมาตรฐานทำนายค่าวัตถุแห้ง โปรตีน NDF ADF และ ADL มีค่า RPD มากกว่า 4.1 ขึ้นไป จัดเป็นสมการที่ยอดเยี่ยมสามารถใช้ทำนายได้ระดับยอดเยี่ยม และสมการทำนายค่าไขมัน และเถ้า เป็นสมการที่อยู่ในระดับดีมากมีค่า RPD มากกว่า 3.5 ซึ่งสามารถนำไปใช้ทำนายได้ในชั้นควบคุมคุณภาพ ซึ่งสอดคล้องกับ Williams (2019) รายงานไว้ว่า ค่า RPD > 4.1 ขึ้นไป เป็นสมการที่อยู่ในชั้นคุณภาพยอดเยี่ยม (Excellent) สามารถนำไปใช้ทำนายได้ยอดเยี่ยม และค่า RPD อยู่ในช่วง 3.5 - 4.0 สมการอยู่ในชั้นดีมาก (Very good) สามารถนำไปใช้ทำนายในชั้นควบคุมคุณภาพและเมื่อพิจารณาค่า SEP ดังแสดงใน Table 4 ค่า SEP ของค่าวัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน เถ้า NDF ADF และ ADL เท่ากับ 0.28 0.27 0.04 0.23 0.56 0.48 และ 0.15 ตามลำดับ ซึ่งค่า SEP ควรมีค่าต่ำ จะเห็นได้ว่าค่า SEP ที่ได้มีค่าต่ำ แสดงว่าค่าที่ทำนายมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง เพราะมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ

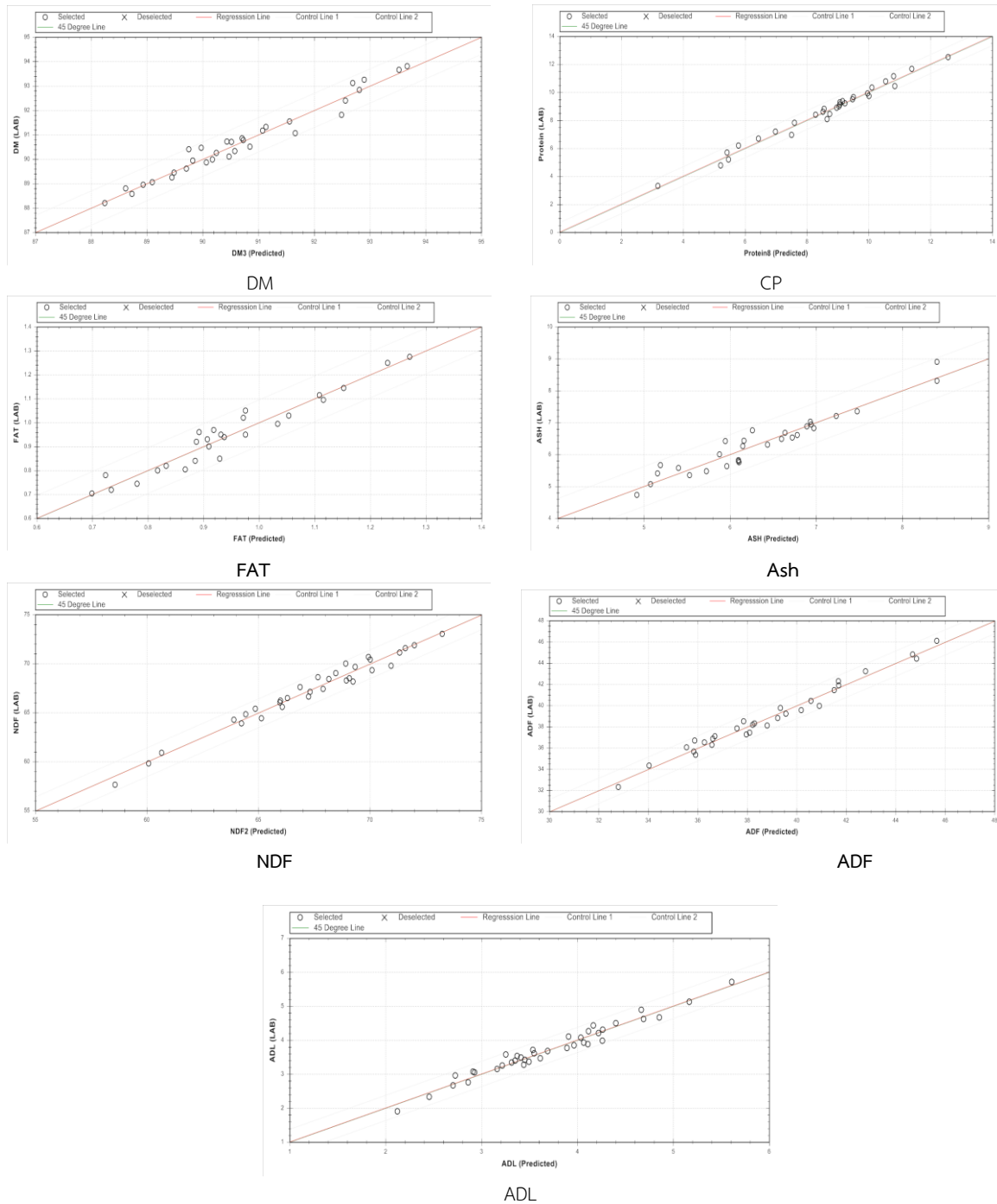


Figure 2 Relationship between actual and predicted of chemical composition of baby corn stover.

จาก Figure 2 คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี (แกน Y) และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเทียบมาตรฐาน (แกน X) พบว่าค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเทียบมาตรฐานของค่าวัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน เถ้า NDF ADF และ ADL มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.96 0.98 0.93 0.93 0.97 0.98 และ 0.96 ตามลำดับ ซึ่งค่าวัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน NDF ADF และ ADL มีค่าการกระจายตัวที่ครอบคลุมค่าต่ำสุดถึงสูงสุดของข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

Table 5 Statistics performance measurement of developed calibration equation for chemical composition according to ISO 12099:2017.

Parameter	Bias			SEP			Slope		
	Calculated value	Criterion (T_b)	Result	Calculated value	Criterion (T_{UE})	Result	Observed value (t_{obs})	Criterion ($t_{(1-\alpha/2)}$)	Result
DM, %	0.01	0.10	Pass	0.28	0.31	Pass	0.01	2.04	Pass
CP, %	0.03	0.10	Pass	0.27	0.39	Pass	0.00	2.05	Pass
EE, %	0.00	0.02	Pass	0.04	0.05	Pass	0.02	2.06	Pass
Ash, %	0.01	0.09	Pass	0.23	0.24	Pass	0.01	2.05	Pass
NDF, %	-0.02	0.20	Pass	0.56	0.60	Pass	-0.05	2.04	Pass
ADF, %	0.03	0.19	Pass	0.48	0.48	Pass	0.01	2.05	Pass
ADL, %	0.01	0.05	Pass	0.15	0.15	Pass	0.02	2.03	Pass

T_b , The calculation of the bias confidence limits; SEP, standard error of prediction

T_{UE} , The unexplained error confidence limits; t_{obs} , The observed t value; $t_{(1-\alpha/2)}$, The t value

ประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานด้วยมาตรฐาน ISO 12099:2017

จากสมการเทียบมาตรฐานที่ได้และผ่านการตรวจสอบความถูกต้องของสมการ จัดว่าเป็นสมการเทียบมาตรฐานที่ดีที่สุด จะนำมาประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานด้วยมาตรฐาน ISO 12099:2017 (ISO, 2017) อีกครั้ง ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์โดยใช้เทคนิค NIR ในการหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ในตัวอย่าง โดยจะทำการประเมินค่าทางสถิติ คือ ค่า Bias SEP และ Slope ดังแสดงใน Table 5 พบว่าทุกองค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพดฝักอ่อน มีค่า Bias ของทุกรายการน้อยกว่าค่า T_b ซึ่งแสดงว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการทำนายไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ ค่าจากการวิเคราะห์ทางเคมีและค่าที่ได้จากการทำนายไม่แตกต่างกัน มีค่า SEP น้อยกว่าหรือเท่ากับค่า T_{UE} กล่าวคือ ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายต่ำเพียงพอที่จะยอมรับได้ และจากการตรวจสอบค่า Slope หรือค่าความสัมพันธ์ของค่าจากการวิเคราะห์ทางเคมีกับ ค่าที่ได้จากการทำนาย ซึ่งจะใช้ค่า t_{obs} ในการตรวจสอบ Slope พบว่า ค่า t_{obs} มีค่าน้อยกว่าค่า $t_{(1-\alpha/2)}$ กล่าวคือ Slope มีค่าไม่แตกต่างจาก 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

สรุปผลการทดลอง

จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานทำนายองค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพดฝักอ่อน ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ใช้ข้อมูลของสเปกตรัมช่วงความยาวคลื่น 1,100-2,500 นาโนเมตร ได้สมการเทียบมาตรฐานทำนายค่า 2 ระดับ คือ

1. สมการเทียบมาตรฐานทำนายค่าได้ในชั้นคุณภาพยอดเยี่ยม ได้แก่ ค่าวัตถุแห้ง โปรตีน NDF ADF และ ADL
2. สมการเทียบมาตรฐานทำนายค่าได้ในชั้นดีมาก ได้แก่ ไขมัน และเถ้า
3. สมการเทียบมาตรฐานที่ได้ มีค่า Bias SEP และ Slope ผ่านมาตรฐานในการประเมินศักยภาพตามมาตรฐาน ISO 12099:2017 เพื่อนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการต่อไป

ข้อเสนอแนะ

สมการเทียบมาตรฐานของการทำนายค่า ไชมัน และเล้า ควรมีการพัฒนาต่อเพื่อให้ได้ในระดับ ขึ้น ยอดเยี่ยม และค่าการทำนายตัวอื่นๆ ที่ยอดเยี่ยมอยู่แล้ว ควรมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มช่วงการทำนายให้เกิด ความแม่นยำ และความเที่ยงมากขึ้น เพราะองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามสภาพ การปลูก พื้นที่ และการดูแลที่แตกต่างกันไป ซึ่งค่าต่ำสุด และสูงสุดอาจมีการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นทุกๆ ปี ควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างจากสถานที่หรือภูมิภาคต่างๆ กัน ฤดูกาลต่างๆ เป็นการปรับสมการเทียบมาตรฐานให้ เป็นปัจจุบันที่ใช้ทำนายองค์ประกอบทางเคมีในห้องปฏิบัติการ

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) หรือ สวก.

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวจันทกานต์ อรณนันท ผู้เชี่ยวชาญด้านวิเคราะห์อาหารสัตว์ ที่กรุณา ตรวจสอบและแก้ไขรายงานฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์อาหารสัตว์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ลำปางทุกท่านที่ช่วยวิเคราะห์ตัวอย่างในการทำงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วง ไปด้วยดี และขอขอบคุณคณะกรรมการวิชาการสำนักพัฒนาอาหารสัตว์ที่ช่วยพิจารณากลับกรองให้เนื้อหามี ความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- คณะกรรมการความต้องการโภชนาโคมนในประเทศไทย. 2563. ความต้องการโภชนาโคมนในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น. 240 หน้า.
- จันทกานต์ อรณนันทน์ เฉลา พัทธ์สินสุข และสุรนนท์ น้อยอุทัย. 2553. การทำนายส่วนประกอบทางเคมีของหญ้าแพงโกล่าด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี. รายงานผลงานวิจัยกองอาหารสัตว์ประจำปี พ.ศ.2553 กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. หน้า 309-327.
- จันทกานต์ อรณนันทน์ เฉลา พัทธ์สินสุข แพรวพรรณ ชูช่วย รัตติกาล ปวงแก้ว อาทิตยา สุขสะเกษ ปฎิมา บุตรชา จุริรัตน์ เงินแดง สดุดี พงษ์เพียจันทร์ ญุฑนาถ โคตรพรหม จริยา บุญจรัสเช สุรนนท์ น้อยอุทัย สุวรรณ เกศกมลลาสน์ วรรณภา อ่างทอง เยาวลักษณ์ แหม่งปิง อุดร ศรีแสง ราไพร นามสีลี สัมพันธ์ มาศโอสถ ศศิพร ช่อลำไย สมศักดิ์ กังเอี่ยม และชนัดดา วงษ์สวัสดิ์. 2563. การทำนายคุณค่าทางโภชนาโคมนของพืชอาหารสัตว์ วัสดุเหลือใช้และผลพลอยได้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม. รายงานการวิจัยและการพัฒนาการวิจัยการเกษตรฉบับสมบูรณ์. สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร(องค์การมหาชน). หน้า 92-96.
- ปานมนัส ศิริสมบุญ, 2564. พื้นฐานเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี. ภาควิชาวิศวกรรมกรรมการเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. แหล่งที่มา <https://nirsresearch.com/sites/6731/files/u/พื้นฐานเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี.pdf>. ตุลาคม 30, 2565.
- รัชณี พุทธา, 2560. ประสิทธิภาพพันธุ์ข้าวโพดฝักอ่อนที่ปลูกในพื้นที่จังหวัดสระแก้ว. มหาวิทยาลัยบูรพา. แหล่งที่มา <https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=43543>. กุมภาพันธ์ 1, 2566
- สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2561. ข้าวโพดฝักอ่อนลูกผสมเดี่ยวไม่ต้องถอดยอด พันธุ์เกษตรศาสตร์ 3. แหล่งที่มา <https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=43543>. กุมภาพันธ์ 1, 2566
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2564. ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร: พื้นที่เพาะปลูก ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ แหล่งที่มา <https://www.mis-app.oae.go.th>. กุมภาพันธ์ 1, 2566
- อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล. 2548. การปรับแต่ง NIR สเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์. เอกสารประกอบการฝึกอบรม “การตรวจคุณภาพอาหารสัตว์ด้วยเทคนิค NIR Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก” ระหว่างวันที่ 19 – 23 ธันวาคม 2548 จัดโดย หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีการตรวจสอบสินค้าโดยไม่ทำลาย, สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 62-81.
- AOAC. 2016. Official Methods of Analysis of AOAC International 20th ed. Maryland.
- Guo, T.; L. Dai, B. Yan, G. Lan, F. Li, F. Li, F. Pan, and F. Wang. 2021. Measurements of Chemical Compositions in Corn Stover and Wheat Straw by Near-Infrared Reflectance Spectroscopy. Available source: <https://doi.org/10.3390/ani11113328>. October 10, 2022.
- Infrasoft International, LLC. 2005. ISI windows near-infrared software WinISI III manual version 1.6. Foss Tecator AB, Hoganas.
- ISO. 2015. International Standard (ISO 11085: 2015(E)). Cereals, cereals-based products and animal feeding stuffs – Determination of crude fat and total fat content by the

- Randall extraction method. International Organization for Standardization. All rights reserved. Geneva.
- ISO. 2017. International Standard (ISO 12099:2017(E)) 2nd Edit. Animal feeding stuffs, Cereals and milled cereal products-Guidelines for the application of near infrared spectrometry. International Organization for Standardization. All rights reserved. Geneva.
- Kasemsumran, S., Y.P. Du, K. Maruo, and Y. Ozaki. 2004. Selective removal of interference singles for near-infrared spectra of biomedical by using region orthogonal signal correlation. *Analytical Chemical Acta* 82;97-103.
- SA. 2017. Sithiporn Associates Company. WIN ISI 4, Training Manual. 80 p.
- Williams, P., J. Antoniszyn, and M. Manley. 2019. Near Infrared Technology: Getting the best out of light. 1st edition. African Sun Media under the Sun Press imprint, Las Vegas. NV. 301p.