

การทำนายองค์ประกอบทางเคมีของกากต้นสับประรดโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

อุดร ศรีแสง^{1/} อนุชนาถ โคตรพรหม^{1/} สดุดี พงษ์เพียจันทร์^{2/}

บทคัดย่อ

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการสำหรับการทำนายองค์ประกอบทางเคมีของกากต้นสับประรด 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) และ ลิกนิน (Acid detergent lignin, ADL) ด้วยเครื่อง Near infrared spectrophotometer พัฒนาสมการโดยใช้วิธีการทางสถิติ คือ PLS (Partial least squares regression) และ MPLS (Modified partial least squares regression) โดยมีการปรับแต่งสเปกตรัมเบื้องต้นแบบใช้และไม่ใช้ SNV (Standard normal variate)-detrend ร่วมกับ Derivative, gap, smoothing และ second smoothing 10 แบบ ได้แก่ (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) ใช้ตัวอย่างกากต้นสับประรดทั้งหมดรวม 142 ตัวอย่าง คัดเลือกสมการเทียบมาตรฐานที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่า Coefficient of determination (r^2) และผลต่างของค่า SEC กับ SECV และทำการทวนสอบความใช้ได้ของสมการโดยพิจารณาจากค่า SEP Bias และค่า Slope รวมทั้งประเมินขั้นคุณภาพของสมการด้วยค่า Ratio of performance to deviation (RPD)

ผลการทดลอง พบว่า สมการเทียบมาตรฐานสำหรับทำนายค่า DM CP EE Ash NDF ADF และ ADL ของกากต้นสับประรดมีค่า r^2 อยู่ในช่วง 0.37-0.95 ค่า SEP อยู่ในช่วง 0.03-0.86 ค่า RPD อยู่ในช่วง 1.27-4.55 โดยสมการที่อยู่ในระดับยอดเยี่ยม คือ สมการสำหรับทำนายค่า ADF สมการที่อยู่ในระดับดีมาก คือ สมการสำหรับทำนายค่า NDF สมการที่อยู่ในระดับดี คือ สมการสำหรับทำนายค่า ADL สมการสำหรับทำนายค่า DM อยู่ในระดับพอใช้ อย่างไรก็ตาม สมการสำหรับใช้ทำนายค่า CP EE และ Ash ยังมีความแม่นยำต่ำมาก เมื่อประเมินศักยภาพตามมาตรฐาน ISO12099:2017 ของสมการทำนายค่า DM NDF ADF และ ADL พบว่า ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่า สมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการทำนายองค์ประกอบทางเคมีของกากต้นสับประรด

คำสำคัญ : เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี กากต้นสับประรด

เลขทะเบียนวิชาการ : 66(2)-0214-028

^{1/} กลุ่มวิจัยและพัฒนาการวิเคราะห์อาหารสัตว์ปทุมธานี ต.บางกะดี อ.เมือง จ.ปทุมธานี

^{2/} ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์เพชรบุรี ต.สามพระยา อ. ชะอำ จ. เพชรบุรี

Prediction of Chemical Composition Using Near Infrared Spectroscopy in Pineapple Stem Residue.

Udorn Srisaeng^{1/} Nuttanart Khotprom^{1/} Sadudee Pongpeachan^{2/}

Abstract

An objective of the present study was to develop near-infrared spectrometry (NIR) equations to predict the chemical components of pineapple stem residues, comprising dry matter (DM) crude protein (CP) fat (Ether extract, EE) ash, cell walls (Neutral detergent fiber, NDF) lignocellulose (Acid detergent fiber, ADF) and lignin (Acid detergent lignin, ADL). The PLS (Partial least squares regression) and MPLS (Modified partial least squares regression) were used to enumerate the spectrums. The preliminary spectral adjustment with/without SNV (Standard normal variate) detrend combined with 10 sets of derivatives, gap, smoothing, and second smoothing of (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) were used to adjust the spectrums of 142 samples of pineapple stem residues. The most suitable calibration equations were chosen based on the coefficient of determination (r^2) and the difference between SEV and low SECV. The validity of the chosen equations was then verified by considering the SEP Bias and Slope values as well as the Ratio of Performance to Deviation (RPD).

The results showed that the r^2 SEP and RDP values of the calibration equations for predicting DM CP EE Ash NDF ADF and ADL of pineapple stem residues ranged from 0.37-0.95 0.03-0.86 and 1.27-4.55, respectively. The equations to predict ADF NDF ADL and DM of the residue were excellent, very good, good and fair, respectively. In contrast, the equations to predict CP EE and Ash of the residue remained unacceptable. Based on the ISO12099:2017 standard, the equations to predict DM NDF ADF and ADL of the residue met the standard with a 95% confidence level. Therefore, it could be summarized that the precision and accuracy of these equations are acceptable to predict the chemical composition of pineapple stem residues by the NIR machine.

Keywords: Near-infrared spectroscopy Pineapple stem residue

Registered No. : 66(2)-0214-028

^{1/}Feed and Forage Analysis Section, Tiwanon road, Bang-Kadi, Mueang Pathum Thani District, Pathumthani.

^{2/}Phetchaburi Animal Nutrition Research and Development Center, Sam Phraya, Cha-am District, Phetchaburi.

คำนำ

สับปะรด (*Ananas comosus*) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่มีอายุการปลูกข้ามฤดู มีอายุตั้งแต่ปลูกจนถึงเก็บเกี่ยวได้ประมาณ 12-14 เดือน ผลผลิตหลักจากการปลูกต้นสับปะรด คือ ผลสับปะรด (Fruit) 45% และมีผลพลอยได้จากการปลูก คิดเป็นส่วนของใบ 38.8% ต้น 16.1% และอื่นๆ 0.1% ส่วนของลำต้นเมื่อนำมาทำความสะอาดและบดละเอียดก่อนนำเข้าสู่กระบวนการแปรรูป ผลพลอยได้หลังการแปรรูป จะได้ส่วนของกากต้นสับปะรด (บางพื้นที่เรียกว่า เหง้าสับปะรด) 50% กากแป้ง 10% และส่วนที่นำไปสกัดสาร 40% (สุริยะ, 2561) ส่วนของกากต้นสับปะรด มีค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ เท่ากับ 2.4 Mcal/kgDM (Pintadis et al., 2020) ลักษณะทั่วไปของตัวอย่างกากต้นสับปะรดถ้าจะนำไปใช้ประโยชน์ในการเลี้ยงสัตว์จะถือว่าเป็นวัตถุดิบแหล่งของพลังงาน คือ ให้พลังงานมากกว่า 2,000 แคลอรีต่อกิโลกรัม มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ คุณภาพของโปรตีนค่อนข้างต่ำ วัตถุดิบอาหารสัตว์ส่วนใหญ่ได้จากเมล็ดธัญพืช และพืชหัวหรือราก (สมคิด, 2550) พบว่ามีการนำกากต้นสับปะรดไปใช้เป็นอาหารหยาบในการขุนโค สามารถลดต้นทุนการขุนโคได้และส่งผลให้กำไรสุทธิสูงสุด (สุริยะ, 2561) นอกจากนี้มีรายงานของ พิลานี (2565) ได้นำกากเหง้าสับปะรดและขุยใบสับปะรดมาเป็นส่วนผสมในสูตรอาหารของโคเนื้อลูกผสมพื้นเมืองบราห์มันเพศผู้ พบว่าโคมีปริมาณการกินได้รวมของกลุ่มอาหารข้นสูตรกากเหง้าสับปะรดและกลุ่มอาหาร TMR ไม่มีความแตกต่างกับกลุ่มอาหารข้นสำเร็จรูปทางการค้า แสดงให้เห็นได้ว่ากากเหง้าสับปะรดสามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบสำหรับผสมอาหารโคเนื้อได้โดยไม่ส่งผลเสียต่อสมรรถภาพการผลิตโคเนื้อลูกผสมพื้นเมืองบราห์มัน

ในการประกอบสูตรอาหารสัตว์ จำเป็นต้องทราบองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่นำมาใช้ การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี เช่น DM CP EE Ash NDF ADF และ ADL รวมทั้งปริมาณของแร่ธาตุ องค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้เป็นข้อมูลที่สำคัญที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพในห้องปฏิบัติการโดยใช้วิธีมาตรฐานที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง แต่มีขั้นตอนของการวิเคราะห์ที่ต้องใช้เวลาหลายวัน และที่สำคัญมีการใช้สารเคมีที่อันตรายในกระบวนการวิเคราะห์ซึ่งส่งผลต่อสภาพแวดล้อมและตัวผู้วิเคราะห์เองอีกด้วย ต้องใช้ผู้มีประสบการณ์ในการปฏิบัติงาน เครื่องมือมีราคาสูง และตัวอย่างจะถูกทำลาย ด้วยข้อจำกัดเหล่านี้ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Near infrared spectroscopy, NIRS) มาใช้ในการประเมินคุณภาพ เพราะสามารถประเมินคุณภาพได้ค่าที่ถูกต้อง แม่นยำ ใช้เวลาสั้น ไม่ทำลายตัวอย่าง ไม่ใช้สารเคมี ไม่ทำลายสภาพแวดล้อม และลดค่าใช้จ่ายได้ในระยะยาว เมื่อเทียบกับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการสร้างสมการจะต้องมาจากการสุ่มเก็บตัวอย่างที่มีความหลากหลายเพื่อให้เป็นตัวแทนของพื้นที่การผลิต ฤดูกาล และกระบวนการที่ได้มา เพื่อให้มีค่าทางเคมีที่กระจายครอบคลุมค่าของตัวอย่างนั้นๆ สำหรับนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในห้องปฏิบัติการ และใช้ในการสแกนด้วยเครื่อง NIRS เพื่อเก็บสเปกตรัม และนำไปใช้สร้างเป็นสมการทำนายค่าต่อไป (จันทกานต์ และคณะ, 2553) ในปัจจุบันยังไม่มีสมการทำนายองค์ประกอบทางเคมีของกากต้นสับปะรดด้วยเครื่อง NIR spectrophotometer ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างสมการสำหรับเครื่อง NIR spectrophotometer เพื่อทำนายองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างกากต้นสับปะรดที่มีความถูกต้องแม่นยำและรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้เกษตรกร นักวิจัยและนักอาหารสัตว์ได้รับผลวิเคราะห์ที่ทันต่อ

ความต้องการใช้ในการประกอบสูตรอาหารสัตว์ ขณะเดียวกันสมการที่ได้นี้สามารถถ่ายโอนไปยังเครื่อง NIR spectrophotometer อื่นได้อีกด้วย ทำให้ได้ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่รวดเร็วขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ดำเนินการทดลองและสร้างสมการทำนายองค์ประกอบทางเคมีของกากต้นสับปะรด โดยใช้เทคนิค NIRS โดยค่า DM NDF ADF และ ADL ดำเนินการวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการกลุ่มวิจัยและพัฒนาการวิเคราะห์อาหารสัตว์ ต. บางกะดี อ. เมืองปทุมธานี จ. ปทุมธานี ส่วนค่า DM CP EE และ Ash ดำเนินการวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์เพชรบุรี ต. สามพระยา อ. ชะอำ จ. เพชรบุรี

ตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

รวบรวมตัวอย่างกากต้นสับปะรดจากห้องปฏิบัติการสำนักพัฒนาอาหารสัตว์จำนวน 5 แห่ง ที่มีความแตกต่างกันในส่วนของพื้นที่ปลูก ฤดูกาล อายุการเก็บเกี่ยว การใส่ปุ๋ย และออกสุมเก็บตัวอย่างใหม่จากฟาร์มเกษตรกร สหกรณ์ โรงงานและร้านจำหน่ายต่างๆ จำนวน 142 ตัวอย่าง โดยสุมเก็บตัวอย่างซึ่งเป็นผงละเอียดประมาณ 2 กิโลกรัม นำมาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง บันทึกร้ำน้ำหนักก่อนอบและหลังอบ จากนั้นนำมาบดให้มีขนาด 1 มิลลิเมตร สำหรับการวิเคราะห์ค่า DM CP EE Ash NDF ADF และ ADL

การวัดสเปกตรัมและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

- นำตัวอย่างกากต้นสับปะรดที่เตรียมเสร็จแล้วมาวัดสเปกตรัมโดยใช้เครื่อง 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) เกลี่ยตัวอย่างให้กระจายอย่างสม่ำเสมอ ทำการวัด 2 ซ้ำต่อตัวอย่าง (Duplicates) การวัดแต่ละครั้งจะแสดงรายการองค์ประกอบทางเคมี จำนวน 7 รายการได้แก่ ค่า DM CP EE Ash NDF ADF และ ADL นำค่าแต่ละรายการที่ได้จากการวัดมาเฉลี่ยเพื่อแสดงผลออกมาเป็นเส้นสเปกตรัม 1 เส้นต่อรอบ ซึ่งค่าที่ได้เรียกว่า ค่าการดูดกลืน (Absorbance)

- นำตัวอย่างกากต้นสับปะรดที่ผ่านการวัดสเปกตรัมมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ โดยวิธีทางเคมี (Wet chemical analysis) ได้แก่ ค่า DM ตามวิธีที่ 930.15 (AOAC, 2016) และคิดเป็นเปอร์เซ็นต์วัตถุแห้ง (Dry matter, DM) CP เป็นการหาเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนด้วยวิธี Kjeldahl แล้วคูณด้วยแฟคเตอร์ 6.25 ตามวิธี In-house method base on ISO 5983-2 (2009) EE ตามวิธีที่ 11085 (ISO, 2015) Ash 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)

- ทำการวิเคราะห์หาค่าความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการหรือ SEL (Standard error of laboratory) ด้วยวิธี Duplicate blind test เพื่อจะนำค่าไปประเมินสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างได้ โดยค่า SEL ต้องมากกว่าค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย (Standard error of prediction, SEP) สองเท่า (SA, 2017) ทำการวิเคราะห์โดยใช้ตัวอย่างกากต้นสับปะรด 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 ชั่วโมง จากนั้นนำผลวิเคราะห์ของแต่ละองค์ประกอบทางเคมี คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของวัตถุแห้ง และคำนวณหาค่า SEL โดยใช้สมการ

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

D = ผลต่างผลวิเคราะห์ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ของแต่ละตัวอย่าง

n = จำนวนตัวอย่าง (10)

การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและการทวนสอบความใช้ได้ของสมการกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ

1. การสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

นำข้อมูลสเปกตรัมและองค์ประกอบทางเคมีมาหาความสัมพันธ์ด้วยวิธี Partial least square regression (PLSR) โดยใช้โปรแกรม WIN ISI IV แบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่มที่เป็นอิสระต่อกัน คือกลุ่มที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐาน ทำนายค่า DM CP EE Ash NDF ADF และ ADL และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ ในสัดส่วนกลุ่มสร้างสมการเทียบมาตรฐานต่อกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ 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 โดยนำสเปกตรัมของตัวอย่างกลุ่มทวนสอบประเมินความถูกต้องแม่นยำโดยใช้ค่าสถิติต่างๆ ได้แก่ ค่า SEP ควรมีค่าน้อยกว่าสองเท่าของ SEL ($SEP < 2 SEL$) ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธีมาตรฐานและค่าที่ได้จากวิธี NIR ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias)

ควรมีค่าน้อยกว่า 0.55 เท่า SEC (Bias<0.55 SEC) ค่า Standard error of prediction correction (SEP(C)) น้อยกว่า 1.29 SEC (SEP(C) <1.29SEC) ค่าความชันเข้าใกล้ 1 (Slope ~ 1) ตามวิธีการของ SA (2017) นอกจากนี้ ได้พิจารณาระดับชั้นคุณภาพของสมการด้วยค่า RPD ตามวิธีการของ Williams et al. (2019) รายละเอียดดังแสดงใน Table 1 เกณฑ์ที่ใช้ในการคัดเลือกสมการตามที่ได้กล่าวถึง จะเลือกสมการเทียบมาตรฐานที่ดีที่สุดเพียง 1 สมการ สำหรับนำไปใช้ในการทำนายองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง NIRS ต่อไป

Table 1 Criteria of prediction efficiency: Williams et al. (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. สมการเทียบมาตรฐาน สมการเทียบมาตรฐานที่คัดเลือกมา 1 สมการ (จากข้อที่ 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 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 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 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 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%
ν	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) ซึ่งจะสอดคล้องกับสมการเส้นตรงโดยมีค่า 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
$\bar{y}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของค่าที่ทำนายจากสมการเทียบมาตรฐาน
$\bar{\bar{y}}$	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
$\hat{y}_i$	คือ	ค่าที่ทำนายได้จากสมการเทียบมาตรฐาน

หากค่า t_{obs} น้อยกว่า $t_{(1-\alpha/2)}$ แสดงว่า ความชันของกราฟการกระจายระหว่างค่าทางเคมีจริงที่เป็นค่าอ้างอิงกับค่าที่ทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานไม่แตกต่างจาก 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองและวิจารณ์

องค์ประกอบทางเคมีของกากต้นสับปะรด

1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

จากการรวบรวมตัวอย่างและสุ่มเก็บตัวอย่างกากต้นสับปะรดจากฟาร์มเกษตรกรและผู้รับจากโรงงานมาจำหน่ายในพื้นที่จังหวัดระยอง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และจังหวัดเพชรบุรี ได้ตัวอย่างสำหรับสร้างสมการทำนายค่า DM CP EE Ash NDF ADF และ ADL รวมทั้งสิ้น 135 133 142 140 140 132 และ 138 ตัวอย่างตามลำดับ มีค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย ค่า SD และค่า SELของแต่ละรายการ รายละเอียดดังแสดงใน Table 2

Table 2 Statistical value of chemical composition of pineapple stem residue by total sample, calibration and validation evaluation set.

Parameter	Evaluation groups	Number of sample	Minimum	Maximum	Average	± SD	SEL
DM, %	Total sample	135	88.78	94.47	91.23	0.98	0.36
	Calibration set	96	88.78	94.47	91.23	0.97	
	Validation set	20	88.95	94.16	91.23	1.00	
CP, %	Total sample	133	2.15	2.46	2.30	0.07	0.07
	Calibration set	106	2.15	2.46	2.30	0.07	
	Validation set	21	2.17	2.44	2.30	0.07	
EE, %	Total sample	142	0.07	0.38	0.22	0.06	0.02
	Calibration set	106	0.07	0.38	0.22	0.06	
	Validation set	24	0.11	0.33	0.22	0.05	
Ash, %	Total sample	140	1.52	2.07	1.74	0.11	0.04
	Calibration set	101	1.52	2.07	1.74	0.11	
	Validation set	25	1.53	1.99	1.74	0.11	
NDF, %	Total sample	140	9.32	23.14	15.90	3.40	0.60
	Calibration set	106	9.32	23.14	15.91	3.41	
	Validation set	21	9.65	21.95	15.87	3.44	
ADF, %	Total sample	132	4.76	7.99	6.76	0.75	0.27
	Calibration set	104	4.76	7.99	6.77	0.76	
	Validation set	21	4.80	7.76	6.74	0.75	
ADL, %	Total sample	138	0.54	1.70	1.10	0.26	0.26
	Calibration set	103	0.54	1.70	1.09	0.26	
	Validation set	25	0.61	1.59	1.12	0.24	

SD = standard deviation, SEL = standard error of laboratory

เมื่อแบ่งสเปกตรัมของตัวอย่างทั้งหมดออกเป็น 2 กลุ่ม เพื่อใช้เป็นตัวอย่งกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของสมการรวมทั้งการใช้ Mahalanobis distance เพื่อตัดสเปกตรัมที่อยู่นอกกลุ่มออก ซึ่งหากผลของกลุ่มที่ใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการให้ค่า r^2 เข้าใกล้ 1 แสดงว่าสมการดังกล่าวเป็นสมการที่ดี ซึ่งจะเห็นว่าข้อมูลที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานมีค่าครอบคลุมค่าต่ำสุด-สูงสุด ของชุดข้อมูลที่น่ามาทำการทดสอบ แสดงว่าสมการเทียบมาตรฐานที่ได้ มีค่าการทำนายที่ครอบคลุม สามารถนำไปใช้เป็นสมการทำนายค่าองค์ประกอบทางเคมีของการต้นสับปะรดได้

1.2 การหาค่าความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ หรือ SEL (Standard error of laboratory)

เมื่อทดสอบหาค่า SEL ของการวิเคราะห์ค่า DM CP EE Ash NDF ADF และ ADL ในตัวอย่างกากต้นสับปะรด ดังแสดงใน Table 2 จะเห็นว่า ค่า SEL ของรายการ DM CP EE Ash NDF ADF และ ADL มีค่าต่ำ แสดงว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อย และเมื่อนำค่า SEL ไปประเมินในขั้นตอนการตรวจสอบความใช้ได้ของสมการจะต้องมีค่าเป็นสองเท่าของค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย (SA, 2017)

1.3 การทดสอบความชำนาญของห้องปฏิบัติการ

การวิเคราะห์ทางเคมีของตัวอย่างกากต้นสับปะรด ได้ดำเนินการวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการ 2 แห่ง คือ ห้องปฏิบัติการกลุ่มวิจัยและพัฒนาการวิเคราะห์อาหารสัตว์ ต.บางกะดี อ.เมือง จ.ปทุมธานี ดำเนินการวิเคราะห์ค่า DM NDF ADF และ ADL และห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์เพชรบุรี ต.สามพระยา อ.ชะอำ จ.เพชรบุรี ดำเนินการวิเคราะห์ค่า DM CP EE และ Ash ดังนั้นเพื่อให้เกิดความมั่นใจในคุณภาพของผลการทดสอบ และแสดงถึงศักยภาพของห้องปฏิบัติการและความสามารถผู้ทำการทดสอบ รวมทั้งเพื่อให้แน่ใจว่าผลทดสอบที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำ มีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ จึงได้ทำการทดสอบความชำนาญของห้องปฏิบัติการทั้ง 2 แห่งที่รับผิดชอบในการวิเคราะห์ทางเคมี โดยวิธีการคือใช้วัสดุอ้างอิงรับรอง (Certificate reference material, CRM) ซึ่ง ค่า DM CP EE และ Ash ประเมินเทียบกับค่า Certified value ส่วนค่า NDF ADF และ ADL ประเมินเทียบกับค่า Assigned value จากการทดสอบพบว่า การวิเคราะห์ทางเคมีทุกรายการจากห้องปฏิบัติการทั้ง 2 แห่ง มีค่า z-score ไม่เกิน 2 แสดงว่า ผลการวิเคราะห์ทุกรายการของ 2 ห้องปฏิบัติการ อยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ รายละเอียดดังแสดงใน Table 3

Table 3 Z-score values to compare the mean of laboratory test results with CRM test results.

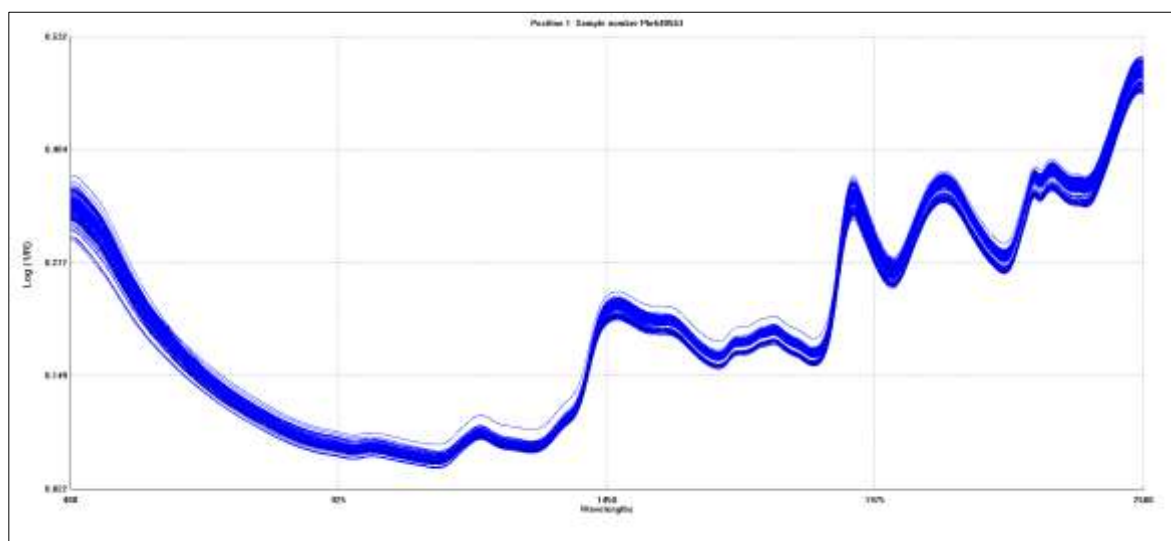
Chemical composition	Certified/Assigned value (g/100 g)	Laboratory' result (g/100 g)			
		PHAT.	Z-score	PETC.	Z-score
DM	9.70 ± 0.54	10.59	1.65	9.96	0.47
CP	21.43 ± 0.43	21.50	0.17	21.25	-0.32
EE	3.40 ± 0.24	2.95	-1.59	3.01	-1.81
Ash	5.86 ± 0.15	5.67	-0.80	5.83	-0.21
NDF	23.40 ± 1.04	22.63	-1.14	23.74	0.51
ADF	14.17 ± 1.04	13.29	-0.83	13.70	-0.46
ADL	4.23 ± 0.57	4.07	-0.29	4.58	0.60

PHAT = Feed and Forage Analysis Section Laboratory.

PETC = Phetchaburi Animal Nutrition Research and Development Center Laboratory.

2. การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและการตรวจสอบความถูกต้องของสมการ

จากการวัดและเก็บสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น คลื่น 1,100-2,500 นาโนเมตร โดยใช้วิธีการวัดแบบสะท้อนกลับ (Reflectance) พบว่ารูปร่างของสเปกตรัมแต่ละตัวอย่างมีเส้นสเปกตรัมที่เหลื่อมซ้อนกัน อันอาจเนื่องจากตัวอย่างที่นำมาสแกนเพื่อเก็บสเปกตรัม ตามสภาพตัวอย่างที่ได้มา ดัง Figure 1(A) เป็นสเปกตรัมของตัวอย่างกากต้นสับปะรดทั้งหมดที่ยังไม่มีการปรับแต่ง ลักษณะสเปกตรัมที่ได้มีฟีก (Peak) กว้างและมีการเลื่อนตัวของสเปกตรัม เพราะความแตกต่างของขนาดอนุภาคตัวอย่างและความเข้มข้นขององค์ประกอบทางเคมีที่สะสมอยู่ในตัวอย่างยังแยกได้ไม่ชัดเจน (Williams et al., 2019) ส่วน Figure 1(B) และ 1 (C) เป็นภาพสเปกตรัมที่มีการปรับแต่งของสมการที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องของสมการเทียบมาตรฐานในการทำนายคุณค่าทางโภชนาการต่างๆ ด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ คือ SNV-Detrend ร่วมกับ Math treatment เพื่อช่วยลดการกระเจิงแสงและผลกระทบแบบคูณ โดยการใช้ Derivative ที่อยู่ในรูปของ Derivative, gap, smoothing and second smoothing ซึ่ง First derivative ของสเปกตรัมจะช่วยแก้ปัญหาที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น คือ การเลื่อนตัวของสเปกตรัมตามแนวแกน Y ผลกระทบแบบคูณ (Multiplicative effect) อันเกิดจากขนาดอนุภาคของตัวอย่างที่แตกต่างกัน อนุภาคขนาดใหญ่จะเปลี่ยนทิศทางการเดินทางของแสงลงไปในตัวอย่างไม่บ่อยครั้งเท่ากับอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้แสงเดินทางเข้าไปในตัวอย่างไม่ได้ระยะทางมากกว่าก่อนที่จะสะท้อนกลับออกมา ทำให้ถูกดูดกลืนมากกว่า ขณะที่ Second derivative ของสเปกตรัม จะทำให้เกิดการแยกของจุดยอดที่เหลื่อมซ้อนกันอยู่ ส่วน Gap และ Smoothing จะช่วยปรับสเปกตรัมที่มีลักษณะเป็นยอดแหลมเล็กกระจายให้เรียบขึ้น (อนุพันธ์, 2548) นอกจากนี้ยังมีการใช้ MPLS และ PLS มาช่วยปรับแต่งสเปกตรัมให้ดีขึ้น การสร้างสมการกากต้นสับปะรดมีการใช้ MPLS จำนวน 6 รายการ ได้แก่ DM CP Ash NDF ADF และ ADL และมีการใช้ PLS จำนวน 1 รายการ ได้แก่ EE ซึ่งจากการรายงานของ Shenk and Westerhaus (1991) ระบุว่า MPLS ให้ผลในการพัฒนาค่า SEP ของสมการเทียบมาตรฐานทำนายได้ดีขึ้นได้มากกว่า 18 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับวิธี MSR (Modified stepwise regression) โดยการใช้ MPLS สร้างสมการที่ MPLS สร้างสมการได้นั้น Westerhaus (2014) ได้นำเสนอว่า MPLS จะสร้างสมการเทียบมาตรฐานที่ทำนายได้แม่นยำกว่าสมการที่สร้างโดย PLS เพราะ PLS จะให้ผลดีกับสเปกตรัมที่มีความแปรปรวนจากองค์ประกอบในการสร้างสมการ (Calibration constituent) ส่วน MPLS จะให้ผลดีเมื่อต้องการตัดแหล่งที่มาของความแปรปรวนของสเปกตรัมและเจาะจงตรงช่วงคลื่นที่เล็กน้อยบนสเปกตรัมแต่มีความสัมพันธ์สูง



(A) Original spectra

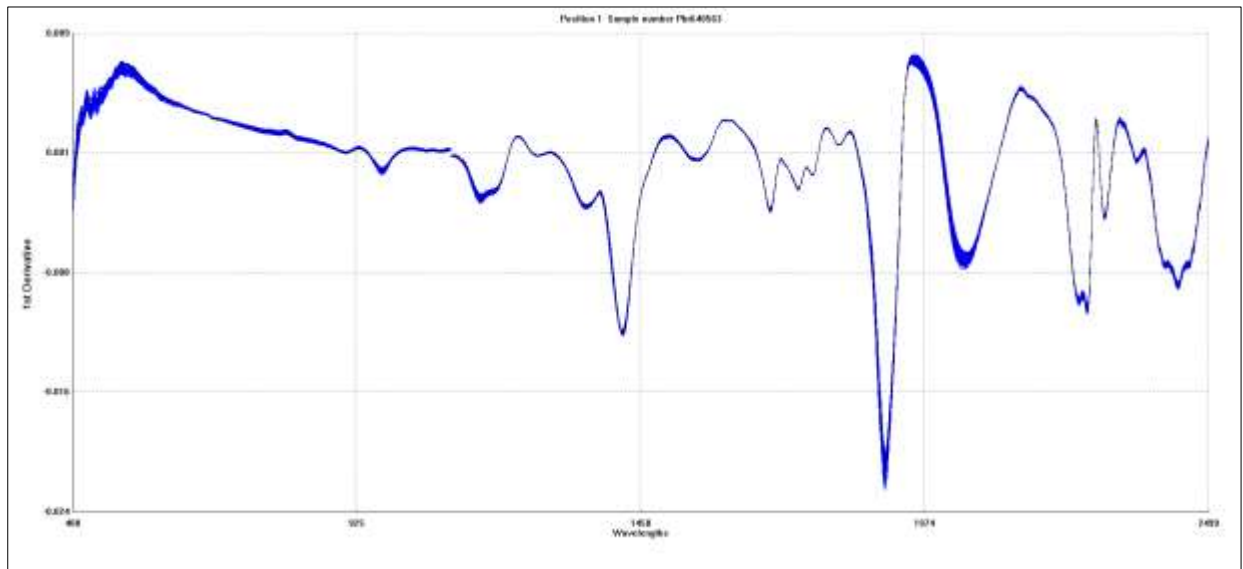
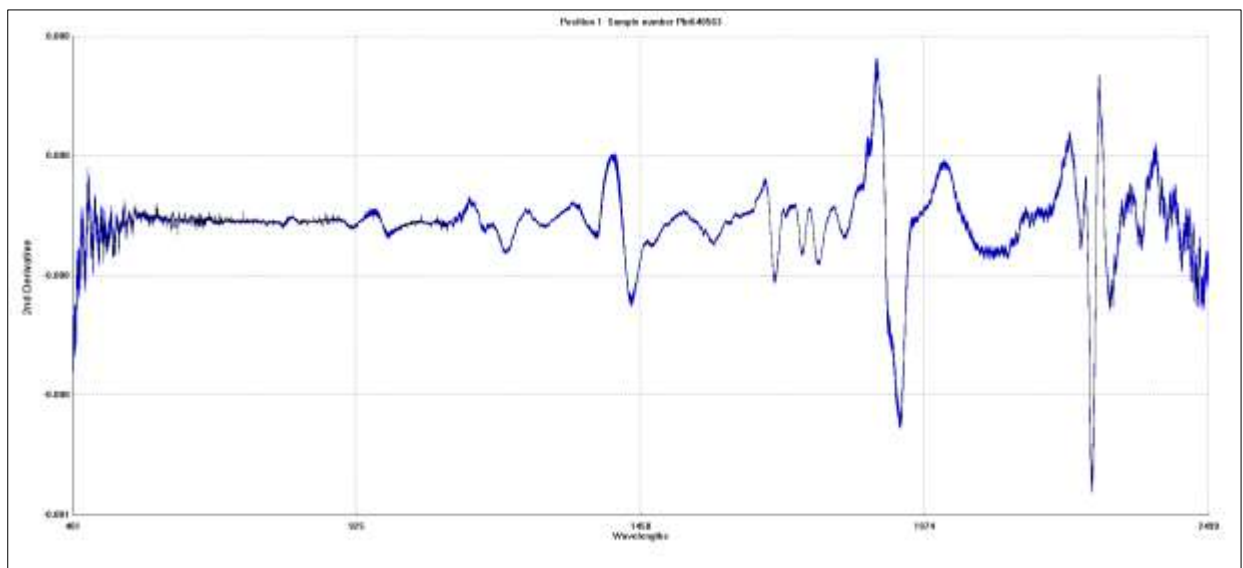
(B) 1st derivative spectra(C) 2nd derivative spectra

Figure 1 NIRS spectra of pineapple stem residue (A) original spectra (B) 1st derivative spectra and (C) 2nd derivative spectra

จากข้อมูลของการสร้างสมการทำนายองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ของกากต้นสับปะรด รายละเอียดดังแสดงใน Table 4 พบว่าสมการที่ถูกคัดเลือกในการทำนายค่า CP และ EE มีค่า r^2 เท่ากับ 0.32 และ 0.14 ตามลำดับการที่ค่า r^2 ของ CP มีค่าต่ำเนื่องจากปริมาณ CP ในตัวอย่างกากต้นสับปะรดมีค่าที่ต่ำ คือ มีค่าอยู่ในช่วง 2.15-2.46 % ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงน้อย ช่วงข้อมูลที่น่ามาสร้างสมการมีพิสัยแคบ (รณฤทธิ์, 2565) เนื่องจากกากต้นสับปะรดมีองค์ประกอบส่วนใหญ่จะเป็นแป้งและเยื่อใย ขณะที่ค่า r^2 ของสมการเทียบมาตรฐานในการทำนายค่า DM Ash NDF ADF และ ADL มีค่าอยู่ในช่วง 0.87-0.96 เข้าใกล้ 1 โดยทุกสมการที่ถูกคัดเลือกมาตรวจสอบความถูกต้องพบว่ามีค่า SECV ต่ำสุด และมีค่า SEC SECV และ SEL ใกล้เคียงกัน เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการ พบว่า มีค่า r^2 อยู่ในช่วง 0.37-0.95 มีค่า SEP < 2 SEL, Bias < 0.55 SEC, SEP(C) < 1.29 SEC และ Slope ~ 1

เมื่อพิจารณาความใช้ได้ของสมการจากค่า RPD รายละเอียดดังแสดงใน Table 4 พบว่า สมการที่ยอดเยี่ยมสามารถใช้ได้ทุกงาน คือ สมการทำนายค่า ADF (RPD>4.1) สมการที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ คือ สมการทำนายค่า NDF (RPD อยู่ในช่วง 3.5-4.0) ส่วนสมการที่ใช้ได้ระดับควบคุมตรวจสอบคุณภาพ คือ สมการทำนายค่า ADL (RPD อยู่ในช่วง 3.0-3.4) สมการที่ใช้ได้ในงานคัดเลือก คือ สมการทำนายค่า DM (RPD อยู่ในช่วง 2.5-2.9) และสมการที่ใช้ได้ในงานคัดเลือกเบื้องต้น คือ สมการทำนายค่า Ash (RPD อยู่ในช่วง 2.0-2.4) ส่วนสมการทำนายค่า CP และ EE ยังไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ การที่ค่า RPD ของ CP และ EE มีค่าต่ำ อาจเกิดจากข้อจำกัดในเรื่ององค์ประกอบทางเคมีที่มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ในตัวอย่างกากต้นสับปะรดค่อนข้างต่ำ ทำให้ช่วงข้อมูลของ CP และ EE มีพิสัยแคบ ส่งผลให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าทางเคมี (SD) ต่ำ และทำให้ค่า RPD ต่ำไปด้วย เนื่องจาก RPD เป็นสัดส่วนระหว่าง SD ต่อค่า SEP ของตัวอย่างในกลุ่มที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของสมการ Calibration ดังนั้นจึงควรปรับปรุงสมการให้มีค่าสถิติดีขึ้นได้ โดยเพิ่มจำนวนตัวอย่างใหม่ให้มากขึ้น และมีค่าครอบคลุมค่าต่ำสุด-สูงสุดด้วย แล้วนำไปสร้างสมการใหม่ จะทำให้ได้ช่วงข้อมูลกว้างขึ้น โดยการเพิ่มตัวอย่างให้มีความหลากหลายทั้งในด้านอายุและฤดูกาล เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและความแม่นยำในการทำนายตัวอย่างต่อไปในอนาคตในอนาคต และจากการสืบค้นการศึกษางานทางด้านเทคนิค NIRS ของกากต้นสับปะรดทั้งในและต่างประเทศไม่พบผลงานวิจัยทางด้านนี้ จึงไม่มีข้อมูลมาสนับสนุนผลของการสร้างสมการทำนายองค์ประกอบทางเคมีในส่วนนี้

Table 4. Statistical analysis of Calibration set and Validation set of pineapple stem residue.

Parameter	Treatment			PLS factors	Calibration set				Validation set				
					N	r ²	SEC	SECV	N	r ²	SEP	Bias	RPD
DM, %	MPLS	None	1,8,8,1	6	96	0.91	0.25	0.32	20	0.85	0.24	-0.04	2.61
CP, %	MPLS	SNV-Detrend	2,5,5,1	2	106	0.32	0.06	0.07	21	0.59	0.03	0.00	1.62
EE, %	MPLS	None	2,4,4,1	1	106	0.14	0.05	0.06	24	0.37	0.03	0.00	1.27
Ash, %	MPLS	SNV-Detrend	1,5,5,1	8	101	0.90	0.03	0.07	25	0.74	0.05	0.00	2.00
NDF, %	MPLS	SNV-Detrend	2,5,5,1	5	106	0.94	0.80	1.25	21	0.93	0.86	-0.01	3.95
ADF, %	MPLS	SNV-Detrend	1,5,5,1	8	104	0.96	0.14	0.27	21	0.95	0.17	0.00	4.55
ADL, %	MPLS	SNV-Detrend	2,5,5,1	4	103	0.87	0.09	0.15	25	0.90	0.07	0.00	3.15

N = number of sample, r² = coefficient of determination, SEC = standard error of calibration, SECV = standard error of cross validation

ประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานด้วยมาตรฐาน ISO 12099:2017

จากข้อมูลรายละเอียดดังแสดงใน Table 5 พบว่าทุกองค์ประกอบทางเคมีของกากต้นสับปะรด มีค่า Bias ของทุกรายการน้อยกว่าค่า T_b ซึ่งแสดงว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการทำนายไม่นับสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ หมายความว่า ค่าจากการวิเคราะห์ทางเคมีและค่าที่ได้จากการทำนายไม่แตกต่างกัน มีค่า SEP น้อยกว่าค่า T_{UE} แสดงว่าค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายต่ำเพียงพอที่จะยอมรับได้ และจากการตรวจสอบค่า Slope หรือค่าความสัมพันธ์ของค่าจากการวิเคราะห์ทางเคมีกับค่าที่ได้จากการทำนาย ซึ่งจะใช้ค่า t_{obs} ในการตรวจสอบ Slope พบว่า ค่า t_{obs} มีค่าน้อยกว่า t_(1-α/2) กล่าวคือ Slope มีค่าไม่

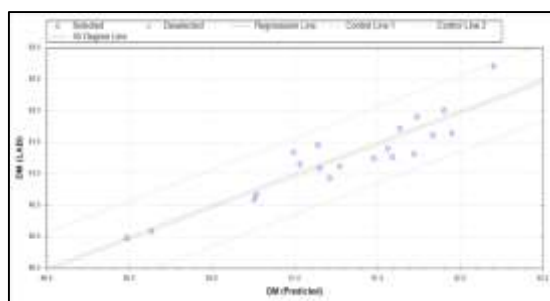
แตกต่างจาก 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งจากสมการเทียบมาตรฐานที่ได้และผ่านการตรวจสอบความถูกต้องของสมการ จัดว่าเป็นสมการเทียบมาตรฐานที่ดีที่สุด เมื่อประเมินศักยภาพด้วยมาตรฐาน ISO 12099 : 2017 (ISO, 2017) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS ในการหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ในตัวอย่าง โดยจะทำการประเมินค่าทางสถิติ คือ ค่า Bias SEP และ ค่า Slope

Table 5. Statistics performance measurement of developed calibration equation for chemical Composition according to ISO 12099 : 2017 of pineapple stem residue.

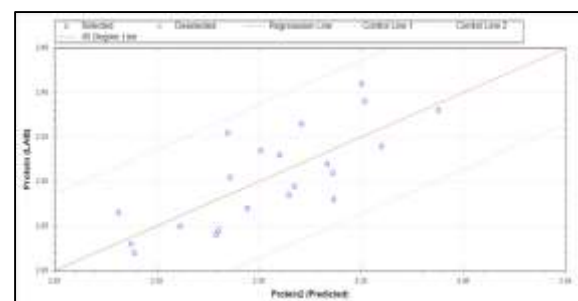
Parameter	Bias			SEP			Slope		
	Calculated	Criterion	Result	Calculated	Criterion	Result	Calculated	Criterion	Result
	Value	(T_b)		Value	(T_{UE})		Value(t_{abs})	($t_{(1-\alpha/2)}$)	
DM, %	-0.04	0.11	pass	0.24	0.32	pass	0.00	2.09	pass
CP, %	0.00	0.02	pass	0.03	0.08	pass	-0.20	2.09	pass
EE, %	0.00	0.01	pass	0.03	0.07	pass	-0.08	2.07	pass
Ash, %	0.00	0.02	pass	0.05	0.07	pass	0.03	2.06	pass
NDF, %	0.00	0.39	pass	0.86	1.04	pass	0.00	2.09	pass
ADF, %	0.00	0.08	pass	0.17	0.19	pass	-0.06	2.09	pass
ADL, %	0.00	0.03	pass	0.07	0.12	pass	-0.01	2.06	pass

T_b = The calculation of the bias confidence limits, SEP = standard error of prediction, T_{ue} = The unexplained error confidence limits, T_{abs} = The observed t value, $T_{(1-\alpha/2)}$ = The t value

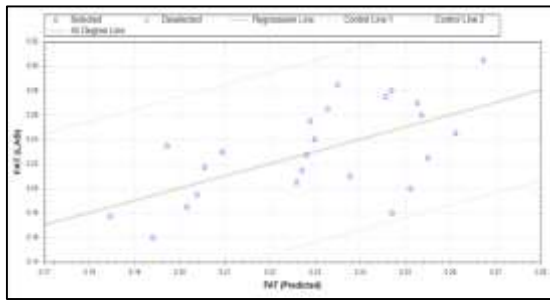
จาก Figure 2(a)-2(g) คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี (แกน Y) และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเทียบมาตรฐาน (แกน X) พบว่าค่าที่ได้จากการทำนายของค่า NDF ADF และ ADL มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง โดยมีค่า r^2 เท่ากับ 0.93 0.95 และ 0.90 ซึ่งสมการสามารถใช้ทำนายได้กับงานควบคุมคุณภาพ ค่าที่ได้จากการทำนายของค่า DM มีค่า r^2 เท่ากับ 0.85 สมการสามารถใช้ทำนายได้กับงานทั่วไปรวมทั้งงานวิจัย ค่าที่ได้จากการทำนายของค่า Ash มีค่า r^2 เท่ากับ 0.74 สมการสามารถใช้ทำนายได้แบบประมาณ ค่าที่ได้จากการทำนายของค่า CP มีค่า r^2 เท่ากับ 0.59 สมการสามารถใช้ทำนายได้แบบ screening เบื้องต้น ส่วน ค่าที่ได้จากการทำนายของค่า EE มีค่า r^2 เท่ากับ 0.37 ยังไม่แนะนำให้นำมาใช้ทำนาย (Williams et al., 2019) ต้องทำการเพิ่มจำนวนตัวอย่างเพื่อสร้างสมการเทียบมาตรฐานใหม่



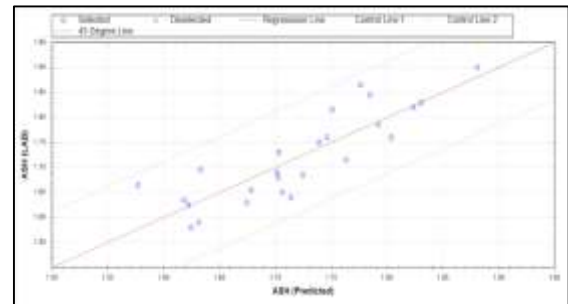
(a) DM



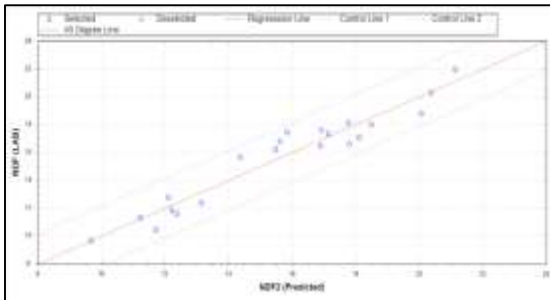
(b) CP



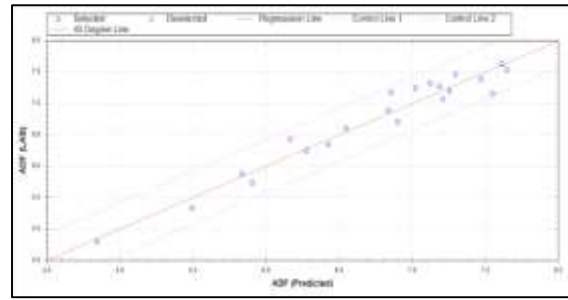
(c) EE



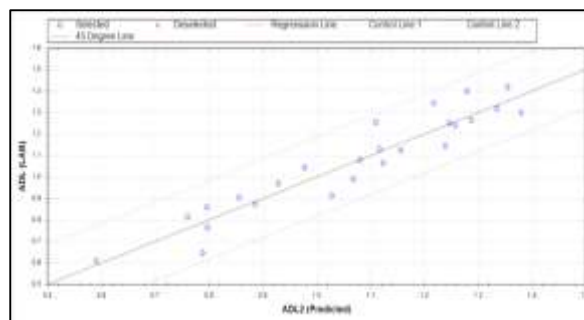
(d) Ash



(e) NDF



(f) ADF



(g) ADL

Figure 2 Relationship between actual and predicted of chemical composition of Pineapple stem residue.

สรุปผลการทดลอง

จากการพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์โดยการสร้างสมการเทียบมาตรฐานทำนายองค์ประกอบทางเคมีของกากต้นสับปะรดโดยใช้เทคนิค NIRS โดยใช้ข้อมูลของสเปกตรัมช่วงความยาวคลื่น 1,100-2,500 นาโนเมตร ในการสร้างสมการทำนายค่า DM CP EE Ash NDF ADF และ ADL พบว่า สมการต่างๆ มีระดับการนำไปใช้งานของสมการ ดังนี้

1. สมการเทียบมาตรฐานที่อยู่ในระดับยอดเยี่ยมสามารถใช้ได้ทุกงาน คือ สมการทำนายค่า ADF
2. สมการเทียบมาตรฐานที่อยู่ในระดับดีมากใช้ในการควบคุมกระบวนการงาน คือ สมการทำนายค่า NDF
3. สมการเทียบมาตรฐานที่อยู่ในระดับดีใช้ได้ระดับควบคุมตรวจคุณภาพ คือ สมการทำนายค่า ADL
4. สมการเทียบมาตรฐานที่อยู่ในระดับพอใช้ใช้ได้ในงานคัดเลือก คือ สมการทำนายค่า DM
5. สมการทำนายค่า CP EE และ Ash ยังไม่เหมาะสมในการนำไปใช้

ข้อเสนอแนะ

สมการเทียบมาตรฐานที่ให้ผลค่า RPD ของ CP EE และ Ash ในระดับพอใช้ ต่ำ และต่ำมากนั้น สามารถพัฒนาต่อเพื่อให้ได้ในระดับชั้นที่ดีขึ้นได้ กรณีที่เกิดจากมีค่าพิสัยแคบ ควรสุ่มเก็บตัวอย่างใหม่เพื่อเพิ่มจำนวนและความหลากหลายที่มากพอและมีค่าครอบคลุมค่าต่ำสุด-สูงสุดของตัวอย่างในอนาคตด้วย แล้วจึงนำไปสร้างสมการเทียบมาตรฐานใหม่ ส่วนค่าทำนายตัวอื่นที่ให้ผลค่า PRD ของ ADF NDF ADL และ DM ในระดับยอดเยี่ยม ดีมาก ดี และพอใช้ ควรมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มช่วงการทำนายตัวอย่างให้ดีขึ้น จะทำให้ความแม่นยำและความเที่ยงมากยิ่งขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพพื้นที่ปลูก การปลูก และลักษณะการดูแลสภาพแปลงปลูกที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งมีผลทำให้ค่าต่ำสุด และสูงสุดของ RPD มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นทุกปีจึงควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างจากสถานที่ปลูกตามภูมิภาคต่างๆ ฤดูกาลที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นการปรับสมการเทียบมาตรฐานให้เป็นปัจจุบันสำหรับการทำนายองค์ประกอบทางเคมีในห้องปฏิบัติการอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ควรมีการสร้างสมการเทียบมาตรฐานทำนายค่าการวิเคราะห์อื่นๆ เช่น ค่าการย่อยได้ของโภชนะต่างๆ ที่ต้องใช้สัตว์ทดลองซึ่งต้องใช้แรงงาน ขั้นตอนดำเนินการยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) และ คุณจันทกานต์ อรณันท์ ผู้เชี่ยวชาญด้านวิเคราะห์อาหารสัตว์ ที่จัดสรรงบประมาณจากโครงการ การทำนายคุณค่าทางโภชนะของพืชอาหารสัตว์ วัสดุเหลือใช้และผลพลอยได้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมด้วยเทคนิค Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) มาให้โครงการดำเนินการได้สำเร็จ

ขอขอบคุณ นางสาววรรณ อ่างทอง หัวหน้ากลุ่มวิจัยและพัฒนาการวิเคราะห์อาหารสัตว์ นางเฉลา พิทักษ์สินสุข นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ลำปาง ที่เป็นพี่ปรึกษาและคอยให้คำแนะนำตลอดการทำงานจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของกลุ่มวิจัยและพัฒนาการวิเคราะห์อาหารสัตว์ปทุมธานี และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์เพชรบุรี สำหรับการวิเคราะห์ทางเคมีและความช่วยเหลือให้งานครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- จันทกานต์ อรณนันทน์ เฉลา พิทักษ์สินสุข และสุรนนท์ น้อยอุทัย. 2553. การทำนายส่วนประกอบทางเคมีของ
หญ้าแพงโกล่าด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี. น. 309-327. ใน รายงานผลงานวิจัยกองอาหาร
สัตว์ประจำปี พ.ศ. 2553. กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- พิลานี ไวณนอมสัถย์. 2565. การพัฒนาการใช้ประโยชน์ไบโอและเหง้าสับปะรดอย่างครบวงจรและการประเมิน
มูลค่าและความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์. บทคัดย่อ. Available source: [http://www.thai-
explore.net/file_upload/submitter/file_doc/bf3347938bc2a45f1a65d5a2d202644b.pdf](http://www.thai-explore.net/file_upload/submitter/file_doc/bf3347938bc2a45f1a65d5a2d202644b.pdf).
January 1, 2020.
- รณฤทธิ์ ฤทธิธ. 2565. การสร้างระบบ Near Infrared Spectroscopy (NIRS) สำหรับการวิเคราะห์ประจำวัน.
เอกสารประกอบการฝึกอบรม ระหว่าง วันที่ 4-5 กรกฎาคม 2565 จัดโดย สำนักพัฒนาอาหารสัตว์,
กรมปศุสัตว์ , หน้า 12-25.
- สมคิด พรหมมา. 2550. วัตถุดิบอาหารสัตว์และข้อจำกัดการใช้. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาเทคโนโลยี
อาหารสัตว์. คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่. หน้า 56-80.
- สุริยะ สะวานนท์. 2561. การนำผลพลอยได้จากการปลูกสับปะรดมาใช้เป็นอาหารโคเนื้อ. วารสารเกษตรกรรม.
ปีที่ 4 ฉบับที่ 4. หน้า 27-30.
- อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล. 2548. การปรับแต่ง NIR Spectrum ก่อนการวิเคราะห์. เอกสารประกอบการฝึกอบรม
“การตรวจคุณภาพอาหารสัตว์ด้วยเทคนิค NIR Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก”
ระหว่างวันที่19-23 ธันวาคม 2548 จัดโดย หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีการตรวจสอบสินค้าโดยไม่
ทำลาย, สถาบันคั่นคว่ำและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
หน้า 62 – 81.
- AOAC. 2016. Official Methods of Analysis of AOAC International 20th ed. Maryland.
- ISO. 2009. International Standard (ISO 5983-2:2009). 2nd Edit. Animal feeding stuffs-Determination
of nitrogen content and calculation of crude protein content. Part 2: Block digestion and
steam distillation method. The International Organization for Standardization. Geneva.
- ISO. 2015. International Standard (ISO 11085:2015). 2nd Edit. Cereals, cereals-based products and
animal feeding stuffs-Determination of crude fat and total fat content by the Randall
extraction method. The International Organization for Standardization. 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,
The International Organization for Standardization. Geneva.
- Infrasoft International. 2005. WinISI III Manual. FOSSTecator AB. Hillerod. 192 p.

- Pintadis, S., P. Boonsaen, C. Hattakum, N. Homwong, and S. Sawanon. 2020. Effects of concentrate levels and pineapple stem on growth performance, carcass and meat quality of dairy steers. *Tropical Animal Health and Production*. 52. 1911–1917.
- Shenk, J.S and Westerhaus, M.O. 1991. Population definition, sample selection and calibration. *procedures for near infrared reflectance spectroscopy*. 31, 469-474.
- Sithiporn Associates Company. 2017. WIN ISI 4, Training Manual. 80 p.
- Westerhaus, M. 2014. Eastern analytical symposium award for outstanding achievements in near infrared spectroscopy: my contributions to near infrared spectroscopy. FOSS. Available source: https://www.fossanalytics.com/media/files/documents/papers/software/winisi/2014_nirnews_eas_markwesterhaus.pdf. June 16, 2022.
- 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. Stellenbosch, Western Cape. 301 p.