

การทำนายคุณค่าทางโภชนาของหญ้าอาหารสัตว์ 4 สกุล โดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

วรรณ อ่างทอง^{1/} รัตติกาล ปวงแก้ว^{2/} เยาวลักษณ์ แหม่งปิง^{3/}

บทคัดย่อ

การทดลองครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับทำนายคุณค่าทางโภชนา [วัตถุแห้ง (Dry matter, DM) โปรตีน (Crude protein, CP) ไขมัน (Ether extract, EE) เถ้า (Ash) ผนังเซลล์ (Neutral detergent fiber, NDF) ลิกโนเซลลูโลส (Acid detergent fiber, ADF) ลิกนิน (Acid detergent lignin, ADL) วัตถุแห้งที่ย่อยได้จริงโดยวิธีทางห้องปฏิบัติการ (*In vitro* true dry matter digestibility, IVTDM) และ ผนังเซลล์ที่ย่อยได้ (Neutral detergent fiber digestibility, NDFD)] ของหญ้าอาหารสัตว์ 4 สกุล (หญ้ารูซี่ แพงโกลา กินี และเนเปียร์) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและค่าการย่อยได้ของตัวอย่างโดยวิธีทางห้องปฏิบัติการ และวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Near infrared spectrophotometer (NIR) ที่ช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร สร้างสมการเทียบมาตรฐานโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป WINISI IV โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากหญ้าอาหารสัตว์จำนวน 600 ตัวอย่าง (หญ้ารูซี่ แพงโกลา กินี และเนเปียร์ ชนิดละ 150 ตัวอย่าง) ร่วมกับข้อมูลของหญ้าทั้ง 4 สกุล ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลจำนวน 3,611 ตัวอย่าง

ผลการทดลอง พบว่า สมการเทียบมาตรฐานสำหรับทำนายค่า DM CP EE Ash NDF ADF ADL IVTDM และ NDFD โดยไม่แยกตามชนิดหญ้ามามีค่า R^2 เท่ากับ 0.88 0.98 0.86 0.92 0.88 0.87 0.78 0.80 และ 0.73 ตามลำดับ และมีค่า RPD เท่ากับ 3.62 8.41 3.25 4.69 3.43 3.25 2.46 3.17 และ 2.52 ตามลำดับ ประสิทธิภาพของสมการเทียบมาตรฐานที่ได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ ISO สรุปได้ว่า สมการทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ดีจนถึงยอดเยี่ยมซึ่งสามารถนำไปใช้ทำนายคุณค่าทางโภชนาของหญ้าอาหารสัตว์ในระดับควบคุมคุณภาพได้ ยกเว้น สมการทำนายค่า ADL และ NDFD ที่สามารถใช้ได้ในระดับการคัดกรองซึ่งควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายต่อไป

คำสำคัญ : เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี หญ้าอาหารสัตว์ คุณค่าทางโภชนา

เลขทะเบียนวิชาการ : 68(2)-0214-016

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

^{2/} ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา ต.ปากช่อง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

^{3/} ศูนย์วิจัยและพัฒนามาตรฐานอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง ต.ท่าพระ อ.เมือง จ.ขอนแก่น

Prediction of nutritive value using near infrared reflectance spectroscopy in four genus of grass forages.

Wanna Angthong^{1/} Rattikan Pongkaew^{2/} Yaowalak Mangpung^{3/}

Abstract

An objective of the present study to establish a standard calibration equation for predicting nutritive values [dry matter (DM), crude protein (CP), ether extract (EE), Ash, neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), acid detergent lignin (ADL), *In vitro* true dry matter digestibility (IVTDMD) and neutral detergent fiber digestibility (NDFD)] of four genus of the grasses (Ruzi, Pangola, Guinea, and Napier). The grasses' chemical composition and in vitro digestibility were analyzed in laboratories. The spectra of the grasses were scanned using the Near Infrared Spectroscopy with a wavelength of 1100-2500 nanometers. A standard calibration equation was developed using the WINISI IV program with 600 datasets (150 datasets from each grass genus) in combination with 3,611 datasets from the existing database.

Results showed that the R^2 and RPD of the standard calibration equation to predict DM, CP, EE, Ash, NDF, ADF, ADL, IVTDMD, and NDFD of the 4 genus grasses were 0.88, 0.98, 0.86, 0.92, 0.88, 0.87, 0.78, 0.80, and 0.73, respectively, and 3.62, 8.41, 3.25, 4.69, 3.43, 3.25, 2.46, 3.17, and 2.52, respectively. In addition, the calibration equation was aligned with the ISO standard. In conclusion, the calibration equation to predict nutritive values of the 4-genus grasses ranged from good to excellent levels, except for the prediction of ADL and NDFD, which remained at a screening level. An additional study was requested to improve the precision of the prediction.

Keywords: NIRS, grass forages, nutritive value

Registered No. : 68(2)-0214-016

^{1/}Baurau of Animal Nutrition Development. Bangkadee, Muang, Pathumthanee.

^{2/}Nakhon Ratchasima Animal Nutrition Research and Development Center, Pakchong.

^{3/}Ruminant Feed Standard Research and Development Center, Muang, Khonkaen.

คำนำ

หญ้าอาหารสัตว์เป็นแหล่งอาหารหยาบที่สำคัญสำหรับใช้เลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้องที่สำนักพัฒนาอาหารสัตว์ได้แนะนำให้ปลูก หญ้าอาหารที่สำคัญ ได้แก่ หญ้ารูซี่ (*Urochloa ruziziensis*) ซึ่งเป็นหญ้าอายุค้างปี สามารถขึ้นได้ในดินที่มีความสมบูรณ์ต่ำโดยเฉพาะในดินร่วนปนทราย ไม่ทนต่อสภาพชื้นแฉะ แต่ทนต่อการเหยียบย่ำของสัตว์ (กรมปศุสัตว์, 2545ก) หญ้าแพงโกลา (*Digitaria eriantha*) ซึ่งเป็นหญ้าที่มีอายุหลายปี เหมาะสำหรับการทำหญ้าแห้ง หน่น้ำท่วมขัง ปลูกได้ในพื้นที่ลุ่ม และพื้นที่ดอน (กรมปศุสัตว์, 2563) หญ้าสกุลกินี (*Megathyrsus maximus*) ซึ่งเป็นหญ้าอายุหลายปี ทนแล้ง ทนต่อการเหยียบย่ำ ทนต่อการเผาไหม้ และทนต่อร่มเงา เหมาะสำหรับการทำหญ้าหมัก หรือหญ้าแห้ง ปลูกได้เกือบทุกสภาพพื้นที่ (กรมปศุสัตว์, 2545ข) และหญ้าสกุลเนเปียร์ (*Cenchrus purpureus*) ซึ่งเป็นหญ้าที่มีอายุหลายปีเจริญเติบโตได้ดีในดินร่วนปนทรายจนถึงดินเหนียว ถ้ามีการให้น้ำจะได้ผลผลิตสูงและมีคุณภาพดี (กรมปศุสัตว์, 2545ค)

การประกอบสูตรอาหารสัตว์ต้องใช้ข้อมูลคุณค่าทางโภชนาของหญ้า เช่น วัตถุแห้ง (Dry matter, DM) โปรตีน (Crude protein, CP) ไขมัน (Ether extract, EE) เถ้า (Ash) และเยื่อใยต่างๆ ได้แก่ ผนังเซลล์ (Neutral detergent fiber, NDF) ลิกโนเซลลูโลส (Acid detergent fiber, ADF) และลิกนิน นอกจากนี้ ค่าการย่อยได้ที่แท้จริงของวัตถุแห้ง (*In vitro* true dry matter digestibility, IVTDMD) และค่าการย่อยได้ของ NDF (Neutral detergent fiber digestibility, NDFD) สามารถใช้ในการบ่งชี้คุณภาพของอาหารสัตว์ เช่น ปริมาณสารอาหารที่สัตว์สามารถนำไปใช้ได้ และอัตราการไหลผ่านของอาหารออกจากกระเพาะหมัก เป็นต้น (Merten, 2019) Moore and Undersander (2002) ใช้ค่า NDFD ในการคำนวณค่า Relative forage quality (RFQ) ซึ่งเป็นค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพของพืชแห้ง โดยวิธีการวิเคราะห์หาค่า IVTDMD และ NDFD สามารถดำเนินการได้ในห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่อง Daisy[®] (Holden, 1999) อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์หาค่า IVTDMD และ NDFD ใช้เวลาในการวิเคราะห์ไม่น้อยกว่า 5 วัน โดยใช้ของเหลวจากกระเพาะรูเมนร่วมกับการวิเคราะห์ทางเคมี ดังนั้น หากสามารถทำนายองค์ประกอบทางเคมีและค่า IVTDMD และ NDFD ด้วยเทคนิค NIRS (Near infrared spectroscopy) ได้แม่นยำก็จะช่วยลดเวลา ลดความสิ้นเปลืองในการเลี้ยงสัตว์ทดลอง และลดการใช้สารเคมีได้

การทำนายคุณค่าทางโภชนาของวัตถุดิบอาหารสัตว์ด้วยเทคนิค NIRS เริ่มต้นจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration equation) ที่มีความแม่นยำและผ่านการทวนสอบความใช้ได้ของสมการ (Validation) ตลอดจนการผ่านการประเมินประสิทธิภาพตามวิธีการมาตรฐานสากล ข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาสมการเทียบมาตรฐานจะต้องมีค่าโภชนาที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอตั้งแต่ระดับต่ำสุดไปจนถึงค่าสูงสุด มีความหลากหลายของแหล่งพื้นที่การผลิต ฤดูกาล และกระบวนการที่ได้มา (Williams *et al.*, 2019) Sapienza *et al.* (2008) แนะนำว่า จำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานไม่ควรต่ำกว่า 80–100 ตัวอย่าง การสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับใช้ทำนายคุณค่าทางโภชนาของหญ้าอาหารสัตว์ส่วนใหญ่แยกตามชนิดของหญ้าซึ่งหากมีหญ้าหลายชนิดก็ต้องมีการทำนายโดยการสแกนตัวอย่างหญ้าหลายครั้ง การสร้างสมการเทียบมาตรฐานที่สามารถใช้ทำนายคุณค่าทางโภชนาของหญ้าอาหารสัตว์ได้หลายชนิดโดยการสแกนเพียงครั้งเดียวจะช่วยลดความยุ่งยากและลดภาระงาน ดังนั้น การทดลองครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมการเทียบมาตรฐานเพียงสมการเดียวที่สามารถใช้ทำนายคุณค่าทางโภชนาของหญ้าอาหารสัตว์ 4 สกุล จำนวน 9 รายการ ได้อย่างแม่นยำ

อุปกรณ์ และวิธีการ

ดำเนินการทดลองที่กลุ่มวิจัยและพัฒนาการวิเคราะห์อาหารสัตว์ ตำบลบางกะดี อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา ตำบลปากช่อง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา และศูนย์วิจัยและพัฒนามาตรฐานอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง ตำบลท่าพระ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ 2565 ถึง มกราคม 2566

การเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

รวบรวมตัวอย่างหญ้าที่แห้งแล้ว หญ้าแพงโกลา หญ้าสกุлкиนี และหญ้าสกุเลนเปียร์ จากแปลงรวบรวมพันธุ์พืชอาหารสัตว์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา และตัวอย่างของเกษตรกรในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และภาคเหนือ ชนิดละ 150 ตัวอย่าง หญ้ามีอายุการตัด 35 ถึง 90 วัน สุ่มเก็บตัวอย่างหญ้าสดประมาณ 2 กิโลกรัม แล้วนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นบดด้วยเครื่องบดผ่านตะแกรงที่มีรูขนาด 1 มิลลิเมตร บรรจุลงในถุงซิปลาสติกและเก็บไว้ในที่อุณหภูมิห้องสำหรับการวัดสเปกตรัมและการวิเคราะห์ทางเคมี

การวัดสเปกตรัม วิเคราะห์ทางเคมี และค่าการย่อยได้โดยวิธีทางห้องปฏิบัติการ

วัดค่าสเปกตรัม วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและค่าการย่อยได้ของตัวอย่างหญ้าอาหารสัตว์ทั้ง 4 สกุลตามขั้นตอนดังนี้

1) สแกนตัวอย่างเพื่อวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIR ยี่ห้อ FOSS รุ่น DS2500 (Foss Analytical A/S) ในช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร ด้วยโปรแกรม ISIScan NOVA วัด 2 ซ้ำต่อตัวอย่าง (Duplicates)

2) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ค่าความชื้น ตามวิธีการของ AOAC 930.15 (2016) (คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ DM ด้วยการนำ 100 หักลบด้วยค่าความชื้น) CP โดยหาเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนด้วยวิธี Kjeldahl แล้วคูณด้วยแฟกเตอร์ 6.25 ตามวิธีการของ AOAC 984.13 (2016) EE ตามวิธีการของ ISO 11085 (2015) Ash ตามวิธีการของ ISO 5982 (2002) NDF ตามวิธีการของ AOAC 2002.04 (2016) ADF และลิกนิน (Acid detergent lignin, ADL) ตามวิธีการของ AOAC 973.18 (2016)

3) วิเคราะห์ค่า IVTDMD ของตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Daisy^{II} ตามวิธีการของ ANKOM Technology (2017) และคำนวณค่า NDFD ตามวิธีการของ Muttoni *et al.* (2013) โดยส่วนของ NDF หลังการบ่มย่อยด้วยเครื่อง ANKOM 200/220 Fiber analyzer ตามวิธีการของ Osborne (2004) นำมาคำนวณค่า IVTDMD และ NDFD ดังนี้

$$\text{IVTDMD (\% DM)} = \{W2 - [W3 - (W1 \times C1)]\} \times 100 / W2$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักถุงเปล่า

W2 คือ น้ำหนักตัวอย่าง (%DM)

W3 คือ น้ำหนักถุง + น้ำหนักตัวอย่างหลังวิเคราะห์หาค่าผนังเซลล์ที่เหลืออยู่หลังการบ่ม

C1 คือ Blank bag correction (น้ำหนักถุงเปล่าหลังการบ่ม / น้ำหนักถุงเปล่าเริ่มต้น)

$$\text{NDFD (\% NDF)} = \{1 - [(100 - \text{IVTDMD}) / \text{NDF}] \times 100$$

เมื่อ NDF คือ ผนังเซลล์ (% DM) ก่อนการบ่ม

วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ (Standard error of laboratory, SEL)

วิเคราะห์หาค่า SEL ของคุณค่าทางโภชนาของหญ้าอาหารสัตว์ทั้ง 4 สกูล ด้วยวิธี Duplicate blind test ใช้ตัวอย่างหญ้าสกลละ 10 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างนำมาแบ่งออกเป็น 2 ตัวอย่างย่อย (สกลละ 20 ตัวอย่างย่อย) แล้วสุ่มส่งวิเคราะห์ 2 ชุด โดย ชุดที่ 1 สุ่มส่ง 10 ตัวอย่าง และชุดที่ 2 คือ 10 ตัวอย่างที่เหลือ แต่ละตัวอย่างให้วิเคราะห์เพียง 1 ซ้ำ ผลวิเคราะห์แต่ละรายการนำมาคำนวณหาค่า SEL โดยใช้สมการ

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

D = ผลต่างผลวิเคราะห์ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ของแต่ละตัวอย่าง

n = จำนวนตัวอย่าง (10)

นำค่า SEL ไปใช้ประกอบการคัดเลือกและประเมินสมการเทียบมาตรฐานที่ได้ โดยค่า SEL ต้องมากกว่า 2 เท่าของค่า Standard error of prediction (SEP) (SA, 2017)

การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและการทวนสอบความใช้ได้ของสมการ

สร้างและทวนสอบความใช้ได้ของสมการเทียบมาตรฐานโดยมีขั้นตอนดังนี้

1) การสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

นำข้อมูลสเปกตรัม และคุณค่าทางโภชนาของหญ้าทั้ง 4 สกูลๆ ละ 150 ตัวอย่าง มารวมกับฐานข้อมูลที่มีอยู่เดิม (หญ้ารูซี่ 181 ข้อมูล หญ้าแพงโกลา 430 ข้อมูล หญ้าสกลกินี 1612 ข้อมูล และหญ้าสกลเนเปียร์ 1388 ข้อมูล) จากนั้นแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่มที่เป็นอิสระต่อกัน คือ กลุ่มที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐาน เพื่อใช้ทำนายค่า DM CP EE Ash NDF ADF ADL IVTDMD และ NDFD และกลุ่มทวนสอบความใช้ได้ของสมการ ซึ่งมีจำนวนไม่ต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ของกลุ่มสร้างสมการเทียบมาตรฐาน สร้างสมการทำนายด้วยวิธี Partial least squares (PLS) และ Modified partial least squares (MPLS) โดยไม่มีการปรับแต่งสเปกตรัม และมีการปรับแต่งสเปกตรัมแบบ 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) ตามคำแนะนำในคู่มือการใช้เครื่อง NIRS (Infrasoft International, 2005) ทำให้ได้สมการเทียบมาตรฐานของแต่ละรายการจำนวน 40 สมการ

สมการเทียบมาตรฐานทั้ง 40 สมการ มีการคำนวณหาค่า R^2 (Coefficient of determination) ควร มีค่าใกล้ 1 ค่า SEC (Standard error of calibration) และค่า SECV (Standard error of cross validation) ซึ่งควรมีค่าต่ำ (Infrasoft International, 2005) เพื่อใช้ในการพิจารณาเลือกสมการเทียบมาตรฐานที่ดีที่สุดให้เหลือเพียง 3 สมการ โดยพิจารณาจากค่า R^2 ที่มีค่าสูง และค่าผลต่างของ SEC และ SECV ที่มีค่าต่ำ ดัดแปลงจากวิธีการของ SA (2017) ก่อนนำสมการที่ได้ไปทวนสอบความใช้ได้ของสมการต่อไป

2. การทวนสอบความใช้ได้ของสมการ

นำสมการที่คัดเลือกจำนวน 3 สมการ มาทวนสอบความใช้ได้ของสมการเพื่อวัดประสิทธิภาพของสมการว่าสามารถใช้ในการประเมินค่าได้แม่นยำมากน้อยเพียงใด โดยนำสเปกตรัมของตัวอย่างกลุ่มทวนสอบมาประเมินความถูกต้องแม่นยำโดยใช้ค่าสถิติต่างๆ ได้แก่ ค่า SEP ควรมีค่าน้อยกว่าสองเท่าของ SEL ($SEP < 2 SEL$) (โดยค่า SEL ที่ใช้ในการพิจารณาเลือกสมการเป็นค่าที่เฉลี่ยจากหญาทั้ง 4 สกูล) ค่า Bias เฉลี่ยระหว่างค่าที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์และค่าที่ได้จากเทคนิค NIRS ควรมีค่าน้อยกว่า 0.55 เท่าของค่า SEC ($Bias < 0.55 SEC$) ค่า Root mean square error of prediction (RMSEP) หรือค่า Standard error of prediction correction (SEP(C)) น้อยกว่า 1.29 เท่าของค่า SEC ($SEP(C) < 1.29 SEC$) ค่าความชัน (Slope) มีค่าใกล้ 1 ตามวิธีการของ SA (2017) นอกจากนี้ ได้พิจารณาระดับชั้นคุณภาพของสมการด้วยค่า RPD (Ratio of performance to deviation) ตามวิธีการของ Williams *et al.* (2019) ดังแสดงใน ตารางที่ 1 เกณฑ์ที่ใช้ในการคัดเลือกสมการตามที่ได้กล่าวถึง จะเลือกสมการเทียบมาตรฐานที่ดีที่สุดเพียง 1 สมการ สำหรับนำไปใช้ในการทำนายองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง NIR ต่อไป

ตารางที่ 1 ความหมายของค่า RPD ที่ใช้ในการจัดลำดับชั้นของสมการเทียบมาตรฐาน

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

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 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P > 0.05$) ซึ่งค่า T_b คำนวณได้ ดังนี้

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

เมื่อ 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 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P>0.05$) ซึ่งค่า T_{UE} คำนวณได้ ดังนี้

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

เมื่อ $F_{(\alpha, v, M)}$ คือ ค่า F Value

SEC คือ Standard error of calibration (ค่าความผิดพลาดมาตรฐานของกลุ่มสร้างสมการ)

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) โดย p คือ number of terms หรือ PLS factors of the model

3.3 การตรวจสอบ Slope เป็นความชันของกราฟการกระจาย (Scatter plots) ระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้จริงเป็นค่าอ้างอิง (แกน y) กับค่าที่ทำนายที่ได้จากสมการเทียบมาตรฐาน ด้วยเครื่อง NIRS (แกน x) ซึ่งจะสอดคล้องกับสมการเส้นตรง โดยมี $y = a + b\hat{y}$ ค่า Slope b และ Intercept a คำนวณได้ตามสมการ ดังนี้

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

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

$S_{\bar{y}y}$ คือ ความแปรปรวนร่วม (Covariance) ระหว่างค่าทำนายกับค่าจริง

$S_{\bar{y}}^2$ คือ ความแปรปรวน (Variance) ของค่าทำนายในกลุ่มทดสอบ

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

$\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าอ้างอิงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน

จากนั้นทดสอบค่า Slope ที่คำนวณได้โดยใช้ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ดังสมการ

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

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

S_{res} คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าผลต่างระหว่างวิธี

t_{obs} คือ ค่า t สังเกต

n คือ จำนวนตัวอย่างในกลุ่มทดสอบ

y_i คือ ค่าอ้างอิงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน

$\hat{y}_i$ คือ ค่าที่ทำนายได้จากสมการเทียบมาตรฐาน

หากค่า t_{obs} น้อยกว่า $t_{(1-\alpha/2)}$ ซึ่งเป็นค่า t ที่ได้จากตารางที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ($P>0.05$) แสดงว่าความชันของกราฟไม่แตกต่างจาก 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ผลการทดลอง และวิจารณ์

คุณค่าทางโภชนาการ สมการเทียบมาตรฐาน และผลการทวนสอบความใช้ได้ของสมการสำหรับใช้ทำนายคุณค่าทางโภชนาการของหญ้า 4 สกุล มีรายละเอียดดังนี้

คุณค่าทางโภชนาการของหญ้า 4 สกุล

คุณค่าทางโภชนาการของหญ้าสกุลรูซี่ แพงโกลา กินี และเนเปียร์ แสดงในตารางที่ 2 ผลการทดลอง พบว่าข้อมูลค่าองค์ประกอบทางเคมีและค่าการย่อยได้ของหญ้าอาหารสัตว์ทั้ง 4 สกุล มีค่าพิสัยกว้างกว่าข้อมูลที่รายงานโดยเนลา และคณะ (2553) และรายงานของคณะกรรมการความต้องการโภชนาการโคนมในประเทศไทย (2563) กล่าวได้ว่า ข้อมูลจากการทดลองครั้งนี้มีความเหมาะสมในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน อนุพันธ์ (2548) รายงานว่า สมการเทียบมาตรฐานที่ดีควรสร้างมาจากตัวอย่างที่ได้รับการสุ่มเก็บให้เป็นตัวแทนของตัวอย่างในอนาคตสำหรับใช้ในเทคนิค NIRS และกลุ่มตัวอย่างต้องมีความหลากหลายในด้านพันธุ์ พื้นที่การผลิต ฤดูกาลผลิต และอายุการเจริญเติบโต นอกจากนี้ ค่า SEL ของค่าโภชนาการของหญ้าทั้ง 4 สกุล มีค่าต่ำซึ่งบ่งบอกถึงความแม่นยำในการวิเคราะห์ทางเคมีของคุณค่าทางโภชนาการ ยกเว้น IVTDMD และ NDFD ที่มีค่าสูงอาจเป็นลักษณะของความแปรปรวนตามธรรมชาติของวิธีการเนื่องจากวิธีการดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับสัตว์ทดลองที่ใช้ในการเก็บของเหลวจากกระเพาะรูเมนมาใช้ในการวิเคราะห์ร่วมด้วยซึ่งจำนวนประชากรจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในแต่ละครั้งอาจมีความแปรปรวนมาจากช่วงเวลาการให้อาหาร อาหารที่ใช้เลี้ยง เวลาการเก็บของเหลว หรือค่า pH ของของเหลวจากกระเพาะรูเมนที่อาจส่งผลต่อจำนวนและสัดส่วนของประชากรจุลินทรีย์เหล่านั้น (Vargas *et al.*, 2009; DePeters and George, 2015)

ตารางที่ 2 จำนวนตัวอย่าง คุณค่าทางโภชนา และค่าความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ
ของหญ้า 4 สกุล

Item		DM	CP	EE	Ash	NDF	ADF	Lignin	IVTDMD	NDFD
		%	<----- % DM ----->						%	% NDF
Ruzi	N	331	330	166	176	301	301	209	171	176
	Minimum	85.45	1.18	0.76	4.92	51.87	21.25	1.88	52.45	32.67
	Maximum	95.78	20.15	3.17	16.46	81.79	49.85	6.34	81.47	72.81
	Average	89.46	10.27	1.67	11.9	64.13	33.66	3.97	71.42	56.56
	SD	2.48	3.67	0.44	2.42	5.17	5.28	0.62	6.29	7.44
	SEL	0.27	0.22	0.13	0.46	0.45	0.41	0.18	2.09	3.26
Pangola	N	584	593	155	155	580	581	484	153	153
	Minimum	83.65	2.42	1.15	5.43	55.49	29.96	2.29	52.01	30.59
	Maximum	96.52	19.33	2.38	8.71	73.08	43.32	6.66	76.54	61.41
	Average	89.61	7.76	1.68	6.78	64.59	36.53	3.94	65.19	47.61
	SD	1.57	2.91	0.31	0.64	2.84	2.78	0.77	5.35	7.30
	SEL	0.28	0.2	0.19	0.19	0.52	0.37	0.19	2.24	3.44
Guinea	N	1756	1761	999	1275	1543	1621	1204	173	173
	Minimum	84.42	2.35	0.1	3.84	53.18	23.97	2.08	43.35	16.85
	Maximum	97.29	20.71	2.4	17.93	82.75	59.46	8.55	78.56	67.71
	Average	92.57	9.64	1.21	10.08	70.55	41.11	4.06	65.43	49.38
	SD	2.24	3.45	0.42	2.47	4.52	4.53	1.12	6.31	8.54
	SEL	0.43	0.35	0.2	1.15	1.15	0.9	0.27	1.67	2.44
Napier	N	1553	1553	1553	1552	1526	1362	1551	170	170
	Minimum	84.31	2.54	0.34	4.23	50.82	25.66	2.00	47.57	14.52
	Maximum	95.93	25	3.48	19.82	76.17	49.72	7.07	80.67	64.62
	Average	91.39	13.21	1.82	11.27	61.98	36.89	3.47	66.48	46.14
	SD	1.49	4.4	0.47	2.97	5.13	4.5	0.78	7.61	10.53
	SEL	0.34	0.28	0.19	0.25	0.87	0.57	0.21	2.08	3.41
SEL เฉลี่ย		0.33	0.26	0.18	0.51	0.75	0.56	0.21	2.02	3.14

N (Number of sample), SD (Standard deviation), SEL (Standard error of laboratory)

ค่าทางสถิติของชุดข้อมูลสำหรับใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานและชุดข้อมูลสำหรับใช้ในการทวนสอบความใช้ได้ของสมการแสดงในตารางที่ 3 โดยจะเห็นได้ว่า คุณค่าทางโภชนาทุกรายการของชุดข้อมูลสำหรับสร้างสมการเทียบมาตรฐานมีค่าพิสัยที่ครอบคลุมชุดข้อมูลสำหรับใช้ทวนสอบความใช้ได้ของสมการซึ่งเป็นตามหลักการที่รายงานโดย William *et al.*, (2019)

ตารางที่ 3 คุณค่าทางโภชนาของหญ้า 4 สกกุล ของชุดสร้างสมการเทียบมาตรฐาน และชุดทวนสอบความใช้ได้ของสมการ

Parameter	Calibration set					Validation set				
	N	Min.	Max.	Mean	SD	N	Min.	Max.	Mean	SD
Dry matter, %	3235	85.86	96.00	91.59	2.16	744	85.94	95.97	91.44	2.06
Crude protein, %DM	3256	1.18	25.00	10.72	4.29	808	1.94	25.00	10.61	4.22
Ether extract, %DM	2248	0.07	5.32	1.60	0.54	509	0.09	3.01	1.59	0.51
ASH, %DM	2450	4.40	20.02	10.63	2.87	568	4.23	19.73	10.46	2.76
NDF, %DM	2987	48.86	78.13	65.64	5.91	713	48.91	78.02	65.62	5.74
ADF, %DM	3091	21.94	56.90	38.78	5.06	740	24.20	52.62	38.35	4.78
Lignin, %DM	2617	2.00	10.09	3.80	0.99	615	2.05	7.83	3.76	0.88
IVTDM, %	518	39.32	83.47	67.12	7.34	110	41.15	80.96	67.03	7.26
NDFD, %NDF	518	14.52	72.66	50.15	9.55	109	14.88	67.20	50.93	9.06

N (Number of sample), Min. (Minimum), Max. (Maximum), SD (Standard deviation)

สมการเทียบมาตรฐานและการทวนสอบความใช้ได้ของสมการ

สร้างสมการเทียบมาตรฐานทำนายคุณค่าทางโภชนาของหญ้า 4 สกกุล ด้วยโปรแกรม WinISI IV ได้มีการเลือกรูปแบบสมการ รูปแบบการปรับแต่งสเปกตรัม และคัดเลือกตัวแปร (Factor, F) ที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการสร้างสมการเพื่อให้ได้ข้อมูลของสมการเทียบมาตรฐานที่ดีที่สุดมีค่าสถิติต่างๆ แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสถิติของสมการเทียบมาตรฐาน และการทวนสอบความใช้ได้ของสมการ

Nutrients	<----- Treatment ----->			F	Calibration set				Validation set					
					N	R ²	SEC	SECV	N	R ²	RMSEP	SEP	Bias	RPD
DM, %	MPLS	None	2,10,10,1	13	3235	0.88	0.76	0.79	744	0.92	0.57	0.57	-0.04	3.62
CP, %DM	MPLS	SNVD	1,4,4,1	15	3256	0.98	0.61	0.63	808	0.99	0.50	0.50	0.02	8.41
EE, %DM	MPLS	None	2,10,10,1	13	2248	0.86	0.20	0.21	509	0.91	0.16	0.16	-0.01	3.25
Ash, %DM	MPLS	SNVD	1,8,4,1	16	2450	0.92	0.81	0.84	568	0.96	0.59	0.59	-0.06	4.69
NDF, %DM	MPLS	SNVD	2,10,10,1	11	2987	0.88	2.07	2.14	713	0.92	1.67	1.67	0.01	3.43
ADF, %DM	MPLS	None	2,10,10,1	12	3091	0.87	1.84	1.92	740	0.91	1.47	1.47	-0.07	3.25
Lignin, %DM	MPLS	SNVD	2,10,10,1	12	2617	0.78	0.45	0.48	615	0.83	0.36	0.36	-0.02	2.46
IVTDM, %	MPLS	SNVD	1,5,5,1	11	518	0.80	3.26	3.47	110	0.90	2.30	2.29	0.17	3.17
NDFD, %NDF	MPLS	SNVD	1,5,5,1	11	518	0.73	4.82	5.13	109	0.84	3.62	3.60	0.10	2.52

N (Number of sample), SD (Standard deviation)

สมการสำหรับทำนายค่า CP อยู่ในเกณฑ์ดีที่สุด (R² มีค่าตั้งแต่ 0.98 ขึ้นไป) สมการทำนายค่า Ash อยู่ในเกณฑ์สามารถนำไปใช้ได้ในทุกกระบวนการรวมทั้งในระดับการควบคุมคุณภาพได้ (R² มีค่า 0.92-0.96) DM EE NDF และ ADF อยู่ในเกณฑ์นำไปใช้ในการเฝ้าระวังในทุกกระบวนการและใช้ในงานวิจัยได้ (R² มีค่า 0.83-0.90)

ส่วนสมการทำนายค่า ADL IVTDMD และ NDFD อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สามารถใช้ในการตรวจสอบคัดกรอง (R^2 มีค่า 0.66-0.81) เมื่อนำสมการเทียบมาตรฐานที่ได้มาทวนสอบความใช้ได้ของสมการโดยพิจารณาจากค่า RPD พบว่ามีค่าตั้งแต่ 3.00 ขึ้นไป จัดอยู่ในเกณฑ์ดี สามารถนำไปใช้ในระดับควบคุมคุณภาพได้ (ตารางที่ 1) ยกเว้นสมการทำนายค่า ADL และ NDFD ที่มีค่า 2.46 และ 2.52 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์พอใช้ สามารถนำไปใช้ใน ระดับการคัดกรอง (William *et al.*, 2019) ในการทดลองครั้งนี้พบว่าสมการทำนายค่า CP มีค่า R^2 สูง เช่นเดียวกับรายงานของ รำไพ และคณะ (2551) ที่รวบรวมตัวอย่างหญ้าเขตร้อน จำนวน 11 ชนิด สร้างสมการทำนายค่า CP EE Ash NDF ADF และ ADL มีค่า R^2 เท่ากับ 0.98 0.79 0.83 0.90 0.93 และ 0.53 ตามลำดับ ในการทดลองดังกล่าว มีค่า R^2 ของสมการทำนายค่า NDF และ ADF สูงกว่าการทดลองครั้งนี้ ส่วนสมการทำนายค่าอื่นๆ มีค่าต่ำกว่ารายงานในครั้งนี เมื่อนำไปพิจารณากับรายงานต่างๆ ที่พบ เช่น ในรายงานของ Massignani *et al.*, (2021) ที่สร้างสมการทำนายพืชอาหารสัตว์ในพื้นที่ตอนใต้ของประเทศบราซิล โดยใช้ตัวอย่างจากพืชตระกูลหญ้า 26 species และพืชตระกูลถั่ว 6 species มาสร้างเป็นสมการเดียว ได้สมการทำนายค่า CP NDF และ ADF มีค่า R^2 เท่ากับ 0.98 0.94 และ 0.95 ตามลำดับ มีค่า RPD เท่ากับ 4.12 2.83 และ 3.52 ตามลำดับ ส่วนสมการทำนายค่าการย่อยได้ของอาหารสัตว์พบมีรายงานของ Mazabel *et al.* (2020) ซึ่งสร้างสมการทำนายค่า IVTDMD ของหญ้าชิกแนลเลื่อย (*Brachiaria humidicola*) มีค่า R^2 และ RPD เท่ากับ 0.22 และ 3.63 ตามลำดับ รายงานของ Zahera *et al.*, (2022) สร้างสมการอาหารหยาบรวมโดยใช้ตัวอย่างหญ้าอาหารสัตว์ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และอุตสาหกรรม มาสร้างเป็นสมการเดียว เพื่อทำนายค่า IVTDMD และ NDFD มีค่า R^2 เท่ากับ 0.68 และ 0.55 ตามลำดับ และมีค่า RPD เท่ากับ 1.40 และ 1.06 ตามลำดับ และมีรายงานของ Samadi *et al.* (2020) สร้างสมการทำนายค่า IVTDMD ของวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรและอุตสาหกรรมมีค่า R^2 และ RPD เท่ากับ 0.86 และ 3.91 ตามลำดับ การใช้เทคนิค NIRS ทำนายค่าการย่อยได้โดยวิธีทางห้องปฏิบัติการ พบว่าความแม่นยำของสมการยังมีความแตกต่างกันตั้งแต่ระดับพอใช้จนถึงดี เนื่องจากข้อมูลการศึกษาค่าการย่อยได้ของอาหารสัตว์ยังมีค่อนข้างจำกัด เช่นเดียวกับในการศึกษาครั้งนี้ที่สมการทำนายค่า IVTDMD อยู่ในระดับดี ส่วนสมการทำนายค่า NDFD อยู่ในระดับพอใช้ ซึ่งความแม่นยำของสมการมีปัจจัยสำคัญมาจากผลการวิเคราะห์จริงที่นำมาใช้เป็นข้อมูล ซึ่งความแปรปรวนนั้นมีปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น ความแม่นยำของผลวิเคราะห์ ความสม่ำเสมอของตัวอย่างในการสแกน ช่วงระยะเวลาที่วิเคราะห์จริงกับเวลาในการสแกน รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการก็อาจส่งผลต่อลักษณะสเปกตรัมของตัวอย่างที่สแกนได้ (William *et al.*, 2019; Samadi *et al.*, 2020)

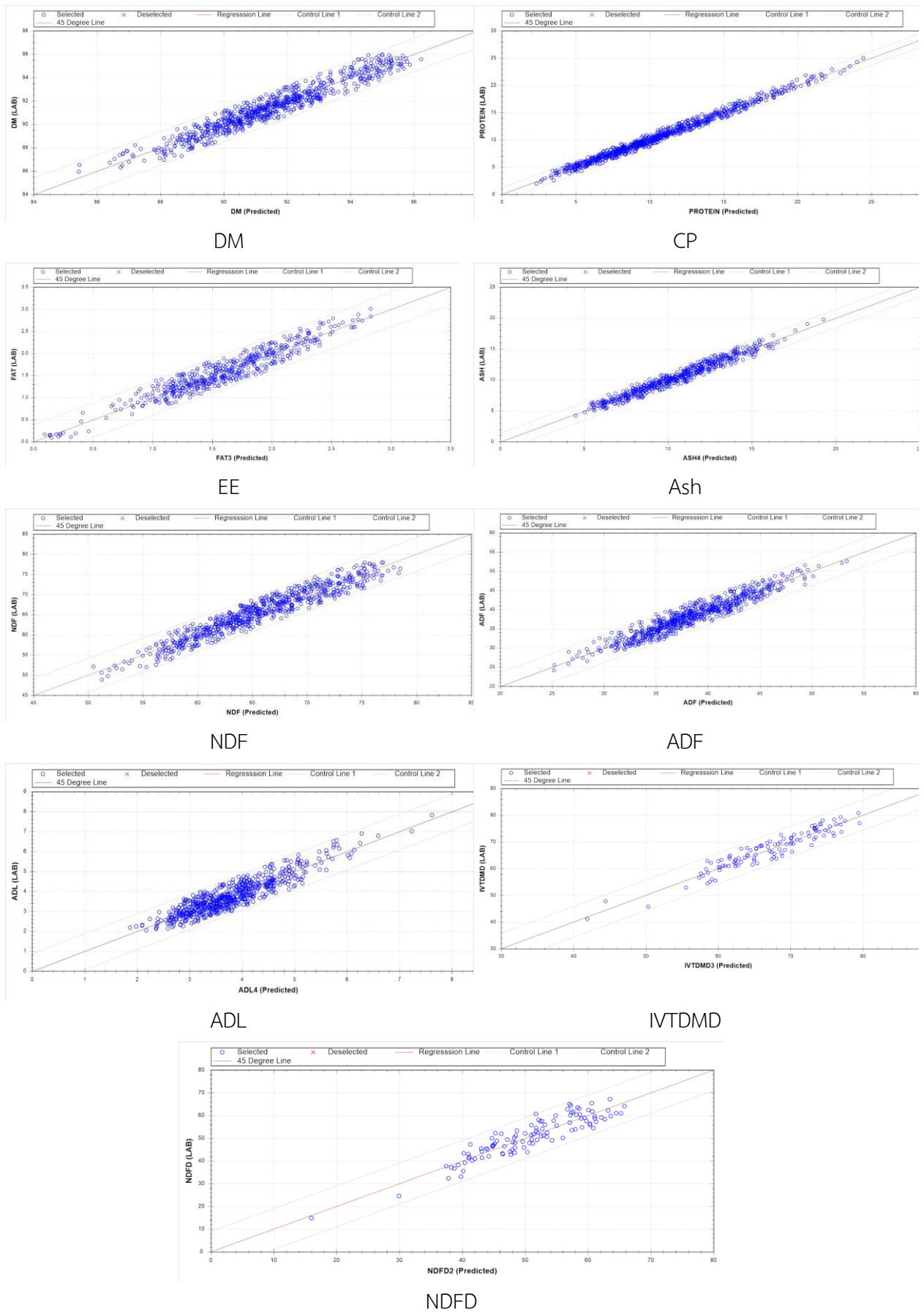
ผลการประเมินประสิทธิภาพตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017 ของสมการเทียบมาตรฐานแสดงในตารางที่ 5 ผลการทดลอง พบว่า ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จริงด้วยวิธีทางเคมีและค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเทียบมาตรฐาน มีค่า Bias SEP และ Slope ที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (Criteria) แสดงว่าสมการเทียบมาตรฐานทั้งหมดมีประสิทธิภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ISO 12099: 2017

ตารางที่ 5 ค่าสถิติที่ได้จากการประเมินประสิทธิภาพของสมการเทียบมาตรฐานของ ISO 12099: 2017

Parameter	Bias			SEP			Slope			
	Calculated	Criterion	Result	Calculated	Criterion	Result	Observed	Calculated	Criterion	Result
	value	(T_b)		value	(T_{UE})		value (t_{obs})	value	($t_{(1-\alpha/2)}$)	
DM, %	-0.043	0.041	Pass	0.571	0.794	Pass	0.200	1.002	1.963	Pass
CP, %DM	0.024	0.035	Pass	0.502	0.642	Pass	-0.006	1.000	1.963	Pass
EE, %DM	-0.005	0.014	Pass	0.157	0.214	Pass	0.002	1.000	1.965	Pass
Ash, %DM	-0.050	0.048	Pass	0.588	0.853	Pass	0.014	1.000	1.964	Pass
NDF, %DM	0.011	0.123	Pass	1.671	2.172	Pass	0.011	1.000	1.963	Pass
ADF, %	-0.072	0.106	Pass	1.469	1.930	Pass	0.009	1.000	1.963	Pass
ADL, %DM	-0.017	0.028	Pass	0.359	0.476	Pass	0.031	1.001	1.964	Pass
IVTDMD,	0.167	0.433	Pass	2.292	3.669	Pass	0.010	1.000	1.982	Pass
NDFD, %NDF	0.098	0.684	Pass	3.603	5.425	Pass	-0.010	1.000	1.982	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-test value), NDF (Neutral detergent fiber), ADF (Acid detergent fiber), IVTDMD (*In vitro* true dry matter digestibility), NDFD (Neutral detergent fiber digestibility)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วิเคราะห์ทางเคมีกับค่าที่ทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานของหญ้า 4 สกกุล แสดงในภาพที่ 1 และพบว่า มีความสัมพันธ์ของค่าที่ทำนายโดยสมการเทียบมาตรฐานกับค่าที่วัดได้จริงจากการวิเคราะห์ทางเคมีของค่า CP และ Ash โดยมีค่าการกระจายใกล้กับเส้น 45 องศา (Target line) และมีค่าการกระจายที่ครอบคลุมทั้งค่าต่ำและค่าสูงจึงมีผลให้มีค่า R^2 และค่า RPD สูง (ตารางที่ 3 และตารางที่ 4) ส่วนกราฟของ DM EE NDF ADF และ IVTDMD มีค่าการกระจายครอบคลุมค่าสูงและต่ำแต่มีรัศมีที่ห่างจากเส้น 45 องศา ส่วนกราฟ ADL และ NDFD มีค่าส่วนมากอยู่บริเวณส่วนกลางซึ่งที่ไม่ครอบคลุมค่าต่ำหรือสูง โดย ADL มีค่าหนาแน่นบริเวณค่าต่ำและกลาง ส่วน NDFD มีค่าหนาแน่นบริเวณค่อนข้างสูง แม้ข้อมูลที่ใช้มีจำนวนตั้งแต่ 500 ชุดข้อมูล ทั้งนี้อาจเกิดจากลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าทั้ง 4 สกกุล ที่มีความแตกต่างกันตามธรรมชาติ เช่น หญ้าสกุลเนเปียร์มีลักษณะของลำต้นใหญ่ เมื่อเทียบกับหญ้าในสกุลอื่น และหญ้าแต่ละสกุลมีสัดส่วนของใบต่อลำต้นที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีส่วนที่เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์มากกว่า อย่างไรก็ตามสมการที่ได้นี้ยังควรต้องการนำตัวอย่างที่นอกเหนือจากกลุ่มที่นำมาใช้สร้างสมการ (External validation set) มาวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการควบคู่กับการใช้สมการทำนาย แล้วนำข้อมูลมาเพิ่มเติมในข้อมูลชุดสร้างสมการเทียบมาตรฐานเพื่อปรับปรุงสมการเทียบมาตรฐานให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการและค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จริงของหญ้า 4 สกุล

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสร้างสมการเทียบมาตรฐานด้วยเทคนิค NIRS เพื่อใช้ทำนายฟิซอาหารสัตว์ 4 สกูล สำหรับทำนายค่า DM CP EE Ash NDF ADF ADL IVTDMD และ NDFD ที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.88 0.98 0.86 0.92 0.88 0.87 0.78 0.80 และ 0.73 ตามลำดับ มีค่า RPD เท่ากับ 3.62 8.41 3.25 4.69 3.43 3.25 2.46 3.17 และ 2.52 ตามลำดับ สมการที่ได้อยู่ในเกณฑ์พอใช้จนถึงยอดเยี่ยม สามารถนำไปใช้ทำนายคุณค่าทางโภชนาของหญ้าอาหารสัตว์ในระดับควบคุมคุณภาพได้ ยกเว้น สมการทำนายค่า ADL และ NDFD ที่สามารถใช้ได้ในระดับการคัดกรอง

ข้อเสนอแนะ

สมการเทียบมาตรฐานที่ใช้ในการทำนายคุณค่าทางโภชนาด้วยเทคนิค NIR ที่มีค่า RPD ต่ำกว่า 3 ควรมีการพัฒนาด้วยการนำตัวอย่างหญ้าอาหารสัตว์ทั้ง 4 สกูล มาวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานควบคู่ไปกับการสแกนเพื่อเก็บสเปกตรัมสำหรับนำมาเพิ่มเติมกับข้อมูลที่มีอยู่เดิมเพื่อพัฒนาให้สมการมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และควรมีการสร้างสมการเทียบมาตรฐานในตัวอย่างอาหารสัตว์อื่นๆ เพิ่มเติมเช่นเดียวกันเพื่อให้สามารถใช้ในการประเมินคุณค่าทางโภชนาด้วยเทคนิค NIR ที่สามารถให้ผลที่รวดเร็ว และลดการใช้สารเคมี เป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณจันทกานต์ อรณนันท ผู้เชี่ยวชาญด้านวิเคราะห์อาหารสัตว์ ที่ได้จัดสรรงบประมาณจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ในการสนับสนุนให้โครงการนี้สามารถดำเนินการได้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี ขอขอบคุณคณะกรรมการวิชาการสำนักพัฒนาอาหารสัตว์ ที่ให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้ผลงานวิชาการฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- กรมปศุสัตว์. 2545ก. มาตรฐาน. เอกสารคำแนะนำ. กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด. กรุงเทพฯ. 27 หน้า.
- , 2545ข. ฐานข้อมูล. เอกสารคำแนะนำ. กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด. กรุงเทพฯ. 35 หน้า.
- , 2545ค. ฐานข้อมูล. เอกสารคำแนะนำ. กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด. กรุงเทพฯ. 27 หน้า.
- , 2563. การผลิตหญ้าแห้งกลอสสำหรับการเลี้ยงสัตว์. คู่มือเกษตรกร. สำนักพัฒนาอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์. บริษัท นวัตกรรมดาการพิมพ์ (ประเทศไทย) จำกัด. กรุงเทพฯ. 20 หน้า.
- คณะกรรมการความต้องการโภชนาโคมนในประเทศไทย. 2563. ความต้องการโภชนาของโคมนในประเทศไทย. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น. 240 หน้า.
- เฉลา พัทธสินสุข จริยา บุญจรัส และ จีรพัฒน์ วงศ์พิพัฒน์. 2553. การรวบรวมและจัดทำข้อมูลด้านคุณค่าทางโภชนาของฟิซอาหารสัตว์. กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 78 หน้า.

- รณฤทธิ์ ฤทธิธรม. 2565. การสร้างระบบ Near Infrared Spectroscopy (NIR) สำหรับการวิเคราะห์ประจำวัน. (โปรแกรมคอมพิวเตอร์). คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม. 162 หน้า.
- จำเริญ นามสีลี สรายุทธ์ ไทยเกื้อ และพิมพ์พร พลเสน. 2551. การทำนายคุณค่าทางโภชนาของพืชอาหารสัตว์ โดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี. รายงานผลงานวิจัยกองอาหารสัตว์ประจำปี พ.ศ.2551 กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. หน้า 304-316.
- อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล. 2548. การปรับแต่ง NIR Spectrum ก่อนการวิเคราะห์. เอกสารประกอบการฝึกอบรม “การตรวจคุณภาพอาหารสัตว์ด้วยเทคนิค NIR Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก” ระหว่างวันที่19-23 ธันวาคม 2548 จัดทำโดย หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีการตรวจสอบสินค้าโดยไม่ทำลาย, สถาบันคั่นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 62-81.
- ANKOM Technology. 2017. In vitro True Digestibility using the DAISY II Incubator. Available source: https://www.ankom.com/sites/default/files/documentfiles/Method_3_Invitro_D200_D200l.pdf. May 10 2019.
- AOAC. 2016. Official Methods of Analysis of AOAC International, 20th Editions. AOAC International, Rockville, Maryland.
- DePeters, E.J. and L.W. George. 2015. Collection of rumen fluid. Available source: <https://www.agproud.com/articles/21026-collection-of-rumen-fluid>. December 22, 2023.
- Holden, L. A. 1999. Comparison of methods of in vitro dry matter digestibility for ten feeds. Journal of Dairy Science. 82: 1791-1794.
- Infrasoft International. 2005. WinISI IV, manual-version 1.60. Foss Tecator AB, Hoganas.
- Ishler, V., J. Heinrichs, and G. Varga. 1996. From Feed to Milk : Understanding rumen function. The Pennsylvania State University Extension Circular 422.
- ISO. 2002. International standard (ISO 5984: 2002 (E)). 2nd Edit. Animal feeding stuffs – Determination of crude ash. International Organization for Standardization. All rights reserved, Geneva.
- 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.
- Massignani, C., B.B. Vandresen, J.V. Marques, R. Kazama, M.P. Osmari, and D.C. da Silva-Kazama. 2021. A single calibration of near-infrared spectroscopy to determine the quality of forage for multiple species. Research, Society and Development, 10 (10). e548101018990. ISSN

- 2525-3409, DOI: Available source: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i10.18990>. March 5, 2024.
- Mazabel, J, M. Worthington, V. Castiblanco, M. Peters, J. Arango. 2020. Using near infrared reflectance spectroscopy for estimating nutritional quality of *Brachiaria humidicola* in breeding selections. *Agrosyst Geosci Environ*. 2020;3:e20070. Available source: <https://doi.org/10.1002/agg2.20070>. March 25, 2024.
- Mertens, D.R. 2019. Importance of fiber and digestibility analysis to predict animal performance. Available source: <https://alfalfa.ucdevis.edu/symposium/proceeding/2019>. January 17, 2022.
- Moore, J.E. and D.J. Undersander. 2002. Relative forage quality: an alternative to relative feed value and quality index. Florida Ruminant Nutrition Symposium, University of Florida, Gainesville, USA, p. 16-31.
- Muttoni, G., N. Palacios-Rojas, L. Galicia, A. Rosales, K.V. Pixley, and N. de Leon. 2013. Cell wall composition and biomass digestibility diversity in Mexican maize (*Zea mays* L) landraces and CIMMYT inbred lines. Available source: <https://journals-crea.4science.it/index.php/maydica/article/view/893>. May 3, 2019.
- Osborne, V.R. 2004. Improving environmental sustainability of beef farms in Ontario by measuring neutral detergent fiber digestibility. Final report, ICAR Registration No. 33331681.
- SA. 2017. Sithiporn Associates Company. WIN ISI 4, Training Manual. 80 p.
- Samadi, K.M.K., S. Wajizah and A.A. Munawar. 2020. Near infrared spectroscopy (NIRS) data analysis for a rapid and simultaneous prediction of feed nutritive parameters. Data in brief. (29) 105211. Available source: <http://www.elsevier.com/locate/dib>. March 21, 2024.
- Sapienza, D., P. Berzaghi, N. Martin, D. Taysom, F. Owens, B. Mahanna, D. Sevenich, and R. Allen. 2008. NIRS White paper: Near infrared spectroscopy for forage and feed testing. NIRS Forage and Feed Testing Consortium. Available source: <http://www.foragelab.com>. February 21, 2022.
- Vargas, J.E., S. López, F.J. Giráldez and J.S. González. 2009. *In vitro* forage digestibility under suboptimal microbial inoculum and culture media pH conditions. Available source: <https://www.researchgate.net/publication/237617922>. February 21, 2024.
- 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.
- Zahera, R., L.A. Sari, L.G. Permana, and Despal. 2021. The use of near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to predict dairy fibre *in vitro* digestibility. 3rd International Conference on Agriculture and Bio-industry (ICAGRI); IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 951 (2022) 012100.doi:10.1088/1755-1315/951/1/01/2100. Available source: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/951/1/012100/pdf>. March 10, 2024.