

การวิเคราะห์หาปริมาณสารตะกั่วในแป้งมันสำปะหลัง
โดยใช้คลื่นแสงอินฟราเรดย่านใกล้
DETERMINATION OF LEAD (Pb) CONTENT IN TAPIOCA STARCH
USING NEAR INFRARED SPECTROSCOPY

พรกมล รูปเลิศ* สายัญ พันธุ์สมบุญ และดำรงค์ กองดวง
Ponkamon Ruploet*, Sayun Phansomboon, and Damrong Kongduang

Faculty of Agro-Industry Technology, Kalasin University
*corresponding author e-mail: Ponkamon.ru@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพของคลื่นแสงอินฟราเรดย่านใกล้แบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ทำความเสียหายกับตัวอย่าง สำหรับการตรวจสอบเพื่อหาปริมาณสารตะกั่วในแป้งมันสำปะหลัง ในช่วงสเปกตรัม NIR ระหว่าง 1,008 ถึง 2,480 นาโนเมตร โดยนำข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยที่ได้มาวิเคราะห์การถดถอยบางส่วนโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด partial least squares (PLS) ด้วย Unscrambler version 10.1 สำหรับการทำนายปริมาณสารตะกั่วในแป้งมันสำปะหลัง มีปัจจัยที่ศึกษาจำนวน 10 ปัจจัย พบว่า สัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (R^2) ในกลุ่มที่ใช้ในการสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการ เท่ากับ 0.96 และ 0.90 ตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกว่าสมการมีความเหมาะสมสำหรับการทำนายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าความผิดพลาดมาตรฐานของสมการ และค่าความผิดพลาดมาตรฐานการทำนาย เท่ากับ 0.02 และ 0.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนค่าไบแอส เท่ากับ 1.4×10^{-9} จากผลการทดลองพบว่าเทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรด สามารถใช้ประเมินปริมาณโลหะหนักสารตะกั่วในแป้งมันสำปะหลังได้ใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน ถือเป็นวิธีการวัดแบบไม่ทำลายตัวอย่างเหมาะสำหรับการตรวจสอบที่รวดเร็ว

คำสำคัญ: ตะกั่ว แป้งมันสำปะหลัง อินฟราเรดย่านใกล้แบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม

Abstract

This research was to study the potential of FT-near infrared spectroscopy (FT-NIRS) as a nondestructive way for tapioca starch investigation. The NIR spectra ranged between 1,008-2,480 nm by partial least squares (PLS) with cross-validate method analyzed by Unscrambler software version 10.1. For Lead content in tapioca starch sample ranged of 0.01 ppm to 0.50 ppm calibration and validation set $n = 86$ for lead contamination measurement in tapioca starch. 10 factors were studied and found that the coefficient from determination calibrations and validation set were 0.96 and 0.90 respectively. The accuracy indicated how close the measured value was from its actual value. The SEC and the SEP was 0.02 and 0.4% with the Bias 1.4×10^{-9} . The experiment

indicated that Pb content measured with NIRS in tapioca starch considered to be used to acquire standard method. NIRS required no sample destruction method and applied for a fast inspection.

Keywords: Lead, Tapioca starch, FT-Near infrared spectroscopy

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตและส่งออกมันสำปะหลังที่สำคัญของโลก การส่งออกแป้งมันสำปะหลังของไทยจะมีการควบคุมมาตรฐานในลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณแป้ง ความชื้น ปริมาณเถ้า เยื่อใย ค่าความเป็นกรด-ด่าง และส่วนของแป้งที่ผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีการปนเปื้อนโลหะหนักที่เป็นอันตรายในแป้งมันสำปะหลัง และผลิตภัณฑ์โดยส่วนใหญ่จะเป็นการปนเปื้อนของโลหะหนักจำพวกสารตะกั่ว ซึ่งเป็นปัญหามาก เนื่องจากโลหะหนักดังกล่าวมีความเป็นพิษต่อร่างกายสูง หากพบว่ามีปริมาณเกินมาตรฐานจะเป็นปัญหาต่อการส่งออก จากข้อมูลของสำนักงานควบคุมคุณภาพ และตรวจสอบกักกันโรคแห่งสาธารณรัฐประชาชนจีน ได้กำหนดคุณภาพมันสำปะหลังของไทยที่ส่งไปยังจีน คือ ให้ปริมาณสารตะกั่ว พบได้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จึงทำให้ต้องมีการตรวจสอบคุณภาพแป้ง และผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังก่อนการส่งออก โดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารตะกั่ว ปัจจุบันการวิเคราะห์โลหะหนักในแป้งมันสำปะหลัง และผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง จะใช้วิธีมาตรฐาน คือ การใช้เครื่องอะตอมมิกแอปซอร์พชัน (Atomic Absorption Spectrometer; AAS) ซึ่งจะต้องเตรียมตัวอย่างให้อยู่ในรูปของสารละลาย โดยเครื่องอะตอมมิกแอปซอร์พชันจะให้พลังงานความร้อนจากเปลวไฟทำให้สารละลายตัวอย่างเกิดกระบวนการแตกตัว (dissociation) หรือกลายเป็นไอ (vaporization) หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอมที่สภาวะพื้น (atomization) จะเปลี่ยนสถานะไปสู่สภาวะกระตุ้น โดยการดูดกลืนแสงที่ผ่านมาจากแหล่งกำเนิดภายนอกที่ความยาวคลื่นที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งเป็นเทคนิคที่เฉพาะ และการเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์นั้นมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก และใช้เวลานาน (Zixia et al., 2009)

เทคนิคการสเปกโตรสโกปีเนียร์อินฟราเรด (Near Infrared Spectroscopy; NIRS) มีการใช้ในงานหลายชนิด ทั้งการควบคุมคุณภาพและปริมาณ ได้แก่ การใช้ในการวิเคราะห์โปรตีน (Bagchi et al., 2016; Chen et al., 2014) และไฟเบอร์ (Chylinska et al., 2016) ปริมาณแป้งในมันฝรั่ง (Magwaza et al., 2016) ในพืชตระกูลถั่ว (Pojić et al., 2010; Teye et al., 2015) ข้าวสาลี (Hell et al., 2016) การวิเคราะห์สารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) ในข้าวโพด (Redaelli et al., 2016) การวิเคราะห์โลหะหนักในพริกชี้หูแดง (Moros et al., 2008) สำหรับการทำนายสารหนูและตะกั่วในตัวอย่างผงพริกชี้หูสีแดง ซึ่งค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาดของการทำนาย (RRMSEP) เท่ากับ 23 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโลหะหนักทั้งสารหนูและตะกั่วที่พบ NIRS ถือได้ว่าเป็นเครื่องมือในการตรวจคัดกรองที่มีประโยชน์อย่างรวดเร็ว ในมันสำปะหลังมีการใช้คาดการณ์แคโรทีนอยด์ ไซยาไนด์และปริมาณน้ำหนักรวมในหัวมันสำปะหลังสดโดยใช้ NIRS (Sanchez et al., 2014) ในการประเมินศักยภาพของ NIRS ที่ใช้ในการทำนายลักษณะคุณภาพหัวมันสำปะหลัง พบว่า การหาปริมาณน้ำหนักรวมมีค่า R^2 : 0.96 และ NIRS ยังสามารถแยกแยะความแตกต่างกับระดับความสูงหรือต่ำของไซยาไนด์ เท่ากับ R^2 : 0.86 ที่สามารถนำมาใช้สำหรับการคาดการณ์ที่มีความแม่นยำได้

นอกจากนี้ยังมีการนำมาใช้วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่มีประสิทธิภาพในการประเมินคุณภาพแ่งมันสำปะหลังได้ ด้วยการทำแคลิเบรชันโมเดล (calibration models) เพื่อการวิเคราะห์หาปริมาณการปนเปื้อนของตะกั่ว หากยังมีข้อจำกัดของสมการเรื่องการเตรียมตัวอย่างพื้นที่ปนเปื้อนที่แตกต่างกัน งานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของเทคนิค NIRS สำหรับการหาปริมาณโลหะหนักตะกั่วในแ่งมันสำปะหลัง และเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการไม่ทำลายตัวอย่างด้วยการวัดสเปกตรัม NIR และการทำนายการหาปริมาณสารตะกั่ว (Machado et al., 2011)

วิธีดำเนินการวิจัย

แ่งมันสำปะหลัง

แ่งมันสำปะหลัง จังหวัดกาฬสินธุ์ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ของประเทศไทย ปริมาณแ่งวัดสเปกตรัมของแ่ง ช่วง 0.01 ถึง 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ชุด calibration, validation set (n = 86)

การวัดสเปกตรัม

อุปกรณ์พกพาฟูเรียร์ทรานส์ NIR spectroscopy ความยาว ระหว่าง 1,008-2,480 นาโนเมตร วัดสเปกตรัมต่อหนึ่งตัวอย่างและการวัดอ้างอิง

การวิเคราะห์ตะกั่ว

การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักสารหนูและตะกั่ว โดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน (Atomic Absorption Spectroscopy; AAS) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในปัจจุบันในห้องปฏิบัติการ มีขั้นตอนในการเตรียมสารมาตรฐานของโลหะ ดังนี้

สารละลายมาตรฐานตะกั่ว เตรียมสารละลายมาตรฐานจาก stock solution ที่ความเข้มข้น 0.00 ถึง 0.50 ppm ปิเปตโดยใช้ Micropipette จาก stock solution 1,000 ppm ปรับปริมาตรด้วย 0.01 โมล ของกรดไนตริก (0.01 โมล HNO_3) จนครบ 10 มิลลิตร ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิตร จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ตามลำดับ นำสารละลายทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อทำการหาปริมาณ

การพัฒนาสมการสอบเทียบ

การวิเคราะห์แบบถดถอยบางส่วนโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Partial Least Squares Regression; PLSR) ร่วมกับการปรับสเปกตรัม

1. ทำการเปรียบเทียบกับสมการที่ไม่ได้ปรับแต่งข้อมูลของการปนเปื้อนโลหะหนักสารตะกั่วในแ่งมันสำปะหลัง ได้สมการแคลิเบรชันโมเดล (calibration models)

2. ในการสร้างสมการจะแบ่งข้อมูลเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มสร้างสมการแคลิเบรชัน (calibration) และกลุ่มตรวจสอบสมการ (validation) และมีขั้นตอนดำเนินการ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างสมการโดยใช้ตัวอย่างกลุ่มแคลิเบรชันด้วยเทคนิคการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน PLSR ร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์ตัวเอง (cross-validation) (Adriluz et al., 2016) โดยใช้โปรแกรม Unscrambler รุ่น 10.1 และอ่านค่าข้อผิดพลาดในการทดสอบตัวเองของสมการ (root mean square of cross-validation; RMSECV) จากสมการ เพื่อพิจารณาปัจจัย PLS factors ที่ให้ค่า RMSECV ที่ต่ำที่สุด (Chen et al., 2014)

ขั้นตอนที่ 2 เลือกสมการที่ดีที่สุด โดยใช้ตัวอย่างกลุ่มแวลิดชัน (validation) นำสมการที่ได้ไปทำนายค่าทางเคมีโดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างกลุ่มแวลิดชัน แล้วคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (correlation coefficient; R^2) และค่าข้อผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย โดยใช้สมการ

เดียวกับค่าข้อผิดพลาดมาตรฐานของสมการแคลิเบรชัน RMSECV และคัดเลือกสมการที่ดีที่สุด (Magwaza et al., 2016) โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 สูง และค่าข้อผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย RMSEP ต่ำสุด

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาสมการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทำนายอนาคตโดยคำนวณค่า ratio of prediction of deviation (RPD) ของข้อมูลกลุ่มทดสอบ (test set) ซึ่งคำนวณได้จากค่ามาตรฐานในการทำนาย standard deviation/RMSEP (Teye et al., 2015)

ผลการวิจัย

กลุ่มตัวอย่างที่ได้รับการออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับการทดสอบแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้วิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง ตัวอย่างสำหรับระบบตัวอย่างเดียว ปริมาณการปนเปื้อนของสารตะกั่วมีความสำคัญมากในแป้งมันสำปะหลังของคลื่นแสงอินฟราเรดย่านใกล้แบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม โดยการใช้เทคนิค PLSR (Machado et al., 2011) กับการวิเคราะห์วิธีการข้ามการตรวจสอบ cross-validate โดยใช้โปรแกรม unscramble version 10.1 สำหรับการทำนายปริมาณสารตะกั่วของแป้งมันสำปะหลัง การวัดสเปกตรัมของตัวอย่างเดียว

ในการสร้างสมการสำหรับทำนายปริมาณโลหะหนักตะกั่วในแป้งมันสำปะหลัง ใช้กลุ่มข้อมูลที่ทราบปริมาณโลหะหนักและข้อมูลสเปกตรัม NIR ของกลุ่ม ได้สมการที่ใช้ในการทำนายแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกน X คือ ความยาวคลื่น (wavelength) กับ แกน Y คือ ค่าสหสัมพันธ์ (correlation) อย่างง่ายของความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสง กับค่าที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานแบบ Original spectrum of Pb by portable NIR spectrometer ดังภาพที่ 1 (Figure 1)

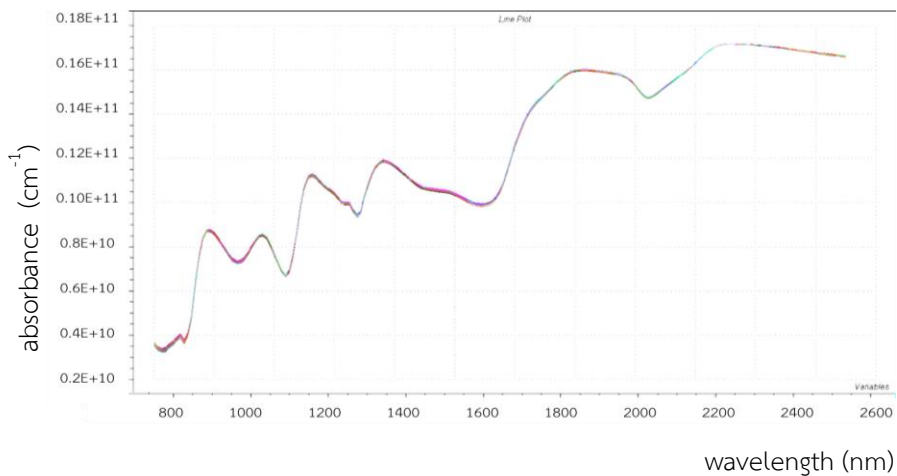


Figure 1 Original spectrum of Pb by portable NIR spectrometer

เมื่อนำปริมาณโลหะหนักตะกั่วในแป้งมันสำปะหลังที่ทำได้จากเทคนิคสเปกโตรสโกปีเนียร์อินฟราเรด และวิธีมาตรฐานมาวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย โดยให้ค่าจากวิธีมาตรฐานเป็น X และค่าจากเทคนิคสเปกโตรสโกปีเนียร์อินฟราเรด เป็น Y ได้ผลดังภาพที่ 2 (Figure 2)

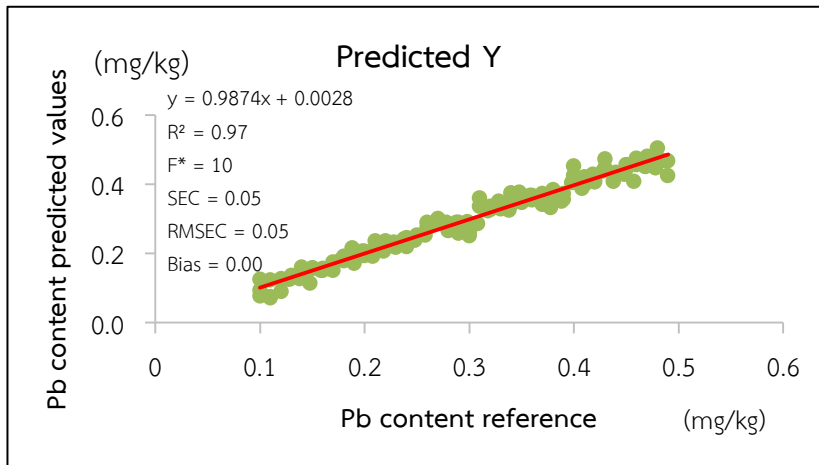


Figure 2 Original of Pb by portable NIR spectrometer and Pb content prediction

จากภาพที่ 2 (Figure 2) แสดงค่าการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย $y = 0.9874x + 0.0028$ แสดงค่าคงที่ ณ จุดตัดแกน Y เมื่อ X มีค่าเท่ากับ 0 และค่าความชันของกราฟ ค่าความเหมาะสมของการทำนายปริมาณโลหะหนักตะกั่วที่หาได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าตกค้าง S_{yx} หรือเรียกว่าค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของสมการ (coefficient of standard error of calibration; SEC) เท่ากับ 0.05 ค่าเฉลี่ยของการทำนายปริมาณโลหะหนักตะกั่ว (Y) กับ ค่าเฉลี่ยของค่าจริง (X) ข้อผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย (Standard error of prediction; SEP) มีความแตกต่างกันโดยค่าเฉลี่ยระหว่างค่าที่ได้จากเทคนิคสเปกโตรสโกปีกับค่าที่วัดโดยวิธีอ้างอิง (bias) เท่ากับ 0.00 และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 0.97 สมการที่สร้างขึ้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงในทางบวกกัน ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการตรวจปริมาณสารตะกั่วในตัวอย่างแป้งมันสำปะหลัง

การคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative) ของสเปกตรัม จะทำให้เกิดการแยกของจุดยอดที่เหลื่อมซ้อนกันออกมา ดังภาพที่ 3 (Figure 3)

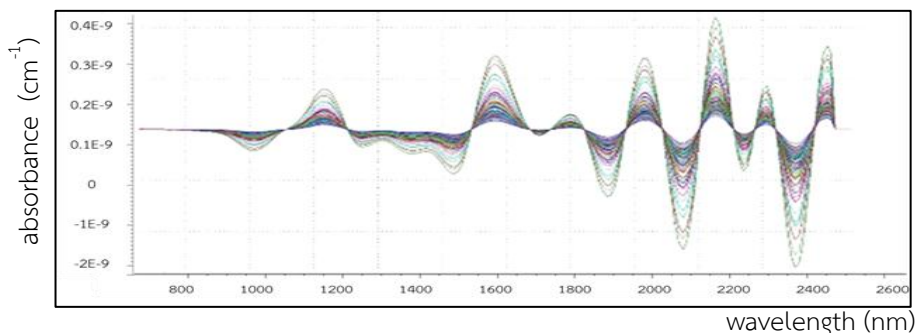


Figure 3 2nd derivative Pb content prediction

เมื่อนำค่าสารตะกั่วในตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรด ซึ่งผ่านการปรับแก้ด้วยวิธีการใช้อนุพันธ์อันดับสอง และค่าที่ได้จากการหาสารตะกั่วด้วยวิธี

อ้างอิง (Atomic Absorption Spectroscopy; AAS) มาวิเคราะห์หาค่าการถดถอยโดยให้อ้างอิงเป็นค่า X และด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีเนียร์อินฟราเรด เป็นค่า Y ได้ผลดังภาพที่ 4 (Figure 4)

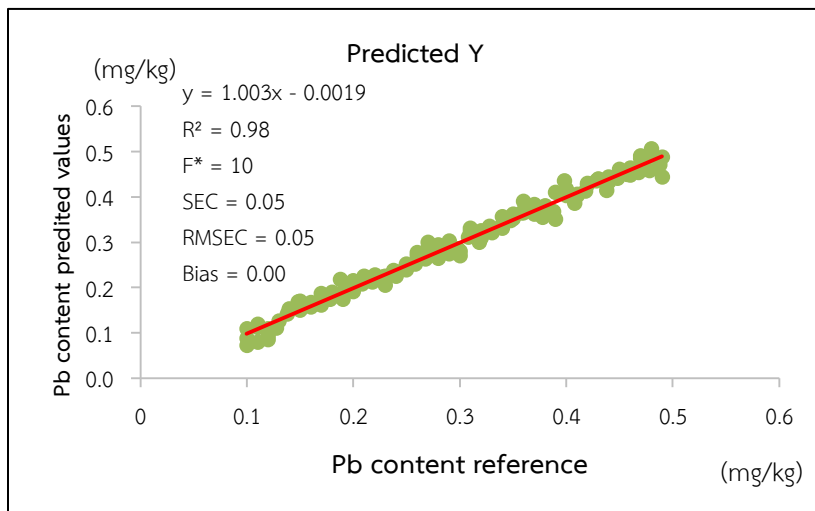


Figure 4 2nd derivative of Pb by portable NIR spectrometer and Pb content prediction

จากภาพที่ 4 (Figure 4) สมการถดถอยที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ R^2 เท่ากับ 0.98 และค่าความคลาดเคลื่อน SEC เท่ากับ 0.05 จะเห็นได้ว่าการปรับแต่งข้อมูลด้วยอนุพันธ์อันดับสอง ทำให้การหาปริมาณสารตะกั่วในแป้งด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีเนียร์อินฟราเรดมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น เพราะทำให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้นจาก 0.97 เป็น 0.98 แสดงค่าทางสถิติของการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 1 (Table 1)

Table 1 Characteristics of calibration and validation sample sets in Tapioca starch

methods	F	R^2	Calibration			R^2	Validation		
			SEC (%)	RMSECV (%)	Bias (%)		SEP (%)	RMSEPV (%)	Bias (%)
% Pb original	10	0.97	0.02	0.02	0.00	0.84	0.05	0.05	-0.00
1 st derivative	10	0.98	0.02	0.02	0.00	0.94	0.03	0.03	1.4×10^{-9}
2 nd derivative	10	0.96	0.02	0.02	9.01	0.90	0.04	0.04	6.38

Remark R^2 =Correlation coefficient, SEC=Standard Error of Calibration, RMSECV=Root Mean Square of Cross-Validation, RMSEPV=Root Mean Square of Prediction, Bias=Mean values between NIRS and reference methods

ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้อนุพันธ์อันดับสอง เช่น การพัฒนาเพื่อปรับปรุงความไวในการตรวจโลหะหนักตะกั่ว โดยใช้เทคนิค PLSR ระดับการถดถอยถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองระหว่างสเปกตรัมและความเข้มข้นของตะกั่ว และการวิเคราะห์แบบข้ามการตรวจสอบถูก (cross-validation) ใช้ในการค้นหาสำหรับจำนวนที่เหมาะสมของปัจจัย PLS ผลการศึกษา พบว่าสเปกตรัม NIR และความเข้มข้นของ ตะกั่ว มีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ตรงกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ใช้ในการตัดสินใจ R^2 สูงสุด

เท่ากับ 0.9228 และค่าข้อผิดพลาดของการทำนายระหว่างค่าจริงเมื่อเทียบกับค่าอ้างอิงจริง (root mean square of prediction; RMSEP) ขึ้นต่ำเท่ากับ 0.4777 mg/L⁻¹ การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการคาดการณ์ของการตรวจสอบความเข้มข้นของตะกั่วด้วยเทคนิคการเพิ่มปริมาณ (Zixia et al., 2009)

อภิปรายผล

อุปกรณ์ FT-NIR spectrometer สามารถใช้วิเคราะห์แป้งมันสำปะหลังที่ปนเปื้อนโลหะหนัก ตะกั่ว ความเข้มข้น 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ระบบเก็บสเปกตรัมของตัวอย่างเดียวที่ความยาวคลื่นระหว่าง 1,008 ถึง 2,480 นาโนเมตร ได้สมการที่สามารถใช้สำหรับคาดการณ์ปริมาณสารตะกั่วในแป้งมันสำปะหลังอย่างถูกต้องใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมการที่สร้างขึ้น และปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Pojić et al., 2010)

สรุปผลการวิจัย

การวัดปริมาณตะกั่วของสมการแคลิเบรชัน ข้อมูลที่ไม่ได้ปรับแต่ง (Original data) มีค่า R² เท่ากับ 0.97 และการปรับข้อมูลค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง และอันดับสอง เท่ากับ 0.97 และ 0.96 ตามลำดับ ในการสร้างสมการตรวจสอบปริมาณตะกั่วในแป้งมันสำปะหลังให้พิจารณาสมการที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจสูงที่สุด จะต้องมีความเข้าใกล้ 1 และค่าข้อผิดพลาดในการทำนายน้อยที่สุด เช่นเดียวกับสมการที่ใช้ตรวจสอบปริมาณสารหนู กรณีที่ค่า R² มีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ให้พิจารณาจากค่าความผิดพลาดในการทำนายซึ่งจะต้องมีค่าน้อยที่สุด และจะต้องใกล้เคียงกับศูนย์ ที่มีข้อผิดพลาดมาตรฐานของการสอบเทียบ SEC ของโลหะหนักตะกั่วที่ปนเปื้อนในตัวอย่อย่างแป้งมันสำปะหลัง การตรวจสอบสมการแคลิเบรชันด้วยสมการแวลูเดชันของข้อมูลที่ไม่ได้ปรับแต่ง มีค่า R² เท่ากับ 0.84 และการปรับข้อมูลค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง และอันดับสอง เท่ากับ 0.94 และ 0.90 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการหาปริมาณสารตะกั่วในแป้งมันสำปะหลังควรปรับแต่งข้อมูลด้วยค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งซึ่งทำให้ได้ค่า R² สูงที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนสนับสนุนการวิจัย บริษัทมิตซูบิชิคอร์ปอเรชัน ในโครงการการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตมันสำปะหลังจากผลการวิจัยสู่เกษตรกรจังหวัดกาฬสินธุ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและสร้างรายได้เพิ่ม ปีที่ 2 และมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

เอกสารอ้างอิง

- Adriluz SP, Andrés D, Román O. et al. Near infrared spectroscopic transmittance measurements for pharmaceutical powder mixtures, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2016; 123: 120-127.
- Bagchi T, Sharma S, Chattopadhyay K. Development of NIRS models to predict protein and amylose content of brown rice and proximate compositions of rice bran, *Food Chemistry*. 2016; 191: 21-27.
- Chen H, Song Q, Tang G. et al. An optimization strategy for waveband selection in FT-NIR quantitative analysis of corn protein. *Journal of Cereal Science*. 2014; 60(3): 595-601.
- Chylinska M, Szymanska C, Kruk B. Study on dietary fibre by Fourier transform-infrared spectroscopy and chemometric methods, *Food Chemistry*. 2016; 196: 114-22.

- Hell J, Pruckler M, Danner L. et al. Comparison between near-infrared (NIR) and mid-infrared (ATR-FTIR) spectroscopy for the multivariate determination of compositional properties in wheat bran samples, *Food Control*. 2016; 60: 365-369.
- Machado A, Gama A, Barros NB. Partial least squares prediction of the first hyperpolarizabilities of donor–acceptor polyenic derivatives, *Chemical Physics*. 2011; 388(1-3): 19-22.
- Magwaza LS, Messo NS, Laurie S. et al. Development of NIRS models for rapid quantification of protein content in sweetpotato [*Ipomoea batatas* (L.) LAM.], *Food Science and Technology*. 2016; 72: 63-70.
- Moros J, Llorca I, Cervera M. et al. Chemometric determination of arsenic and lead in untreated powdered red paprika by diffuse reflectance near-infrared spectroscopy, *An International Journal Devoted to All Branches of Analytical Chemistry*. 2008; 613(2): 196-206.
- Pojic M, Mastilović J, Palic D. et al. The development of near-infrared spectroscopy (NIRS) calibration for prediction of ash content in legumes on the basis of two different reference methods. *Food Chemistry*. 2010; 123(3): 800-805.
- Redaelli R, Alfieri M, Cabassi G. Development of a NIRS calibration for total antioxidant capacity in maize germplasm, *Talanta*. 2016; 154: 164-168.
- Sanchez T, Ceballos H, Dufour D. et al. Prediction of carotenoids, cyanide and dry matter contents in fresh cassava root using NIRS and Hunter color techniques, *Food Chemistry*. 2014; 151: 444-451.
- Teye E, Huang X, Sam-Amoah L. et al. Estimating cocoa bean parameters by FT-NIRS and chemometrics analysis. *Food Chemistry*. 2015; 176: 403-410.
- Zixia H, Wei T, Juanj F. et al. Multivariate calibration of on-line enrichment near-infrared (NIR) spectra and determination of trace lead in water. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2009; 98(2): 195-200.