



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การพัฒนาวิธีการตรวจประเมินยาฆ่าแมลงกลุ่มคาร์บาเมตตกค้าง
ในวัตถุดิบอาหารสัตว์อย่างรวดเร็วด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปคโตรสโคปี

โดย

ดร. สนธยา นุ่มท้วม

ธันวาคม 2560

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การพัฒนาวิธีการตรวจประเมินยาฆ่าแมลงกลุ่มคาร์บาเมตตกค้างในวัตถุดิบอาหารสัตว์
อย่างรวดเร็วด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปคโตรสโคปี

ผู้วิจัย

ดร. สนธยา นุ่มท้วม

สังกัด

คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และมหาวิทยาลัยนเรศวร

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และมหาวิทยาลัยนเรศวรไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

รายละเอียดโครงการ

สัญญาเลขที่ : TRG5780047

ชื่อโครงการ (ไทย) การพัฒนาวิธีการตรวจประเมินยาฆ่าแมลงกลุ่มคาร์บาเมตตกค้างในวัตถุดิบอาหารสัตว์

อย่างรวดเร็วด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

ชื่อโครงการ (อังกฤษ) Development of rapid assessment of carbamate pesticide residues in

feedstuffs using near infrared spectroscopy

หัวหน้าโครงการ : ดร. สนธยา นุ่มท้วม

สังกัด : คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

งบประมาณ : 480,000 บาท

ระยะเวลา : 2 ปี

Abstract

Project Code : TRG5780047

Project Title : Development of rapid assessment of carbamate pesticide residues in feedstuffs using near infrared spectroscopy

Investigator : Dr. Sonthaya Numthuam, Naresuan University

E-mail Address : sonthayan@nu.ac.th

Project Period : 2 years

In order to increase crops yield, pesticides have been extremely used, resulting in a high risk to environment and human health. Maize and cassava have been widely used as feedstuff in feed industries. There is a high risk of contamination from agricultural chemicals used in their cultivation, especially carbofuran which is a highly toxic insecticide to vertebrates. The objective of this study was to develop a simple and rapid determination method for insecticidal carbofuran contamination in feedstuff by near infrared (NIR) spectroscopy. Samples used in this study were ground maize and ground cassava contaminated with carbofuran ranging from 0-50 ppm. The contaminated ground samples were acquired the NIR spectra, as a nondestructive determination, and then the carbofuran extraction from the samples were done with distilled water and ethyl acetate. The extracted solutions were dropped onto a glass microfiber filter paper and the filter paper was then dried. The reflectance spectra of the filter papers containing carbofuran; called DESIR samples, were also collected. Calibration models for carbofuran prediction based on the spectral data of the ground samples, extracted solution samples and the DESIR samples were performed by partial least square (PLS) regression. For maize samples, the PLS results obtained from spectra of DESIR maize-samples were superior than other samples. The best predictive results of the DESIR maize-samples were correlation coefficient (R) of 0.99 and root mean square error of cross validation (RMSECV) of 2.17 ppm. Similar results were also noticed from the cassava results. The best PLS results of the DESIR cassava-samples were R of 0.99 and RMSECV of 3.72 ppm. It was concluded that NIRS combined with DESIR technique was feasible as a rapid method for carbofuran determination in maize and cassava.

Keywords: feedstuff, pesticide, near infrared spectroscopy, maize, cassava

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : TRG5780047

ชื่อโครงการ : การพัฒนาวิธีการตรวจประเมินยาฆ่าแมลงกลุ่มคาร์บาเมตตกค้างในวัตถุดิบอาหารสัตว์
อย่างรวดเร็วด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

ชื่อนักวิจัย และสถาบัน : ดร. สอนทยา นุ่มท้วม มหาวิทยาลัยนเรศวร

อีเมล : sonthayan@nu.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 2 ปี

ปัจจุบันมีการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชในปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดปัญหาสารพิษตกค้างในผลผลิตทางการเกษตร และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ ข้าวโพดอาหารสัตว์และมันสำปะหลังจัดเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่สำคัญมากในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ซึ่งมีความเสี่ยงจากการปนเปื้อนสารกำจัดแมลงตกค้างในระหว่างกระบวนการเพาะปลูก โดยสารคาร์โบฟูรานจัดเป็นสารกำจัดแมลงที่มีพิษร้ายแรงจนถึงขั้นเสียชีวิตต่อสัตว์มีกระดูกสันหลัง การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบปริมาณสารกำจัดแมลงคาร์โบฟูรานปนเปื้อนในวัตถุดิบอาหารสัตว์อย่างง่ายและรวดเร็วด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ตัวอย่างวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แก่ข้าวโพดอาหารสัตว์ และมันสำปะหลัง ที่ปนเปื้อนสารคาร์โบฟูรานระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ในช่วง 0-50 ppm โดยตัวอย่างวัตถุดิบอาหารสัตว์บดที่ปนเปื้อนสารพิษจะถูกนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงเนียร์อินฟราเรดเพื่อเป็นตัวแทนการตรวจสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างปนเปื้อนไปสกัดสารคาร์โบฟูรานด้วยน้ำกลั่นหรือสารละลายเอทิลอะซิเตท แล้วหดยาสารละลายสกัดลงบนกระดาษกรองใยแก้ว และระเหยให้แห้ง จากนั้นนำกระดาษที่ดักกรองสารคาร์โบฟูรานไว้ ซึ่งเรียกว่าตัวอย่าง DESIR มาวัดสเปกตรัมการสะท้อนกลับ นำข้อมูลสเปกตรัมของตัวอย่างข้าวโพดและตัวอย่างมันสำปะหลังรูปแบบต่าง ๆ มาทำการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วยวิธี partial least square regression สำหรับผลของตัวอย่างข้าวโพดอาหารสัตว์พบว่า การทำนายปริมาณสารผ่านตัวอย่างรูปแบบ DESIR ให้ผลการทำนายที่ดีกว่าตัวอย่างรูปแบบอื่นๆ โดยแบบจำลองที่มีค่าการทำนายที่ดีที่สุดมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) และค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (RMSECV) เท่ากับ 0.99 และ 2.17 ppm ตามลำดับ ซึ่งสามารถพบผลในทำนองเดียวกันจากการทำนายสารปนเปื้อนในตัวอย่างมันสำปะหลัง คือแบบจำลองจากสเปกตรัมของตัวอย่าง รูปแบบ DESIR ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุดโดยมีค่า R และ ค่า RMSECV เท่ากับ 0.99 และ 3.72 ppm ตามลำดับ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีร่วมกับตัวอย่างรูปแบบ DESIR สำหรับตรวจวัดสารคาร์โบฟูรานในข้าวโพดอาหารสัตว์และมันสำปะหลังแบบรวดเร็ว

คำสำคัญ: วัตถุดิบอาหารสัตว์, สารกำจัดแมลง, เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี, ข้าวโพดอาหารสัตว์,
มันสำปะหลัง

บทสรุปผู้บริหาร

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ระบบเกษตรอุตสาหกรรมทั่วโลกในปัจจุบัน ส่งเสริมการพึ่งพาเคมีเกษตรอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นปุ๋ยสังเคราะห์ หรือสารเคมีกำจัดแมลงและศัตรูพืช เพื่อควบคุมป้องกันและกำจัดศัตรูพืช หรือโรคพืชต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มผลผลิตการเกษตร อย่างไรก็ตาม การมุ่งเน้นใช้สารเคมีเกษตรเพื่อเพิ่มผลผลิต ทำให้เกษตรกรละเลยด้านความปลอดภัยของผู้ใช้สารเคมีและผู้บริโภค การใช้สารเคมีดังกล่าวในปริมาณมาก อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภค และยังก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม หากใช้สะสมต่อเนื่องเป็นเวลายาวนาน จึงเป็นที่มาให้องค์การทางด้านสาธารณสุขของโลก เช่น World Health Organization (WHO) และ Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO) ทำการกำหนดปริมาณสารเคมีอันตรายตกค้างเพื่อควบคุมคุณภาพและความปลอดภัยของอาหารและผลผลิตทางการเกษตร สำหรับในประเทศไทย มีการรายงานปริมาณสารพิษตกค้างที่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนดในผลิตผลทางการเกษตรที่วางจำหน่ายทั้งตลาดในประเทศและต่างประเทศ โดยกลุ่มสหภาพยุโรป และสหรัฐ รวมถึงประเทศอาเซียนบางประเทศ ได้ระบุว่าพบสารตกค้างในสินค้าพืชผักของไทย เช่น ข้าว ข้าวโพด และมันสำปะหลัง รวมไปถึงในสินค้ากุ้งและไก่ ทำให้รัฐบาลวางนโยบายควบคุมมาตรฐานด้านความปลอดภัยของอาหารและสินค้าเกษตรอย่างจริงจัง ข้อมูลรายงานการสำรวจขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (2558) พบว่าประเทศไทย มีการใช้ยาฆ่าแมลงมากเป็นอันดับ 5 ของโลก ใช้ยาฆ่าหญ้าเป็นอันดับ 4 ของโลก ที่สำคัญจากการสำรวจในทุกปี ยังพบว่ามีพบสารเคมีตกค้างในผัก และสารเคมีที่เป็นพิษอันตรายต่อร่างกายที่ทั่วโลกห้ามใช้ สารคาร์โบฟูราน (carbofuran) เป็นวัตถุอันตรายทางการเกษตร ประเภทยาฆ่าแมลงกลุ่มคาร์บาเมต (carbamate) สารชนิดนี้ใช้กำจัดแมลงในวงกว้าง ทั้งหนอนกอ หนอนเมลงวัน เพลี้ยแป้ง เพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล ฯลฯ นิยมใช้ในนาข้าว พืชไร่ เช่น ถั่วเหลือง ข้าวโพด และพืชสวนเช่น กาแฟ ส้ม มะพร้าว ฯลฯ สารเคมีเหล่านี้เมื่อใช้ในปริมาณที่มากจะไม่สามารถกำจัดให้หมดได้โดยการทำความสะอาดด้วยการล้าง เพราะสารที่ตกค้างสามารถซึมเข้าสู่เนื้อเยื่อของผลผลิต ส่งผลให้เกิดภาวะสารเคมีตกค้างในผู้บริโภคและกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภคอีกด้วย

วัตถุดิบอาหารสัตว์ เป็นผลิตผลทางการเกษตรที่มีความสำคัญเป็นอันดับต้นๆ ในอุตสาหกรรมการผลิตสัตว์ เนื่องจากเป็นต้นทุนหลักในการเลี้ยงสัตว์ วัตถุดิบอาหารสัตว์ส่วนมากจะได้มาจากพืช ได้แก่ ข้าวโพด มันสำปะหลัง รำ ปลายข้าว เป็นต้น โดยในการเพาะปลูกพืชวัตถุดิบอาหารสัตว์ มักประสบปัญหาการปนเปื้อนสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้ในระหว่างการเพาะปลูกตกค้าง ซึ่งเป็นอันตรายอย่างยิ่งหากนำมาใช้เป็นส่วนผสมอยู่ในสูตรอาหารสัตว์ก็สามารถทำอันตรายกับสัตว์ได้ เช่น ทำให้ลูกสัตว์ต่างๆ จะมีอัตราการเติบโตช้าลงอย่างเห็นได้ชัด แม้สุกรจะแท้งลูกหรือตัวอ่อนตายในท้อง แมไก่มีอัตราการ

การไหลลดลงและมีอัตราการฟักออกต่ำ (สุกัญญา, 2539) ด้วยเหตุนี้ การตรวจสอบยาฆ่าแมลงตกค้างในวัตถุดิบอาหารสัตว์จึงมีความจำเป็นต่อความปลอดภัยของผู้บริโภคและสัตว์เลี้ยง

เพื่อให้ผู้บริโภคได้รับอาหารที่ปลอดภัย จึงต้องมีระบบการควบคุมและตรวจสอบคุณภาพความปลอดภัยตั้งแต่วัตถุดิบทางการเกษตรเริ่มต้นไปจนถึงผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการตรวจสอบสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในสินค้าเกษตรและผลพลอยได้ทางการเกษตร และเพื่อเพิ่มศักยภาพด้านการตรวจสอบสารพิษตกค้างดังกล่าว จึงควรมีการพัฒนาวิธีการตรวจสอบที่มีความรวดเร็ว ง่ายต่อการปฏิบัติ และมีประสิทธิภาพสูง และเทคนิควิเคราะห์แบบเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy: NIRS) เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพดังกล่าว ที่กำลังได้รับความนิยมในการตรวจวัดระดับอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นการตรวจวัดค่าองค์ประกอบทางเคมีในอาหาร (Tsenkova et al., 1999; Riovanto et al., 2012) และพืชผลทางการเกษตร เช่น ข้าว ข้าวโพด และผลไม้ต่าง ๆ (Lovett et al., 2004; Rittiron et al., 2005; Nicoli et al., 2007) เนื่องจากเป็นวิธีที่อาศัยหลักการสร้างสมการของค่าปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างที่สัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดของตัวอย่าง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการวิเคราะห์ ให้ผลรวดเร็ว และสามารถตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิดได้จากการตรวจวัดเพียงครั้งเดียว

สำหรับการตรวจสอบยาฆ่าแมลงในผลิตผลทางการเกษตร รวมถึงการวิเคราะห์สารที่ความเข้มข้นต่ำๆ ในระดับ ppm ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (NIRS) นั้น ยังมีการศึกษาค้นขาน้อย เช่น Saranwong and Kawano (2005) วิเคราะห์สารกำจัดเชื้อราที่ผิวมะเขือเทศด้วยเทคนิค Dry Extract System for Infrared (DESIR) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งหวังที่จะพัฒนาวิธีตรวจสอบยาฆ่าแมลงตกค้างในวัตถุดิบอาหารสัตว์แบบรวดเร็วด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีในวัตถุดิบอาหารสัตว์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้ได้อาหารที่มีคุณภาพและปลอดภัย อันจะส่งผลต่อการพัฒนาการผลิตทางเกษตรและการปศุสัตว์ และเสริมสร้างความมั่นคงด้านอาหารของประเทศไทยอย่างยั่งยืน

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการตรวจสอบสารคาร์โบฟูรานตกค้างในข้าวโพดอาหารสัตว์แบบรวดเร็วด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี
- 2) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการตรวจสอบสารคาร์โบฟูรานตกค้างในมันสำปะหลังแบบรวดเร็วด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

สารคาร์โบฟูราน เป็นสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มคาร์บาเมตที่จัดเป็นวัตถุอันตรายร้ายแรง ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2551 ควบคุมโดยกรมวิชาการเกษตร เนื่องจากเป็นสารมีพิษ

ร้ายแรง ดังนั้นจึงเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคที่บริโภคผลผลิตทางการเกษตรที่ไม่ผ่านกระบวนการรวมถึงการผสมวัตถุดิบอาหารสัตว์ในสูตรอาหารสัตว์โดยไม่ผ่านกระบวนการล้างหรือความร้อน ดังนั้นการตรวจสอบยาฆ่าแมลงตกค้างในวัตถุดิบอาหารสัตว์ ไม่ว่าจะเป็นข้าวโพดอาหารสัตว์ หรือมันสำปะหลัง ซึ่งจัดเป็นวัตถุดิบที่ใช้เป็นปริมาณมากในสูตรอาหารสัตว์ จึงมีความจำเป็นไม่น้อยไปกว่าการตรวจสอบสารตกค้างในพืชผักผลไม้ เนื่องจากสามารถส่งผลเสียต่อความเชื่อมั่นด้านความมาตรฐานคุณภาพและความปลอดภัยในระดับสากล อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันการผลิตสินค้าเกษตรเพื่อการส่งออกมีปริมาณมาก ในขณะที่วิธีการตรวจสอบสารเคมีตกค้างในปัจจุบันมีขั้นตอนการตรวจสอบที่ซับซ้อนและใช้เวลานาน ทำให้ปริมาณตัวอย่างที่สุ่มตรวจไม่มากเพียงพอ ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาวิธีการตรวจสอบที่มีความรวดเร็วและแม่นยำจึงมีความจำเป็นสำหรับการตรวจสอบผลผลิตระดับมหภาค เพื่อยกระดับมาตรฐานการควบคุมคุณภาพสินค้าเกษตรไทยในระดับสากล

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี เป็นวิธีการหนึ่งที่มีศักยภาพในการตรวจสอบแบบรวดเร็ว ใช้งานง่าย ไม่ใช้สารเคมี และยังสามารถตรวจสอบหลายดัชนีได้ในครั้งเดียว ซึ่งอาศัยหลักการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงย่านใกล้อินฟราเรดขององค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง มาทำการวิเคราะห์สร้างสมการทำนายค่าดัชนีที่สนใจต่าง ๆ ด้วยโปรแกรมคำนวณเฉพาะทางผ่านคอมพิวเตอร์ และมีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายในการตรวจสอบคุณค่าทางโภชนาของอาหารและผลผลิตเกษตร แต่ยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อยมากในการนำมาตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืช ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมีกรอบความคิดในการศึกษาประเมินประสิทธิภาพของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี สำหรับการตรวจสอบสารคาร์โบฟูรานตกค้างในข้าวโพดและมันสำปะหลัง เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจสอบสารกำจัดศัตรูพืชให้เป็นแบบรวดเร็วในวัตถุดิบอาหารสัตว์

วิธีดำเนินการวิจัย

ใช้ตัวอย่างข้าวโพดอาหารสัตว์ และมันสำปะหลังปลอดสารพิษ จำนวนชนิดละ 75 ตัวอย่าง นำสารละลายคาร์โบฟูรานที่มีความเข้มข้นต่างๆ จำนวน 25 ระดับ ในช่วง 0-50 ppm สเปรย์ใส่ตัวอย่างวัตถุดิบอาหารสัตว์ ระดับละ 3 ซ้ำ นำตัวอย่างที่ปนเปื้อนสารเคมีมาทำการวัดสเปกตรัมด้วยแสง NIR เพื่อใช้เป็นตัวแทนการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างวัตถุดิบอาหารสัตว์มาสกัดให้ได้สารละลายสกัดได้เป็นตัวอย่างรูปแบบของเหลว แล้วนำสารละลายสกัดที่ได้มาหยดลงบนกระดาษกรองใยแก้วปริมาตร 0.5 มล. เมื่อระเหยตัวทำละลายจนแห้งแล้วเรียกตัวอย่างสารคาร์โบฟูรานที่อยู่บนกระดาษกรองว่าตัวอย่าง DESIR สำหรับตัวอย่างรูปแบบของเหลวและตัวอย่าง DESIR นำมาทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง NIR ด้วยเช่นกัน

สำหรับการวิเคราะห์ด้วย NIRS นั้น วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างด้วยเครื่อง Multi purpose analyzer (MPA) FT-NIR spectroscopy (Bruker, Germany) ใช้แสงเนียร์อินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น 9000 ถึง 4000 cm^{-1} เพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงจากตัวอย่างทั้ง 3 รูปแบบด้วยโหมด

การวัดแบบสะท้อน โดยการสแกนตัวอย่างรูปแบบวัตถุดิบอาหารสัตว์บนนั้นจะบรรจุตัวอย่างใน quartz cup สำหรับตัวอย่างรูปแบบของเหลวสกัดจะบรรจุลงใน sample cell ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร โดยใช้ aluminum reflector เป็นตัวช่วยในการสะท้อนกลับของแสงไปยังตัวตรวจวัด และตัวอย่างรูปแบบ DESIR จะถูกวัดโดยอาศัยตัวช่วยสะท้อนแสง (aluminum reflector) วางทับบนกระดานกรอง เมื่อได้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างรูปแบบต่างๆ แล้ว ทำการวิเคราะห์ข้อมูลสร้างแบบจำลองวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วยวิธี partial least squares regression (PLSR) และคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) ที่สูงที่สุด ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (RMSECV) ต่ำที่สุด และค่า ratio of standard deviation of reference data in the validation set to SEP (RPD) ที่สูงที่สุด

ผลการวิจัย/ข้อค้นพบ

การจัดการตัวอย่างรูปแบบต่างๆ ทั้ง 3 รูปแบบเพื่อการวิเคราะห์ด้วย NIRS มีผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานในระดับ ppm ทั้งในตัวอย่างข้าวโพดอาหารสัตว์ และตัวอย่างมันสำปะหลัง โดยแบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลสเปกตรัมของตัวอย่างรูปแบบ DESIR มีประสิทธิภาพในการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานบนเปลือกในข้าวโพดอาหารสัตว์ และมันสำปะหลังได้ดีที่สุด ดังนั้นการกรองตัวอย่างเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความแม่นยำในการทำนายสารคาร์โบฟูรานในวัตถุดิบอาหารสัตว์ด้วยเทคนิค NIRS ในระดับ ppm ได้

ข้อเสนอแนะและการนำไปใช้ประโยชน์

เนื่องจากเทคนิค NIRS สามารถใช้ข้อมูลด้านองค์ประกอบของพันธะเคมีในตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ จึงมีความเป็นไปได้สูงในการนำมาใช้วิเคราะห์เพื่อจัดจำแนกกลุ่มหรือชนิดของสารกำจัดแมลง เพื่อประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบควบคุมความปลอดภัยของวัตถุดิบอาหารสัตว์และผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
Abstract	ก
บทคัดย่อ	ข
บทสรุปผู้บริหาร	ค
สารบัญ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ที่มาและความสำคัญของข้าวโพด	4
2.2 การใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชในประเทศไทย	8
2.3 คาร์โบฟูราน (Carbofuran)	11
2.4 การตรวจสอบยาฆ่าแมลงด้วยวิธีมาตรฐาน	14
2.5 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี	19
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย	29
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์	38
4.1 การทดลองที่ 1 การประเมินประสิทธิภาพการตรวจสอบปริมาณสารคาร์โบฟูรานตกค้างในข้าวโพดอาหารสัตว์แบบรวดเร็วด้วย NIRS	38
4.2 การทดลองที่ 2 การประเมินประสิทธิภาพการตรวจสอบปริมาณสารคาร์โบฟูรานตกค้างในมันสำปะหลังแบบรวดเร็วด้วย NIRS	46
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ	51
เอกสารอ้างอิง	52
Output ที่ได้จากโครงการ	57
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก สูตรคำนวณค่าที่ใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพแบบจำลอง	59
ภาคผนวก ข ค่าปริมาณสารคาร์โบฟูรานที่ปนเปื้อนจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย	61
ภาคผนวก ค การเสนอผลงานรูปแบบ oral presentation	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ระบบเกษตรอุตสาหกรรมทั่วโลกในปัจจุบัน ส่งเสริมการพึ่งพาเคมีเกษตรอย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นปุ๋ยสังเคราะห์ หรือสารเคมีกำจัดแมลงและศัตรูพืช เพื่อควบคุมป้องกันและกำจัดศัตรูพืชหรือโรคพืชต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มผลผลิตการเกษตร อย่างไรก็ตาม การมุ่งเน้นใช้สารเคมีเกษตรเพื่อเพิ่มปริมาณและรักษาคุณภาพผลผลิต ทำให้เกษตรกรละเลยด้านความปลอดภัยของผู้ใช้สารเคมีและผู้บริโภค การใช้สารเคมีดังกล่าวในปริมาณมาก อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภค เช่นเป็นสารก่อมะเร็ง และผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ (Gauthier et al., 2001; Landau-Ossondo et al., 2009) และยังก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อม เช่นการตกค้างที่ดินและแหล่งน้ำ หากใช้สะสมต่อเนื่องเป็นระยะเวลายาวนาน จึงเป็นที่มาให้องค์การต่าง ๆ ทางด้านสาธารณสุขของโลก เช่น Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO) และ World Health Organization (WHO) กำหนดปริมาณสารเคมีอันตรายตกค้างเพื่อควบคุมคุณภาพและความปลอดภัยของอาหารและผลผลิตทางการเกษตร สำหรับประเทศไทย ในระหว่างปี พ.ศ. 2540-2553 มีการนำเข้าสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชมากถึง 120,000 ตัน (แสงโสม, 2556) และมีการรายงานปริมาณสารพิษตกค้างที่เกินกว่าที่มาตรฐานกำหนดในผลผลิตทางการเกษตรที่วางจำหน่ายทั้งตลาดในประเทศและต่างประเทศ โดยกลุ่มสหภาพยุโรป และสหรัฐอเมริกา รวมถึงประเทศอาเซียน บางประเทศ ได้ระบุพบสารตกค้างในสินค้าพืชผัก ผลไม้ไทย เช่น ข้าวและมันสำปะหลัง รวมไปถึงในสินค้ากุ้งและไก่ ทำให้รัฐบาลวางนโยบายควบคุมมาตรฐานด้านความปลอดภัยของอาหารและสินค้าเกษตรอย่างจริงจัง

อาหารสัตว์มีความสำคัญ และจำเป็นต่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของสัตว์ อาหารของสัตว์สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติและเกิดขึ้นจากการแปรรูปที่ได้จากพืช หรือสัตว์ เป็นสิ่งที่มีสารอาหารและเป็นประโยชน์ในการบำรุงร่างกายแก่สัตว์ ซึ่งอาหารสัตว์ส่วนมากจะได้มาจากพืช ได้แก่ ข้าวโพด มันสำปะหลัง รำ ปลายข้าว เป็นต้น เมื่อสัตว์ได้กินอาหารเข้าไปแล้วก็เปลี่ยนเป็นพลังงาน และพร้อมที่จะนำไปใช้ในส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ได้แก่ การเจริญเติบโต อาหารสัตว์ถูกใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อในร่างกาย การดำรงชีพ การให้พลังงานในการทำงานของอวัยวะส่วนต่าง ๆ เพื่อสามารถให้มีชีวิตอยู่ต่อไปได้ เช่น การหายใจ การเคลื่อนไหว การสืบพันธุ์ และการให้ผลผลิตเป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในการเพาะปลูกพืชวัตถุดิบอาหารสัตว์ มักประสบปัญหาการปนเปื้อนสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้ในระหว่างการผลิตตกค้าง ซึ่งเป็นอันตรายอย่างยิ่งหากนำมาใช้เป็นส่วนผสมอยู่ในสูตรอาหารสัตว์ก็สามารถทำอันตรายกับสัตว์ได้ เช่น ทำให้ลูกสัตว์ต่างๆ จะมีอัตราการเติบโตช้าลงอย่างเห็นได้ชัด แม้สุกรจะแท้งลูกหรือตัวอ่อนตายในท้อง แม้

ไถ่มีอัตราการไต่ลดลงและมีอัตราการฟักออกต่ำ (สุกัญญา, 2539) ด้วยเหตุนี้ การตรวจสอบยาฆ่าแมลงตกค้างในวัตถุดิบอาหารสัตว์จึงมีความจำเป็นต่อความปลอดภัยของผู้บริโภคและสัตว์เลี้ยง

ข้อมูลรายงานการสำรวจของ องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (2558) พบว่าประเทศไทย มีการใช้ยาฆ่าแมลงมากเป็นอันดับ 5 ของโลก ใช้ยาฆ่าหญ้าเป็นอันดับ 4 ของโลก ที่สำคัญจากการสำรวจในทุกปี ยังพบว่ามีการพบสารเคมีตกค้างในผัก และสารเคมีที่เป็นพิษอันตรายต่อร่างกายที่ทั่วโลกห้ามใช้ สารคาร์โบฟูราน (carbofuran) เป็นวัตถุอันตรายทางการเกษตร ประเภทยาฆ่าแมลงกลุ่มคาร์บาเมต (carbamate) สารชนิดนี้ใช้กำจัดแมลงในวงกว้าง ทั้งหนอนกอ หนอนเมลงวัน เพลี้ยแป้ง เพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล ฯลฯ นิยมใช้ในนาข้าว พืชไร่ เช่น ถั่วเหลือง ข้าวโพด และพืชสวนเช่น กาแฟ ส้ม มะพร้าว ฯลฯ สารเคมีเหล่านี้เมื่อใช้ในปริมาณที่มากจะไม่สามารถกำจัดให้หมดได้โดยการทำความสะอาดด้วยการล้าง เพราะสารที่ตกค้างสามารถซึมเข้าสู่เนื้อเยื่อของผลผลิต ส่งผลให้เกิดภาวะสารเคมีตกค้างในผู้บริโภคและกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภคอีกด้วย

เพื่อให้ผู้บริโภคได้รับอาหารที่ปลอดภัย จึงต้องมีระบบการควบคุมและตรวจสอบคุณภาพความปลอดภัยตั้งแต่วัตถุดิบทางการเกษตรเริ่มต้นไปจนถึงผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการตรวจสอบสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในสินค้าเกษตรทั่วไป รวมไปถึงพืชที่เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ เนื่องจากสารพิษปนเปื้อนเหล่านี้อาจตกค้างอยู่ในผลผลิตจากสัตว์ เช่น เนื้อสัตว์ นม และไข่ ซึ่งมนุษย์นำมาบริโภคต่อได้ และเพื่อเพิ่มศักยภาพด้านการตรวจสอบสารพิษตกค้างดังกล่าว จึงควรมีการพัฒนาวิธีการตรวจสอบที่มีความรวดเร็ว ง่ายต่อการปฏิบัติ และมีประสิทธิภาพสูง และเทคนิควิเคราะห์แบบเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy: NIRS) เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพดังกล่าว ที่กำลังได้รับความนิยมในการตรวจวัดระดับอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นการตรวจวัดค่าองค์ประกอบทางเคมีในอาหาร (Tsenkova et al., 1999; Riovanto et al., 2012) และพืชผลทางการเกษตร เช่น ข้าว ข้าวโพด และผลไม้ต่าง ๆ (Kawano, 1995; Lovett et al., 2004; Rittiron et al., 2005; Nicoli et al., 2007) เนื่องจากเป็นวิธีที่อาศัยหลักการสร้างสมการของค่าปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างที่สัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดของตัวอย่าง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการวิเคราะห์ ให้ผลรวดเร็ว และสามารถตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิดได้จากการตรวจวัดเพียงครั้งเดียว

สำหรับการตรวจสอบยาฆ่าแมลงในผลิตผลทางการเกษตรด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (NIRS) นั้น ยังมีการศึกษาค้นคว้าจำกัดโดยเฉพาะในการวิเคราะห์สารที่ความเข้มข้นต่ำๆ ในระดับ ppm และมีการศึกษาค้นขำน้อย เช่น Saranwong and Kawano (2005) วิเคราะห์สารกำจัดเชื้อราที่ผิวมะเขือเทศด้วยเทคนิค Dry Extract System for Infrared (DESIR) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งหวังที่จะพัฒนาวิธีตรวจสอบยาฆ่าแมลงตกค้างในวัตถุดิบอาหารสัตว์แบบรวดเร็วด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีในวัตถุดิบอาหารสัตว์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้ได้อาหารที่มีคุณภาพและปลอดภัย อันจะส่งผล

ต่อการพัฒนาการผลิตทางเกษตรและการปศุสัตว์ และเสริมสร้างความมั่นคงด้านอาหารของประเทศไทยอย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการตรวจสอบสารคาร์โบฟูรานตกค้างในข้าวโพดอาหารสัตว์แบบรวดเร็วด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี
- 2) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการตรวจสอบสารคาร์โบฟูรานตกค้างในมันสำปะหลังแบบรวดเร็วด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

1.3 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

สารคาร์โบฟูราน เป็นสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มคาร์บาเมตที่จัดเป็นวัตถุอันตรายร้ายแรง ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2551 ควบคุมโดยกรมวิชาการเกษตร เนื่องจากเป็นสารมีพิษร้ายแรง ดังนั้นจึงเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคที่บริโภคผลผลิตทางการเกษตรที่ไม่ผ่านกระบวนการแปรรูป รวมถึงการผสมวัตถุดิบอาหารสัตว์ในสูตรอาหารสัตว์โดยไม่ผ่านกระบวนการล้างหรือความร้อน ดังนั้นการตรวจสอบยาฆ่าแมลงตกค้างในวัตถุดิบอาหารสัตว์ ไม่ว่าจะเป็นข้าวโพดอาหารสัตว์ หรือมันสำปะหลัง ซึ่งจัดเป็นวัตถุดิบที่ใช้เป็นปริมาณมากในสูตรอาหารสัตว์ จึงมีความจำเป็นไม่น้อยไปกว่าการตรวจสอบสารตกค้างในพืชผักผลไม้ เนื่องจากสามารถส่งผลเสียต่อความเชื่อมั่นด้านความมาตรฐานคุณภาพและความปลอดภัยในระดับสากล อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันการผลิตสินค้าเกษตรเพื่อการส่งออกมีปริมาณมาก ในขณะที่วิธีการตรวจสอบสารเคมีตกค้างในปัจจุบันมีขั้นตอนการตรวจสอบที่ซับซ้อนและใช้เวลานาน ทำให้ปริมาณตัวอย่างที่สุ่มตรวจไม่มากเพียงพอ ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาวิธีตรวจสอบที่มีความรวดเร็วและแม่นยำจึงมีความจำเป็นสำหรับการตรวจสอบผลผลิตระดับมหภาค เพื่อยกระดับมาตรฐานการควบคุมคุณภาพสินค้าเกษตรไทยในระดับสากล

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี เป็นวิธีการหนึ่งที่มีศักยภาพในการตรวจสอบแบบรวดเร็วใช้งานง่าย ไม่ใช้สารเคมี และยังสามารถตรวจสอบหลายดัชนีได้ในครั้งเดียว ซึ่งอาศัยหลักการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงย่านใกล้อินฟราเรดขององค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง มาทำการวิเคราะห์สร้างสมการทำนายค่าดัชนีที่สนใจต่าง ๆ ด้วยโปรแกรมคำนวณเฉพาะทางผ่านคอมพิวเตอร์ และมีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายในการตรวจสอบคุณค่าทางโภชนาการและผลผลิตเกษตร แต่ยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อยมากในการนำมาตรวจวัดสารกำจัดศัตรูพืช ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมีกรอบความคิดในการศึกษาประเมินประสิทธิภาพของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี สำหรับการตรวจสอบสารคาร์โบฟูรานตกค้างในข้าวโพดและมันสำปะหลัง เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจสอบสารกำจัดศัตรูพืชให้เป็นแบบรวดเร็วในวัตถุดิบอาหารสัตว์

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ที่มาและความสำคัญของข้าวโพด

ข้าวโพด (Indian Corn หรือ Maize) มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Zea mays* เป็นพืชตระกูลเดียวกับหญ้ามีลำต้นสูง โดยเฉลี่ย 2.2 เมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้น 0.5-2.0 นิ้ว ถิ่นกำเนิดก็คือ ได้มีการขุดพบซังข้าวโพดและซากของต้นข้าวโพดที่ใกล้แม่น้ำในนิวยอร์ก (แถบอเมริกาใต้) และปัจจุบันนิยมปลูกแพร่หลายในแถบอเมริกา แคนาดา ฯลฯ สามารถปลูกได้ในสภาพที่ภูมิอากาศแตกต่างกันมาก ๆ เป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของสัตว์ เพราะสามารถนำมาเลี้ยงสัตว์ได้ทั้งต้น ใบ และเมล็ด ข้าวโพดมีองค์ประกอบพื้นฐานเคมีที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบพื้นฐานเคมีของข้าวโพด

ส่วนประกอบทางเคมี (%)	
ความชื้น	13
โปรตีน	8
ไขมัน	4
เยื่อใย	2.5
เถ้า	1.3
แคลเซียม	0.01
ฟอสฟอรัส	0.10

สำหรับประเทศไทย คนไทยรู้จักนำข้าวโพดมาเลี้ยงสัตว์ตั้งแต่หลังสงครามโลกครั้งที่ 1 โดย ม.จ.สิทธิพร กฤษดากร ได้นำข้าวโพดพันธุ์ที่ใช้เลี้ยงสัตว์มาปลูกและทดลองใช้เลี้ยงสัตว์ ซึ่งในขณะนั้นเป็นที่รู้จักกันน้อยในหมู่นักวิชาการ จนกระทั่งหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 การใช้ข้าวโพดเริ่มแพร่หลายขึ้นในหมู่นักวิชาการ จนกระทั่งหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 การใช้ข้าวโพดเริ่มแพร่หลายขึ้นในหมู่นักวิชาการ ทั้งนี้เนื่องจาก คุณหลวงสุวรรณ วาจกกลกิจได้นำการเลี้ยงไก่แบบการค้ามาเริ่มสาธิต และกระตุ้นให้ประชาชนปฏิบัติตามผู้เลี้ยงไก่จึงรู้จักใช้ข้าวโพดมากขึ้นกว่าเดิม แต่เนื่องจากกระแสนั้นข้าวโพดมีราคาสูงและหายาก การใช้ข้าวโพดจึงใช้เป็นเพียงส่วนประกอบของอาหารหลัก ซึ่งมีรำและปลายข้าวเป็นส่วนใหญ่ แต่ในปัจจุบันผู้เลี้ยงสัตว์รู้จักข้าวโพดกันทั่ว และประเทศไทยได้ปลูกข้าวโพดในปีหนึ่ง ๆ จำนวนไม่น้อย หัสนำมาใช้เองและส่งออกต่างประเทศ คิดพื้นที่ ๆ เพาะปลูกเฉลี่ยแล้วตั้งแต่ปี 18 เป็นต้นมา ปลูกไม่ต่ำกว่า

8,000,000 ไร่/ปี ปริมาณข้าวโพดที่ผลิตได้ ได้นำมาใช้ภายในประเทศ 10-15% ของที่ผลิตได้ หรือถ้านับรวมทั้งการใช้เลี้ยงสัตว์และค่าเมล็ดพันธุ์เพาะปลูกประมาณ 5-6 แสนตันต่อปี

2.1.1 ชนิดของข้าวโพด

ข้าวโพดที่ใช้เลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยมีหลายพันธุ์ ที่นิยมปลูกในประเทศไทยได้แก่ พันธุ์แก้วเตมาลา พีบี 12(Rep.1) แก้วเตมาลา พีบี 12(Rep.2) พีบี 5 ข้าวโพดเหนียว และโอเปก-2 มีเมล็ดตั้งแต่สีขาว สีเหลืองไปจนถึงสีแดง ขนาดของเมล็ดขึ้นอยู่กับพันธุ์ โดยทั่วไปจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.5-0.8 ซม. ก่อนนำมาเลี้ยงสัตว์จึงต้องบดก่อนเพื่อช่วยให้การย่อยและการผสมได้ผลดีขึ้น ที่บดแล้วจะมีขนาดประมาณ 1-8 มิลลิเมตร โดยทั่วไปข้าวโพดจัดออกเป็น 5 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์หรือข้าวโพดไร่ (Field Corn) ที่รู้จักในปัจจุบันมีข้าวโพดหัวบวม(Dent Coorn) และข้าวโพดหัวแข็ง (Fint Corn) ซึ่งเป็นการเรียกตามลักษณะเมล็ด

- ข้าวโพดหัวบวมหรือหัวบุบ ข้าวโพดชนิดนี้เมื่อเมล็ดแห้งแล้วตรงส่วนหัวบนสุดจะมีรอยบุ๋มลงไป ซึ่งเป็นส่วนของแบ่งสีขาว ข้าวโพดชนิดนี้สำคัญมากและนิยมปลูกกันมากใน ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเฉพาะทางแถบคอร์นเบลท์ สีของเมล็ดมีตั้งแต่ขาวไปจนถึงเหลือง เนื่องจากมีหลายสายพันธุ์มีโปรตีนน้อยกว่าพวกข้าวโพดหัวแข็ง
- ข้าวโพดหัวแข็ง ข้าวโพดพันธุ์นี้ส่วนบนสุดของเมล็ดมักมีสีเหลืองจัดและเมื่อแห้งจะแข็งมาก ภายในเมล็ดมีสารที่ทำให้ข้าวโพดมีสีเหลืองจัดเป็นสารให้สีที่ชื่อ คริปโตแซนทีน (Cruptoxanthin) สารนี้เมื่อสัตว์ได้รับร่างกายสัตว์จะเปลี่ยนสารนี้ให้เป็นวิตามินเอ นอกจากนี้สารนี้ยังช่วยให้ไข่แดงมีสีแดงเข้ม ช่วยให้ไก่มีผิวหนัง ปาก เนื้อ และแข้งมีสีเหลืองเข้มขึ้น เป็นที่นิยมของตลาดโดยเฉพาะแถบอเมริกาส่วนอังกฤษนั้นนิยมใช้ข้าวโพดขาว

กลุ่มที่ 2 ข้าวโพดหวาน (Sweet Corn) เป็นข้าวโพดที่คนใช้รับประทาน ไม่มีการแปรรูปเมล็ด มักจะใสและเหนียวเมื่อแก่เต็มที่ เพราะมีน้ำตาลมากก่อนที่จะสุกจะมีรสหวานมากกว่าชนิดอื่น ๆ จึงเรียกข้าวโพดหวาน มีหลายสายพันธุ์

กลุ่มที่ 3 ข้าวโพดคั่ว (Pop Corn) เป็นข้าวโพดที่คนใช้รับประทาน ไม่มีการแปรรูป เมล็ดค่อนข้างแข็ง สีดีและขนาดแตกต่างกัน สำหรับต่างประเทศ ถ้าเมล็ดมีลักษณะแหลมเรียกว่า ข้าวโพดข้าว (Rice Corn) ถ้าเมล็ดกลม เรียกว่า ข้าวโพดไข่มุก (Pearl Corn)

กลุ่มที่ 4 ข้าวโพดแป้ง (Flour Corn) เมล็ดมีสีหลายชนิด เช่น ขาว (เช่น ๆ หรือปนเหลืองนิด ๆ) หรือสีน้ำเงินคล้ำ หรือมีทั้งสีขาวและสีน้ำเงินคล้ำในฝักเดียวกัน เนื่องจากกลายพันธุ์ พวกที่มีเมล็ดสีคล้ำ และพวกกลายพันธุ์เรียกว่าข้าวโพดอินเดียนแดง (Squaw Corn) หรือเรียกได้อีกชื่อว่าข้าวโพดพันธุ์พื้นเมือง (Native Corn) พวกข้าวโพดสีคล้ำนี้จะมีในอาซิน สูงกว่าข้าวโพดที่มีแป้งสีขาว

กลุ่มที่ 5 ข้าวโพดเทียน (Waxy Corn) เป็นข้าวโพดที่คนใช้รับประทาน จะมีแป้งที่มีลักษณะเฉพาะคือ นุ่มเหนียว เพราะในเนื้อแป้งจะประกอบด้วยแป้งพวกแอมมิโลเปคติน (Amylopectin) ส่วนข้าวโพดอื่น ๆ มีแป้งแอมมิโลส (Amylose) ประกอบอยู่ด้วย จึงทำให้แป้งค่อนข้างแข็ง

2.1.2 วิธีการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ใช้ได้หลายรูปแบบทั้งอาหารหยาบและอาหารข้น การใช้ในรูปอาหารหยาบคือ ใช้ต้น ใบ ชัง ทั้งสภาพสด และแห้งและหมักส่วนอาหารข้นใช้ได้ทั้งเมล็ด ทั้งในรูปแหล่งให้พลังงานและแหล่งเสริมโปรตีน ซึ่งได้จากผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจากอุตสาหกรรมแปรรูปข้าวโพด น้ำมันข้าวโพด และน้ำหวานจากข้าวโพด ซึ่งผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเหล่านี้มีหลายชนิด

1) เมล็ดข้าวโพดบด โดยปกติ หมายถึงเมล็ดข้าวโพดที่มีสีออกจากฝักแล้วนำมาบดหรือทำให้แตกออก การบดไม่ควรบดให้ละเอียดเกินไป เพราะสัตว์ไม่ชอบกิน ข้าวโพดที่บดแล้วจะเก็บไว้ได้นานต้องมีความชื้นไม่เกิน 12 % ข้าวโพดบดผสมอาหารได้ดีถึง 70-80% โดยไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์ ถือว่าเป็นอาหารชั้นที่ดี ลักษณะข้าวโพดบดแบบนี้มักนิยมบดใช้เองในฟาร์ม

ในต่างประเทศ ข้าวโพดบดจากกรรมวิธีการผลิตในปัจจุบัน หมายถึงข้าวโพดที่แยกเอาส่วนของเปลือกนอกของเมล็ด (Hull) และส่วนจุดงอกหรือคัพพะ (Germ) ของเมล็ดออกไปแล้วและนำมาบด เมล็ดข้าวโพดบดไม่ควรมีส่วนเปลี่ยนแปลงปลอมมากเกินไป 4 % สิ่งที่มีปนมาก็คือ ชังและเปลือกข้าวโพด

สำหรับการเก็บเมล็ดข้าวโพด จะต้องเก็บในลักษณะที่เมล็ดแห้งจริง ๆ เมล็ดข้าวโพดนิยมใช้เป็นอาหารสุกร วัว สัตว์ปีก ม้า ล่อ และแพะ-แกะ และนอกจากนี้ใช้หมักทำแอลกอฮอล์ และประกอบเป็นอาหารคน เล่น ทำแป้งข้าวโพด สกัดเอาน้ำมันข้าวโพด ทำน้ำหวานจากข้าวโพด น้ำตาลหรือน้ำส้มจากข้าวโพด หรือบริโภคในรูปข้าวโพดทั้งฝัก หรือข้าวโพดคั่ว นอกจากจะนิยมรับประทานโดยไม่แปรรูป แล้วอาจนำมาทำเป็นเครื่องกระป๋อง หรือต่างประเทศนิยมแช่แข็งเก็บไว้บริโภค คุณค่าของโภชนะในข้าวโพดที่ปลูกในอเมริกา ค่อนข้างจะแปรปรวนขึ้นอยู่กับพันธุ์ และสถานที่ปลูก ข้าวโพดมีวิตามินเอ สูงมาก แต่มีวิตามินบีรวมต่ำ ก่อนจะบดข้าวโพดต้องเลือกสิ่งแปลกปลอมออก

2) ข้าวโพดบดทั้งฝักโดยแกะเปลือกออกแล้ว โดยปกติจะมีชังติดมาตามธรรมชาติประมาณ 20% เป็นอาหารที่เบาฟาม มีกากมากขึ้นเมื่อเทียบกับเมล็ดข้าวโพดบด เหมาะสำหรับแม่โค พ่อโคพันธุ์เนื้อ โคนม ในกรณีที่ใช้ในไก่ไข่และไก่อระยะเติบโตจะให้ผลดีเท่ากับเมล็ดข้าวโพดบดละเอียด เหมาะสำหรับสุกอุ้มท้องเพื่อกันอ้วน แต่ไม่เหมาะสำหรับสุกรขุน แต่ถึงอย่างไรซึ่งข้าวโพดยังมีคุณค่าทางอาหารสูงกว่าฟางข้าว แม้ว่าโปรตีนจะน้อยกว่าค่อนข้างยาก เนื่องจากซึ่งข้าวโพดย่อยยาก การบดข้าวโพดทั้งฝัก ถ้าบดละเอียด หมายถึงข้าวโพดต้องสามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ได้ทั้งหมด และผ่านเบอร์ 10 ได้ 50 %

3) เลี้ยงสัตว์โดยใช้ข้าวโพดทั้งฝัก โดยให้สัตว์กินเอาเปลือกออกหรือไม่ก็ตาม และมีอาหารโปรตีนวิตามิน แร่ธาตุใส่รางต่างหาก ข้าวโพดที่ไม่ได้แกะเปลือกออกจะป้องกันตัวเปลี้ยได้ดี ข้าวโพดทั้งฝักที่เก็บในโรงเก็บจะมีความชื้นประมาณ 14 % ซึ่งในระยะที่ปลิดฝักจะมีความชื้นตั้งแต่ 16-30 % การให้ข้าวโพดทั้งฝักใช้ได้ดีในพวกวัว

4) ซึ่งข้าวโพด อันที่จริงแล้วจัดเป็นอาหารหยาบที่ให้พลังงาน หมายถึง ฝักข้าวโพดที่กะเทาะเปลือกออกแล้วนำมาบดเลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้องเช่น วัวนม หรือพ่อโค แม่พันธุ์โคเนื้อ เพื่อป้องกันไม่ให้สัตว์เคี้ยวเอื้องอ้วนเกินไป และยังช่วยเพิ่มปริมาณไขมันนมให้สูงขึ้น เพราะเป็นอาหารที่มีเยื่อใย (กาก) สูงแต่ยัง

มีคุณค่าสูงกว่าฟางข้าว นิยมใช้เมื่อขาดแคลนหญ้าสด แต่เนื่องจากชังข้าวโพดย่อยยาก ดังนั้น ก่อนนำมาเลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้องจะต้อง

4.1) บดจนละเอียด

4.2) มีอาหารเสริมโปรตีนอย่างเพียงพอ (เพื่อช่วยเพิ่มจุลินทรีย์ในทางเดินอาหาร)

4.3) ใช้อาหารที่มีแป้งที่ละลายได้หรือย่อยง่ายผสมด้วย

4.4) เสริมแร่ธาตุโดยเฉพาะฟอสฟอรัส ซึ่งสัตว์มักขาดหากได้รับชังข้าวโพดบดใช้เลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้องได้แต่ไม่เหมาะกับสุกร ไก่ นอกจากนำมาเป็นวัสดุรองพื้นคอก อัตราที่ใช้เลี้ยงวัวได้ผลดีใกล้เคียงกับหญ้าสด คือ 2 กิโลกรัม/ วัน

5) ข้าวโพดบดชนิดหยาบ หมายถึง ข้าวโพดที่ถูกนำมาร่อน เพื่อแยกเอาส่วนที่ละเอียดหรือมีขนาดเล็กออกไป ส่วนที่เหลือจะมีขนาดใหญ่ จึงเรียก สกริน แครก คอรัน ซึ่งในที่นี้เรียกเป็นข้าวโพดบดชนิดหยาบ ไม่ควรมีสัดส่วนแป้งเกิน 4%

6) ปลายข้าวโพด เป็นส่วนที่แข็งมากของเมล็ดขนาดกลางซึ่งอาจมีส่วนของรำและบริเวณที่งอกเป็นต้นข้าวโพด (Germ) ปนมาบ้างเล็กน้อย หรือไม่มีเลย แป้งส่วนที่แข็งมากนี้มีสีเหลืองและสีขาวหรืออย่างใดอย่างหนึ่ง มีไขมันไม่เกิน 4% ถ้าเมล็ดสีขาวจะเรียก White corn grits ถ้าเป็นสีเหลืองเรียก Yellow corn Grits

7) กลุ่มผลิตผลพลอยได้จากการทำแป้งข้าวโพด ในการทำแป้งข้าวโพด จะมีผลพลอยได้หลายชนิด ทั้งที่มีโปรตีนสูง จึงเป็นแหล่งโปรตีน

7.1) โฮมินีฟีด (Hominy feed) เป็นส่วนผสมของรำข้าวโพด ส่วนของเจอร์มและส่วนที่เป็นแป้ง ไม่ว่าจะเป็นสีขาวหรือเหลือง ซึ่งเป็นผลิตผลข้างเคียงจากการผลิต คือเมล็ดข้าวโพดบดที่ขัดเอาส่วนเปลือกผิว และเจอร์มออกไปแล้ว ผู้คนนิยมนำไปต้มบริโภค เรียก (Table corn meal) โฮมินีฟีดนี้จะมีไขมันอยู่ไม่น้อยกว่า 4%ได้มีการทดลองพบว่ามีไขมันอยู่ตั้งแต่ 4.3-7.8 % ค่า EM ตั้งแต่ 2618-3366 Kcal ME/kg. ที่ความชื้น 10% ในปัจจุบันโรงงานใช้ระบบเคมีสกัด (Solvent extracted hominy feed) จะให้พลังงานต่ำกว่านี้ มีคุณค่าอาหารสัตว์ป้อนน้อยลง เป็นแหล่งที่มีกรดไขมันลิโนเลอิกมากพอสมควร สามารถใช้แทนข้าวโพดในสูตรอาหารปศุสัตว์ และใช้แทนเมล็ดธัญพืชในสูตรอาหารสัตว์ปีก

7.2) คอรันแพลนท์พัลป์ (Corn plant pulp) เป็นกากข้าวโพดที่ได้จากการคั้นเอาน้ำข้าวโพดออกไปแล้ว นำมาทำให้แห้ง ส่วนน้ำข้าวโพดนำไปทำน้ำเชื่อมหรือน้ำตาลต่อไป

7.3) ฮีทโปรเซสคอร์ด (Heat process cord) คล้ายข้าวโพดบดทั้งฝัก แต่ชื่อเรียกต่างกันตามการทำ โดยนำข้าวโพดทั้งฝักยังไม่แกะเปลือกมานึ่งภายใต้ความดัน หรืออบให้แห้งด้วยความร้อนโดยตรง แล้วบดหรืออัดเม็ด หรือทับเป็นแผ่น แบบๆ เช่น Corn Flake

2.1.3 คุณค่าทางอาหารของข้าวโพด

มีแป้ง 65% เยื่อใยต่ำ มีพลังงานแบบเมตาโบไลซ์ (ME)สูงมีไขมัน 3-6% มีกากไขมันไม่อิ่มตัวสูง มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดไขมันเหลวในสัตว์ได้ โปรตีนรวม 8-13% มีอยู่ 2 ชนิด คือซีนหรือ เซอิน (Zein) ซึ่งพบในเนื้อใน (Endosperm) ในปริมาณมาก แต่โปรตีนชนิดนี้ขาด (Lysine) และ (Tryptophan) ส่วนกลูเทนิน จะพบใน Endosperm น้อย และคัพพะ มีอยู่บ้าง แต่มีส่วนประกอบของ EAA ต่ำกว่า Zein เพราะมีไลซีน และทริปโตเฟน ประกอบอยู่ในปริมาณที่สูงกว่า

2.2 การใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชในประเทศไทย

เป็นสารเคมีที่พัฒนาเพื่อใช้ควบคุม ป้องกัน หรือกำจัดศัตรูพืช ทั้งแมลงและวัชพืช ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มผลผลิตทางการเกษตรได้ โดยสารกำจัดศัตรูพืชส่วนมากที่ใช้ในประเทศไทยมาจากการนำเข้าในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากทุกปี อย่างไรก็ตาม การใช้เคมีเกษตรเหล่านี้ให้มีประสิทธิภาพและปลอดภัย ผู้ใช้จะต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารเคมี วิธีการใช้ ตลอดจนข้อควรระวัง เนื่องจากเป็นวัตถุอันตรายทางการเกษตรที่อาจส่งผลกระทบต่อระยะยาวทำให้เกิดมะเร็ง และผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ (Gauthier et al., 2001; Landau-Ossondo et al., 2009; Rai et al., 2009) ตลอดจนผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Plangklang and Reungsang, 2009) มีการแบ่งสารเคมีกำจัดศัตรูพืชออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 4 ประเภท คือ

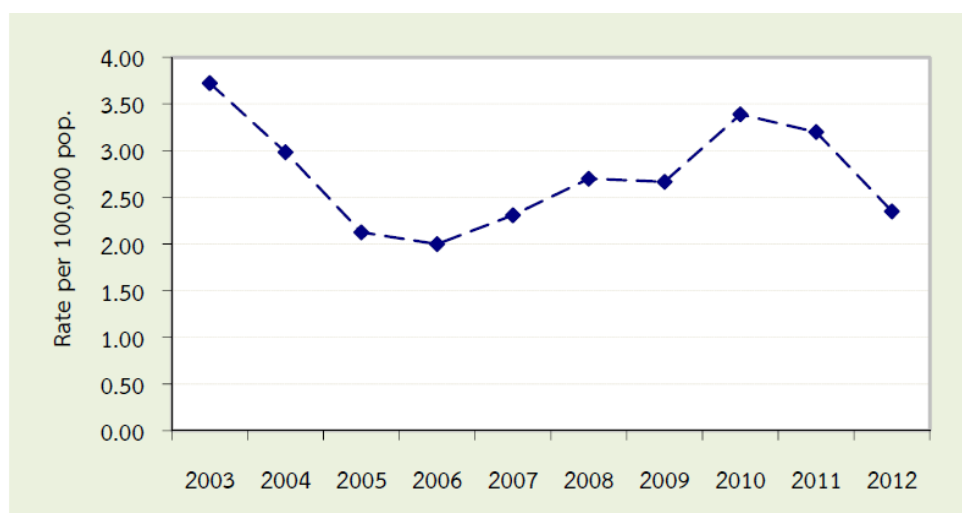
1) *กลุ่มออร์กาโนคลอไรด์* ซึ่งเป็นกลุ่มของสารเคมีที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ สารเคมีกำจัดแมลงในกลุ่มนี้ที่นิยมใช้กันมาก คือ ดีดีที (DDT), ดีลด์ริน (dieldrin), ออลดริน (aldrin), ท็อกซาฟีน (toxaphene), คลอเดน (chlordane), ลินเดน (lindane), เอนดริน (endrin), เฮปตาคลอ (heptachlor) เป็นต้น สารเคมีในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นสารเคมีที่มีพิษไม่เลือก (คือเป็นพิษต่อแมลงทุกชนิด) และค่อนข้างจะสลายตัวช้า ทำให้พบตกค้างในห่วงโซ่อาหารและสิ่งแวดล้อมได้นาน บางชนิดอาจตกค้างได้นานหลายสิบปี ปัจจุบันประเทศส่วนใหญ่ทั่วโลกจะไม่อนุญาตให้ใช้สารเคมีในกลุ่มนี้ หรือไม่ก็มีการควบคุมการใช้ ไม่อนุญาตให้ใช้อย่างเสรี เพราะมีผลกระทบในด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

2) *กลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต* ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ โดยสารเคมีในกลุ่มนี้ที่รู้จักกันคือ มาลาไธออน (malathion), อาซินอน (diazinon), เฟนิโตรไธออน (fenitrothion), ไพริมิฟอสเมทิล (pirimiphos methyl), และไดคลอวอส (dichlorvos หรือ DDVP) เป็นต้น สารเคมีในกลุ่มนี้จะมีพิษรุนแรงมากกว่ากลุ่มอื่น โดยเป็นพิษทั้งกับแมลงและสัตว์อื่นๆ ทุกชนิด แต่สารในกลุ่มนี้จะย่อยสลายได้เร็วกว่ากลุ่มแรก

3) *กลุ่มคาร์บาเมต* ซึ่งมีคาร์บาริลเป็นองค์ประกอบสำคัญ เป็นสารเคมีกำจัดแมลงที่รู้จักและใช้กันมาก คือ คาร์บาริล (carbaryl ที่มีชื่อการค้า Savin), คาร์โบฟูแรน (carbofuran), โพรพ็อกเซอร์ (propoxur), เบนไดโอคาร์บ (bendiocarb) สารเคมีในกลุ่มคาร์บาเมตจะมีความเป็นพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมน้อยกว่าพวกออร์กาโนฟอสเฟต

4) *กลุ่มสารสังเคราะห์ไพรีทรอย* เป็นสารเคมีกลุ่มที่สังเคราะห์ขึ้นโดยมีความสัมพันธ์ตามโครงสร้างของไพรีทริน ซึ่งเป็นสารธรรมชาติที่สกัดได้จากพืชไพรีทรัม (เป็นไม้ยืนต้นที่ชอบอากาศหนาวเย็น หรือเรียกว่าดอกไม้มะเขี๋ยงสำหรับแมลง) สารเคมีในกลุ่มนี้มีความเป็นพิษต่อแมลงสูง แต่มีความเป็นพิษต่อสัตว์เลือดอุ่นต่ำ อย่างไรก็ตามสารเคมีกลุ่มนี้มีราคาแพงจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้ สารเคมีกำจัดแมลงในกลุ่มนี้ ได้แก่ เดลตาเมธริน (deltamethrin), เพอร์เมธริน (permethrin), เรสเมธริน (resmethrin), และไบโอเรสเมธริน (bioresmethrin) เป็นต้น

สำหรับประเทศไทยในปัจจุบัน มีการอนุญาตให้ขึ้นทะเบียนและนำสารเคมีกำจัดศัตรูพืชเข้ามาใช้ในประเทศทั้งหมดกว่า 27,000 รายการ โดยให้กรมวิชาการเกษตรเป็นหน่วยงานหลักในการควบคุมวัตถุอันตรายทางการเกษตร ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2551 จากการเฝ้าระวังโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม โดยสำนักกระบาดวิทยา พบว่าระหว่างปี พ.ศ. 2546 – 2555 มีรายงานผู้ป่วยได้รับพิษจากสารป้องกันกำจัดศัตรูพืชทั้งสิ้น 17,340 ราย คือเฉลี่ยปีละ 1,734 ราย อัตราป่วย 2.35 ต่อประชากรแสนคน (ภาพที่ 2.1) โดยเฉพาะกลุ่มเกษตรกรที่ได้รับสัมผัสกับสารกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต (organophosphate) และคาร์บาเมต (carbamate) ในจำนวนนี้มีการขึ้นทะเบียนสารเคมีอันตรายร้ายแรง 4 ชนิด ที่หลายประเทศทั่วโลกห้ามใช้และปฏิเสธการขึ้นทะเบียน ซึ่งยังไม่มีประกาศห้ามใช้ในประเทศไทย แต่กลับเป็นสารเคมีที่ได้รับความนิยมใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากออกฤทธิ์กับศัตรูพืชได้หลากหลายชนิด สารเคมีที่เป็นพิษร้ายแรง 4 ชนิดดังกล่าว คือ คาร์โบฟูราน (carbofuran), เมโทมิล (methomyl), อีพีเอ็น (ethyl p-nitrophenyl thionobenzenephosphonate: EPN) และไดโครโตฟอส (dicrotophos) (ตารางที่ 2.2) เป็นสารที่ถูกห้ามใช้ในหลายประเทศรวมถึงประเทศคู่ค้าของไทย โดยมีการรณรงค์ที่จะยุติการขึ้นทะเบียนสารเคมีดังกล่าว



ภาพที่ 2.1 อัตราป่วยจากการได้รับพิษจากสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืช ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2003-2012 (แสงโสม, 2556)

ผลกระทบทางสุขภาพของสารเคมีกำจัดศัตรูเฝ้าระวัง 4 ชนิด คือ คาร์โบฟูราน, เมโทมิล, ไดโครโตฟอส และอีพีเอ็น ซึ่งเป็นสารพิษร้ายแรงและอันตรายถึงชีวิตแม้จะได้รับสารพิษเพียงเล็กน้อย มีดังนี้ (เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเพื่อการเฝ้าระวังสารเคมีทางการเกษตร, 2554)

- 1) คาร์โบฟูราน มีพิษเฉียบพลันคือ พิษต่อระบบประสาทและหัวใจ หลอดเลือด โดยทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดเกร็งที่ท้อง เหงื่อออก ท้องเสีย เสียการทรงตัว มองเห็นไม่ชัด หายใจลำบาก ความดันโลหิตสูงขึ้น กลั้นปัสสาวะไม่อยู่ พิษเรื้อรังเมื่อสัมผัสสารเป็นเวลานาน ได้แก่ การเสื่อมของเซลล์หรือการแบ่งตัวผิดปกติของเซลล์ตับ พิษต่อระบบสืบพันธุ์ ความผิดปกติและการตายของอสุจิ ทำลายระบบต่อมไร้ท่อที่เกี่ยวข้องกับระบบสืบพันธุ์ เกิดการวิรูปในทารกซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตในระยะยาว ทำให้เป็นเบาหวานในขณะตั้งครรภ์ ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ ก่อพิษต่อยีน เป็นพิษต่อเซลล์สมอง เมื่อถูกกระบวนการสันดาปในกระเพาะอาหารหรือภายใต้สภาวะที่เป็นกรด และเปลี่ยนเป็น N-nitrosocarbonylurea จะมีฤทธิ์เป็นสารก่อการกลายพันธุ์และสารก่อมะเร็งที่รุนแรง
- 2) เมโทมิล มีพิษเฉียบพลันคือ ตาพร่า ปวดศีรษะ วิงเวียน คลื่นไส้ อาเจียน ปวดเกร็งที่ท้อง แน่นหน้าอก เหงื่อออกมาก ชีพจรเต้นช้าลง หากเกิดพิษเฉียบพลันร้ายแรงจะมีอาการชัก กระตุก สับสนมึนงง ความดันต่ำ หัวใจเต้นไม่เป็นจังหวะ การหายใจล้มเหลวและทำให้เสียชีวิต เมโทมิลยังมีฤทธิ์ทำลายในระดับ DNA และมีผลต่อปอด ผิวหนัง ลำไส้ ไต ม้าม และอวัยวะที่สร้างเลือด โดยความรุนแรงขึ้นอยู่กับวิธีการได้รับสารเคมี ระยะเวลาและปริมาณ แม้ว่าสารเคมีชนิดนี้จะไม่สะสมในร่างกาย แต่เมโทมิลอาจก่อความผิดปกติต่อเอนไซม์ชนิดอื่น นอกเหนือจากเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรสที่เกี่ยวกับระบบประสาท
- 3) ไดโครโตฟอส มีอาการของพิษเฉียบพลัน ได้แก่ ปวดหัว เหงื่อออกมาก คลื่นไส้ ท้องเสีย อาเจียน กล้ามเนื้อกระตุก สูญเสียการทรงตัว ตาพร่า เป็นอันตรายต่อผิวหนังอย่างรุนแรง ในรายที่ได้รับ พิษมากจะมีอาการ เช่น หายใจลำบาก สั่น ชัก ล้มหมดสติ ระบบหายใจล้มเหลว ส่วนใหญ่พิษเฉียบพลัน จะเกิดขึ้นภายใน 12 ชั่วโมง หลังได้รับพิษ พิษเรื้อรังจะเกี่ยวกับการลดลงของน้ำหนักตัวและความอยากอาหาร มีผลต่อพัฒนาการของตัวอ่อนในครรภ์ มีผลต่อระบบสืบพันธุ์ ระบบประสาทส่วนกลางได้รับความเสียหาย
- 4) อีพีเอ็น มีความเป็นพิษสูงสุดในสารเคมีเฝ้าระวัง 4 ชนิด อาการพิษเฉียบพลันคือ คลื่นไส้ อาเจียน ปวดหัว เหงื่อออกมาก แน่นหน้าอก กล้ามเนื้อกระตุก สูญเสียการทรงตัว เกิดการระคายเคืองที่ปอด ไอ หายใจสั้น การได้รับสารในปริมาณมากทำให้มีการหลั่งของเหลวที่ปอด เกิดการบวม (pulmonary edema) และหยุดการหายใจ พิษเรื้อรังอาจทำให้ไขสันหลังผิดปกติ กระตุก อัมพาต กระดูกสันหลังคด เติบโตช้า เสียการทรงตัว ได้ยินเสียงผิดปกติ มีการบวมอย่างรุนแรง น้ำหนักลดลง

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลพื้นฐานของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชเฝ้าระวัง 4 ชนิด

	คาร์โบฟูราน carbofuran	เมโทมิล methomyl	ไดโครโตฟอส dicrotophos	อีพีเอ็น EPN
ข้อมูลทั่วไป	กลุ่มคาร์บาเมต ที่มีพิษสูงที่สุดรองลงมา จากออลดีคาร์บและพาราไรออน	กลุ่มคาร์บาเมต	กลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต สามารถผลิต เป็นสารโมโนโครโตฟอส (break- down product)	กลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต ที่มีความเป็น พิษสูงมาก
การใช้	ใช้ในพืชหลากหลายประเภท เช่น ข้าว แตงโม ข้าวโพด มะพร้าว ถั่วเหลือง ถั่วฝักยาว แตงกวา กาแฟ ส้ม ฯลฯ เพื่อ กำจัดแมลงในวงกว้าง ไม่ว่าจะเป็น หนอนกอ หนอนแมลงวัน เพลี้ยแป้ง เพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล ฯลฯ	ใช้ในการกำจัดแมลงหลายประเภท เช่น แมลงปากกัด ปากดูด เพลี้ย และหนอน ชนิดต่างๆ มักใช้ในพืชจำพวก ส้มเขียวหวาน ฝรั่ง ลำไย สดอเบอร์รี่ กะหล่ำปลี หัวหอม มะเขือเทศ ฯลฯ	กำจัดแมลงประเภทปากดูด เเจาะ หรือ กัดในพืชผักผลไม้ เช่น ข้าว กาแฟ ถั่วฝักยาว ผักกาดหัว อ้อย คენห่า ส้ม ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ฯลฯ	มักถูกใช้เป็นห่วยและผสมกับสารเคมี เกษตรชนิดอื่นๆ ในการเพาะปลูกพืช เช่น ข้าว ข้าวโพด พืชตระกูลแตง ไม้ผล ไม้ดอก ไม้ประดับ เพื่อกำจัดแมลง หลายชนิด เช่น หนอนเจาะสมอฝ้าย หนอนกอข้าว แมลงค้ำหนาม ฯลฯ
ปริมาณการ นำเข้า 2553	5,301,161 กก.	1,550,200 กก.	356,908 กก.	144,001 กก.
มูลค่าการ นำเข้า 2553	148,870,091 บาท	282,076,856 บาท	59,031,934 บาท	53,748,334 บาท

ที่มา: ดัดแปลงจาก (เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเพื่อการเฝ้าระวังสารเคมีทางการเกษตร, 2554)

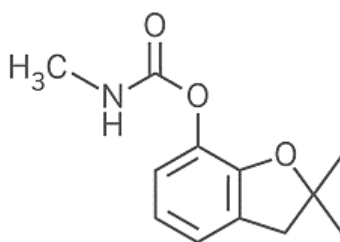
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลพื้นฐานของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชเฝ้าระวัง 4 ชนิด (ต่อ)

	คาร์โบฟูราน carbofuran	เมโทมิล methomyl	ไดโครโตฟอส dicrotophos	อีพีเอ็น EPN
ตัวอย่างราคา				
ในตลาด ต่อ 1	40-50 บาท	425-500 บาท	310-400 บาท	450 บาท
กก. หรือ	(ชนิด 3% G)	(ชนิด 40% SP)	(ชนิด 33% SL)	(ชนิด 45% w/v EC)
1000 ซีซี				
ตัวอย่างชื่อ	ฟูราดาน	แลนเนท	กระเจ้า 330	อีพีเอ็น
ทางการค้า	คูราแทร์	นูตริน	ไมโครเวฟ 24	คูมิฟอส
	ค็อกโคได 3 จี	มีโทเม็กซ์	ไบดริน	
	เลมอน 3 จี	ซาติสตันโท	คาร์ไบครอน	
ประเทศที่	สหภาพยุโรป	สหราชอาณาจักร	อินเดีย ปากีสถาน	อเมริกา สหภาพยุโรป
ระงับหรือห้าม	อเมริกา	เยอรมนี	สิงคโปร์	ออสเตรเลีย
ใช้สารเคมี		ฟินแลนด์ ตุรกี	สหภาพยุโรป	แคนาดา นิวซีแลนด์
ชนิดนี้		สิงคโปร์ มาเลเซีย	แคนาดา	มาเลเซีย สิงคโปร์
		อินเดีย (ยกเลิกบางสูตร)	ออสเตรเลีย	พม่า เวียดนาม
			มาเลเซีย	อินเดีย

ที่มา: ดัดแปลงจาก (เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเพื่อการเฝ้าระวังสารเคมีทางการเกษตร, 2554)

2.3 คาร์โบฟูราน (Carbofuran)

คาร์โบฟูราน (Carbofuran) (ภาพที่ 2.2) เป็นสารกำจัดศัตรูพืชในกลุ่มคาร์บาเมต ซึ่งใช้กันแพร่หลายและรู้จักกันในชื่อทางการค้าว่า คูราแทร์ 3% จี หรือฟูราดาน จัดเป็นวัตถุอันตรายที่เกษตรกรใช้ในการปลูกข้าว โดยทั่วไปชาวนาจะใช้คาร์โบฟูรานกำจัดแมลงบั่วในนาข้าวหลังการหว่านข้าว หรือหลังการปักดำ ขณะที่ชาวสวน-ชาวไร่ ใช้คาร์โบฟูรานกำจัดพวกหนอนและด้วงหลายชนิดที่ทำลายผลผลิต เช่น หนอนกระทู้ หนอนเจาะยอดข้าวฟ่าง หนอนแมลงวันเจาะต้นถั่วเหลืองและถั่วฝักยาว ด้วงงวงมันเทศ ด้วงหลอดยาวมันสำปะหลัง เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของสารคาร์โบฟูราน

ที่มา: Prasad et al., 2013

2.3.1 ลักษณะทางกายภาพ

1) ชื่อ IUPAC

2, 3-dihydro-2, 2-dimethylbenzofuran-7-yl methylcarbamate

2) ชื่อสามัญ

คาร์โบฟูราน

3) คุณสมบัติ

3.1 สูตรโมเลกุล $C_{12}H_{15}NO_3$ (ภาพ 2)

3.2 มวลโมเลกุล 221.25

3.3 ความหนาแน่น 1.18 g/cm^3

3.4 จุดหลอมเหลว 151°C องศาเซลเซียส

4) การทำละลาย

4.1 น้ำ	700 mg/l
4.2 Acetone	150 g/l
4.3 Acetonitrile	140 g/l
4.4 Ethyl acetate	100 g/l
4.5 Benzene	40 g/l

4.6 Ethanol 40 g/l

5) ชื่อการค้า

คูราแทรร์ และฟูราดาน

6) ลักษณะทางกายภาพ

เป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น เมื่อโดนความร้อนจะให้ควันที่เป็นพิษ ดูดซึมเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังได้น้อยกว่าทางการหายใจและทางปาก เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกขับออกมาทางปัสสาวะ และสามารถถูกขับออกมาจากน้ำนมมารดาได้ร้อยละ 1 การสลายตัวจะเกิดเร็วขึ้นเมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นด่าง

7) วิธีการทำลาย

เป็นสารในกลุ่มคาร์บาเมตชนิดที่ถูกดูดซึมผ่านระบบราก เข้าสู่ในต้นพืชได้ และมีวิธีการทำลายโดยไปยับยั้งการทำงานของน้ำย่อยโคลีนเอสเตอเรสในระบบประสาทของแมลงและสัตว์อื่นอย่างไม่ถาวร เช่นเดียวกับสารคาร์บาเมตชนิดอื่นๆ

2.3.2 วิธีการใช้คาร์โบฟูรานในพืชผลทางการเกษตร :

วิธีการใช้ส่วนมากจะใช้หยอดหลุม หรือโรยตามร่องตอนปลูก ตัวอย่างการใช้คาร์โบฟูรานในการกำจัดศัตรูของพืชชนิดต่าง ๆ มีดังนี้

- 1) ข้าว เพื่อกำจัด บั่ว หนอนกอแถบลาย หนอนกอแถบลายสีม่วง หนอนกอสีครีม หนอนกอสีชมพู เพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล เพลี้ยกระโดดหลังขาว และเพลี้ยจักจั่นสีเขียว โดยใช้คาร์โบฟูราน 3%G ซึ่งสำหรับในแปลงตกกล้าจะใช้ 8-10 กิโลกรัมต่อไร่ หว่านหลังหว่านข้าวกล้าแล้ว 10 วัน ส่วนในแปลงนาทั่วไปจะใช้ 5 กิโลกรัมต่อไร่ โดยในนาดำนั้นจะหว่านหลังปักดำ 20 วัน ส่วนในนาหว่าน จะหว่านสารนี้หลังหว่านข้าวแล้ว 30 วัน อย่างไรก็ตามหากจะใช้คลุกเมล็ดพันธุ์ข้าวไร่ เพื่อกำจัดเพลี้ยจักจั่นสีเขียว เพลี้ยจักจั่นปีกลายหยัก เพลี้ยกระโดดหลังขาว เพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล หนอนกระทุ้ควายพระอินทร์ หนอนกอแถบลายสีม่วง หนอนกอสีครีม หนอนกอสีชมพู หนอนม้วนใบข้าว บั่วและเพลี้ยไฟ ใช้คาร์โบฟูราน 35 %ST ในอัตรา 15 ซีซี (ประมาณ 1.5 ข้อนแกง) คลุกเมล็ดพันธุ์ 1 กิโลกรัม ก่อนปลูก
- 2) ข้าวฟ่าง เพื่อกำจัดหนอนแมลงวันเจาะยอดข้าวฟ่าง โดยใช้คาร์โบฟูราน 3%G ในอัตรา 8 กิโลกรัมต่อไร่ โรยในร่องพร้อมปลูก หรือจะใช้คาร์โบฟูราน 35%ST ในอัตราส่วน 20 ซีซี คลุกเมล็ดพันธุ์ข้าวฟ่าง 1 กิโลกรัมก่อนปลูก
- 3) ข้าวโพด เพื่อกำจัดหนอนกระทุ้ควายพระอินทร์ และหนอนเจาะลำต้น โดยใช้คาร์โบฟูราน 3%G ในอัตรา 8 กิโลกรัมต่อไร่ หยอดที่หยอดระยะที่ไปยังคลีไม่หมด
- 4) อ้อย เพื่อกำจัดหนอนกอสีชมพู หนอนกอสีขาว และหนอนกอลายเล็ก โดยใช้คาร์โบฟูราน 3%G ในอัตรา 10 กิโลกรัมต่อไร่ โรยบนท่อนพันธุ์ขณะปลูกหรือขณะแต่งตอ สำหรับอ้อยต่อนั้นจะโรยซ้ำโดยใช้อัตราเดิมห่างจากครั้งแรก 45 วัน

- 5) *มันสำปะหลัง* เพื่อกำจัดแมลงหนอนหลวง โดยใช้คาร์โบฟูราน 3%G ในอัตรา 12 กิโลกรัมต่อไร่ โรยบนพืชนพันธุ์ขณะปลูกเป็นแถวห่างจากต้นประมาณ 8 นิ้วแล้วกลบ
- 6) *ยาสูบ* เพื่อกำจัดแมลงหริ่งขาวยาสูบและหนอนเจาะลำต้นยาสูบ โดยใช้คาร์โบฟูราน 3%G โรยกันหลุมขณะปลูกในอัตรา 1 กรัมต่อหลุม ซึ่งเป็นการใช้คาร์โบฟูราน 3%G ในอัตราและวิธีการเดียวกันกับการกำจัดแมลงศัตรูของฝ้ายคือ เพลี้ยจักจั่นฝ้าย เพลี้ยอ่อนฝ้าย เพลี้ยไฟฝ้าย และแมลงหริ่งขาวยาสูบ
- 7) *ถั่วเหลือง* เพื่อกำจัดหนอนแมลงวันเจาะต้นถั่ว ใช้คาร์โบฟูราน 3%G ในอัตรา 4-6 กิโลกรัมต่อไร่ โรยในร่องขณะปลูก หรือใช้คาร์โบฟูราน 35%ST ในอัตรา 15-33 ซี คลุกเมล็ดถั่วเหลือง 1 กิโลกรัมก่อนปลูก
- 8) *ถั่วลิสง* เพื่อกำจัดเสี้ยนดินโดยใช้คาร์โบฟูราน 3%G ในอัตรา 6-8 กิโลกรัมต่อไร่ โรยข้างแถว เมื่อถั่วอายุได้ 30-35 วันแล้วกลบโคน ซึ่งอาจแบ่งใส่ 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 2 ใส่เมื่อถั่วอายุได้ 60-65 วัน
- 9) *กาแฟ* เพื่อกำจัดเพลี้ยหอยสีเขี้ยว โดยใช้คาร์โบฟูราน 3%G ในอัตรา 30 กรัมต่อต้น หว่านห่างจากโคน 1 ฟุต
- 10) *มะเขือเทศ* เพื่อกำจัดไส้เดือนฝอยและแมลงหริ่งขาวยาสูบ โดยใช้คาร์โบฟูราน 3%G ในอัตรา 3 กรัมต่อหลุม คลุกกับดินกันหลุมก่อนปลูก

2.3.3 ข้อควรระวัง

- 1) ห้ามล้างภาชนะบรรจุ อุปกรณ์ และเครื่องฉีดพ่น ลงในแม่น้ำลำคลองเพราะเป็นพิษต่อปลา ตลอดจนสัตว์น้ำชนิดอื่นๆ และยังจะเกิดมลพิษในน้ำอีกด้วย
- 2) สำหรับชนิดใช้คลุกเมล็ด ให้ใช้คลุกเฉพาะเมล็ดที่จะใช้ทำพันธุ์เท่านั้น ห้ามคลุกเมล็ดพืชที่นำไปเป็นอาหารคนและสัตว์
- 3) ต้องปฏิบัติเช่นเดียวกับการใช้สารมีพิษชนิดอื่นๆ คือ ควรสวมถุงมือและหน้ากากขณะใช้สารพิษ ขณะใช้ต้องอยู่เหนือลมเสมอ อย่าให้สารพิษเข้าปาก ตา จมูก หรือถูกผิวหนังและเสื้อผ้า ล้างมือ ล้างหน้าให้สะอาดด้วยน้ำและสบู่มาก่อนการกินอาหารหรือดื่มน้ำ อย่าเข้าไปในบริเวณที่มีการใช้สารนี้แล้วเสร็จใหม่ๆ เพราะอาจจะได้รับอันตรายจากสารพิษได้และหลังจากฉีดพ่นสารมีพิษแล้วใหม่ๆ ต้องอาบน้ำ เปลี่ยนเสื้อผ้า ชักชุดที่สวมทำงานให้สะอาด ภาชนะบรรจุสารพิษเมื่อใช้งานหมดแล้วต้องทำลาย แล้วให้ฝังดินให้เรียบร้อย ห้ามเผาไฟ

2.3.4 ความเป็นพิษของคาร์โบฟูรานและการกำหนดควบคุมปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด :

สารคาร์โบฟูรานจะเป็นพิษอย่างรุนแรงเมื่อเข้าสู่ร่างกายทางระบบการหายใจและทางปาก และเป็นพิษปานกลางเมื่อผ่านทาง การดูดซึมทางผิวหนัง มีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์อะเซทิลโคลีนเอส

เทอเรส (Acetylcholinesterase: AChE) เมื่อเข้าสู่ร่างกายในปริมาณมาก จะเกิดอาการวิงเวียน เหงื่อแตก อาเจียน กล้ามเนื้อเกร็ง น้ำลายฟูมปาก และอาจหมดสติได้ เนื่องจากเป็นวัตถุอันตรายมีพิษร้ายแรง สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์จึงมีการกำหนดควบคุมปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุดของสารคาร์โบฟูรานในสินค้าเกษตรหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็น ข้าว มันสำปะหลัง รวมไปถึงนมและเนื้อสัตว์

การตกค้างในอาหาร ปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด (maximum residue limit for pesticide; MRL) หมายถึง ปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุดที่มีได้ในสินค้าเกษตร กำหนดโดยคณะกรรมการมาตรฐานสินค้าเกษตร มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมสารพิษตกค้างต่อกิโลกรัมสินค้าเกษตร ซึ่งปริมาณสารตกค้างสูงสุดของคาร์โบซัลแฟนหรือคาร์โบฟูรานได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างปริมาณควบคุมของสารพิษตกค้างของคาร์โบซัลแฟนหรือคาร์โบฟูรานในวัตถุดิบอาหารสัตว์

วัตถุดิบทางการเกษตร	ชนิดสารพิษตกค้าง	สินค้าทางเกษตร	ปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด (mg/kg)
คาร์โบซัลแฟน (carbosulfan)	ผลรวมของคาร์โบฟูราน และ 3-ไฮดรอกซีคาร์โบฟูราน (3- hydroxycarbofuran)	กระถิน	0.2
หรือ คาร์โบฟูราน (carbofuran)	รายงานผลเป็นคาร์โบฟูราน	ปาล์มน้ำมัน	0.1
		ข้าวโพดฝักสด	0.01
		ข้าวโพดเมล็ดแห้ง	0.05
		ข้าวฟ่าง	0.1
		ถั่วเหลืองเมล็ดแห้ง	0.1
		มันสำปะหลัง	0.02
		เมล็ดฝ้าย	0.1
		อ้อย	0.1

ที่มา: ดัดแปลงจาก สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2557

2.4 การตรวจสอบยาฆ่าแมลงด้วยวิธีมาตรฐาน

ปัจจุบันการตรวจสอบหาสารกำจัดแมลงนั้นสามารถตรวจสอบได้หลากหลายวิธี เช่น การใช้ชุดน้ำยาตรวจสอบยาฆ่าแมลง/สารพิษตกค้าง "จีที" Gas Chromatography (GC) และ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) เป็นต้น

2.4.1 ชุดน้ำยาตรวจสอบยาฆ่าแมลง/สารพิษตกค้าง “จีที”

ชุดน้ำยาตรวจสอบยาฆ่าแมลง “จีที” (ภาพที่ 2.3) จะตรวจสอบความเป็นพิษตกค้างจากการใช้สารเคมีกำจัดแมลง หรือสารพิษอื่นๆ ที่อาจปนเปื้อนหรือตกค้างในอาหาร โดยสามารถตรวจหาความเป็นพิษของสารเคมีกำจัดแมลง 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม Organophosphate, Carbamate และสารพิษ

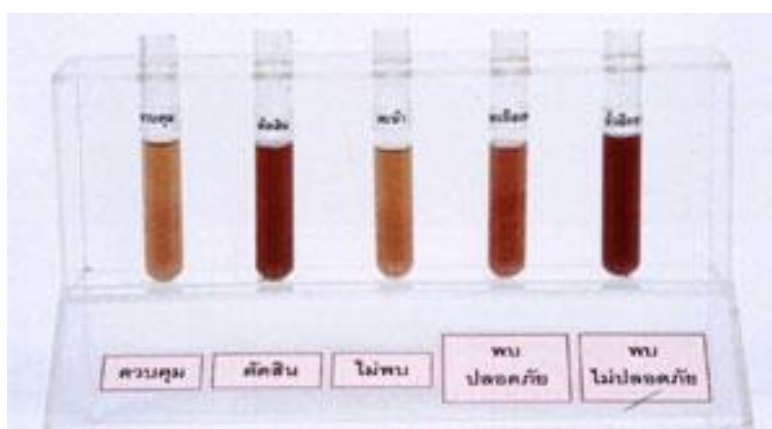
อื่นๆ ที่เป็นสาร Cholinesterase inhibitor โดยการตรวจสอบนั้นจะเป็นการเปรียบเทียบความเข้มของสีที่เกิดขึ้นในหลอดตัวอย่างที่ตรวจกับหลอดควบคุมและหลอดตัดสิน หลอดควบคุมคือไม่พบสารพิษตกค้าง และหลอดตัดสินคือมีสารพิษตกค้างที่ยับยั้งประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์อยู่ที่ระดับ 50% ซึ่งผลการตรวจด้วยชุดน้ำยา “จีที” ดังแสดงในภาพที่ 2.4 จะบ่งบอกเป็น 3 แบบ คือ

- 1) ไม่พบสารพิษตกค้าง (สีของหลอดตัวอย่างจะอ่อนกว่าหรือเท่ากับหลอดควบคุม)
- 2) พบสารพิษตกค้างในระดับที่ปลอดภัย (สีของหลอดตัวอย่างจะเข้มกว่าหลอดควบคุม แต่ยังอ่อนกว่าหลอดตัดสิน)
- 3) พบสารพิษตกค้างในระดับที่ไม่ปลอดภัย (สีของหลอดตัวอย่างจะเข้มเท่ากับหรือเข้มกว่าหลอดตัดสิน)



ภาพที่ 2.3 ชุดน้ำยาตรวจสอบยาฆ่าแมลง “จีที”

ที่มา: <http://www.gccthai.com/UserFiles/Image/Picture1.jpg>

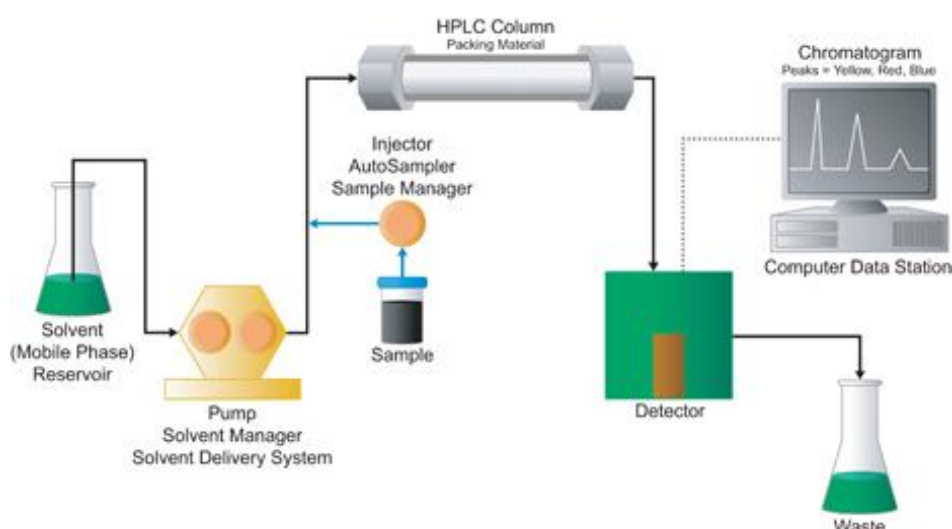


ภาพที่ 2.4 การดูผลชุดน้ำยาตรวจสอบยาฆ่าแมลง “จีที”

ที่มา: <http://www.gttestkit.com/images/result.jpg>

2.4.2 High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

HPLC เป็นเครื่องมือใช้สำหรับแยกสารประกอบที่สนใจที่ผสมอยู่ในตัวอย่าง โดยกระบวนการแยกสารประกอบที่สนใจจะเกิดขึ้นระหว่างเฟส 2 เฟส คือ เฟสอยู่กับที่ (stationary phase) หรือคอลัมน์ (column) กับเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) ซึ่งจะถูกแยกออกมาในเวลา ที่ต่างกัน สารผสมที่อยู่ในตัวอย่างสามารถถูกแยกออกจากกันได้นั้นจะขึ้นอยู่กับความสามารถ ในการเข้ากันได้ดีของสารนั้นกับเฟสเคลื่อนที่หรือเฟสอยู่กับที่ โดยสารประกอบตัวไหนที่สามารถเข้ากันได้ ดีกับเฟสเคลื่อนที่ สารนั้นก็จะถูกแยกออกมาก่อน ส่วนสารที่เข้ากันได้ไม่ดีกับเฟสเคลื่อนที่ หรือเข้ากันได้ดี กับเฟสอยู่กับที่ ก็จะถูกแยกออกมาทีหลัง โดยสารที่ถูกแยกออกมาได้นี้จะถูกตรวจวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจ วัดสัญญาณ (detector) และสัญญาณที่บันทึกได้จากตัวตรวจวัดจะมีลักษณะเป็นพีก ซึ่งเรียกว่า “โครมา โทแกรม (chromatogram)” ดังแสดงในภาพที่ 2.5 การวิเคราะห์นี้สามารถตรวจวัดได้ทั้งเชิงคุณภาพ (qualitative analysis) และเชิงปริมาณ (quantitative analysis) โดยการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ส่วนใหญ่นิยมใช้วิเคราะห์สารประกอบที่ระเหยยาก (low volatile substation) หรือมีน้ำหนักโมเลกุลสูง (high molecular weight compounds) เทคนิค HPLC นี้ได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ตัวอย่างจาก หลากหลายอุตสาหกรรม ทั้งด้านยา สิ่งแวดล้อม รวมไปถึงอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การวิเคราะห์หา ปริมาณวิตามิน สารปนเปื้อนในอาหาร และสารพิษที่ผลิตจากเชื้อรา (mycotoxin) และถูกนำมาใช้ วิเคราะห์การตรวจสอบยาฆ่าแมลงชนิดต่างๆ เช่น การตรวจสอบคาร์โบฟูรานในกะหล่ำปลี (Zan and Chantara, 2007), การตรวจสอบยาฆ่าแมลงในน้ำผลไม้ (Topuz et al, 2005; Vichapong et al., 2013) การตรวจสอบสารกำจัดแมลงประเภท organophosphorus ในมะเขือเทศ (Peng et al., 2015) เป็นต้น



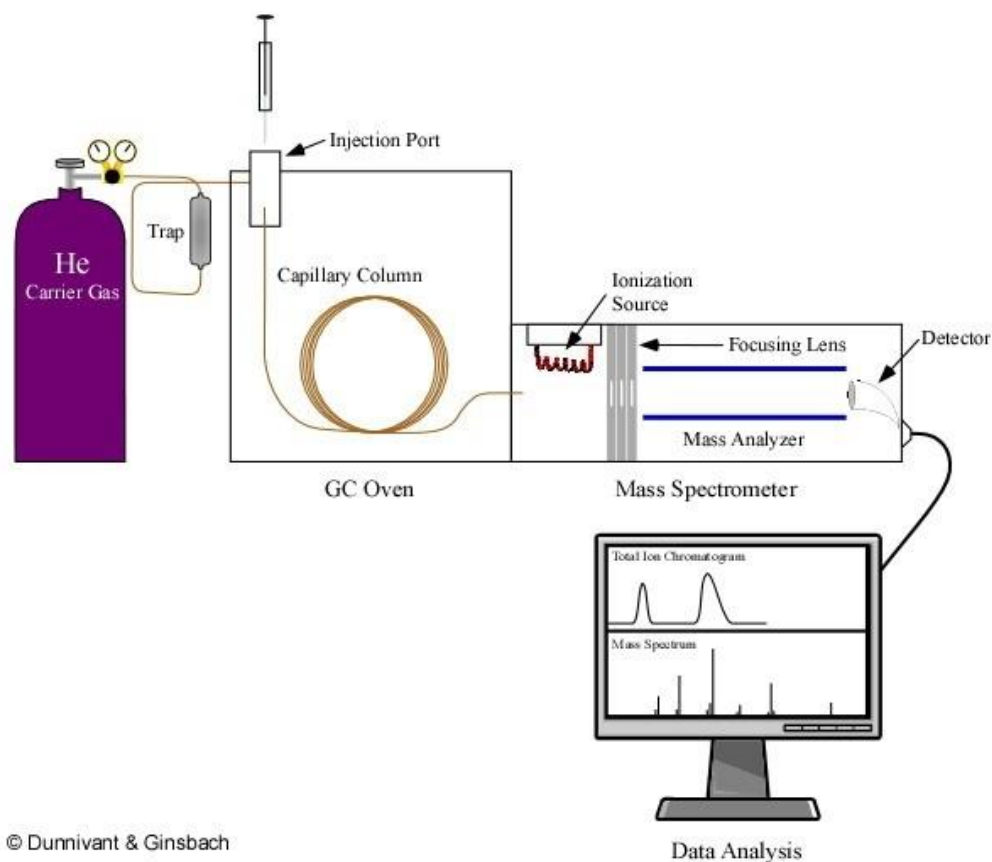
ภาพที่ 2.5 หลักการ High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

2.4.3 Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

GC-MS เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้นในขณะนี้ เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำนายชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในสารได้อย่างค่อนข้างแม่นยำ โดยอาศัยการเปรียบเทียบ fingerprint ของเลขมวล (mass number) ของสารตัวอย่างนั้นๆ กับข้อมูลที่มีอยู่นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังมีความสามารถในการวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณ (quantitative analysis) และเชิงคุณภาพ (qualitative analysis) ได้อย่างถูกต้อง GC-MS เป็นเครื่องมือที่ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของเครื่อง GC (gas chromatography) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการแยกองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างให้ออกมาทีละองค์ประกอบก่อนที่จะเข้าสู่ตัวตรวจวัด และอีกส่วนคือเครื่อง MS (mass spectrometry) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัด (detector) ในการตรวจสอบดูว่าองค์ประกอบต่างๆ ที่ผ่านออกมาจากเครื่อง GC เพื่อที่จะได้สามารถทำนายได้ว่าสารที่เราสนใจอยู่นั้นประกอบด้วยองค์ประกอบชนิดใดบ้าง มีปริมาณเท่าไร และเทคนิค GC นี้ได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์การตรวจสอบยาฆ่าแมลงชนิดต่างๆ เช่น การตรวจสอบยาฆ่าแมลงในน้ำตาลทราย (Sinha et al., 2011) การตรวจสอบสารกำจัดแมลงในพริก และผักกระเจียว (Sharma and Kapadnis, 2015) การตรวจสอบสารกำจัดศัตรูพืช 653 ชนิดในชา (Pang et al., 2011) การตรวจสอบสารกำจัดแมลงในกล้วย (Paranthaman et al., 2012) และการตรวจสอบสารกำจัดแมลงชนิด Trichlorfon ในนม (Hem et al., 2010) เป็นต้น

การทำงานของเครื่อง GC-MS ดังแสดงในภาพที่ 2.6 เมื่อเตรียมตัวอย่างสารเสร็จเรียบร้อยแล้วก็นำมาฉีดเข้าทาง injector ของเครื่อง GC จากนั้นสารก็จะถูกแยกออกเป็นองค์ประกอบต่างๆ เมื่อผ่านเข้าสู่ column ที่อยู่ใน oven จากนั้นองค์ประกอบใดที่ถูกแยกออกมาจาก column ก่อนก็จะผ่านเข้าไปในส่วน of เครื่อง MS ซึ่งมีสถานะเป็นสุญญากาศก่อน แล้วเข้าไปเจอกับ ion source ซึ่งจะทำหน้าที่ ionize โมเลกุลที่ผ่านเข้ามาให้กลายเป็นประจุจากนั้นประจุเหล่านี้ก็จะเดินทางผ่านเครื่องคัดเลือกและแยกแยะขนาดของประจุ (mass analyzer) ดูว่าประจุเหล่านั้นประกอบไปด้วยขนาดมวลเท่าใดบ้าง ก่อนที่จะเดินทางเข้าสู่เครื่องตรวจวัดปริมาณประจุ (detector) เพื่อตรวจหาปริมาณของประจุแล้วแปลงผลออกมาเป็นปริมาณขององค์ประกอบแต่ละตัวที่มีอยู่ในสารตัวอย่างนั้นๆ

การตรวจหาปริมาณสารกำจัดศัตรูพืชที่ตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรที่มีระดับความเข้มข้นต่ำส่วนใหญ่ใช้เครื่องมือ HPLC และ GC แต่อย่างไรก็ตามการตรวจสอบทั้งสองวิธีนี้ก็ยังมีข้อจำกัดหลายด้าน ดังแสดงในตาราง 4 เช่น เทคนิคการวิเคราะห์ด้วย HPLC นั้น ต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในปริมาณที่มาก ใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน ส่วนในการวิเคราะห์สารฆ่าแมลงบางชนิดด้วย GC นั้น มีขั้นตอนของการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยากมาก คือการทำให้เกิดสารอนุพันธ์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการระเหยของสารตัวอย่าง ทำให้ใช้เวลาในการวิเคราะห์นานและสารรีเอเจนต์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาส่วนใหญ่มีราคาสูงและเป็นพิษ (สุรตดา ศรีสุวรรณ และจันทร์เพ็ญ อินทรประเสริฐ, 2555)



ภาพที่ 2.6 หลักการ Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

ที่มา: http://people.whitman.edu/~dunnivfm/C_MS_Ebook/CH2/Figures/Fig_2_5_GC-MS.jpg

อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบแต่ละวิธีมีความเหมาะสมแตกต่างกันตามการใช้งาน ชุดตรวจสอบสารพิษตกค้างอย่างง่าย เป็นชุดตรวจสอบภาคสนามที่อาศัยหลักการเปลี่ยนสีของสาร (colorimetric) การตรวจวัดด้วยชุดตรวจสอบนี้ต้องอาศัยผู้มีทักษะสูงในการวิเคราะห์ และยังไม่สามารถระบุปริมาณการตกค้างได้แน่นอน หากต้องการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารพิษตกค้าง จะต้องนำตัวอย่างมาทำการวัดด้วย Gas Chromatography (GC) และ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ซึ่งเป็นการตรวจสอบโดยใช้หลักการแยกสารเคมีที่อยู่ในสารละลายออกจากกันด้วยตัวพา เป็นวิธีการที่มีความแม่นยำสูง แต่จำเป็นต้องทำการตรวจในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากเครื่องมือมีขนาดใหญ่ มีความยุ่งยากในการเตรียมตัวอย่าง ต้องการผู้มีทักษะสูงในการวัด และใช้เวลานาน ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของวิธีการตรวจสอบแบบต่างๆ

วิธีตรวจสอบ	ข้อดี	ข้อเสีย
โครมาโทกราฟี	1. สามารถแยกสารที่มีปริมาณน้อยได้ 2. สามารถแยกได้ทั้งสารที่มีสีและไม่มีสี 3. สามารถใช้ได้ทั้งปริมาณวิเคราะห์และคุณภาพวิเคราะห์ 4. สามารถบ่งชี้ชนิดขององค์ประกอบ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ 5. สามารถแยกสารออกจากกระตาขกรองหรือตัวดูดซับโดยสกัดด้วย ตัวทำละลาย	1. ต้องใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในปริมาณมาก 2. ใช้เวลานานในการวิเคราะห์ 3. มีขั้นตอนของการเตรียมตัวอย่างที่ยุ่งยาก 4. มีค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ตัวอย่างแต่ละครั้งสูง
ชุดน้ำยาตรวจสอบยาฆ่าแมลง “จีที”	1. ใช้เวลาตรวจสอบไม่นาน 2. มีราคาถูก 3. สามารถตรวจสอบหาฆ่าแมลงได้ในเชิงคุณภาพวิเคราะห์	1. การตรวจสอบยาฆ่าแมลงไม่สามารถบอกเป็นปริมาณที่แน่นอนได้

2.5 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

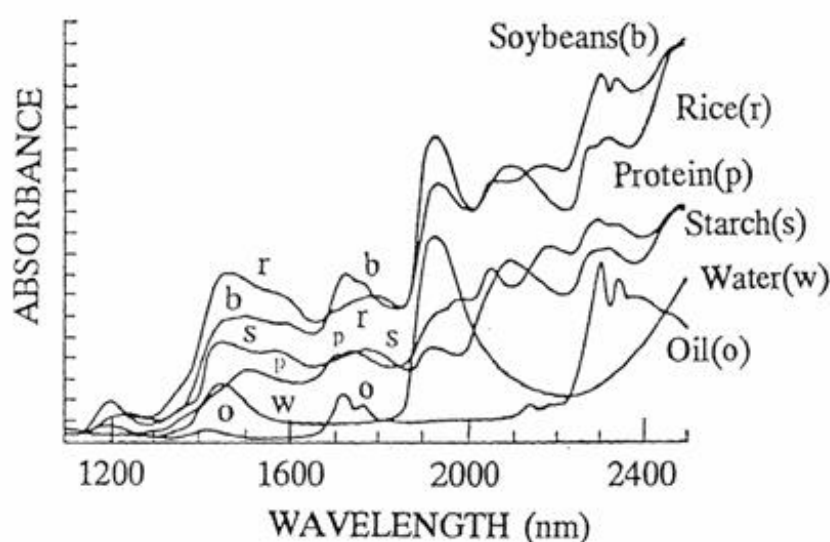
2.5.1 หลักการของเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี:

แสงเนียร์อินฟราเรด (NIR) หรือแสงย่านใกล้อินฟราเรด เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 700-2500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่มีพลังงานสูงพอในการทะลุผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ เมื่อแสงส่องผ่านวัตถุแล้วสารตัวอย่างจะเกิดการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง NIR ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิดพันธะของสารองค์ประกอบ เช่น O-H, N-H และ C-H จะเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นจำเพาะ ปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสง (Absorbance, A) จะเป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert) คือพลังงานคลื่นแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างจะถูกดูดกลืนไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง โดยความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืนจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นและความหนาของตัวอย่างที่ลำแสงผ่าน (Osborne et al., 1993) สามารถแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$A = \log(I_0/I_t) = \epsilon cd$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
 I_0 = ความเข้มของแสงก่อนส่องผ่านตัวอย่าง
 I_t = ความเข้มของแสงหลังส่องผ่านตัวอย่าง
 ϵ = molar absorptivity เป็นค่าคงที่ของแต่ละสาร
 c = ความเข้มข้นของสารละลายหรือองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง
 d = ความหนาของเซลล์

โดยจะแสดงผลการดูดกลืนแสงออกมาในรูปของสเปกตรัมซึ่งมีลักษณะต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง (ภาพที่ 2.7) อย่างไรก็ตาม NIR สเปกตรัมจะมีลักษณะพีคกว้าง (Broad spectrum) บางที่มีพีคกว้างที่มีความเข้มสูง เนื่องจากการซ้อนทับกัน (Overlapping bands) บางที่อาจเห็นพีคที่คมชัด (แต่น้อย) สเปกตรัมของวัสดุเกษตรและอาหารส่วนใหญ่มีพีคของน้ำเป็นพีคใหญ่และกว้างที่บริเวณ 760, 970, 1450 และ 1940 nm ลักษณะของสเปกตรัมเช่นนี้ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุได้โดยตรง จำเป็นต้องใช้หลักทางเคมีเมตริก (Chemometric) มาใช้ โดยต้องทำสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าองค์ประกอบทางเคมีหรือสมบัติทางกายภาพหรือสมบัติอื่นที่ต้องการวิเคราะห์ กับข้อมูลของสเปกตรัม เพื่อประมาณค่าองค์ประกอบหรือสมบัติที่ต้องการ



ภาพที่ 2.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง NIR ของข้าว ถั่วเหลือง และองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ (Kawano, 1995)

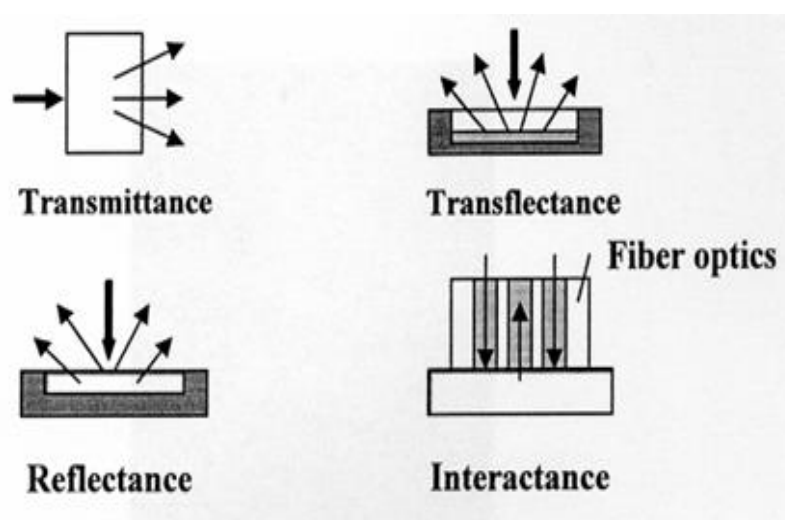
หลักการทำงานของ NIRS นั้น เครื่องจะมีส่วนประกอบหลัก ๆ 4 ส่วนคือ 1) แหล่งกำเนิดคลื่นแสง NIR 2) โมโนโครมาเตอร์ (monochromator) เป็นอุปกรณ์แยกความยาวคลื่นแสงออกเป็นแต่ละความยาวคลื่น แล้วส่งทีละความยาวคลื่นมาที่ตัวอย่าง 3) อุปกรณ์สำหรับตรวจวัด (detector) จะทำหน้าที่บันทึกปริมาณแสงแต่ละความยาวคลื่นที่ตัวอย่างดูดกลืนและแปลงผลเป็นสัญญาณส่งเข้าสู่ส่วนประมวลผลหรือส่วนอ่านสัญญาณ 4) การอ่านสัญญาณ (read out) จะมีโปรแกรมประมวลผลให้ค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในรูปสเปกตรัม แล้วบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์ สำหรับรูปแบบการปฏิสัมพันธ์ (interaction) ของตัวอย่างกับแสง NIR นั้นจะเกิดได้หลายรูปแบบ เมื่อแสงผ่านไปยังตัวอย่างที่มีลักษณะต่างกัน จะมีปฏิสัมพันธ์ได้ 4 ลักษณะ (ภาพที่ 2.8) ดังนี้

1) Transmission เป็นการวัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมาในด้านตรงกันข้ามกับด้านที่แสงตกกระทบ

2) Reflection แสงตกกระทบที่พื้นผิวของตัวอย่าง วัดปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาโดยรวมถึงแสงที่สะท้อนจากเนื้อตัวอย่างส่วนที่ใกล้ผิวตัวอย่างได้อีกด้วย

3) Transflection แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบตัวอย่าง ผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบแผ่นเซรามิก ทอง หรืออะลูมิเนียมในชั้นใต้สุด แล้วสะท้อนกลับมายัง detector

4) Interaction ใช้ในกรณี fiber optics probe แสงจากแหล่งกำเนิดแสงย่าน NIR ส่งผ่านลงมายังตัวอย่างในวงแหวนด้านนอก แล้วแสงที่สะท้อนออกมาจากเนื้อตัวอย่างถูกส่งไปยัง detector บริเวณส่วนกลาง fiber optics probe



ภาพที่ 2.8 ลักษณะการปฏิสัมพันธ์ของตัวอย่างกับแสง NIR (Kawano, 2002)

2.5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการทำนายค่าของ NIRS

2.5.2.1 การปรับแต่งสเปกตรัม

ก่อนนำสเปกตรัมไปวิเคราะห์ ควรมีการนำข้อมูลสเปกตรัมไปปรับแต่งด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์เพื่อลดความคลาดเคลื่อนให้เหลือน้อยที่สุด การแปลงข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง NIRS เพื่อลดอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสเปกตรัม ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สเปกตรัมมีความแตกต่างกัน ส่งผลต่อสมการที่สร้างขึ้น มีความแม่นยำในการทำนายลดลง ดังนั้นการแปลงข้อมูลสเปกตรัมโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ถือเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้ขั้นตอนการสร้างสมการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ในการแปลงข้อมูลสเปกตรัม ได้แก่

1) วิธีอนุพันธ์ (derivative) เป็นการหาความชันของเส้นสเปกตรัม เพื่อแก้ปัญหาพีกที่มีฐานกว้าง (broad peak) เนื่องจากการซ้อนทับกันของพีก (overlapping) และอิทธิพลจากการยกตัวของเส้นสเปกตรัม (base line shift) ที่เกิดจากการกระเจิงแสง (scattering light) เมื่อแสงตกกระทบที่ตัวอย่าง ทำให้แสงเปลี่ยนทิศทาง ซึ่งมีผลต่อการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจาก

ขนาดของตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ การอัดตัว และการกระจายตัวของตัวอย่างภายในเซลล์บรรจุที่แตกต่างกัน รวมทั้งความชื้นภายในตัวอย่างที่แตกต่างกันด้วย (William and Norris, 2001) ประกอบด้วย 2 วิธี

1.1) อนุพันธ์อันดับที่ 1 (first derivative) เป็นการหาความชันของสเปกตรัม ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น เนื่องจากอิทธิพลของความชื้นและขนาดอนุภาค การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 สามารถลดปัญหาการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแกน Y ทำให้เส้นสเปกตรัมเลื่อนมาชิดกัน แต่พีคของสเปกตรัมยังมีฐานกว้าง จึงไม่สามารถแยกพีคออกจากกันอย่างชัดเจนได้ อีกทั้งวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 ให้ความหมายเป็นค่าความชันของสเปกตรัมแต่ละความยาวคลื่นซึ่งทำให้แปลความหมายได้ยาก

1.2) อนุพันธ์อันดับที่ 2 (second derivative) เป็นการหาการเปลี่ยนแปลงของความชันสเปกตรัม สเปกตรัมที่ได้จะมีรูปร่างที่แตกต่างจากสเปกตรัมเริ่มต้น โดยจะมีการทำ derivative อีกครั้ง โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 2 สามารถลดผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแกน Y ที่ชัดเจนกว่าวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 และแยกอนุพันธ์พีคสเปกตรัมที่มีการซ้อนทับกันออกจากกันได้อย่างชัดเจนทำให้ทราบตำแหน่งความยาวคลื่นแต่ละสเปกตรัมมีลักษณะหวักลบลงมาด้านล่าง (Osborne et al., 1993)

2) วิธี multiplicative scatter correction (MSC) เป็นการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสเปกตรัม เพื่อลดอิทธิพลของการกระเจิงของแสงที่เกิดจากสาเหตุต่างๆ ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการลดค่าผิดพลาด การใช้ MSC นั้นใช้ได้ดีกับสเปกตรัมของตัวอย่างที่มีค่าทางเคมีเหมือนกันและสเปกตรัมมีรูปร่างลักษณะเหมือนกัน แต่ถ้ารูปร่างสเปกตรัมแตกต่างกันมากการใช้ MSC ก็ไม่ได้ช่วยให้ผลการวิเคราะห์ดีขึ้น

3) วิธี smoothing เป็นการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อน โดยมีการแทนค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความยาวคลื่นด้วยค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีจุดศูนย์กลางของช่วงความยาวคลื่นตรงกับจุดที่ถูกแทนที่ ต่อจากนั้นเลื่อนช่วงไปหนึ่งความยาวคลื่น แล้วคำนวณซ้ำจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ซึ่งสามารถลดปัญหาของสเปกตรัมที่มีสัญญาณรบกวนมากหรือสเปกตรัมที่มีลักษณะเป็นยอดแหลมเล็กกระจายตลอดช่วงความยาวคลื่นบนสเปกตรัมต่อค่าการดูดกลืนแสง โดยจะได้สเปกตรัมที่มีลักษณะเหมือนสเปกตรัมดั้งเดิม แต่จะเรียบสม่ำเสมอมากกว่า

4) วิธี standard normal variate (SNV) เป็นวิธีการกำจัดอิทธิพลของการกระเจิงแสงออกจากสเปกตรัม โดยสเปกตรัมแต่ละเส้นจะถูกปรับแก้โดยปรับค่าการดูดกลืนแสงให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน (normalization) โดยปรับแก้ให้ค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมมีค่าเป็นศูนย์ด้วยการนำค่าเฉลี่ยของสเปกตรัม (ค่าการดูดกลืนแสง) ของตัวอย่างนั้นๆ มาลบออกจากค่าสเปกตรัมที่แต่ละความยาวคลื่นตลอดช่วง และปรับแก้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานให้เท่ากับหนึ่งโดยนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณจากค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมตลอดช่วงมาหารค่าสเปกตรัมหรือค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความยาวคลื่น

วิธีการแปลงข้อมูลสเปกตรัมที่ดีที่สุดก็คือ วิธีที่ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้สมการทำนายที่มีความสามารถในการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้ใกล้เคียงที่สุด อย่างไรก็ตามไม่มีกฎตายตัวแน่นอนสำหรับการตัดสินใจเลือกวิธีที่จะใช้ในการแปลงข้อมูลวิธีที่ดีที่สุด คือการลองผิดลองถูกในการทดลองใช้แต่ละวิธีจนกว่าจะได้สมการทำนายที่แม่นยำสุด โดยต้องเข้าใจความหมายและคำนึงถึงข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีให้ชัดเจน (Hruschka, 2001)

2.5.2.2 การสร้างสมการ (calibration equation)

ขั้นตอน calibration เป็นขั้นตอนการสร้างสมการที่ใช้ในการทำนายค่าคุณภาพที่ทำการศึกษา ในการสร้างสมการจำเป็นต้องมีจำนวนตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์อย่างเพียงพอ เมื่อนำตัวอย่างมาผ่านขั้นตอนการสร้างสมการ จะได้ข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากเครื่อง NIR กับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี จากนั้นจะนำข้อมูลที่รวบรวมได้มาสร้างสมการที่ใช้ในการทำนาย ในการสร้างสมการสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

- 1) การกำหนดตัวแปรอิสระ (Independent variables) และตัวแปรตาม (Dependent variables)
- 2) การสร้างสมการที่ใช้ในการทำนายตัวแปรที่ทำการศึกษา
- 3) เทคนิคการแปลงข้อมูลสเปกตรัมก่อนการสร้างสมการ ที่ใช้ในการทำนาย

สมการ calibration ประกอบไปด้วยตัวแปร 2 ชนิด คือ ตัวแปรอิสระ X และตัวแปรตาม Y การหาตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรตามเป็นสิ่งสำคัญของการสร้างสมการ calibration แบ่งได้เป็น 2 วิธีหลัก คือ

2.5.2.2.1 Wavelength selection เป็นการเลือกความยาวคลื่นเฉพาะซึ่งเป็นตัวแปรอิสระให้มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรตามนั้น ได้แก่

- วิธี Single linear (SL) regression เป็นการสร้างสมการที่ประกอบด้วยตัวแปรสองชนิดที่มีความสัมพันธ์กัน คือ ตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) SL Regression เป็นการเลือกพิจารณาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างที่ความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียว (single wavelength) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย NIR Spectroscopy เป็นไปไม่ได้ที่จะใช้ความยาวคลื่นใดความยาวคลื่นหนึ่งในการหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้ เนื่องจากตัวอย่างประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิดด้วยกัน

- วิธี Multiple linear (ML) regression เป็นการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่นำตัวแปรอิสระ (X) มากกว่าหนึ่งตัว มาใช้ในการประเมินค่าตัวแปรตาม (Y) การพิจารณาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างจากหลายความยาวคลื่น การใช้เทคนิค ML Regression ในการสร้างสมการ โดยใช้ตัวแปรอิสระที่ได้จากการเลือกความยาวคลื่นมากกว่าหนึ่งความยาวคลื่นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม การสร้างสมการด้วยวิธี ML Regression มีข้อเสียคือ ในการคัดเลือกตัวแปรอิสระหรือความยาวคลื่นที่เหมาะสม

จากความยาวคลื่นทั้งหมดมาสร้างสมการอาจได้ข้อมูลที่ไม่ครอบคลุมมากพอ ทำให้ค่าที่ทำนายได้จากวิธีนี้มีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่แท้จริง

2.5.2.2.2 Full spectrum method เป็นการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดในสเปกตรัม (full spectrum) มาสร้างสมการ โดยทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) และ สร้างตัวแปรกลุ่มใหม่ขึ้นมา วิธีทางสถิติที่นิยมใช้ได้แก่ Partial least square (PLS) regression จัดกลุ่มการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) โดยการสร้างแพกเตอร์นั้นจะมีการนำข้อมูลตัวแปรตาม (Y) เข้ามารวมสร้างแพกเตอร์ โดยนำค่าองค์ประกอบทางเคมีมาคิดในกระบวนการหาแพกเตอร์ด้วย ทำให้แพกเตอร์ที่ได้จากวิธี PLS Regression สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลและเกี่ยวข้องกับค่าทางเคมีในเวลาเดียวกัน สมการ calibration ที่ได้จากวิธี PLS Regression จึงประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น สมการ PLS Regression สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Y = b_0 + b_1F_1 + b_2F_2 \dots + b_nF_n$$

เมื่อ $F_1, F_2, \dots, F_n$ = ค่าตัวแปรใหม่ที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูล Y ที่ตำแหน่ง n
ตัวแปร

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่วงน้ำหนักที่มีความสัมพันธ์กับ
ข้อมูล Y ที่ตำแหน่ง n ตัวแปร

2.5.2.3 ขั้นตอนการทดสอบสมการ (Validation test)

เมื่อได้สมการ calibration แล้วจะต้องนำสมการที่ได้มาทดสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพของสมการว่าสามารถใช้ประเมินค่าได้แม่นยำมากน้อยเพียงใด วิธีที่นิยมมี 2 วิธี คือ

1) Full cross validation

วิธีนี้ตัวอย่างที่นำมาประเมินเป็นตัวอย่างชุดเดียวกับกลุ่ม calibration โดยมีวิธีการ

1.1 ตัดตัวอย่างที่หนึ่งออกไปจากกลุ่ม calibration แล้วนำตัวอย่างที่เหลือมาสร้างสมการ calibration แล้วนำมาประเมินค่าตัวอย่างที่หนึ่งที่ตัดไปก่อนหน้านี้

1.2 ตัวอย่างที่สองออกไป นำตัวอย่างที่หนึ่งกลับเข้ามาในกลุ่ม calibration รวมกับตัวอย่างอื่นๆ ที่เหลือเพื่อสร้างสมการ calibration เมื่อได้สมการ calibration นำมาประเมินค่าของตัวอย่างที่สอง ทำซ้ำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งประเมินค่าของตัวอย่างครบทุกตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างแต่ละตัวจะถูกตัดออก 1 ครั้งเท่านั้น

การทดสอบในลักษณะนี้เป็นการทดสอบภายใน (internal validation) ซึ่งวัดผลโดยการดูค่า Root mean square error of cross validation (RMSECV) เป็นการวัดค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการประเมินโดยใช้สมการ calibration กับค่าที่วิเคราะห์ได้ (measured value or true value) ถ้ามีค่าแตกต่างน้อยแสดงว่าสมการ calibration ใช้ทำการประเมินนั้นมีประสิทธิภาพให้ค่าที่

สามารถยอมรับได้ การใช้วิธี Full cross validation มักใช้กับวิธีการวิเคราะห์โดยวิธี PLS Regression ไม่นิยมใช้กับวิธีการวิเคราะห์โดยวิธี ML Regression การใช้วิธีนี้ใช้ในกรณีที่มีตัวอย่างจำนวนน้อยๆ แต่ไม่เหมาะสมในกรณีที่มีตัวอย่างจำนวนมากๆ เพราะผลที่ได้อาจจะไม่ถูกต้อง

2) Prediction testing

เป็นการทดสอบโดยนำกลุ่มตัวอย่างชุดใหม่ (testing set) มาประเมินค่าจากสมการ calibration ที่ได้ โดยตัวอย่างชุดใหม่ที่น่ามาวิเคราะห์ต้องมีวิธีการเตรียมตัวอย่างการวัดสเปกตรัมสภาวะในการทดลอง รวมไปถึงการแปลงข้อมูลสเปกตรัมต้องเหมือนกับกลุ่ม calibration ข้อควรระวังก็คือ ตัวอย่างในกลุ่มใหม่จะต้องมีค่าที่ต้องการประเมินอยู่ในช่วงของกลุ่ม calibration การทดสอบลักษณะนี้เรียกว่า การทดสอบแบบภายนอก (external validation) ซึ่งมีวิธีการคือนำตัวอย่างชุดใหม่มาทำการวิเคราะห์ในสภาวะการทดลอง เช่นเดียวกันกับตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการทำนายค่าทางเคมี (calibration set) รวมถึงวิธีการแปลงข้อมูลสเปกตรัมก็ต้องเป็นชุดเดียวกันกับตัวอย่าง calibration set เรียกชุดตัวอย่างที่น่ามาทดสอบสมการนี้ว่าชุดทดสอบ (validation set) วิธีการเตรียมตัวอย่างทำเช่นเดียวกับกลุ่มตัวอย่างใน calibration set แต่จุดที่ต้องระวังคือ ค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ต้องการหาในตัวอย่าง validation set ต้องมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับ calibration set หลังจากได้สเปกตรัมของชุด validation set นำค่าที่ได้ไปคำนวณจากสมการทำนายองค์ประกอบทางเคมี จากนั้นดูผลการคำนวณที่ได้จากค่าสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิงกับค่าที่ได้จาก NIR (Bias), ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มทดสอบสมการ (root mean square error of prediction; RMSEP) หรือ (standard error of prediction; SEP), ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มสร้างสมการ (root mean square error of calibration; RMSEC) หรือ (standard error of calibration; SEC) และค่าอัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่ม validation ต่อค่า SEP (ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP; RPD) ซึ่งค่าสถิติเหล่านี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสมการ calibration ถ้าผลการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับผลที่อ้างอิง และให้ค่าทางสถิติที่ดีแสดงว่าสมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีนั้นยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ทำนายปริมาณตัวอย่างต่อไปได้อย่างถูกต้อง

ในการสร้างสมการสำหรับการทำนายองค์ประกอบต่างๆ นั้น จะมีค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสมการนั้นจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient; R) หรือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) คือค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (X) คือค่าอ้างอิงที่ได้จากวิธีมาตรฐาน และตัวแปรตาม (Y) คือค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIR หากค่าที่คำนวณได้มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1 หมายความว่าสมการที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้ในการอธิบายค่าทำนายที่เกิดจากอิทธิพลของตัวแปรอิสระ (X) กับค่าตัวแปรตาม (Y) ที่มีความสัมพันธ์กันมาก เกณฑ์การพิจารณายอมรับค่า R และค่า RPD ค่าจากที่คำนวณได้มีค่าสูง หมายถึง ค่าผิดพลาดมาตรฐานที่ทำนายได้จาก NIR มีค่าน้อยกว่าค่าผิดพลาดมาตรฐานที่ได้จากวิเคราะห์จริง

2.5.3 ประโยชน์ของเทคนิค NIRS และการประยุกต์ใช้:

เครื่องมือแต่ละประเภทต่างก็มีข้อดีและข้อจำกัดในการใช้งาน สำหรับเครื่อง NIR มีประโยชน์และข้อดีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีหรือการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่น สำหรับการนำเครื่อง NIR ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมมีประโยชน์มากมายเช่น

- 1) ง่ายต่อการเตรียมตัวอย่าง ไม่จำเป็นต้องซึ่งตัวอย่างก่อนนำมาวัดค่า
- 2) มีความรวดเร็วในการวัดค่า
- 3) การตรวจสอบเป็นแบบไม่ทำลาย ทำตัวอย่างที่นำมาตรวจสอบ สามารถจำหน่ายส่งออก หรือบริโภคต่อได้ เป็นการประหยัดต้นทุนของผลิตภัณฑ์อีกทางหนึ่ง
- 4) ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ลดต้นทุนในการดูแลรักษาสภาพแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางด้านเคมี
- 5) สะดวกต่อการใช้งาน เนื่องจากในการปฏิบัติไม่จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีประสบการณ์ หรือต้องได้รับการฝึกฝนโดยเฉพาะ สามารถปฏิบัติตามคู่มือการใช้งานได้ทันที
- 6) ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมี และเครื่องแก้วเป็นจำนวนมาก ทำให้สามารถลดต้นทุนในเรื่องสารเคมี และอุปกรณ์เครื่องแก้วลงไปได้
- 7) เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับนำไปควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต

สำหรับในปัจจุบันได้มีประยุกต์ในการนำเทคนิค NIRS มาใช้ในการตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบทางเคมีหรือคุณค่าทางโภชนาการชั้นนี้ต่างๆ ของอาหารและผลผลิตทางการเกษตร เช่น การตรวจวัดปริมาณโปรตีนในข้าว (Rittiron et al., 2005) คุณค่าทางโภชนาการของน้ำมัน (Tsenkova et al., 1999) และการวิเคราะห์ประเมินคุณภาพเมล็ดพืชดังแสดงในตารางที่ 2.5

นอกจากนี้ยังมีความพยายามในการนำเทคนิค NIRS มาใช้ในการตรวจสอบองค์ประกอบที่มีความเข้มข้นต่ำในระดับ ppm เช่น สารกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น โดยในการวัดสารที่มีปริมาณความเข้มข้นต่ำมากๆ นั้น ได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิค DESIR ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำให้ตัวอย่างที่สนใจอยู่บนกระดานรอง โดยการหยดสารตัวอย่างลงบนบริเวณตรงกลางกระดานรองใยแก้ว จากนั้นนำไปประเหยสารละลายออกให้เหลือเพียงสารที่สนใจอยู่บนกระดานรองใยแก้ว หลังจากนั้นนำกระดานรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยโหมด Reflectance โดยใช้ NIR reflector วางทับบนกระดานรองเพื่อช่วยให้แสงสะท้อนกลับไปยัง detector (ภาพที่ 2.9) และเทคนิค NIRS นี้ได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์การตรวจสอบสารกำจัดแมลงชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 เช่น การตรวจวัดยาฆ่าแมลงที่ผิวผลไม้ด้วยเทคนิค DESIR (Acharya et al., 2012) และการตรวจวัดสารกำจัดและป้องกันโรคพืชที่ผิวมะเขือเทศด้วยเทคนิค DESIR-NIR (Saranwong and Kawano, 2005) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การศึกษาเหล่านี้จะเป็นการตรวจวัดปริมาณสารที่ผิวของผักและผลไม้ ซึ่งมีลักษณะตัวอย่างที่ต่างจากการศึกษาในครั้งนี้ ที่ใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์ซึ่งมีลักษณะตัวอย่างที่เป็นผง

ตารางที่ 2.5 รายงานวิจัยที่ใช้เทคนิค NIR ในการวิเคราะห์คุณภาพผลผลิตทางการเกษตร

Authors	Product	Constituents	Statistics			
			<i>R</i>	<i>SECV</i>	<i>RMSEP</i>	<i>SEP</i>
Orman and Schuman (1992)	Corn	Oil	0.56	1.20	-	-
Kramer et al. (2000)	Corn	Avidin	0.29	5.26	-	-
Rittiron et al. (2005)	Brown rice	Protein	0.98	-	-	0.24
		Moisture	0.94	-	-	0.40
Canneddu et al. (2015)	Macadamia	Peroxide	0.72	-	-	3.45
		Acidity	0.80	-	-	0.14
Pan et al. (2015)	Sugar beet	Moisture	0.83	-	-	1.15
		SSC	0.81	-	-	1.14
		Sucrose	0.75	-	-	0.99
Rungpichayapichet et al. (2015)	Mango	B-carotene	0.94	10.2	-	-
		Flesh colour	0.80	-	-	11.64
Cortés et al. (2016)	Apple	SSC	0.94	-	0.36	-
Kljusuricm et al. (2016)	Berry fruit	Total phenolic	0.98	-	35.48	-
		Antioxidant	0.99	-	2.20	-
		Freshness	0.84	-	2.70	-
Jamshidi et al. (2016)	Cucumber	Diazinon	0.91	3.22	-	-
Marques et al. (2016)	Mango	SSC	0.92	-	0.55	-
		Dry matter	0.67	-	0.51	-
		Firmness	0.72	-	12.20	-

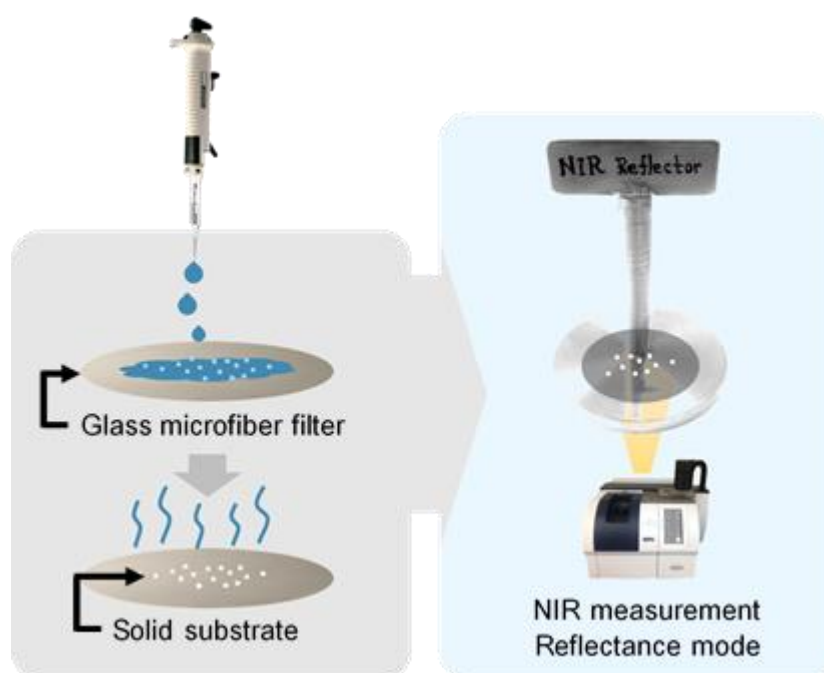
หมายเหตุ: SSC: soluble solid content

R: correlation coefficient

SECV: standard error of cross validation

RMSEP: root mean square error of prediction

SEP: standard error of prediction



ภาพที่ 2.9 เทคนิค Dry Extract System for Infrared (DESIR)

ตารางที่ 2.6 รายงานวิจัยที่ใช้เทคนิค DESIR ในการตรวจสอบองค์ประกอบที่มีความเข้มข้นต่ำๆ

Authors	Product	Constituent s	Statistics			
			<i>R</i>	<i>Bias</i>	<i>RMSEP</i>	<i>SEP</i>
Saranwong and Kawano (2005)	Tomato surfaces	Fungicide	-	0.84	-	7.89
Acharya et al. (2012)	Fruit surfaces (Mango, apple and tomato)	Pesticide	0.90	-	0.048	-

หมายเหตุ: R: correlation coefficient

RMSEP: root mean square error of prediction

SEP: standard error of prediction

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

3.1.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย: ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และมันสำปะหลังเส้นปลอดสาร

3.1.2 สารเคมี

- 1) Carbofuran
- 2) Ethyl acetate

3.1.3 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

- 1) เครื่อง FT-NIR spectroscopy (MPA, Bruker, Germany)
- 2) NIRS aluminum reflector
- 3) Sample holder: Quartz cup
- 4) Filter paper No.1 90 mm. (Whatman, International Ltd., UK)
- 5) Glass microfiber filter GF/C 42.5 mm. (Whatman, International Ltd., UK)
- 6) Petri dish 50 mm. (Crystal grade polystyrene) (SPL life science)
- 7) เครื่อง Ultrasonic (Crest Ultrasonic, Malaysia)
- 8) ตู้ดูดความชื้น
- 9) ตู้บลมร้อน

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 การศึกษา โดยมีวิธีการดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.2.1 การศึกษาที่ 1 การประเมินประสิทธิภาพการตรวจสอบปริมาณสารคาร์โบฟูรานตกค้างในข้าวโพดอาหารสัตว์แบบรวดเร็วด้วย NIRS

1) การปนเปื้อนสารคาร์โบฟูรานในตัวอย่างและการจัดการตัวอย่าง: ตัวอย่างข้าวโพดอาหารสัตว์ปลอดสารพิษได้จากฟาร์มเกษตรกรในจังหวัดพิษณุโลก ซึ่งตัวอย่างข้าวโพดเมล็ดตัวอย่างละ 20 กรัม ใส่ในถุงพลาสติก จำนวน 75 ตัวอย่าง ทำจำลองการปนเปื้อนโดยการสเปรย์ด้วยสารละลายคาร์โบฟูราน (artificial contaminated samples) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ตั้งแต่ 0-50 ppm จากนั้นระเหยตัวทำละลายออกเป็นเวลา 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง และนำมาทำการจัดการตัวอย่างเป็นทั้งหมด 3 รูปแบบสำหรับการวิเคราะห์ด้วย NIRS ดังนี้

รูปแบบที่ 1 รูปแบบข้าวโพดบดปนเปื้อน โดยนำข้าวโพดเมล็ดปนเปื้อนมาทำการบดละเอียดด้วยตะแกรงบดขนาดรูตะแกรง 2 มิลลิเมตร (ภาพที่ 3.3A)

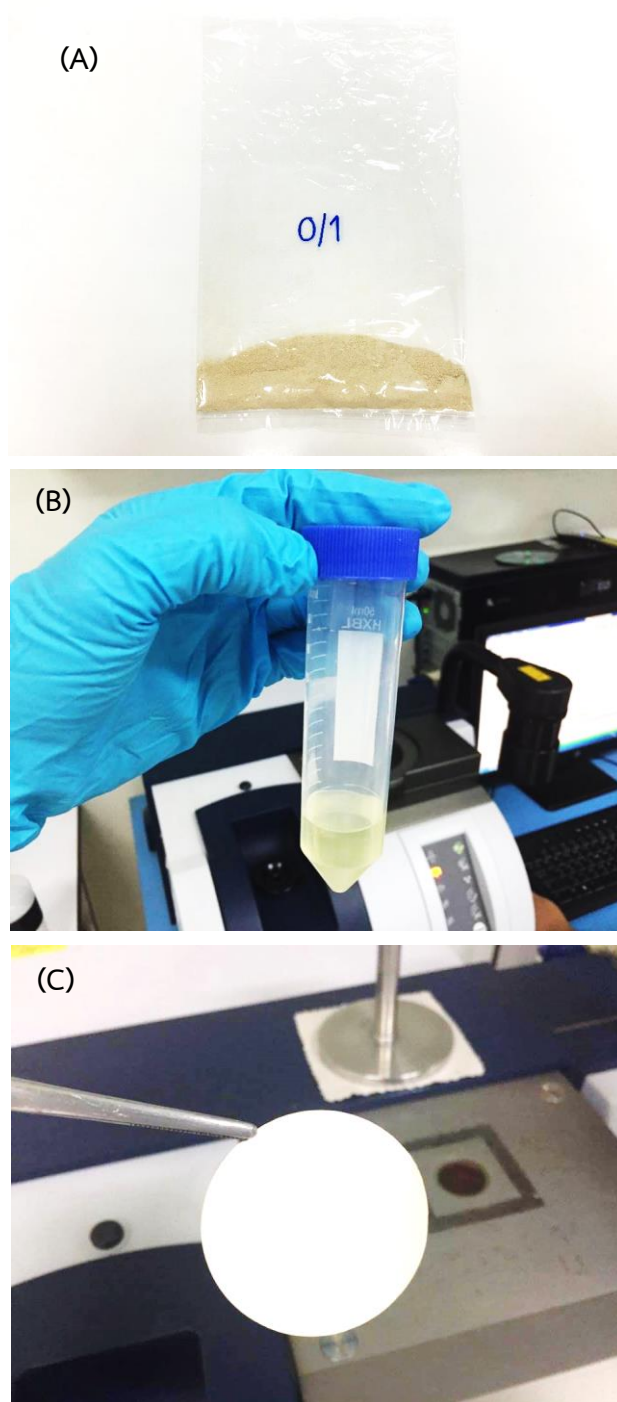
รูปแบบที่ 2 รูปแบบของเหลว (ภาพ 3.3B) ได้จากการนำตัวอย่างรูปแบบที่ 1 มาใส่ตัวทำละลาย 2 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น และสารละลายเอทิลอะซิเตท เพื่อศึกษาหาสารสกัดชนิดที่เหมาะสมต่อการสกัดสาร

คาร์โบฟูรานออกจากตัวอย่างข้าวโพดบด จากนั้นนำตัวอย่างที่แช่ในสารสกัดแต่ละชนิดไปสกัดด้วยเครื่อง Ultrasonic เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปกรองเพื่อแยกกากออกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 จะได้ของเหลวที่สกัดสารคาร์โบฟูรานออกมา โดยตัวอย่างรูปแบบของเหลวนี้นี้จะมี 2 ชนิด ได้แก่ ตัวอย่างของเหลวจากการสกัดด้วยน้ำกลั่น และตัวอย่างของเหลวจากการสกัดด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท

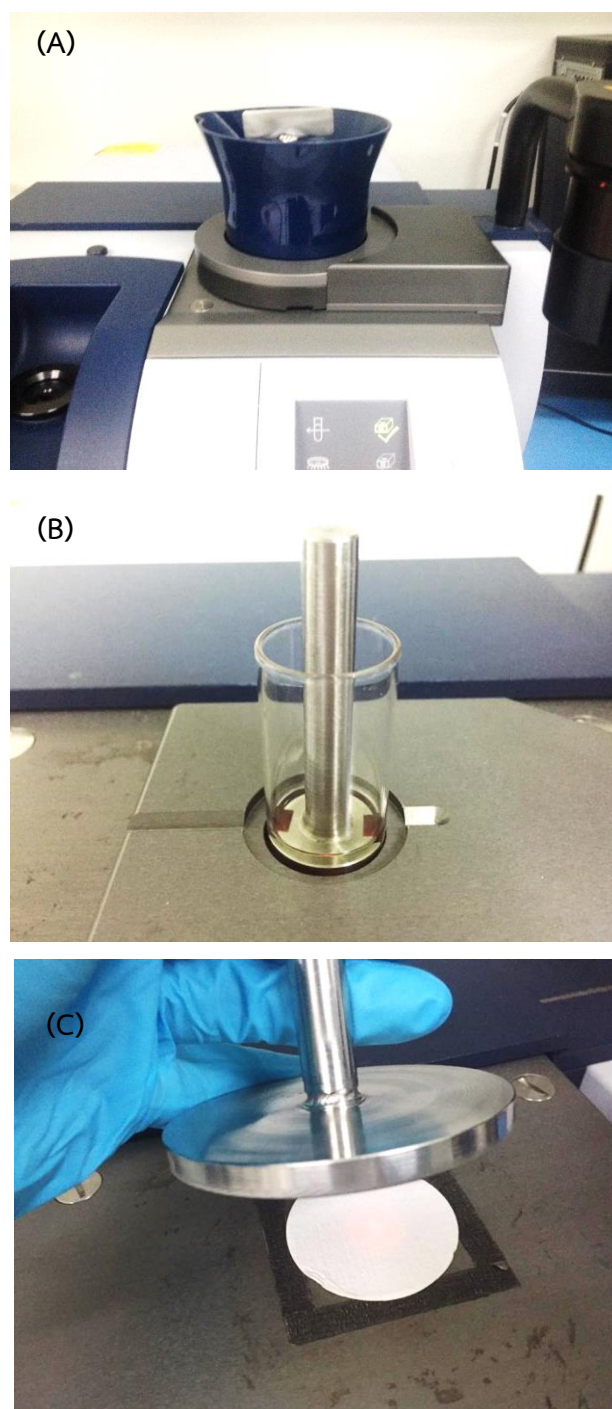
รูปแบบที่ 3 รูปแบบ DESIR (ภาพ 3.3C) เนื่องจากระดับการปนเปื้อนของสารกำจัดศัตรูพืชในตัวอย่างมีความเข้มข้นที่ต่ำในระดับ ppm จึงมีการประยุกต์ใช้เทคนิค DESIR ซึ่งดัดแปลงจากวิธีการของ Saranwong and Kawano (2005) โดยการนำตัวอย่างรูปแบบของเหลวจากทั้งที่สกัดได้จากน้ำกลั่นและสกัดจากเอทิลอะซิเตท ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร หยดลงบริเวณกึ่งกลางของกระดาษกรองใยแก้ว 2 แผ่น ที่วางซ้อนในจานเพาะเลี้ยงเชื้อชนิดพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร จากนั้นนำกระดาษที่ดักกรองสารคาร์โบฟูรานไว้ประหยศตัวทำละลายให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งกระดาษกรองแห้ง และทำการเก็บตัวอย่างไว้ในตู้ดูดความชื้น ได้เป็นตัวอย่างกระดาษกรอง ซึ่งเรียกว่า “ตัวอย่าง DESIR” โดยในการศึกษานี้ จะมีตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำกลั่น และตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท

2) การตรวจวิเคราะห์ด้วย NIRS: ใช้เครื่อง Multipurpose analyzer (MPA) FT-NIR spectroscopy (Bruker, Germany) ใช้แสงเนียร์อินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น 9000 ถึง 4000 cm^{-1} ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทั้ง 3 รูปแบบ ใช้โหมดการวัดแบบสะท้อนกลับ ซึ่งตัวอย่างจากการศึกษาที่ 1 นี้ ที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วย NIRS ประกอบไปด้วยตัวอย่างทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ 1) ตัวอย่างรูปแบบข้าวโพดบด (Ground maize: GM) 2) ตัวอย่างรูปแบบของเหลวสกัดด้วยน้ำกลั่น (Maize-extracted solution by distilled water: MEW) 3) ตัวอย่างรูปแบบของเหลวสกัดด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (Maize-extracted solution by ethyl acetate: MEE) 4) ตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำกลั่น (DESIR from maize-extracted solution by distilled water: DMW) และ 5) ตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (DESIR from maize-extracted solution by ethyl acetate: DME) โดยการสแกนตัวอย่าง GM นั้นจะบรรจุตัวอย่างลงใน quartz cup (ภาพที่ 3.4A) ตัวอย่างรูปแบบของเหลวทั้ง 2 ชนิดจะบรรจุลงใน sample cell ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร โดยใช้ aluminum reflector ที่มีขนาดความลึกของ pathlength 0.1 มิลลิเมตร เป็นตัวช่วยในการสะท้อนกลับของแสงไปยังตัวตรวจวัด (ภาพที่ 3.4B) และตัวอย่างรูปแบบ DESIR ทั้ง 2 ชนิดจะถูกวัดโดยตรง และวางทับด้วย aluminum reflector เพื่อเป็นตัวช่วยในการสะท้อนแสง (ภาพที่ 3.4C) ข้อมูลการดูดกลืนแสง NIR ของตัวอย่างทั้ง 5 ชนิด จะถูกนำไปสร้างแบบจำลองหาความสัมพันธ์กับปริมาณการปนเปื้อนสารคาร์โบฟูแรนในลำดับถัดไป

3) การสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูราน: การวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างแบบจำลองการปนเปื้อนสารคาร์โบฟูรานในข้าวโพดอาหารสัตว์ ด้วยวิธี PLS regression ด้วยโปรแกรม OPUS version 7.2 มีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 3.3 ตัวอย่างข้าวโพด 3 รูปแบบที่ผ่านการจัดการ; (A) รูปแบบข้าวโพดบดปนเปื้อน, (B) รูปแบบของเหลว และ (C) รูปแบบ DESIR



ภาพที่ 3.4 การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค NIRS ของตัวอย่าง 3 รูปแบบ; (A) รูปแบบข้าวโพดบดปนเปื้อน, (B) รูปแบบของเหลวที่สกัดได้ และ (C) รูปแบบ DESIR

3.1) นำสเปกตรัมดิบของตัวอย่างแต่ละชนิด ทั้ง 5 ชนิด มาทำการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี Derivative, Multiplicative scattering correction (MSC) และ Standard normal variate (SNV) เพื่อหาลักษณะข้อมูลสเปกตรัมที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายความสัมพันธ์

3.2) นำข้อมูลสเปกตรัมดิบ และสเปกตรัมที่ปรับแต่งแบบต่าง ๆ มาคำนวณเพื่อสร้างแบบจำลองโดยการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้น (Partial Least Square Regression: PLSR) โดยวิธี full cross validation จากนั้นนำตัวอย่างกลุ่มทำนายมาทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองระหว่างความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสง NIR ของตัวอย่างกับค่าสารคาร์โบฟูรานจริงที่ปนเปื้อนในตัวอย่างข้าวโพด

3.3) ทดสอบสมการทำนายสารคาร์โบฟูรานและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลรูปแบบต่างๆ เพื่อหาสมการที่มีประสิทธิภาพในการทำนายสูงสุด คัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) ที่สูงที่สุด ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (Root mean square error of cross validation: RMSECV) ต่ำที่สุด และค่า ratio of standard deviation of reference data in the validation set to SEP (RPD) ที่สูงที่สุด โดยใช้เกณฑ์ในการพิจารณาดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

3.2.2 การศึกษาที่ 2 การประเมินประสิทธิภาพการตรวจสอบปริมาณสารคาร์โบฟูรานตกค้างในมันสำปะหลังแบบรวดเร็วด้วย NIRS

1) การปนเปื้อนสารคาร์โบฟูรานในตัวอย่างและการจัดการตัวอย่าง: ตัวอย่างมันสำปะหลังปลอดสารได้จากฟาร์มเกษตรกรในจังหวัดพิษณุโลก ซึ่งตัวอย่างตัวอย่างละ 20 กรัม ใส่ในถุงพลาสติก จำนวน 75 ตัวอย่าง และทำจำลองการปนเปื้อนสารคาร์โบฟูราน (artificial contaminated samples) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ตั้งแต่ 0-50 ppm ด้วยวิธีการเช่นเดียวกับตัวอย่างข้าวโพดอาหารสัตว์ จากนั้นนำมาทำการจัดการตัวอย่างเป็นทั้งหมด 3 รูปแบบเช่นเดิม แต่ในการศึกษาที่ 2 นี้จะทำการสกัดตัวอย่างด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตทเพียงอย่างเดียว ไม่ได้ใช้การสกัดด้วยน้ำกลั่นเนื่องจากผลการทำนายจากตัวอย่างที่ใช้สารสกัดเอทิลอะซิเตทให้ผลดีกว่าและใช้ระยะเวลาในการดำเนินการสั้นกว่าการใช้ น้ำกลั่น จึงทำให้ชนิดตัวอย่างลดลงเหลือ 3 ชนิด สำหรับการวิเคราะห์ด้วย NIRS ได้แก่ 1) ตัวอย่างมันสำปะหลังสด (Ground cassava: GC) 2) ตัวอย่างของเหลวสกัดจากมันสำปะหลังด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (Cassava-extracted solution by ethyl acetate: CEE) และ 3) ตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดมันสำปะหลังด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (DESIR from cassava-extracted solution by ethyl acetate: DCE)

2) การตรวจวิเคราะห์ด้วย NIRS: ใช้เครื่อง Multipurpose analyzer (MPA) FT-NIR spectroscopy (Bruker, Germany) ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างมันสำปะหลังทั้ง 3 ชนิด โดยตัวอย่างแต่ละรูปแบบจะใช้โหมดการวัดแบบสะท้อนกลับและวิธีการวัดเช่นเดียวกับการศึกษาที่ 1

จากนั้นข้อมูลการดูดกลืนแสง NIR ของตัวอย่างมันสำปะหลังทั้ง 3 ชนิด จะถูกนำไปสร้างแบบจำลองหาความสัมพันธ์กับปริมาณการปนเปื้อนสารคาร์โบฟูรานในลำดับถัดไป

3) การสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูราน: การวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างแบบจำลองการปนเปื้อนสารคาร์โบฟูรานในมันสำปะหลังด้วยวิธีเช่นเดียวกับการศึกษาที่ 1 โดยการนำสเปกตรัมดิบของตัวอย่างมันสำปะหลังแต่ละชนิด ชนิดละ 75 ตัวอย่างมาทำการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี Derivative, Multiplicative scattering correction (MSC) และ Standard normal variate (SNV) เพื่อหาลักษณะข้อมูลสเปกตรัมที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายความสัมพันธ์ จากนั้นนำข้อมูลสเปกตรัมดิบ และสเปกตรัมที่ปรับแต่งแบบต่าง ๆ มาคำนวณเพื่อสร้างแบบจำลองโดยการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้น (Partial Least Square Regression: PLSR) และทดสอบสมการด้วยวิธี full cross validation จากนั้นนำตัวอย่างกลุ่มทำนายมาทดสอบความแม่นยำของแบบจำลอง ระหว่างความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสง NIR ของตัวอย่างกับค่าสารคาร์โบฟูรานจริงที่ปนเปื้อนในตัวอย่างมันสำปะหลังแต่ละชนิด

ทดสอบสมการทำนายสารคาร์โบฟูรานและคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) ที่สูงที่สุด ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (RMSECV) ต่ำที่สุด และค่า ratio of standard deviation of reference data in the validation set to SEP (RPD) ที่สูงที่สุด

ตารางที่ 3.1 เกณฑ์ในการพิจารณาความสามารถของสมการ calibration ด้วยค่า RPD

ค่า RPD	การคัดแยกกลุ่มตัวอย่าง	การประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์เชิงปริมาณ
0.0-2.3	แย่มาก (very poor)	ไม่แนะนำให้ใช้ (not recommended)
2.4-3.0	ไม่ดีพอ (poor)	การแบ่งระดับปริมาณอย่างหยาบ (very rough screening)
3.1-4.9	ปานกลาง (fair)	การแบ่งระดับปริมาณ (screening)
5.0-6.4	ดี (good)	การควบคุมคุณภาพ (quality control)
6.5-8.0	ดีมาก (very good)	การควบคุมกระบวนการ (process control)
8.1 ขึ้นไป	ยอดเยี่ยม (excellent)	ทุกงาน (any application)

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์ในการพิจารณาความสามารถของสมการ calibration ด้วยค่า R

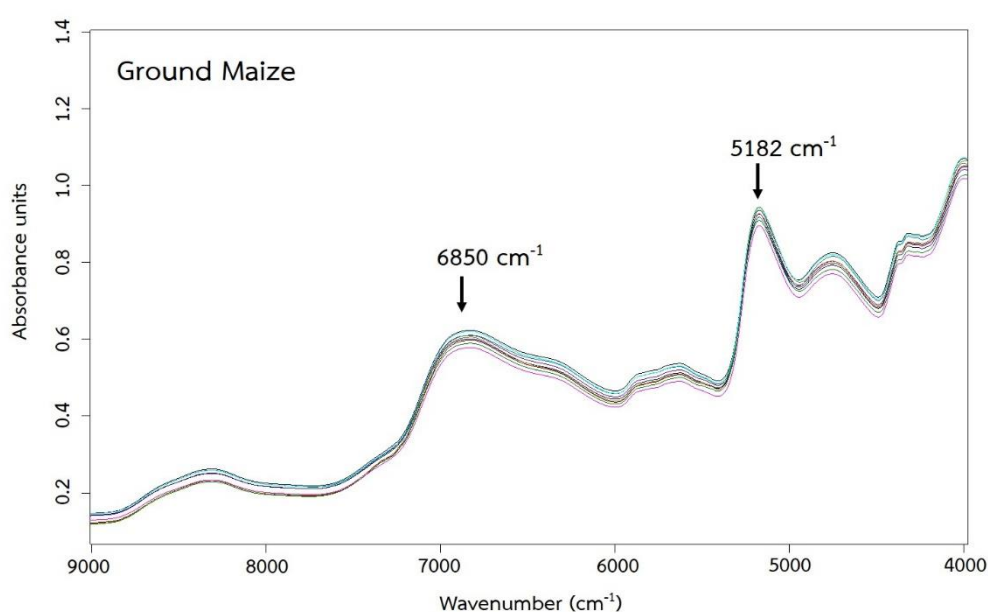
ค่า R	ความสามารถของสมการ calibration
± 0.5	ไม่ควรใช้ในการทำนาย (not usable)
$\pm 0.51-0.70$	ความสัมพันธ์ไม่ดีพอ (poor correlation)
$\pm 0.71-0.80$	การทำนายเพื่อการแบ่งระดับปริมาณอย่างหยาบ (rough screening)
$\pm 0.81-0.90$	การทำนายเพื่อแบ่งระดับปริมาณหรือประมาณค่าเบื้องต้น (screening)
$\pm 0.91-0.95$	การทำนายเพื่องานวิจัยและงานทั่วไป (research)
$\pm 0.96-0.98$	การทำนายเพื่อการประกันคุณภาพ (quality assurance)
± 0.99 ขึ้นไป	ทุกงาน (any application)

บทที่ 4

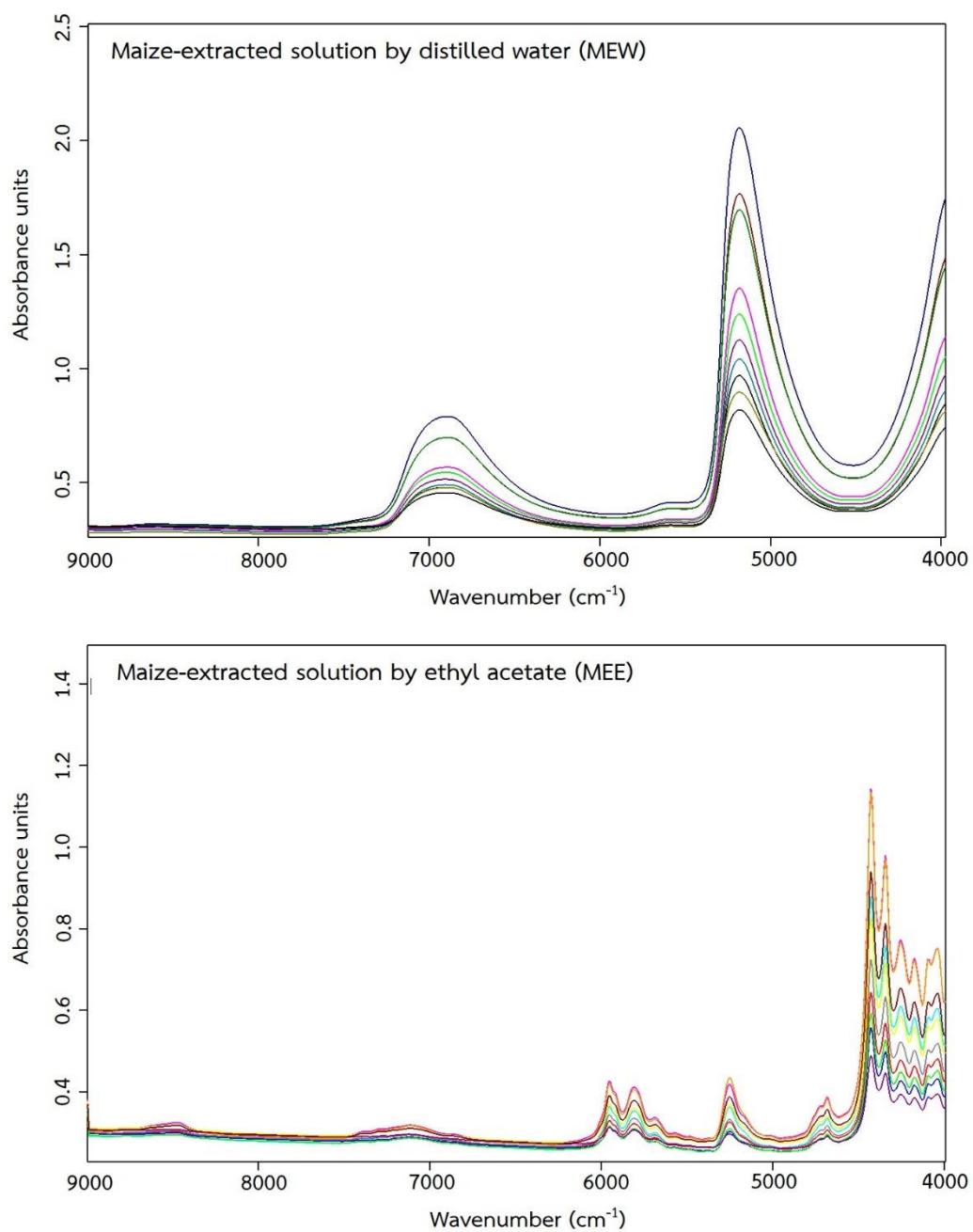
ผลการทดลอง และวิจารณ์

4.1 การทดลองที่ 1 การประเมินประสิทธิภาพการตรวจสอบปริมาณสารคาร์โบฟูรานตกค้างในข้าวโพดอาหารสัตว์แบบรวดเร็วด้วย NIRS

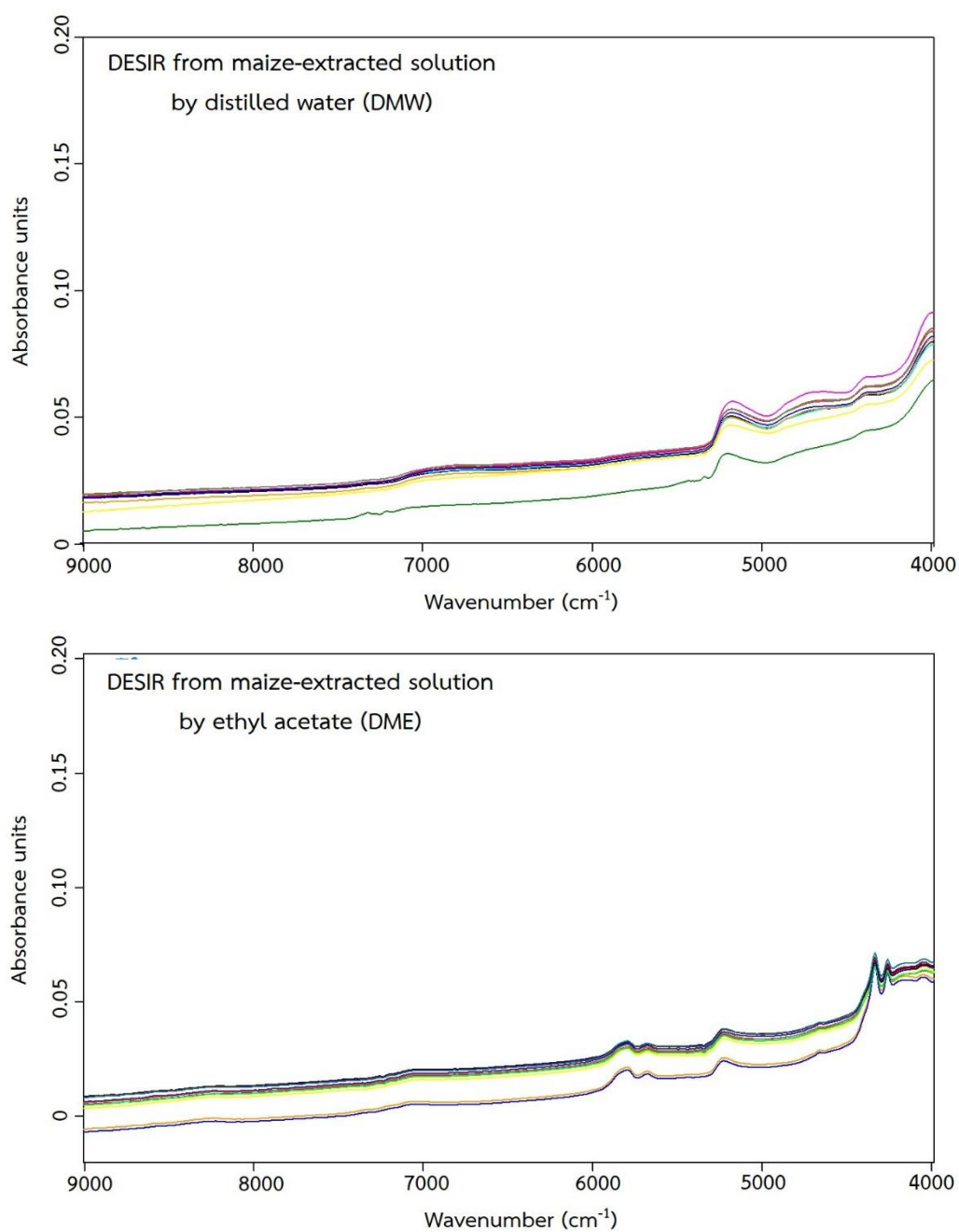
การศึกษาในครั้งนี้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานตกค้างในข้าวโพดอาหารสัตว์ (ที่ระดับการปนเปื้อนในช่วง 0-50 ppm) ที่สร้างจากสเปกตรัมตัวอย่างข้าวโพดรูปแบบต่างๆ ทั้งหมด 5 ชนิด คือ 1) ตัวอย่างรูปแบบข้าวโพดบด (GM) 2) ตัวอย่างรูปแบบของเหลวสกัดด้วยน้ำกลั่น (MEW) 3) ตัวอย่างรูปแบบของเหลวสกัดด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (MEE) 4) ตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดด้วยน้ำกลั่น (DMW) และ 5) ตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (DME) จากภาพที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าลักษณะของสเปกตรัมของตัวอย่างข้าวโพดบด (GM) ซึ่งเป็นตัวแทนของการวัดแบบไม่ทำลายตัวอย่างและไม่ใช้สารเคมี พบพิกขนาดใหญ่ 2 พิก คือ พิกของพันธะ O-H ของโมเลกุลน้ำที่เลขคลื่น 6850 และ 5182 cm^{-1} เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของตัวอย่างรูปแบบของเหลว (ภาพที่ 4.2) ทั้งตัวอย่าง MEW และ ตัวอย่าง MEE พบว่าสเปกตรัมของ MEW มีพิกหลักขนาดใหญ่เพียง 2 พิกคือพิกของพันธะ O-H ของโมเลกุลน้ำที่เลขคลื่น 6906 และ 5188 cm^{-1} ซึ่งใกล้เคียงกับพิกน้ำในสเปกตรัมตัวอย่างข้าวโพดบด ในขณะที่สเปกตรัมของตัวอย่าง MEE จะไม่พบการดูดกลืนแสงในช่วงดังกล่าว เนื่องจากสารสกัดที่ใช้เป็นสารละลายเอทิลอะซิเตท ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีต่างกัน เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของตัวอย่างรูปแบบ DESIR ทั้งตัวอย่าง DMW และ DME (ภาพที่ 4.3) จะสังเกตเห็นว่าพิกของน้ำหายไปเช่นเดียวกัน เนื่องจากระเหยตัวทำละลายออกไปแล้ว จึงเหลือเพียงการดูดกลืนแสงของตัวกระตาชกรองและสารตกค้างบนกระตาช โดยพิกที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนแสงของกระตาชกรองที่เลขคลื่น 5235 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Saranwong and Kawano (2005)



ภาพที่ 4.1 สเปกตรัมของตัวอย่างรูปแบบข้าวโพดบดปนเปื้อนสารคาร์โบฟูราน

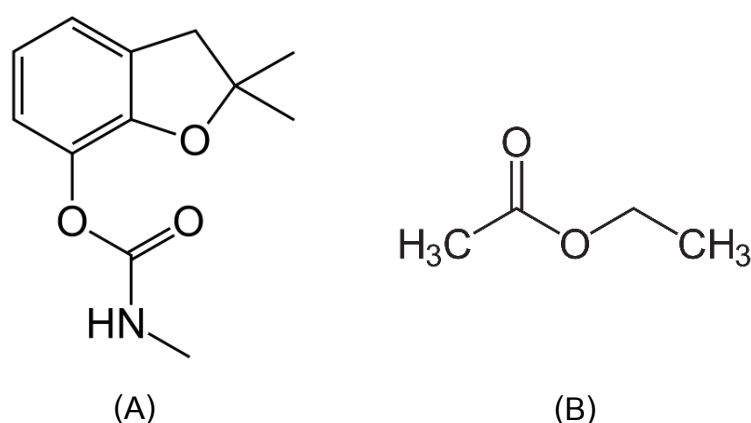


ภาพที่ 4.2 สเปกตรัมของตัวอย่างรูปแบบของเหลวสกัดจากข้าวโพดด้วยน้ำกลั่น (MEW) และด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (MEE)



ภาพที่ 4.3 สเปกตรัมของตัวอย่างรูปแบบ DESIR ที่ได้จากการสกัดข้าวโพดปนเปื้อนด้วย น้ำกลั่น (DMW) และด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (DME)

เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติแบบสมการถดถอยกำลังสองน้อยสุดบางส่วน (Partial Least Squares Regression; PLSR) สำหรับสร้างแบบจำลองการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานตกค้างบนข้าวโพดอาหารสัตว์จากตัวอย่างข้าวโพด 75 ตัวอย่าง ซึ่งผ่านการจัดการตัวอย่างได้เป็น 5 ชนิด นำสเปกตรัมของตัวอย่างแต่ละชนิดมาทำการปรับแต่งสเปกตรัมแบบต่างๆ ผลการทำนายจากแบบจำลองที่ดีที่สุดของสเปกตรัมตัวอย่างแต่ละชนิด โดยพิจารณาจากแบบจำลองที่มีค่าเฉลี่ยกำลังสองของการทำนาย (RMSECV) และค่าอัตราส่วนระหว่างความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนายต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (RPD) ที่ต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวอย่างส่วนใหญ่ในการศึกษานี้คือวิธี standard normal variate ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสเปกตรัมของตัวอย่างชนิด GM, DMW และ DME เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) ของแบบจำลองจากสเปกตรัมของตัวอย่างแต่ละชนิดพบว่า ตัวอย่างรูปแบบของเหลวทั้ง MEW และ MEE มีค่า R น้อยกว่าตัวอย่างรูปแบบอื่นๆ คือมีตัวอย่างทั้งสองชนิดค่า R เท่ากับ 0.88 ในขณะที่ตัวอย่างชนิดอื่นๆ มีค่า R มากกว่า 0.90 และยังมีค่า RMSECV ค่อนข้างสูงกว่าตัวอย่างชนิดอื่นๆ โดย MEW และ MEE มีค่า RMSECV เท่ากับ 7.06 และ 6.16 ppm ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวบ่งบอกได้ว่าสเปกตรัมของตัวอย่างรูปแบบของเหลวมีความเหมาะสมน้อยที่สุดสำหรับนำมาใช้ทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานปนเปื้อนในข้าวโพดอาหารสัตว์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในตัวอย่าง MEW มีโมเลกุลน้ำปริมาณมาก ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสง (molar absorptivity) ในช่วง NIR สูง ทำให้บดบังข้อมูลการดูดกลืนแสงของโมเลกุลสารคาร์โบฟูรานซึ่งมีความเข้มข้นต่ำมากในระดับ ppm เช่นเดียวกันกับตัวอย่าง MEE ที่มีปริมาณสารละลายเอทิลอะซิเตทมากกว่าความเข้มข้นของสารคาร์โบฟูราน จึงเกิดการบดบังข้อมูลการดูดกลืนแสงของสารที่สนใจศึกษาได้เนื่องจากสารเอทิลอะซิเตทและสารคาร์โบฟูรานมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายกัน (ภาพที่ 4.4) ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการทำนายลดลง



ภาพที่ 4.4 โครงสร้างทางเคมี; (A) คาร์โบฟูราน และ (B) เอทิลอะซิเตท

ตารางที่ 4.1 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS Regression สำหรับทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานปนเปื้อนในตัวอย่างข้าวโพดอาหารสัตว์ที่ผ่านการจัดการตัวอย่างเป็นรูปแบบต่างๆ

Sample	Rank	Calibration		Validation			Regions (cm ⁻¹)	Preprocessing
		R	RMSEE*	RMSECV*	Bias	RPD		
Ground maize (GM)	10	0.96	3.56	5.20	-0.197	3.00	9403-4597	Standard normal variate
Maize-extracted solution by distilled water (MEW)	7	0.88	5.69	7.06	-0.217	2.21	6102-5446	First derivative
Maize-extracted solution by ethyl acetate (MEE)	4	0.88	5.78	6.16	0.001	2.60	7506-6094	No spectral processing
DESIR from maize-extracted solution by distilled water (DMW)	4	0.99	2.03	2.17	0.003	7.18	7752-6094	Standard normal variate
DESIR from maize-extracted solution by ethyl acetate (DME)	5	0.94	4.57	4.95	-0.096	2.83	9403-7498, 6102-4242	Standard normal variate

หมายเหตุ: * หน่วย ppm

R: correlation coefficient

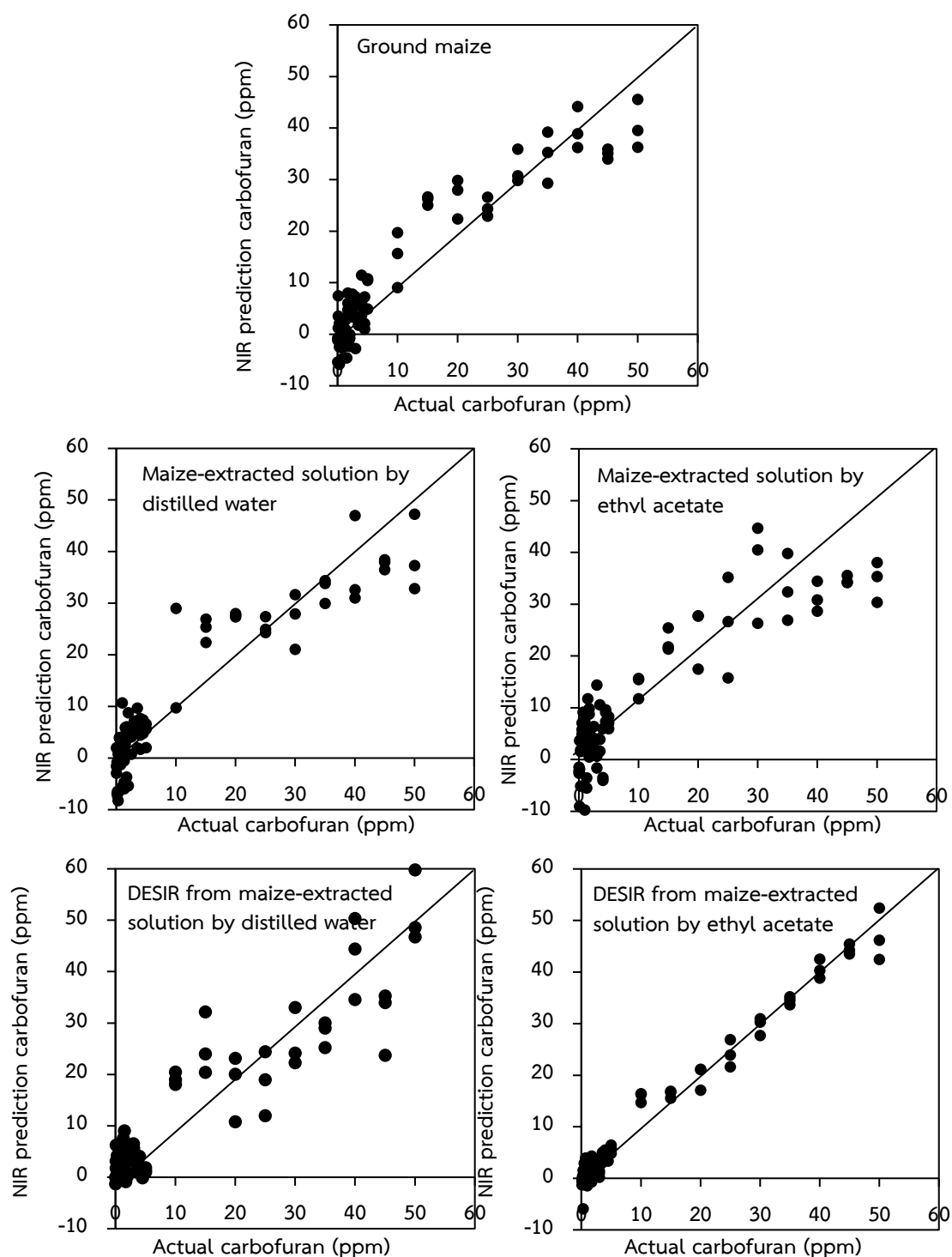
RMSEC: Root mean square error of calibration

RMSECV: Root mean square error of cross validation

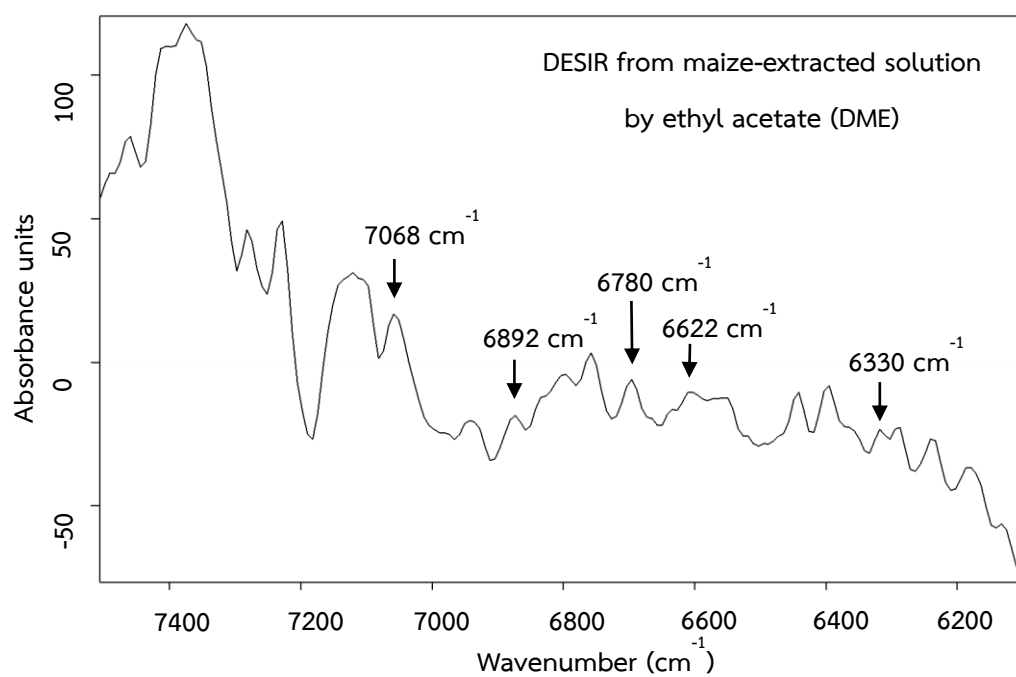
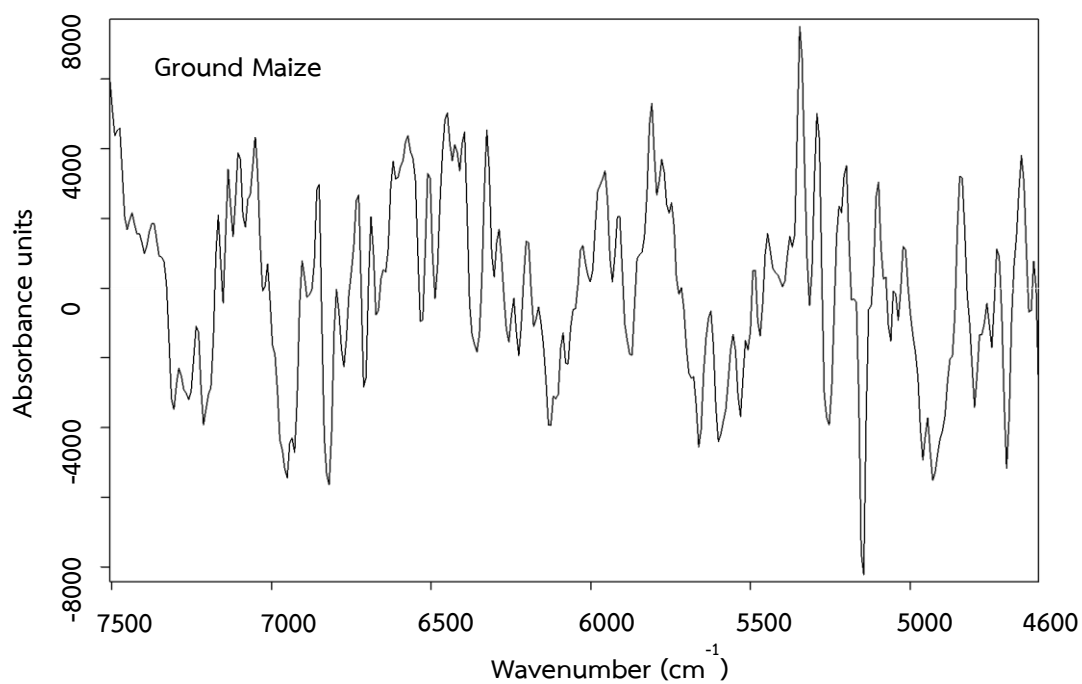
RPD: Ratio of standard deviation of reference data in the validation set to standard error of prediction

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำนายปริมาณสารปนเปื้อนผ่านสเปกตรัมของตัวอย่างทั้ง 5 ชนิด จะเห็นได้ว่าแบบจำลองจากสเปกตรัมของ DME มีผลการทำนายที่ดีที่สุด โดยมีค่า R เท่ากับ 0.99 มีค่า RMSECV เท่ากับ 2.17 ppm และมีค่า RPD สูงที่สุดเท่ากับ 7.18 ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมากในระดับการประยุกต์ใช้สำหรับการควบคุมกระบวนการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (ตารางที่ 3.1)

การเปรียบเทียบปริมาณสารคาร์โบฟูรานจริงที่ปนเปื้อนในตัวอย่างข้าวโพดอาหารสัตว์กับปริมาณสารคาร์โบฟูรานที่ทำนายได้จากแบบจำลองของตัวอย่างชนิดต่างๆดังแสดงในภาพที่ 4.5 และเมื่อพิจารณาโครงสร้างตัวแปรที่สำคัญในการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานปนเปื้อนในข้าวโพดโดยคัดเลือกตัวอย่าง 2 ชนิดที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ตัวอย่าง GM และตัวอย่าง DME โดยพิจารณาจากค่า regression coefficient ดังแสดงในภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าช่วงเลขคลื่นที่มีความสำคัญต่อการสร้างแบบจำลองของตัวอย่าง GM และ DME อยู่ในช่วงเลขคลื่น $9403-4597\text{ cm}^{-1}$ และ $7752-6094\text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ว่าพีกที่มีผลต่อการทำนายของตัวอย่าง GM จะมีช่วงที่กว้างกว่าและมีจำนวนพีกมากกว่าตัวอย่าง DME อาจเนื่องมาจากสเปกตรัมที่ได้จากตัวอย่าง GM ซึ่งเป็นตัวอย่างข้าวโพดบดมีข้อมูลการดูดกลืนแสงจากองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ภายในเนื้อเยื่อของตัวอย่างที่ซับซ้อนกว่าสเปกตรัมของ DME ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีองค์ประกอบหลักเป็นเพียงกระดาศกรองใยแก้วและสารที่ฉกกรองไว้บนกระดาศ จึงพบจำนวนพีกจากค่า regression coefficient ของตัวอย่าง DME น้อยกว่าแต่มีความชัดเจนมากขึ้น จากข้อมูลดังกล่าว จึงมีความเป็นไปได้ว่าข้อมูลการดูดกลืนแสงที่มีความสัมพันธ์สูงกับปริมาณคาร์โบฟูรานจากตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดอยู่ในช่วงเลขคลื่น $7800\text{ ถึง }6000\text{ cm}^{-1}$ โดยในการทำนายผ่านตัวอย่าง DME นั้น พบพีกสำคัญที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองหลายพีกเมื่อเปรียบเทียบกับพันธะเคมีของโมเลกุลสารคาร์โบฟูราน เช่น พีกที่เลขคลื่น $6329\text{ และ }6898\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีกที่เกิดจากการสั่นของพันธะ O-H และ C-H (Williams and Norris, 2001) พีกที่เลขคลื่น 6622 cm^{-1} เป็นพีกที่เกิดจากการสั่นของพันธะ N-H (Osborne, et al., 1993; Williams and Norris, 2001) พีกที่เลขคลื่น 6779 cm^{-1} เป็นพีกที่มีความเกี่ยวข้องกับการดูดกลืนแสงของกลุ่มคาร์บาเมต (Martens and Naes, 1989) และยังมีพีกที่เกิดจากการดูดกลืนแสงขององค์ประกอบของพันธะ C-H ในช่วงเลขคลื่น 7067 cm^{-1} (Murray and Williams, 1987; Shenk et al., 1992)



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารคาร์โบฟูรานปนเปื้อนจริงบนตัวอย่างข้าวโพดและค่าที่ทำนายได้จากวิธี NIRS จากสเปกตรัมของตัวอย่างข้าวโพดรูปแบบต่าง ๆ

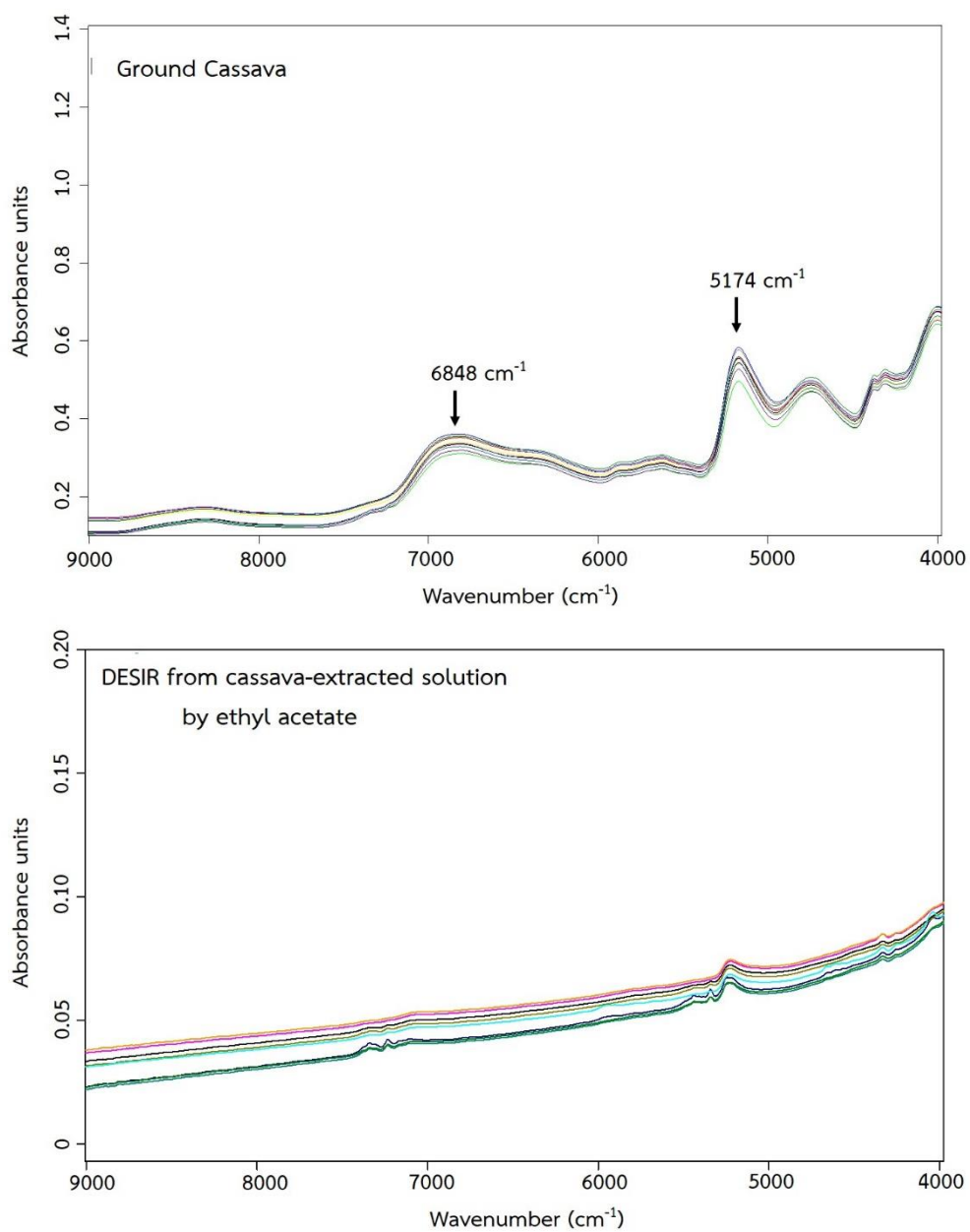


ภาพที่ 4.6 Regression coefficient แสดงช่วงเลขคลื่นสำคัญในการสร้างแบบจำลองตัวอย่างรูปแบบ ข้าวโพดบด และตัวอย่างรูปแบบ DESIR

4.2 การทดลองที่ 2 การประเมินประสิทธิภาพการตรวจสอบปริมาณสารคาร์โบฟูรานตกค้างในมันสำปะหลังแบบรวดเร็วด้วย NIRS

สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพแบบจำลองการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานตกค้างในวัตถุดิบอาหารสัตว์ (ที่ระดับการปนเปื้อนในช่วง 0-50 ppm) ที่สร้างจากสเปกตรัมตัวอย่างมันสำปะหลังรูปแบบต่างๆ ซึ่งจากการศึกษาในข้าวโพดอาหารสัตว์ทำให้คัดเลือกรูปแบบตัวอย่างที่มีประสิทธิภาพแบบจำลองที่ดีมาศึกษาในการทดลองที่ 2 นี้เพียง 2 รูปแบบ คือ ตัวอย่างรูปแบบมันสำปะหลังบด (GC) และ ตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (DCE) เนื่องจากการสกัดตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นให้ผลการทำนายที่ด้อยกว่าการสกัดด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท ทำให้ในการทดลองนี้ใช้เพียงสารละลายเอทิลอะซิเตทในการจัดการตัวอย่าง จากภาพที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าลักษณะของสเปกตรัมของตัวอย่างมันสำปะหลังบด (GC) ซึ่งเป็นตัวแทนของการวัดแบบไม่ทำลายตัวอย่างและไม่ใช้สารเคมี พบพีคขนาดใหญ่ 2 พีคเช่นเดียวกับตัวอย่างข้าวโพดในการทดลองที่ 1 คือ พีคของพันธะ O-H ของโมเลกุลน้ำที่เลขคลื่น 6848 และ 5174 cm^{-1} เช่นเดียวกันกับสเปกตรัมของตัวอย่าง DCE ที่ไม่พบการดูดกลืนแสงของพีคน้ำ เนื่องจากมีการระเหยตัวทำละลายออกไปแล้ว จึงเหลือเพียงการดูดกลืนแสงของตัวกระดูกโครงและสารตกค้างบนกระดูก โดยพีคที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนแสงของกระดูกโครงอยู่ในช่วงเลขคลื่น 5235 cm^{-1} เช่นกัน

เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติแบบสมการถดถอยกำลังสองน้อยสุดบางส่วน (Partial Least Squares Regression; PLSR) ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นว่า ตัวอย่าง GC ให้ผลการทำนายที่ด้อยกว่าตัวอย่างรูปแบบ DCE โดยผล PLS ที่ดีที่สุดจากการศึกษาสารตกค้างในมันสำปะหลัง มีค่า R เท่ากับ 0.99 และมีค่าความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนาย (RMSECV) เท่ากับ 3.72 ppm ภาพที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณสารคาร์โบฟูรานจริงที่ปนเปื้อนในตัวอย่างมันสำปะหลังกับปริมาณคาร์โบฟูรานที่ทำนายด้วยวิธี NIRS เมื่อพิจารณาโครงสร้างตัวแปรที่สำคัญในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานจากค่า regression coefficient ของตัวอย่างมันสำปะหลัง (ภาพที่ 4.9) จะเห็นได้ว่าช่วงเลขคลื่นสำคัญในการทำนายปริมาณสารพิษจากสเปกตรัมตัวอย่างมันสำปะหลังบดอยู่ระหว่างช่วงเลขคลื่น 9400 และ 5400 cm^{-1} ในขณะที่ข้อมูลสำคัญในการสร้างแบบจำลองของตัวอย่างรูปแบบกระดูกโครง (ตัวอย่าง DCE) อยู่ในช่วงเลขคลื่น $9403\text{--}7498\text{ cm}^{-1}$ และ $6102\text{--}4242\text{ cm}^{-1}$ ในการทำนายผ่านตัวอย่างกระดูกโครงนั้น พบพีคที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนแสงของกระดูกโครงไยแก้วที่เลขคลื่น 5238 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Saranwong and Kawano (2005) และพบพีคที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองหลายพีค เช่น พีคที่เลขคลื่น 5006 และ 5122 cm^{-1} เป็นพีคที่มีความเกี่ยวข้องกับการดูดกลืนแสงของกลุ่มคาร์บาเมต (Martens and Naes, 1989) พีคที่เลขคลื่น 6622 cm^{-1} เป็นพีคที่เกิดจากการสั่นของพันธะ N-H (Osborne, et al., 1993) และพีคที่เลขคลื่น 7088 และ 7235 cm^{-1} เป็นพีคที่เกิดจากการสั่นของพันธะ O-H และ C-H (Williams and Norris, 2001)



ภาพที่ 4.7 สเปกตรัมของตัวอย่างรูปแบบมันสำปะหลังบด และตัวอย่างรูปแบบ DESIR ที่ได้จากการสกัดมันสำปะหลังด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท

ตารางที่ 4.2 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS Regression สำหรับทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานปนเปื้อนในตัวอย่างมันสำปะหลังที่ผ่านการจัดการตัวอย่างเป็นรูปแบบต่างๆ

Sample	Rank	Calibration		Validation			Regions (cm ⁻¹)	Preprocessing
		R	RMSEE*	RMSECV*	Bias	RPD		
Ground maize (GM)	4	0.92	6.15	6.96	-0.006	2.24	9403-5446	First derivative
Maize-extracted solution by ethyl acetate (MEE)	8	0.95	4.82	5.62	0.069	2.77	6102-5446, 4605-4242	First derivative
DESIR from maize- extracted solution by ethyl acetate (DME)	10	0.99	2.48	3.72	-0.010	4.18	7752-6094, 5454-4242	Standard normal variate

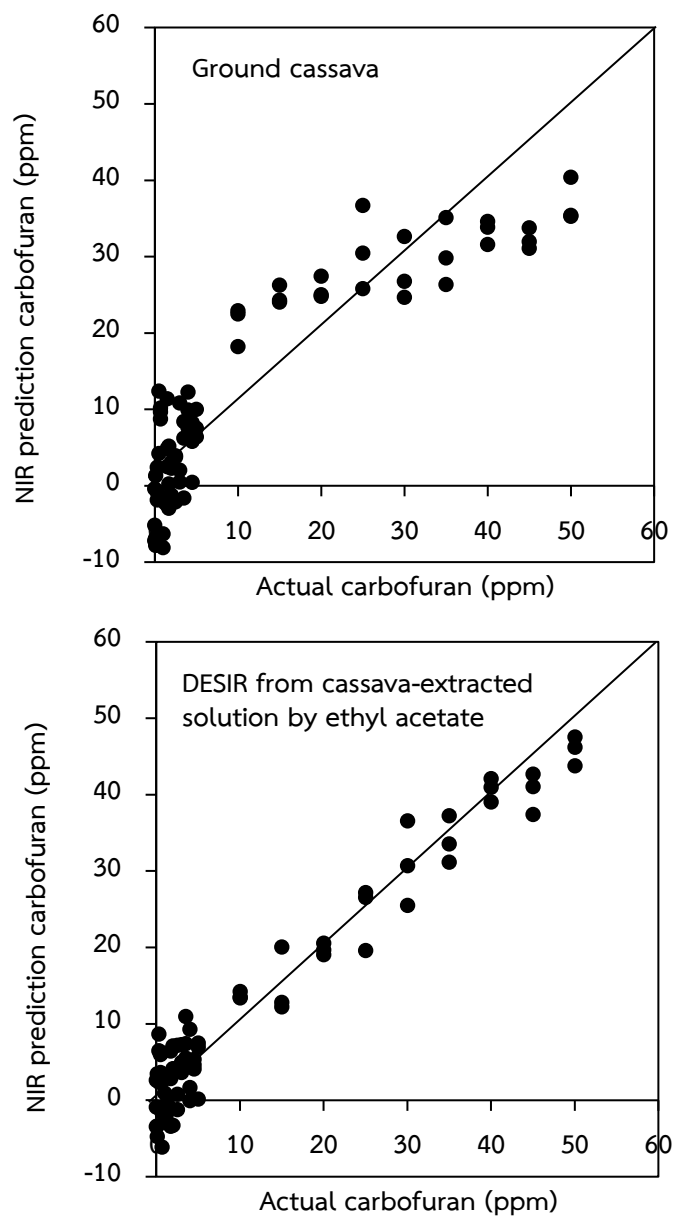
หมายเหตุ: * หน่วย ppm

R: correlation coefficient

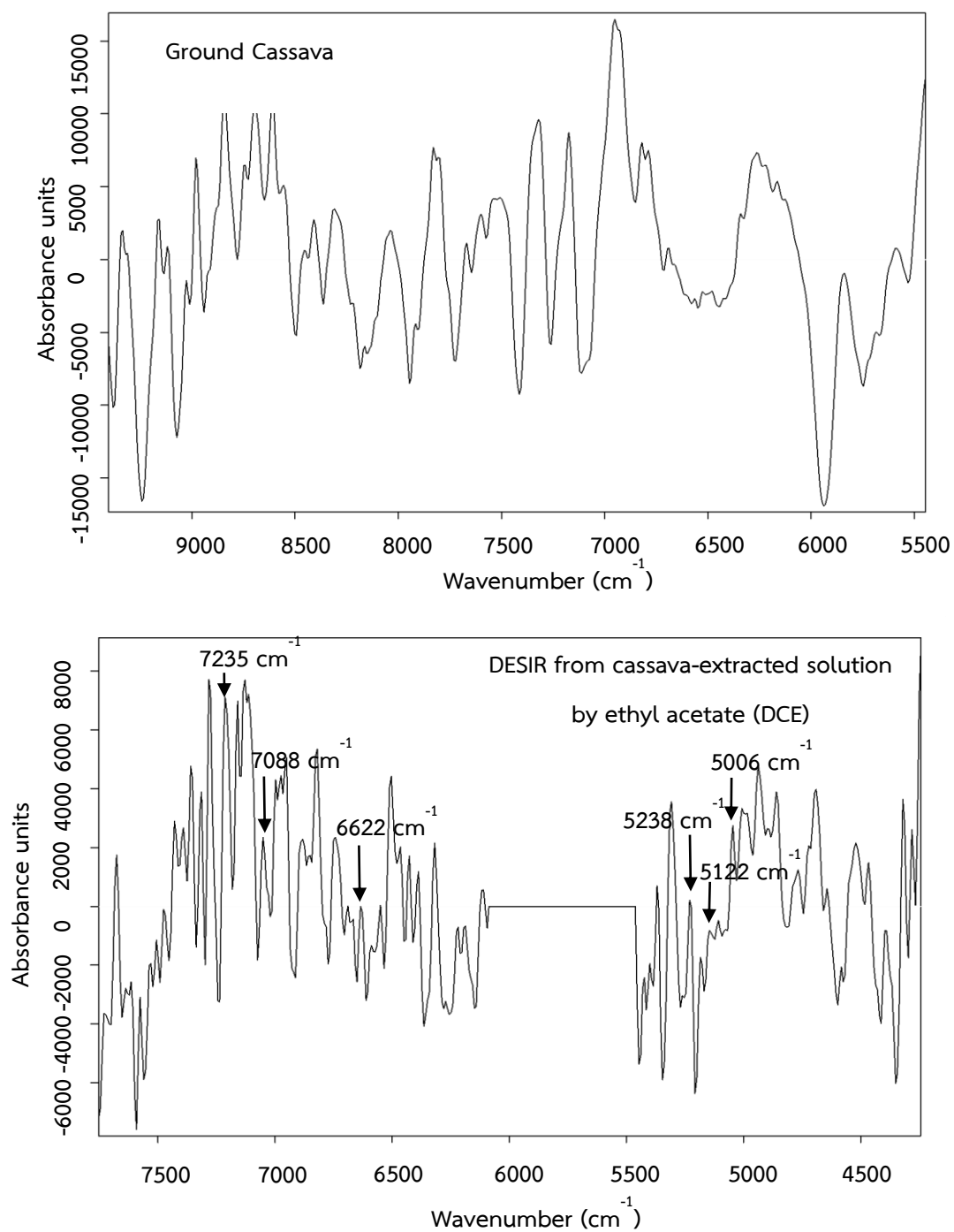
RMSEC: Root mean square error of calibration

RMSECV: Root mean square error of cross validation

RPD: Ratio of standard deviation of reference data in the validation set to standard error of prediction



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารคาร์โบฟูรานบนเปลือกจริงบนตัวอย่างและค่าที่ทำนายได้จากวิธี NIRS จากสเปกตรัมของตัวอย่างมันสำปะหลังรูปแบบต่าง ๆ



ภาพที่ 4.9 Regression coefficient แสดงช่วงเลขคลื่นสำคัญในการสร้างแบบจำลองตัวอย่างรูปแบบมัน
สำหรับหลังบดและตัวอย่างรูปแบบ DESIR

บทที่ 5

บทสรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1) การจัดการตัวอย่างวัตถุดิบอาหารสัตว์สำหรับนำไปวิเคราะห์ด้วย NIRS มีผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานในระดับ ppm โดยแบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลสเปกตรัมของตัวอย่างรูปแบบ DESIR ให้ผลการทำนายดีที่สุด ในขณะที่ตัวอย่างรูปแบบของเหลวสกัดมีประสิทธิภาพการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานต่ำที่สุด ดังนั้นการกรองตัวอย่างเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความแม่นยำในการทำนายสารคาร์โบฟูรานด้วยเทคนิค NIRS ในระดับ ppm ได้

2) ผล PLS ที่ดีที่สุดสำหรับการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานตกค้างในข้าวโพดอาหารสัตว์ได้จากแบบจำลองสเปกตรัมของตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดข้าวโพดด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (ตัวอย่าง DME) ซึ่งมีค่า R, RMSECV และ RPD เท่ากับ 0.99, 2.17 ppm และ 7.18 ตามลำดับ

3) ผล PLS ที่ดีที่สุดสำหรับการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานตกค้างในมันสำปะหลังได้จากแบบจำลองสเปกตรัมของตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดข้าวโพดด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (ตัวอย่าง DCE) ซึ่งมีค่า R, RMSECV และ RPD เท่ากับ 0.99, 3.72 ppm และ 4.18 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

เนื่องจากเทคนิค NIRS สามารถใช้ข้อมูลด้านองค์ประกอบของพันธะเคมีในตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ จึงมีความเป็นไปได้สูงในการนำมาใช้วิเคราะห์เพื่อจัดจำแนกกลุ่มหรือชนิดของสารกำจัดแมลงเพื่อประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบควบคุมความปลอดภัยของวัตถุดิบอาหารสัตว์และผลิตผลทางการเกษตร

เอกสารอ้างอิง

- สุกัญญา จัตตูปรรพงษ์. (2539). การตรวจสอบคุณภาพวัตถุอันตราย. ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมการเลี้ยงสุกรแห่งชาติ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม. หน้า 193.
- สุรัตดา ศรีสุวรรณ และจันทร์เพ็ญ อินทรประเสริฐ. (2555). การวิเคราะห์ปริมาณสารกำจัดวัชพืชกลุ่มคลอโรฟีนอกซีอะซีติกแอซิดโดยแคปิลารีอิเล็กโทรโฟรีซิส. The 13th Graduate Research Conference 2012 (น. 367-375), มหาวิทยาลัยขอนแก่น: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- แสงโฉม ศิริพานิช. (2556). สถานการณ์และผลต่อสุขภาพจากการสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืช ปี พ.ศ. 2556. รายงานการเฝ้าระวังทางระบาดวิทยาประจำสัปดาห์ 2556; 44: 689-92.
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2557. สารพิษ ตกค้าง: ปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด. มาตรฐานสินค้าเกษตร, มกษ. 9002-2556, หน้า 1-50.
- สุกัญญา จัตตูปรรพงษ์. 2539. การตรวจสอบคุณภาพวัตถุอันตราย. ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมการเลี้ยงสุกรแห่งชาติ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม. หน้า 193.
- เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเพื่อการเฝ้าระวังสารเคมีทางการเกษตร. (2554). หมวดที่ 3: ประมวลความรู้เบื้องต้นเรื่องพิษภัยสารเคมีทางการเกษตรเฝ้าระวัง 4 ชนิด. สืบค้น 15 กันยายน 2558, จาก <http://www.biothai.net/node/9290>.
- Acharya, U.K., Subedi, P.P., and Walsh, K.B. (2012). Evaluation of a dry extract system involving NIR spectroscopy (DESIR) for rapid assessment of pesticide contamination of fruit surfaces. *American Journal of Analytical Chemistry*, 3, 524- 533.
- Canneddu, G., Júnior, L.C.C., & Teixeira, G.H.A. (2016). Quality evaluation of shelled and unshelled macadamia nuts by means of near-infrared spectroscopy (NIR). *Journal of Food Science*, 81(7), 1613-1621.
- Cortés, V., Ortiz, C., Aleixos, N., Blasco, J., Cubero, S., & Talens, P. (2016). A new internal quality index for mango and its prediction by external visible and near- infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 118, 148-158.
- Gauthier, E., Fortier, I., Courchesne, F., Pepin, P., Mortimer, J. and Gauvreau, D. (2001). Environmental Pesticide Exposure as a Risk Factor for Alzheimer's Disease: A Case-Control Study. *Environmental Research Section A*, 86, 37-45.

- Hem, L., Khay, S., Choi, J.H., Morgan, E.D., El-Aty, A.M.A., & Shirm, J.H. (2010). Determination of trichlorfon pesticide residues in milk via gas chromatography with u-electron capture detection and GC-MS. *Toxicology Research*, 26(2), 149-155.
- Hruschka, W.R. (2001). Data analysis: Wavelength selection methods. In P.C. Williams & K. Norris (Ed.), *Near-infrared technology in the agricultural and food industries*, (pp. 39-58). St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists.
- Landau-Ossondo, M., Rabia, N., Jos-Pelage, J., Marquet, L.M., Isidore, Y., Saint-Aime, C., Saint-Aime, C., Irigaray, P. and Belpomme, D. (2009). Why pesticides could be a common cause of prostate and breast cancers in the French Caribbean Island, Martinique. An overview on key mechanisms of pesticide-induced cancer. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 63: 383-395.
- Lovett, D.K., Deaville, E.R., Mould, F., Givens, D.I. and Owen, E. (2004). Using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to predict the biological parameters of maize silage. *Animal Feed Science and Technology*, 115, 179-187.
- Jamshidi, B., Mohajerani, E., & Jamshidi, J. (2016). Developing a Vis/NIR spectroscopic system for fast and non-destructive pesticide residue monitoring in agricultural product. *Measurement*, 89, 1-6.
- Kawano S. 1995. Progress in application of NIR and FT-NIR in food characterization. In A.G. Gaonkar (Ed.), *Characterization of food: Emerging Method*, Amsterdam: Elsevier Science B.V., 185-199.
- Kawano S. 2002. Application to agricultural products and foodstuffs. In H.M. Siesler, Y. Ozaki, S. Kawata, H.M. Heise (Eds.), *Near Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Application*, 269-288.
- Kljusuric, J.G., Mihalev, K., Becic, I., & Polovic, I. (2016). Near-infrared spectroscopy analysis of total phenolic content and antioxidant activity of berry fruits. *Food Technology and Biotechnology*, 54(2), 236-242.
- Kramer, K.J., Morgan, T.D., Throne, J.E., Dowell, F.E., Bailey, M., & Howard, J.A. (2000). Transgenic avidin maize is resistant to storage insect pests. *Nature Biotechnology*, 18, 670-674.

- Marques, E.J.N., Freitas, S.T., Pimentel, M.F., & Pasquini, C. (2016). Rapid and non- destructive determination of quality parameters in the Tommy Atkins' mango using a novel handheld near infrared spectrometer. *Food Chemistry*, 197, 1207-1214.
- Martens, H., and Naes, T. (1989). Multivariate calibration by data compression. In. P. Williams (Ed.), *Near Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. St. Paul: MN.
- Murray, I., and Williams, P.C. (1987). Chemical principles of near-infrared technology. In P.C. Williams & K. Norris (Ed.), *Near infrared technology in the agricultural and food industries*, American Association of Cereal Chemists (pp. 17-34). St. Paul: Minnesota, USA.
- Nicoli, B.M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K.I., Lammertyn, J. (2007). Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 46, 99-118.
- Orman, B.A., and Schumann, R.A.Jr. (1992). Nondestructive single-kernel oil determination of maize by near-infrared transmission spectroscopy, *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 69, 1036-1038.
- Osborne B.G., Mertens B., Thompson M. and Fearn T. 1993. The authentication of Basmati rice using near infrared spectroscopy. *J. Near Infrared Spectrosc.*, 1, 77-83.
- Pan, L., Lu, R., Zhu, Q., McGrath, J.M., & Tu, K. (2015). Measurement of moisture, soluble solid, sucrose content and mechanical properties in sugar beet using portable visible and near-infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 102, 42-50.
- Paranthaman R., Sudha A. and Kumaravel S. 2012. Determination of Pesticide Residues in Banana by Using High Performance Liquid Chromatography and Gas Chromatography-Mass Spectrometry. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 8(1), 1-6.
- Peng, G., He, Q., Lu, Y., Mmereki, D., and Zhong, Z. (2016). Determination of organophosphorus pesticides and their major degradation product residues in food samples by HPLC-UV. *Environment Science and Pollution Research*, 19, 1-8.
- Plangklang, P. and Reungsang, A. (2009). Bioaugmentation of carbofuran residues in soil using *Burkholderia cepacia* PCL3 adsorbed on agricultural residues. *International Biodeterioration Biodegradation*, 63, 515-522.

- Prasad, R., Upadhyay, N. and Kumar, V. (2013). Simultaneous determination of seven carbamate pesticide residues in gram, wheat, lentil, soybean, fenugreek leaves and apple matrices. *Microchem. J.*, 111, 91-96.
- Rai, D.K., Rai, P.K., Rizvi, S.I., Watal, G. and Sharma, B. (2009). Carbofuran-induced toxicity in rats: Protective role of vitamin C. *Experimental and Toxicologic Pathology* 61, 531–535.
- Riovanto, R., De Marchi, M., Cassandro, M., Penasa, M. (2012). Use of near infrared transmittance spectroscopy to predict fatty acid composition of chicken meat. *Food Chemistry*, 134, 2459-2464.
- Rittiron, R., Saranwong, S., Kawano, S. (2005). Detection of variety contamination in milled Japanese rice using single kernel near infrared technique in transmittance mode. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 13, 19-25.
- Rungpichayapichet, P., Mahayothee, B., Khuwijtjaru, P., Nagle, M., & Müller, J. (2015). Non-destructive determination of B-carotene content in mango by near-infrared spectroscopy compared with colorimetric measurements. *Journal of Food Composition and Analysis*, 38, 32-41.
- Saranwong S. and Kawano S. 2005. Rapid determination of fungicide contaminated on tomato surfaces using the DESIR-NIR: a system for ppm-order concentration. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 13(3), 169-175.
- Sharma S. S. and Kapadnis K. H. 2015. Development of Method for Determination of Pesticide Residues from Chilly and Ladyfinger by Using HPLC and GC-MS. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 4, 2319-6602.
- Shenk, J.S., Westerhaus, M.O., and Workman, J.J. (1992). Application of NIR spevtroscopy to agricultural products. In D.A. Bums, E.W. Ciurczak (Ed.), *Handbook of near infrared analysis, practical spectroscopy series* (pp. 383-431). Marcel Dekker: New York, USA.
- Topuz, S., Özhan, G., and Alpertunga, B. (2005). Simultaneous determination of various pesticides in fruit juices by HPLC-DAD. *Food Control*, 16, 87-92.
- Tsenkova, R., Atanassova, S., Toyoda, K., Ozaki, Y., Itoh, K. and Fearn, T. (1999). Near-Infreared Spectroscopy for Dairy Management: Measurement of Unhomogenized Milk Composition. *Journal of Dairy Science*, 82(11), 2344-2351.

- Vichapong, J., Burakham, R., and Srijaranai, S. (2013). Vortex-assisted surfactant- enhanced- emulsification liquid-liquid microextraction with solidification of floating organic droplet combined with HPLC for the determination of neonicotinoid pesticides. *Talanta*, 117, 221-228.
- Williams P. and Norris K.H. 2001. Variable affecting near infrared spectroscopic analysis. *Near-infrared technology in the agriculture and food industries* (2nd ed.), The American Association of Cereal Chemists, St. Paul, 171–185.
- Zan, K.L. and Chantara, S. (2007). Otimization for determination of carbofuran and caroxin residues in cabbages by SPE and HPLC-UV. *Chiang Mai Journal of Science*, 34(2), 227-234.

Output ที่ได้จากโครงการ

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสาร ประกอบการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (รูปแบบ oral presentation)

Numthuam, S., Rungchang, R., Charoensook, R. and Tartrakoon, W. (2016). Method development for pesticide determination in corn using near infrared spectroscopy. Congress proceeding of the 18th World Congress of Food Science and Technology (IUFOST 2016, August 21 – 25, 2016 at Dublin, Ireland).

กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำโครงการไปใช้ประโยชน์

ดำเนินการต่อยอดงานวิจัยกับตัวอย่างวัตถุดิบอาหารสัตว์ชนิดอื่นๆ ได้แก่ ข้าวสาร ข้าวเปลือก และรำข้าว โดยขอการสนับสนุนทุนวิจัยจากแหล่งทุนอื่น คือ

- โครงการ “การพัฒนาวิธีตรวจสอบยาฆ่าแมลงปนเปื้อนในรำข้าวแบบรวดเร็วด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี” แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
- โครงการ “การพัฒนาวิธีตรวจสอบสารกำจัดศัตรูพืชปนเปื้อนในข้าวเปลือกและข้าวสารแบบรวดเร็วด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี” แหล่งทุน: งบประมาณแผ่นดิน กองทุนมหาวิทยาลัยนเรศวร

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สูตรคำนวณค่าที่ใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพแบบจำลอง

สูตรคำนวณค่าทางสถิติสำหรับพิจารณาประสิทธิภาพแบบจำลอง

1. ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient: R)

$$R = \left[\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \right]^{1/2}$$

2. ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของการสร้างสมการ (root mean square error of calibration: RMSEC)

$$\text{RMSEC} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i^{\text{meas}} - y_i^{\text{pred}})^2} = \sqrt{\frac{1}{M} \cdot \text{PRESS}}$$

3. ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของการทำนาย (root mean square error of prediction: RMSEP)

$$\text{RMSEP} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i^{\text{meas}} - y_i^{\text{pred}})^2}$$

4. ค่าการคลาดเคลื่อนแบบโน้มเอียง (Bias)

$$\text{Bias} = \bar{d} = (\sum d_i) / n_v$$

5. อัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มทดสอบต่อค่า SEP (ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP: RPD)

$$\text{RPD} = \frac{\text{standard deviation of reference data in validation set}}{\text{SEP}}$$

ภาคผนวก ข

ค่าปริมาณสารคาร์โบฟูรานที่ปนเปื้อนจริงและค่าสารคาร์โบฟูราน
ที่ได้จากการทำนายด้วย NIRS จากตัวอย่างข้าวโพดอาหารสัตว์และมันสำปะหลัง

ตาราง ข1 ผลการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วย NIRS จากสเปกตรัมตัวอย่างข้าวโพดบดปนเปื้อน (GM)

Sample no.	True value	Predict value	Difference
1	0.00	-5.38	5.38
2	0.00	-1.14	1.14
3	0.00	-0.77	0.77
4	0.10	3.51	-3.41
5	0.10	1.25	-1.15
6	0.10	7.48	-7.38
7	0.30	-2.47	2.77
8	0.30	2.09	-1.79
9	0.30	-5.81	6.11
10	0.50	-0.74	1.24
11	0.50	-1.74	2.24
12	0.50	1.09	-0.59
13	0.70	-4.77	5.47
14	0.70	-2.63	3.33
15	0.70	0.80	-0.10
16	1.00	-0.33	1.33
17	1.00	-2.45	3.45
18	1.00	-0.01	1.01
19	1.30	-1.98	3.27
20	1.30	0.97	0.33
21	1.30	2.78	-1.48
22	1.50	-4.60	6.10
23	1.50	-0.08	1.58
24	1.50	3.29	-1.79
25	1.70	7.98	-6.28
26	1.70	4.76	-3.06
27	1.70	6.04	-4.34
28	2.00	-0.04	2.04
29	2.00	-2.34	4.34

Sample no.	True value	Predict value	Difference
30	2.00	-0.82	2.82
31	2.50	3.35	-0.85
32	2.50	7.77	-5.27
33	2.50	4.91	-2.41
34	3.00	-2.78	5.78
35	3.00	7.26	-4.26
36	3.00	6.34	-3.34
37	3.50	1.77	1.73
38	3.50	5.72	-2.22
39	3.50	1.91	1.59
40	4.00	6.08	-2.08
41	4.00	11.47	-7.47
42	4.00	3.65	0.35
43	4.50	1.04	3.46
44	4.50	2.06	2.44
45	4.50	7.24	-2.74
46	5.00	10.43	-5.43
47	5.00	10.76	-5.76
48	5.00	4.92	0.08
49	10.00	9.06	0.94
50	10.00	15.66	-5.66
51	10.00	19.71	-9.71
52	15.00	26.29	-11.30
53	15.00	26.63	-11.60
54	15.00	25.04	-10.00
55	20.00	22.36	-2.36
56	20.00	29.86	-9.86
57	20.00	27.98	-7.98
58	25.00	26.58	-1.58

ตาราง ข1 ผลการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วย NIRS จากสเปกตรัมตัวอย่างข้าวโพดบดปนเปื้อน (GM) (ต่อ)

Sample	True value	Predict value	Difference
59	25.00	24.33	0.67
60	25.00	22.93	2.07
61	30.00	29.83	0.17
62	30.00	30.75	-0.75
63	30.00	35.90	-5.90
64	35.00	39.21	-4.21
65	35.00	35.25	-0.25
66	35.00	29.28	5.72
67	40.00	38.88	1.12
68	40.00	36.24	3.76
69	40.00	44.16	-4.16
70	45.00	35.11	9.89
71	45.00	35.92	9.08
72	45.00	34.00	11.00
73	50.00	36.30	13.70
74	50.00	39.52	10.50
75	50.00	45.53	4.47

AV	12.06	12.27	-0.20
SD	15.68	15.02	5.23
Min	0.00	-5.81	-11.60
Max	50.00	45.53	13.70
Unit	ppm	ppm	ppm
n	75	75	75

ตาราง ข2 ผลการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วย NIRS จากสเปกตรัมตัวอย่างของเหลวสกัดจากข้าวโพดคอปนเปื้อนด้วยน้ำกลั่น (MEW)

Sample no.	True value	Predict value	Difference
1	0.00	-1.56	1.56
2	0.00	-2.95	2.95
3	0.00	1.99	-1.99
4	0.10	2.08	-1.98
5	0.10	-1.68	1.78
6	0.10	-0.78	0.88
7	0.30	-6.79	7.09
8	0.30	-8.24	8.54
9	0.30	0.79	-0.49
10	0.50	1.59	-1.09
11	0.50	3.97	-3.47
12	0.50	3.89	-3.39
13	0.70	-0.60	1.30
14	0.70	-1.26	1.96
15	0.70	-1.08	1.78
16	1.00	-5.54	6.54
17	1.00	1.44	-0.44
18	1.00	10.67	-9.67
19	1.30	-4.69	5.99
20	1.30	-5.94	7.24
21	1.30	-0.52	1.82
22	1.50	2.76	-1.26
23	1.50	5.89	-4.39
24	1.50	4.52	-3.02
25	1.70	4.71	-3.01
26	1.70	-3.70	5.39
27	1.70	6.04	-4.34
28	2.00	8.78	-6.78
29	2.00	4.01	-2.01

Sample no.	True value	Predict value	Difference
30	2.00	-5.39	7.39
31	2.50	4.11	-1.61
32	2.50	5.56	-3.06
33	2.50	0.73	1.77
34	3.00	7.16	-4.16
35	3.00	5.37	-2.37
36	3.00	5.82	-2.82
37	3.50	1.96	1.54
38	3.50	6.24	-2.74
39	3.50	9.68	-6.18
40	4.00	4.48	-0.48
41	4.00	7.68	-3.68
42	4.00	1.70	2.30
43	4.50	7.21	-2.71
44	4.50	4.81	-0.31
45	4.50	7.40	-2.90
46	5.00	2.02	2.98
47	5.00	5.65	-0.65
48	5.00	6.58	-1.58
49	10.00	9.75	0.25
50	10.00	29.00	-19.00
51	15.00	26.91	-11.90
52	15.00	25.38	-10.40
53	15.00	22.38	-7.38
54	20.00	27.98	-7.98
55	20.00	27.73	-7.73
56	20.00	27.33	-7.33
57	25.00	24.94	0.06
58	25.00	24.34	0.66

ตาราง ข2 ผลการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วย NIRS จากสเปกตรัมตัวอย่างของเหลวสกัดจากข้าวโพดคอปนเปื้อนด้วยน้ำกลั่น (MEW) (ต่อ)

Sample	True value	Predict value	Difference
59	25.00	27.42	-2.42
60	30.00	21.07	8.93
61	30.00	27.92	2.08
62	30.00	31.68	-1.68
63	35.00	34.36	0.64
64	35.00	29.96	5.04
65	35.00	33.84	1.16
66	40.00	31.00	9.00
67	40.00	32.63	7.37
68	40.00	47.00	-7.00
69	45.00	37.94	7.06
70	45.00	38.42	6.58
71	45.00	36.52	8.48
72	50.00	32.85	17.20
73	50.00	37.32	12.70
74	50.00	47.24	2.76

AV	12.09	12.16	-0.06
SD	15.78	14.80	5.87
Min	0.00	-8.24	-19.00
Max	50.00	47.24	17.20
Unit	ppm	ppm	ppm
n	74	74	74

ตาราง ข3 ผลการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วย NIRS จากตัวอย่างของเหลวสกัดจากข้าวโพด
บดปนเปื้อนด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (MEE)

Sample no.	True value	Predict value	Difference
1	0.00	-2.21	2.21
2	0.00	-1.46	1.46
3	0.00	-2.63	2.63
4	0.10	3.67	-3.57
5	0.10	-1.84	1.94
6	0.10	-9.04	13.10
7	0.30	1.56	-1.26
8	0.30	-5.15	5.45
9	0.30	1.86	-1.56
10	0.50	4.91	-4.41
11	0.50	7.06	-6.56
12	0.50	5.79	-5.29
13	0.70	3.65	-2.95
14	0.70	9.12	-8.42
15	0.70	5.68	-4.98
16	1.00	2.47	-1.47
17	1.00	7.36	-6.36
18	1.00	-9.74	13.70
19	1.30	-3.53	4.83
20	1.30	-5.47	6.77
21	1.30	4.77	-3.47
22	1.50	11.73	-10.20
23	1.50	4.38	-2.88
24	1.50	2.67	-1.17
25	1.70	8.75	-7.05
26	1.70	0.51	1.19
27	1.70	9.84	-8.14
28	2.00	2.00	0.00
29	2.00	3.59	-1.59

Sample no.	True value	Predict value	Difference
30	2.00	5.97	-3.97
31	2.50	6.39	-3.89
32	2.50	2.28	0.22
33	2.50	4.12	-1.62
34	3.00	-1.65	4.65
35	3.00	14.38	-11.40
36	3.00	0.63	2.37
37	3.50	3.87	-0.37
38	3.50	10.58	-7.08
39	3.50	1.60	1.90
40	4.00	5.94	-1.94
41	4.00	-3.99	7.99
42	4.00	-3.50	7.50
43	4.50	9.62	-5.12
44	4.50	9.10	-4.60
45	4.50	7.32	-2.82
46	5.00	5.97	-0.97
47	5.00	7.08	-2.08
48	5.00	8.29	-3.29
49	10.00	15.67	-5.67
50	10.00	11.75	-1.75
51	10.00	15.45	-5.45
52	15.00	21.35	-6.35
53	15.00	21.77	-6.77
54	15.00	25.43	-10.40
55	20.00	27.73	-7.73
56	20.00	17.48	2.52
57	20.00	27.75	-7.75
58	25.00	15.80	9.20

ตาราง ข3 ผลการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วย NIRS จากตัวอย่างของเหลวสกัดจากข้าวโพด
 บดปนเปื้อนด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (MEE) (ต่อ)

Sample	True value	Predict value	Difference
59	25.00	35.20	-10.20
60	25.00	26.67	-1.67
61	30.00	26.31	3.69
62	30.00	40.49	-10.50
63	30.00	44.71	-14.70
64	35.00	39.81	-4.81
65	35.00	32.38	2.62
66	35.00	26.89	8.11
67	40.00	28.65	11.40
68	40.00	30.84	9.16
69	40.00	34.42	5.58
70	45.00	35.58	9.42
71	45.00	34.17	10.80
72	45.00	34.29	10.70
73	50.00	35.36	14.60
74	50.00	38.07	11.90
75	50.00	30.35	19.60

AV	12.06	12.38	-0.22
SD	15.68	13.98	7.10
Min	0.00	-9.74	-14.70
Max	50.00	44.71	19.60
Unit	ppm	ppm	ppm
n	75	75	75

ตาราง ข4 ผลการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วย NIRS จากสเปกตรัมตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดข้าวโพดด้วยน้ำกลั่น (DMW)

Sample no.	True value	Predict value	Difference
1	0.00	-1.26	1.26
2	0.00	-0.01	0.01
3	0.10	6.27	6.17
4	0.10	1.75	1.65
5	0.10	3.16	3.06
6	0.30	0.93	-0.63
7	0.30	-0.73	1.03
8	0.30	4.20	-3.90
9	0.50	-0.08	0.58
10	0.50	4.31	-3.81
11	0.70	2.34	-1.64
12	0.70	1.34	-0.64
13	0.70	-0.02	0.72
14	1.00	5.95	-4.95
15	1.00	2.28	-1.28
16	1.00	3.83	-2.83
17	1.30	7.55	-6.25
18	1.30	-0.13	1.43
19	1.30	0.89	0.41
20	1.50	9.02	-7.52
21	1.50	2.64	-1.14
22	1.50	5.91	-4.41
23	1.70	-0.84	2.54
24	1.70	1.15	0.55
25	1.70	0.89	0.81
26	2.00	6.02	-4.02
27	2.00	0.22	1.78
28	2.00	4.04	-2.03
29	2.50	5.79	-3.29

Sample no.	True value	Predict value	Difference
30	3.00	6.54	-3.54
31	3.00	5.72	-2.72
32	3.50	4.26	-0.76
33	3.50	2.54	0.96
34	3.50	1.01	2.49
35	4.00	2.17	1.83
36	4.00	4.04	-0.04
37	4.00	1.60	2.40
38	4.50	-0.10	4.60
39	4.50	1.14	3.36
40	4.50	0.39	4.11
41	5.00	1.37	3.63
42	5.00	0.96	4.04
43	5.00	1.89	3.11
44	10.00	20.45	-10.50
45	10.00	18.09	-8.09
46	10.00	18.96	-8.96
47	15.00	32.19	-17.20
48	15.00	20.42	-5.42
49	15.00	23.98	-8.98
50	20.00	23.16	-3.16
51	20.00	20.03	-0.03
52	20.00	10.78	9.22
53	25.00	11.97	13.00
54	25.00	18.97	6.03
55	25.00	24.44	0.56
56	3.00	6.54	-3.54
57	3.00	5.72	-2.72
58	3.50	4.26	-0.76

ตาราง ข4 ผลการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วย NIRS จากสเปกตรัมตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดข้าวโพดด้วยน้ำกลั่น (DMW) (ต่อ)

Sample	True value	Predict value	Difference
59	30.00	24.15	5.85
60	30.00	22.27	7.73
61	30.00	33.04	-3.04
62	35.00	30.02	4.98
63	35.00	25.20	9.80
64	35.00	29.00	6.00
65	40.00	44.43	-4.43
66	40.00	34.60	5.40
67	40.00	50.32	-10.30
68	45.00	23.74	21.30
69	45.00	33.98	11.00
70	45.00	35.28	9.72
71	50.00	46.77	3.23
72	50.00	48.60	1.40
73	50.00	59.77	-9.77

AV	12.39	12.49	-0.10
SD	15.77	14.85	5.99
Min	0.00	-1.26	-17.20
Max	50.00	59.77	21.30
Unit	ppm	ppm	ppm
n	73	73	73

ตาราง ข5 ผลการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วย NIRS จากสเปกตรัมตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดข้าวโพดด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (DME)

Sample no.	True value	Predict value	Difference
1	0.00	-0.45	0.45
2	0.00	-1.29	1.29
3	0.00	-0.45	0.45
4	0.10	-0.53	0.63
5	0.10	0.34	-0.24
6	0.10	0.24	-0.14
7	0.30	1.54	-1.24
8	0.30	0.59	-0.29
9	0.30	-5.91	6.21
10	0.50	1.31	-0.81
11	0.50	1.28	-0.78
12	0.50	2.95	-2.45
13	0.70	-0.16	0.86
14	0.70	2.56	-1.86
15	0.70	3.92	-3.22
16	1.00	-0.85	1.85
17	1.00	-1.46	2.46
18	1.00	1.00	0.00
19	1.30	0.60	0.70
20	1.30	0.81	0.49
21	1.30	0.40	0.90
22	1.50	0.86	0.64
23	1.50	1.19	0.31
24	1.50	0.69	0.81
25	1.70	2.65	-0.95
26	1.70	4.32	-2.62
27	1.70	-0.70	2.40
28	2.00	1.63	0.37
29	2.00	1.12	0.88

Sample no.	True value	Predict value	Difference
30	2.50	2.10	0.40
31	3.00	1.41	1.59
32	3.00	0.22	2.78
33	3.00	0.98	2.02
34	3.50	3.06	0.44
35	3.50	5.02	-1.52
36	3.50	4.03	-0.53
37	4.00	4.41	-0.41
38	4.00	5.49	-1.49
39	4.00	4.91	-0.91
40	4.50	4.65	-0.15
41	4.50	3.34	1.17
42	4.50	5.00	-0.50
43	5.00	4.85	0.15
44	5.00	5.82	-0.82
45	5.00	6.44	-1.44
46	10.00	16.41	-6.41
47	10.00	14.72	-4.72
48	10.00	16.31	-6.31
49	15.00	16.73	-1.73
50	15.00	15.56	-0.56
51	15.00	16.88	-1.88
52	20.00	17.12	2.88
53	20.00	21.10	-1.10
54	20.00	21.14	-1.14
55	25.00	23.94	1.06
56	2.50	2.10	0.40
57	3.00	1.41	1.59
58	3.00	0.22	2.78

ตาราง ข5 ผลการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วย NIRS จากสเปกตรัมตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดข้าวโพดด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (DME) (ต่อ)

Sample	True value	Predict value	Difference
59	25.00	21.65	3.35
60	25.00	26.90	-1.90
61	30.00	27.72	2.28
62	30.00	30.96	-0.96
63	30.00	30.33	-0.33
64	35.00	33.64	1.36
65	35.00	35.21	-0.21
66	35.00	34.55	0.45
67	40.00	38.83	1.17
68	40.00	42.51	-2.51
69	40.00	40.32	-0.32
70	45.00	45.44	-0.44
71	45.00	44.26	0.74
72	45.00	43.53	1.47
73	50.00	42.48	7.52
74	50.00	46.20	3.80
75	50.00	52.43	-2.43

AV	12.06	12.07	0.00
SD	15.68	15.50	2.18
Min	0.00	-5.91	-6.41
Max	50.00	52.43	7.52
Unit	ppm	ppm	ppm
n	75	75	75

ตาราง ข6 ผลการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วย NIRS จากสเปกตรัมตัวอย่างมันสำปะหลังบดปนเปื้อน (GC)

Sample no.	True value	Predict value	Difference
1	0.00	-0.39	0.39
2	0.00	-5.15	5.15
3	0.00	-7.20	7.20
4	0.10	-6.85	6.95
5	0.10	-7.79	7.88
6	0.10	1.35	-1.25
7	0.30	-0.85	1.15
8	0.30	2.43	-2.13
9	0.30	-1.83	2.13
10	0.50	-1.49	1.99
11	0.50	12.41	-11.90
12	0.50	4.23	-3.73
13	0.70	10.16	-9.46
14	0.70	8.74	-8.04
15	0.70	9.66	-8.96
16	1.00	-8.09	9.09
17	1.00	-6.29	7.29
18	1.30	-1.56	2.86
19	1.30	-1.94	3.24
20	1.30	-2.30	3.60
21	1.50	11.39	-9.89
22	1.50	4.85	-3.35
23	1.50	2.49	-0.99
24	1.70	0.24	1.46
25	1.70	5.19	-3.49
26	1.70	-2.96	4.66
27	2.00	3.08	-1.07
28	2.00	2.30	-0.30
29	2.00	-1.21	3.21

Sample no.	True value	Predict value	Difference
30	2.50	3.76	-1.26
31	2.50	-2.09	4.59
32	2.50	3.92	-1.42
33	3.00	10.84	-7.84
34	3.00	2.06	0.94
35	3.00	0.51	2.49
36	3.50	8.40	-4.90
37	3.50	-1.60	5.10
38	3.50	6.25	-2.75
39	4.00	12.28	-8.28
40	4.00	9.91	-5.91
41	4.00	7.61	-3.61
42	4.50	0.44	4.06
43	4.50	8.27	-3.77
44	4.50	5.83	-1.33
45	5.00	7.52	-2.52
46	5.00	6.40	-1.40
47	5.00	10.01	-5.01
48	10.00	18.24	-8.24
49	10.00	22.49	-12.50
50	10.00	22.94	-12.90
51	15.00	24.29	-9.29
52	15.00	24.05	-9.05
53	15.00	26.27	-11.30
54	20.00	24.79	-4.79
55	20.00	25.03	-5.03
56	20.00	27.44	-7.44
57	25.00	25.80	-0.80
58	25.00	30.47	-5.47

ตาราง ข6 ผลการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วย NIRS จากสเปกตรัมตัวอย่างมันสำปะหลังบดปนเปื้อน (GC) (ต่อ)

Sample	True value	Predict value	Difference
59	25.00	36.71	-11.70
60	30.00	26.77	3.23
61	30.00	24.70	5.30
62	30.00	32.66	-2.66
63	35.00	35.12	-0.12
64	35.00	26.34	8.66
65	35.00	29.85	5.15
66	40.00	33.88	6.12
67	40.00	31.60	8.40
68	40.00	34.61	5.39
69	45.00	33.77	11.20
70	45.00	31.10	13.90
71	45.00	31.96	13.00
72	50.00	40.42	9.58
73	50.00	35.27	14.70
74	50.00	35.43	14.60

AV	12.21	12.36	-0.15
SD	15.73	14.10	6.93
Min	0.00	-8.09	-12.90
Max	50.00	40.42	14.70
Unit	ppm	ppm	ppm
n	74	74	74

ตาราง ข7 ผลการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วย NIRS จากสเปกตรัมตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดมันสำปะหลังด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (DCE)

Sample no.	True value	Predict value	Difference
1	0.00	2.61	-2.61
2	0.00	-3.44	3.44
3	0.00	-0.92	0.92
4	0.10	-3.40	3.50
5	0.10	3.47	-3.37
6	0.10	-4.77	4.87
7	0.30	6.47	-6.17
8	0.30	2.35	-2.05
9	0.30	8.65	-8.35
10	0.50	2.35	-1.85
11	0.50	3.62	-3.12
12	0.50	5.96	-5.45
13	0.70	-6.15	6.85
14	0.70	-1.68	2.38
15	0.70	6.24	-5.54
16	1.00	-1.59	2.59
17	1.00	-0.76	1.76
18	1.00	0.93	0.07
19	1.30	-1.08	2.38
20	1.30	-2.82	4.12
21	1.30	-0.39	1.69
22	1.50	-1.01	2.51
23	1.50	-1.37	2.87
24	1.50	-0.87	2.37
25	1.70	6.43	-4.73
26	1.70	2.82	-1.12
27	1.70	-3.41	5.11
28	2.00	7.09	-5.09
29	2.00	4.12	-2.12

Sample no.	True value	Predict value	Difference
30	2.50	7.20	-4.70
31	3.00	7.25	-4.25
32	3.00	4.98	-1.98
33	3.00	3.63	-0.63
34	3.50	7.38	-3.88
35	3.50	10.94	-7.44
36	3.50	5.51	-2.01
37	4.00	-0.07	4.07
38	4.00	9.30	-5.29
39	4.00	1.66	2.34
40	4.50	4.10	0.40
41	4.50	5.35	-0.85
42	4.50	4.65	-0.15
43	5.00	6.95	-1.95
44	5.00	7.48	-2.48
45	5.00	0.14	4.86
46	10.00	14.24	-4.24
47	10.00	13.37	-3.37
48	10.00	13.53	-3.53
49	15.00	12.21	2.79
50	15.00	20.05	-5.05
51	15.00	12.81	2.19
52	20.00	19.04	0.96
53	20.00	19.69	0.31
54	20.00	20.54	-0.54
55	25.00	26.52	-1.52
56	25.00	19.59	5.41
57	25.00	27.17	-2.17
58	30.00	36.55	-6.55

ตาราง ข7 ผลการทำนายปริมาณสารคาร์โบฟูรานด้วย จากสเปกตรัมตัวอย่าง DESIR ที่ได้จากการสกัดมันสำปะหลังด้วยสารละลายเอทิลอะซิเตท (DCE) (ต่อ)

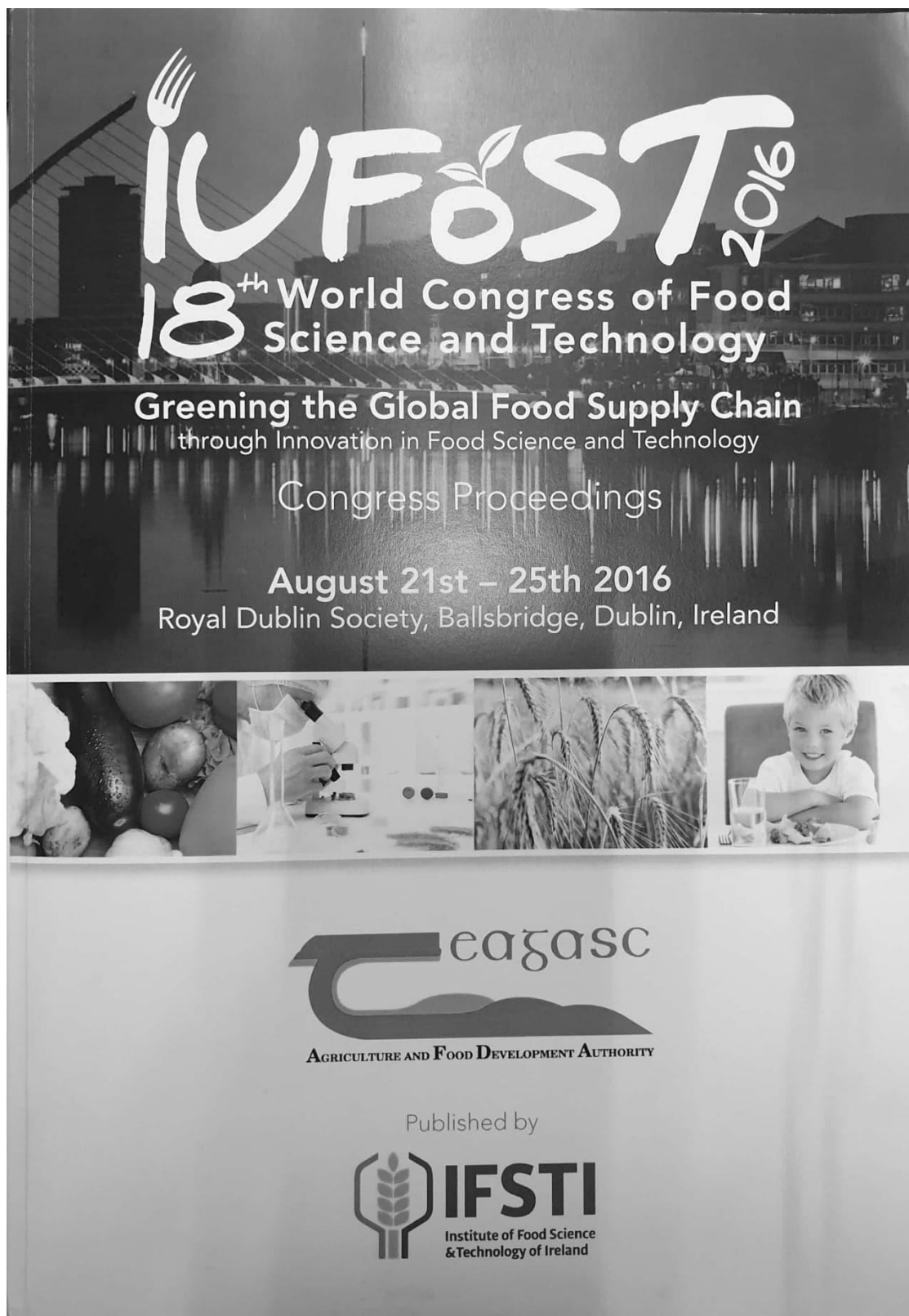
Sample	True value	Predict value	Difference
59	25.00	19.59	5.41
60	25.00	27.17	-2.17
61	30.00	36.55	-6.55
62	30.00	25.49	4.51
63	30.00	30.68	-0.68
64	35.00	31.15	3.85
65	35.00	33.55	1.45
66	35.00	37.23	-2.23
67	40.00	40.94	-0.94
68	40.00	39.04	0.97
69	40.00	42.10	-2.10
70	45.00	42.67	2.33
71	45.00	41.02	3.98
72	45.00	37.38	7.62
73	50.00	43.75	6.25
74	50.00	47.55	2.45
75	50.00	46.21	3.79

AV	12.06	12.08	-0.02
SD	15.68	15.16	3.74
Min	0.00	-6.15	-8.35
Max	50.00	47.55	7.62
Unit	ppm	ppm	ppm
n	75	75	75

ภาคผนวก ค

การเสนอผลงานรูปแบบ oral presentation ในงาน
the 18th World Congress of Food Science and Technology

การเสนอผลงานรูปแบบ oral presentation ในงาน
The 18th World Congress of Food Science and Technology



Method Development for Pesticide Determination in Corn Using Near Infrared Spectroscopy

S. Numthuam¹, S. Rungchang¹, R. Charoensook¹ and W. Tartrakoon¹

¹Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand

Control of pesticide residues in food and feed is a vital public health concern. A large number of pesticides, including a highly toxic carbofuran, are used on corn, which is grown for human consumption and animal feed. In order to maintain public health conditions, it is necessary to determine the pesticide residue in food crop. This study aimed to investigate the feasibility of near infrared (NIR) spectroscopy for a rapid determination of carbofuran in corn. Ground corn contaminated with carbofuran ranging from 0-50 ppm was used as samples. A nondestructive NIR measurements of the corn samples were performed using reflectance FT-NIR spectroscopy. To improve an accuracy of carbofuran prediction, the dry-extract system for (near) infrared (DESIR) technique was employed by extracting carbofuran from corn and filtering onto a glass microfiber paper. The NIR spectra of DESIR samples were also obtained. Partial least square (PLS) regression was used to develop a calibration model for the carbofuran prediction. The spectra of DESIR samples provided superior PLS results than the spectra of ground corn. The best results from DESIR samples were correlation coefficient of 0.99 and root mean square error of prediction of 2.17 ppm. It was concluded that NIR spectroscopy combined with DESIR technique had a potential to be a rapid method for the determination of carbofuran in corn. This method could be a powerful tool in food safety regulatory system for pesticide residue controls.

