



การพัฒนาสมการเทียบมาตรฐานสำหรับตรวจวัดคุณภาพของผักและผลไม้อบแห้งอย่างรวดเร็วด้วย  
เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

โดย

นางสาวชัชมนต์ ศรีศิริรัตน์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาสมการเทียบมาตรฐานสำหรับตรวจวัดคุณภาพของผักและผลไม้อบแห้งอย่าง  
รวดเร็วด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต  
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF CALIBRATION MODELS FOR RAPID DETERMINATION OF  
THE QUALITY IN DRIED VEGETABLES AND FRUITS USING NEAR-INFRARED  
SPECTROSCOPY (NIRS)



By  
MISS Chatchamon SRISIRIRAT

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science (FOOD TECHNOLOGY)  
Department of FOOD TECHNOLOGY  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2022  
Copyright of Silpakorn University



620920021 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้, ผักและผลไม้อบแห้ง, ปริมาณความชื้น, ค่าวอเตอร์แอกติวิตี, ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด

นางสาว ชัชมนต์ ศรีศิริรัตน์: การพัฒนาสมการเทียบมาตรฐานสำหรับตรวจวัดคุณภาพของผักและผลไม้อบแห้งอย่างรวดเร็วด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราภรณ์ มหาโยธี

ผักและผลไม้อบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปที่ได้รับความนิยมในผู้บริโภคและเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่สร้างรายได้ให้กับประเทศไทย โดยผลไม้อบแห้งที่ประเทศไทยมีการส่งออกมากได้แก่ มะม่วงอบแห้ง ลำไยแห้ง ทูเรียนอบแห้ง สับปะรดแช่อิ่มอบแห้ง กัลยาดาก ๆ เป็นต้น โดยหนึ่งในตลาดส่งออกที่สำคัญของประเทศไทยคือกลุ่มประเทศเอเชีย-แปซิฟิก (APEC) ทั้งนี้มาตรฐานของผักและผลไม้อบแห้งอาศัยค่าดัชนีคุณภาพ ได้แก่ ค่าวอเตอร์แอกติวิตีหรือปริมาณน้ำอิสระ (Water activity,  $a_w$ ) ปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total soluble solids, TSS) ที่มีกำหนดขึ้นในแต่ละประเทศเป็นมาตรฐานในการซื้อขาย โดยทั่วไปเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าคุณภาพเหล่านี้เป็นเทคนิคที่ต้องทำลายตัวอย่าง เช่น การใช้เครื่องอบลมร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-infrared spectroscopy, NIRS) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่างในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานทั่วไป (Common calibration model) เพื่อติดตามคุณภาพด้าน MC,  $a_w$  และ TSS ในผักและผลไม้อบแห้งที่มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน โดยเลือกใช้เครื่อง Portable vis/NIR spectrometer ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพ พกพาได้ และมีราคาต่ำกว่าเครื่อง NIR แบบตั้งโต๊ะ เนื่องจากมีช่วงความยาวคลื่นในการวิเคราะห์ที่แคบกว่าและครอบคลุมช่วง visible ตัวอย่างผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Natural dried fruits, Nat), ผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (Osmotic dehydrated fruits, OD) และ ผักและผลไม้อบแห้งแบบฟรีซดราย (Freeze-dried vegetables and fruits, FD) ทั้งหมด 11 ชนิด ได้แก่ มะม่วง สับปะรด กัลยาดาก ลำไย ส้ม มะละกอ มะปราง มะยงชิด ทูเรียน มะพร้าว และบรอกโคลี จำนวนทั้งสิ้น 232 ตัวอย่าง ถูกนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Portable vis/NIR spectrometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 305-1140 นาโนเมตร ด้วยหัววัดใยแก้วนำแสง ในรูปแบบการวัดแบบอินเทอร์แอคแตนซ์ (Interactance mode) โดยเพิ่มความยาวคลื่นทีละ 1 นาโนเมตร มีค่า wavelength accuracy เท่ากับ 0.3 นาโนเมตร ค่า resolution เท่ากับ 10 นาโนเมตร และ integration time เท่ากับ 2300 ms แล้วสร้างสมการเทียบมาตรฐานจากกลุ่มตัวอย่างที่แตกต่างกัน 6 รูปแบบ ได้แก่ สมการ Nat, OD, Nat+OD, Nat+FD, OD+FD และ Nat+OD+FD ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร และ 700-1140 นาโนเมตร เพื่อหา

ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลการดูดกลืนกับค่าคุณภาพทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน โดยใช้วิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) พบว่าการสร้างสมการทำนายค่า MC ทั้งสองช่วงความยาวคลื่นจากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) และค่าสัดส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าทางเคมีและค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (The ratio of the standard deviation of validation set to standard error of prediction, RPD) ดีที่สุดเท่ากับ 0.94 และ 3.92 และ 0.96 และ 4.73 ตามลำดับ และมีค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Standard error of prediction, SEP) ต่ำเท่ากับ 1.81% และ 1.49% ตามลำดับ ขณะที่การสร้างสมการทำนายค่า  $a_w$  ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร และ 700-1140 นาโนเมตร มีค่า  $R^2$ , SECV และ RPD เท่ากับ 0.93, 0.05 และ 3.71 ตามลำดับ สำหรับสมการจากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD และ 0.96, 0.03 และ 5.33 ตามลำดับ สำหรับสมการจากกลุ่มตัวอย่าง OD+FD นอกจากนี้สมการการทำนายค่า TSS ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร และ 700-1140 นาโนเมตร มีค่า  $R^2$ , SECV และ RPD เท่ากับ 0.95, 2.09 และ 4.52 °Brix ตามลำดับ สำหรับสมการจากกลุ่มตัวอย่าง OD และ 0.92, 2.28 และ 3.43 °Brix ตามลำดับ สำหรับสมการจากกลุ่มตัวอย่าง Nat ดังนั้นเทคนิค NIR มีความสามารถในการนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายคุณภาพของผักและผลไม้อบแห้งที่มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันได้



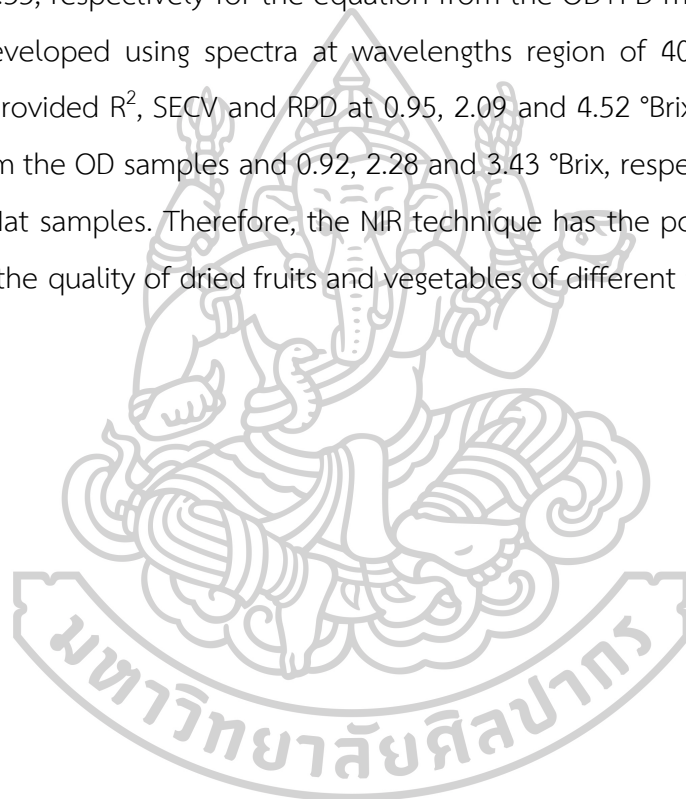
620920021 : Major (FOOD TECHNOLOGY)

Keyword : Near-infrared (NIR) spectroscopy, Dried vegetables and fruits, Moisture content, Water activity, Total soluble solids

MISS CHATCHAMON SRISIRIRAT : DEVELOPMENT OF CALIBRATION MODELS FOR RAPID DETERMINATION OF THE QUALITY IN DRIED VEGETABLES AND FRUITS USING NEAR-INFRARED SPECTROSCOPY (NIRS) THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. BUSARAKORN MAHAYOTHEE, Ph.D.

Dried fruits and vegetables are one of the products that generate income for Thailand. Dried mangoes, dried longans, dried durians, osmotic dehydrated pineapples, dried bananas are the major exported products. One of Thailand's major export markets is Asia-Pacific Countries (APEC). Water activity ( $a_w$ ), moisture content (MC) and total soluble solids (TSS) are used as trading standard which are established in each country. In general, non-destructive methods were carried out for determining these qualities for example, hot air oven is used to determine moisture content. Therefore, this research aims to study the feasibility of using near-infrared spectroscopy (NIRS), a non-destructive technique, for developing common calibration model to monitor the quality of MC,  $a_w$  and TSS in dried fruits and vegetables with different production processes. A portable vis/NIR spectrometer were chosen in this research because it is efficient, portable and cheaper than a benchtop NIR instrument due to a narrower wavelength range and covers the visible range. Natural dried fruits (Nat), osmotic dehydrated fruits (OD) and freeze-dried fruits and vegetables made from 11 different sources, i.e. mangoes, pineapples, bananas, longans, oranges, papayas, marian plums, sweet yellow marian plums, durians, coconuts and broccoli. A total of 232 samples were measured the absorbance spectrum in interactance mode using a portable vis/NIR spectrometer equipped with fiber optic probe at wavelength range 305-1140 nm with wavelength increments of 1 nm, wavelength accuracy of 0.3 nm, resolution of 10 nm, and integration time of 2300 ms. Calibration models from Nat, OD, Nat+OD, Nat+FD, OD+FD and Nat+OD+FD at wavelengths 400-1140 nm and 700-1140 nm were performed to determine the relationship between the absorbance data and the chemical data using Partial Least Square Regression (PLSR) method, The results show that models for MC prediction

from Nat+FD model gave the best prediction results for both vis/NIR and NIR wavelength region with coefficient of determination ( $R^2$ ), the ratio of the standard deviation of validation set to standard error of prediction (RPD) and the standard error of prediction (SEP) at 0.94, 3.92 and 1.81% and 0.96, 4.73 and 1.49%, respectively. While the prediction equations for  $a_w$  developed using spectra at wavelengths region of 400-1140 nm and 700-1140 nm gave  $R^2$ , SECV and RPD values of 0.93, 0.05 and 3.71, respectively for the equations for the Nat+FD model and 0.96, 0.03 and 5.33, respectively for the equation from the OD+FD model. In addition, TSS models developed using spectra at wavelengths region of 400-1140 nm and 700-1140 nm provided  $R^2$ , SECV and RPD at 0.95, 2.09 and 4.52 °Brix, respectively for the model from the OD samples and 0.92, 2.28 and 3.43 °Brix, respectively for the model from the Nat samples. Therefore, the NIR technique has the potential to be applied to predict the quality of dried fruits and vegetables of different production processes.





## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราภรณ์ มหาโยธี ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งคอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา เป็นกำลังใจ ตลอดจนการตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ไปด้วยดี นอกจากนี้ยังให้โอกาสในการทำงานในด้านต่างๆ ซึ่งช่วยเพิ่มพูนความรู้ ฝึกทักษะและประสบการณ์ในการทำงานด้านอื่นๆ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ คูวิจิตรจากรุ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาในการนำเสนอผลงานทางวิชาการ และตรวจสอบบทความที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นตลอดภาคการศึกษาที่ผ่านมา

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ภาริกา รุ่งพิชยพิเชฐ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งคอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา เป็นกำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ ชี้แนะแนวทางในการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ ตลอดจนตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.รณฤทธิ์ ฤทธิธรรม ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ในเรื่องเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ รวมทั้งให้คำแนะนำ ให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ไปศึกษาความรู้ ณ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ขอขอบคุณ นางสาวกัญรณี จันทิพย์วงษ์ นายฉัตรชัย วัฒนไพโรจน์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ช่วยให้คำแนะนำและคำปรึกษาต่างๆ อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ห้องปฏิบัติการวิจัย และงานธุรการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา

ขอขอบคุณ พี่จู่ พี่ก้อย พี่เตย พี่ฟ้า พี่อ้ม พี่พลอย พี่ออย เมย์ น้องดริม และหลายๆ ท่านมา ณ ที่นี้สำหรับการให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา เป็นกำลังใจ และคอยอยู่เคียงข้างกันเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ บุคคลในครอบครัวทุกท่าน ที่ให้กำลังใจ เป็นแรงสนับสนุน คอยผลักดัน ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ รับฟังความเห็น คอยอยู่เคียงข้างกันเสมอมา ซึ่งล้วนเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการศึกษาเล่าเรียนและการดำเนินชีวิตตลอดมา ซึ่งล้วนเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการศึกษาเล่าเรียนและการดำเนินชีวิตตลอดมา

นางสาว ชัชมนต์ ศรีสิริรัตน์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 .....	7
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ประเภทของผักหรือผลไม้อบแห้งที่มีการผลิตและจำหน่ายในประเทศไทย .....	7
2.2 กระบวนการทำแห้งอาหาร (Food Dehydration or Food Drying).....	9
2.2.1 กระบวนการทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิส (Osmotic Dehydration) .....	12
2.3 ค่าวอเตอร์แอกติวิตีหรือปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, $a_w$ ).....	13
2.4 มาตรฐานข้อกำหนดปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้อบแห้งตามมาตรฐานต่างๆ ที่กำหนดขึ้นในแต่ละประเทศ	15
2.5 หลักการพื้นฐานเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-infrared spectroscopy, NIRS).....	15



3.4.2.1 การหาปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) .....	47
3.4.2.2 การหาปริมาณน้ำอิสระหรือค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity, $a_w$ ) .....	48
3.4.2.3 การหาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total soluble solids, TSS).....	48
บทที่ 4 .....	49
ผลการทดลองและอภิปรายผล .....	49
4.1 คุณภาพทางเคมีของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้ง .....	49
4.2 ลักษณะสเปกตรัมของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้ง.....	52
4.3 การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้สำหรับติดตามปริมาณความชื้น (MC) ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ ) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ในผักและผลไม้อบแห้ง ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 1140 นาโนเมตร และ 700 - 1140 นาโนเมตร .....	61
4.3.1 ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่า MC ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 1140 นาโนเมตร.....	62
4.3.2 ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่า MC ที่ช่วงความยาวคลื่น 700 - 1140 นาโนเมตร.....	77
4.3.3 ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่า $a_w$ ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 1140 นาโนเมตร.....	90
4.3.4 ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่า $a_w$ ที่ช่วงความยาวคลื่น 700 - 1140 นาโนเมตร.....	103
4.3.5 ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 1140 นาโนเมตร.....	116
4.3.6 ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ที่ช่วงความยาวคลื่น 700 - 1140 นาโนเมตร.....	130
บทที่ 5 .....	144

สรุปผลการทดลอง..... 144

รายการอ้างอิง..... 145

ภาคผนวก..... 156

    ภาคผนวก ก..... 157

    ภาคผนวก ข..... 168

    ภาคผนวก ค..... 173

    ภาคผนวก ง..... 181

ประวัติผู้เขียน..... 221



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	ผลิตภัณฑ์อบแห้งยี่ห้อต่างๆ ที่มีการผลิตและจำหน่ายในประเทศไทย .....	8
ตารางที่ 2	หลักการ ข้อดี และข้อเสียของกระบวนการทำแห้งแบบธรรมชาติ กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน และกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง .....	10
ตารางที่ 3	แนวทางการอธิบายความสามารถของสมการเทียบมาตรฐานด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, R) หรือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R <sup>2</sup> ).....	19
ตารางที่ 4	รายละเอียดของกลุ่มของตัวอย่าง ลักษณะปรากฏ ชนิด รหัสตัวอย่าง ยี่ห้อหรือแบรนด์ วันที่ผลิต วันที่หมดอายุ จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมดของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งที่ใช้ในการศึกษา.....	28
ตารางที่ 5	รายละเอียดของกลุ่มตัวอย่างและวิธีที่ใช้ในการทวนสอบสมการเทียบมาตรฐาน MC, a <sub>w</sub> และ TSS ของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง .....	43
ตารางที่ 6	รายละเอียดของสมการเทียบมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่นำไปใช้ในการทำนาย และวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมที่ใช้สำหรับการทำนายสมการเทียบมาตรฐานค่า MC, a <sub>w</sub> และ TSS ของแต่ละช่วงความยาวคลื่น .....	46
ตารางที่ 7	ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดในผักและผลไม้อบแห้งจำแนกตามกลุ่มของตัวอย่าง.....	50
ตารางที่ 8	ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดในผักและผลไม้อบแห้งรวมทั้งหมด 232 ตัวอย่าง.....	52
ตารางที่ 9	ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation set) ของปริมาณความชื้น (MC) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร และ 700-1140 นาโนเมตร.....	63
ตารางที่ 10	ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation set) ที่ช่วงความยาวคลื่น	

400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) สำหรับปริมาณความชื้น (MC) .....	65
ตารางที่ 11 ผลการประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานที่ให้การทำนายที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่างด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) สำหรับปริมาณความชื้น (MC) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร .....	74
ตารางที่ 12 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ของปริมาณความชื้น (MC) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร.....	75
ตารางที่ 13 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ปริมาณความชื้น (MC) ที่ได้จากการศึกษาความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานในแต่ละกลุ่มตัวอย่างที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร .....	76
ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Validation set) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) สำหรับปริมาณความชื้น (MC) .....	79
ตารางที่ 15 ผลการประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานที่ให้การทำนายที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่างด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) สำหรับปริมาณความชื้น (MC) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร.....	87
ตารางที่ 16 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ของปริมาณความชื้น (MC) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร.....	88
ตารางที่ 17 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ปริมาณความชื้น (MC) ที่ได้จากการศึกษาความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานในแต่ละกลุ่มตัวอย่างที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร.....	89
ตารางที่ 18 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Validation set) ของค่าแอมพลิจูด (a <sub>w</sub> ) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร และ 700-1140 นาโนเมตร .....	91

ตารางที่ 19 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Validation set) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) สำหรับค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ )..... 92

ตารางที่ 20 ผลการประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานที่ให้การทำนายที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่างด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) สำหรับค่า วอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ ) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร..... 100

ตารางที่ 21 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ของค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ ) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร..... 101

ตารางที่ 22 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ ) ที่ได้จากการศึกษาความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานในแต่ละกลุ่มตัวอย่างที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร..... 102

ตารางที่ 23 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Validation set) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) สำหรับค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ )..... 105

ตารางที่ 24 ผลการประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานที่ให้การทำนายที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่างด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) สำหรับค่า วอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ ) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร..... 113

ตารางที่ 25 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ของค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ ) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร..... 114

ตารางที่ 26 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ ) ที่ได้จากการศึกษาความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานในแต่ละกลุ่มตัวอย่างที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร..... 115

ตารางที่ 27 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-



validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation set) ของปริมาณของแข็ง  
 ที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร และ 700-1140 นาโนเมตร  
 ..... 117

ตารางที่ 28 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน  
 (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-  
 validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation set) ที่ช่วงความยาวคลื่น  
 400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square  
 Regression, PLSR) สำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS)..... 119

ตารางที่ 29 ผลการประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานที่ให้การทำนายที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่ม  
 ตัวอย่างด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) สำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ที่  
 ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร..... 127

ตารางที่ 30 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ของ  
 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร..... 128

ตารางที่ 31 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ปริมาณ  
 ของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ที่ได้จากการศึกษาความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานในแต่ละ  
 กลุ่มตัวอย่างที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร..... 129

ตารางที่ 32 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน  
 (Calibration set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation set) ที่ช่วงความยาว  
 คลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square  
 Regression, PLSR) สำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS)..... 132

ตารางที่ 33 ผลการประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานที่ให้การทำนายที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่ม  
 ตัวอย่างด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) สำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ที่ช่วง  
 ความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร..... 141

ตารางที่ 34 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ของ  
 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร..... 142

ตารางที่ 35 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ปริมาณ  
 ของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ที่ได้จากการศึกษาความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานในแต่ละ  
 กลุ่มตัวอย่างที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร..... 143

ตารางที่ 36 มาตรฐานข้อกำหนดปริมาณความชื้นในผักและผลไม้อบแห้งตามมาตรฐานต่างๆ.....	159
ตารางที่ 37 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Nat) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร.....	185
ตารางที่ 38 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Nat) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร.....	186
ตารางที่ 39 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า $a_w$ ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Nat) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร.....	187
ตารางที่ 40 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า $a_w$ ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Nat) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร.....	188
ตารางที่ 41 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Nat) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร.....	189
ตารางที่ 42 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Nat) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร.....	190
ตารางที่ 43 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร.....	191
ตารางที่ 44 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร.....	192
ตารางที่ 45 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า $a_w$ ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร.....	193



ตารางที่ 55 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบ  
มาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้อบแห้ง  
แบบฟรีซดราย (Nat+FD) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโน  
เมตร..... 203

ตารางที่ 56 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบ  
มาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้อบแห้ง  
แบบฟรีซดราย (Nat+FD) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโน  
เมตร..... 204

ตารางที่ 57 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า  $a_w$  ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบ  
มาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้อบแห้ง  
แบบฟรีซดราย (Nat+FD) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโน  
เมตร..... 205

ตารางที่ 58 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า  $a_w$  ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบ  
มาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้อบแห้ง  
แบบฟรีซดราย (Nat+FD) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโน  
เมตร..... 206

ตารางที่ 59 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบ  
มาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้อบแห้ง  
แบบฟรีซดราย (Nat+FD) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโน  
เมตร..... 207

ตารางที่ 60 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบ  
มาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้อบแห้ง  
แบบฟรีซดราย (Nat+FD) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโน  
เมตร..... 208

ตารางที่ 61 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบ  
มาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้แช่เยือกแข็งร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้อบแห้งแบบฟรีซด  
ราย (OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร  
..... 209



ตารางที่ 70 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า $a_w$ ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งทั้งสามกลุ่ม (Nat+OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร.....	218
ตารางที่ 71 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งทั้งสามกลุ่ม (Nat+OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร.....	219
ตารางที่ 72 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งทั้งสามกลุ่ม (Nat+OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร.....	220



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 การถ่ายเทมวลในผลไม้หรือผักในระหว่างกระบวนการทำแห้งแบบออสโมซิส .....	13
ภาพที่ 2 แผนภาพ Labuza map แสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในอาหารที่ผันแปรตามค่าปริมาณน้ำอิสระหรือค่าวอเตอร์แอกติวิตี .....	14
ภาพที่ 3 ตำแหน่งรังสีสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในแถบสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า .....	16
ภาพที่ 4 องค์ประกอบของเครื่องสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ .....	17
ภาพที่ 5 ระบบการวัดหรือโหมดการวัดของเทคนิค NIRS (a) ระบบการวัดแบบส่องผ่าน, (b) ระบบการวัดแบบส่องผ่านสะท้อน, (c) ระบบการวัดแบบสะท้อนแบบแพร่ (d) ระบบการวัดแบบอินเทอร์แอกแทนซ์ และ (e) ระบบการวัดแบบส่องผ่านที่มีการกระเจิงของแสง .....	18
ภาพที่ 6 การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งด้วยเครื่อง portable vis/NIR spectrometer .....	38
ภาพที่ 7 ตำแหน่งการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งด้วยเครื่อง Portable vis/NIR spectrometer .....	39
ภาพที่ 8 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งด้วยเครื่อง Portable vis/NIR spectrometer และการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน .....	40
ภาพที่ 9 PCA score plot (ก) และ Loadings plot (ข) แสดงการกระจายตัวค่าพารามิเตอร์ทางเคมีของค่า MC, $a_w$ และ TSS ของกลุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้งทั้ง 3 กลุ่ม .....	51
ภาพที่ 10 สเปกตรัมของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งทั้ง 11 ชนิด จำนวน 29 ยี่ห้อ (ก) สเปกตรัมดิบ (Raw spectrum) ที่ความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร (ข) มะม่วง (ค) สับปะรด (ง) กัลย (จ) ลำไย (ฉ) ส้ม (ช) มะละกอ (ซ) มะพร้าวและมะยงชิด (ฌ) ทุเรียน (ญ) มะพร้าว (ฎ) บรอกโคลี .....	55
ภาพที่ 11 สเปกตรัมของตัวอย่างมะม่วงอบแห้งที่มีกรรมวิธีการผลิตด้วยวิธีที่แตกต่างกัน .....	58
ภาพที่ 12 PCA score plot แสดงสเปกตรัมของกลุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้งทั้ง 3 กลุ่ม ที่ช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน (ก) ช่วง vis/NIR และ (ข) ช่วง NIR .....	60

ภาพที่ 13 ลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณ ความชื้นที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี มาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร.....	68
ภาพที่ 14 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับปริมาณความชื้นของแต่ละกลุ่ม ตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วย วิธีที่แตกต่างกัน.....	70
ภาพที่ 15 ลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณ ความชื้นที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี มาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร.....	82
ภาพที่ 16 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับปริมาณความชื้นของแต่ละกลุ่ม ตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วย วิธีที่แตกต่างกัน.....	83
ภาพที่ 17 ลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอเตอร์แอด คติวิตีที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี มาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร.....	95
ภาพที่ 18 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับค่าอเตอร์แอดคติวิตีของแต่ละ กลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัม ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน.....	96
ภาพที่ 19 ลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอเตอร์แอด คติวิตีที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี มาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร.....	108
ภาพที่ 20 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับค่าอเตอร์แอดคติวิตีของแต่ละ กลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัม ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน.....	109
ภาพที่ 21 ลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณ ของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ได้ทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400- 1140 นาโนเมตร.....	122



ภาพที่ 22 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน.....	123
ภาพที่ 23 ลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร.....	136
ภาพที่ 24 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน.....	137
ภาพที่ 25 สเปกตรัมดิบ (Raw spectrum) ของตัวอย่างผักและผลไม้แห้งทั้ง 29 ยี่ห้อ ในช่วงความยาวคลื่น 305-1140 นาโนเมตร .....	182
ภาพที่ 26 PCA score plot และ Residual X-variance แสดงข้อมูลผิดปกติ (Outliers) ของค่า MC, $a_w$ และ TSS ในตัวอย่างผักและผลไม้แห้งทั้งสามกลุ่มที่กระจายตัวอยู่บนแกน PCA นอกเส้นแบ่งโดยใช้วิธีการทดสอบ Hotelling T-squared distribution.....	182
ภาพที่ 27 PCA score plot แสดงข้อมูลผิดปกติ (Outliers) ของค่า MC และ TSS ในตัวอย่างผลไม้แห้งแบบธรรมชาติที่กระจายตัวอยู่บนแกน PCA นอกเส้นวงกลมโดยใช้วิธีการทดสอบ Hotelling T-squared distribution.....	183
ภาพที่ 28 PCA score plot แสดงข้อมูลผิดปกติ (Outliers) ของค่า MC, $a_w$ และ TSS ในตัวอย่างกลุ่มผลไม้แช่อิ่มอบแห้งที่กระจายตัวอยู่บนแกน PCA นอกเส้นวงกลมโดยใช้วิธีการทดสอบ Hotelling T-squared distribution.....	183
ภาพที่ 29 Residual X-variance plot แสดงข้อมูลผิดปกติ (Outliers) ของค่า MC, $a_w$ และ TSS ในตัวอย่างกลุ่มผลไม้แช่อิ่มอบแห้งที่กระจายตัวอยู่บนแกน PCA นอกเส้นวงกลมโดยใช้วิธีการทดสอบ Hotelling T-squared distribution.....	184

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผลไม้อบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปที่ได้รับความนิยมในผู้บริโภคและเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่สร้างรายได้ให้กับประเทศไทย โดยผลไม้อบแห้งที่ประเทศไทยมีการส่งออกได้แก่ มะม่วงอบแห้ง ลำไยแห้ง ทุเรียนอบแห้ง ลิ้นจี่อบแห้ง สับปะรดแห้ง สับปะรดแช่อิ่มอบแห้ง แอปเปิลอบแห้ง กล้วยตากอ่อนแห้ง จากการรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร พบว่าในปี พ.ศ. 2562 และพ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกผลไม้อบแห้งเท่ากับ 2,470,487 และ 3,202,932 กิโลกรัม คิดเป็นมูลค่าการส่งออกเท่ากับ 323,500,081 และ 428,246,922 บาท ตามลำดับ ขณะที่ผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (ผลไม้ที่ทำไว้มิให้เสียโดยใช้น้ำตาล) มีปริมาณการส่งออกเท่ากับ 38,352,031 และ 38,281,619 กิโลกรัม ซึ่งคิดเป็นมูลค่าการส่งออกเท่ากับ 4,539.0 และ 4,613.9 ล้านบาท ตามลำดับ โดยหนึ่งในตลาดส่งออกที่สำคัญของประเทศไทยคือกลุ่มประเทศเอเชีย-แปซิฟิก (Asia-Pacific Economic Cooperation, APEC) (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563)

ค่าวอเตอร์แอกติวิตีหรือปริมาณน้ำอิสระ (Water activity,  $a_w$ ) ปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total soluble solids, TSS) เป็นดัชนีคุณภาพที่สำคัญที่ใช้ในการซื้อขายผักและผลไม้อบแห้งสังเกตได้จากมาตรฐานที่มีกำหนดขึ้นในแต่ละประเทศ เช่น ในประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานสินค้าสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อลำไยสดอบแห้ง ให้มีปริมาณความชื้นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 12 และไม่เกินร้อยละ 18 ค่าวอเตอร์แอกติวิตีไม่เกิน 0.6 และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดไม่ต่ำกว่า 80°Brix (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2549) อีกทั้งยังช่วยบ่งชี้ถึงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในผลไม้ กล่าวคือปฏิกิริยา Maillard ระหว่างกระบวนการทำแห้งและการเก็บรักษา (นิธิยา รัตนานนท์, 2539; Işıl Gürsul Aktaş และ Vural Gökmen, 2021) ในการวิเคราะห์ค่าคุณภาพเหล่านี้ทำได้โดยใช้เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Dew point water activity meter) การอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อน (Hot air oven) และเครื่องวัดค่าความหวานแบบดิจิตอล (digital refractometer) ตามลำดับ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ต้องทำลายตัวอย่าง เนื่องจากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจะต้องมีการลดขนาดของชิ้นตัวอย่างให้เล็กลงและใช้เวลาในการวิเคราะห์ โดยเฉพาะการวัดค่าปริมาณความชื้น (Tewari และคณะ, 2008; Rongtong และคณะ, 2018) ดังนั้นการพัฒนาเทคนิคที่มีความรวดเร็วในการช่วยตรวจสอบคุณภาพของผักและผลไม้อบแห้งได้อย่างรวดเร็วและไม่ทำลายตัวอย่างจึงมีความน่าสนใจ (Valdivieso และคณะ, 2014; Pan และคณะ, 2015)

เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared spectroscopy, NIRS) เป็นหนึ่งในเทคนิคการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่างที่มีความรวดเร็วในการวิเคราะห์ การเตรียมตัวอย่างไม่ซับซ้อน ไม่ใช้สารเคมีในการวิเคราะห์ และเป็นเทคนิคที่มีความแม่นยำที่สามารถนำมาวิเคราะห์คุณภาพได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณอย่างแพร่หลาย (Nicolai และคณะ, 2007) ที่ผ่านมามีการนำเทคนิค NIRS มาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการศึกษาปริมาณความชื้น (Özdemir และคณะ, 2018; Peng และคณะ, 2021; Xuan และคณะ, 2021) ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Özdemir และคณะ, 2018; Rongtong และคณะ, 2018; Liu และคณะ, 2021) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Fan และคณะ, 2020, Zhang และคณะ, 2019) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ได้แก่ น้ำตาลซูโครส น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโตส (Rambla และคณะ, 1997; Xie และคณะ, 2009; Oliveira และคณะ, 2013; Simeone และคณะ, 2017; Rongtong และคณะ, 2018; Liu และคณะ, 2021) ในผลไม้และน้ำผลไม้หลากหลายชนิด และได้ผลการทำนายที่มีประสิทธิภาพ Mishra และคณะ (2021) ได้ศึกษาปริมาณความชื้นและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Soluble solids content, SSC) ในลูกแพร์แบบทั้งผลจำนวน 240 ผล ที่มาจากจากสวนที่ต่างกัน 11 แห่ง โดยใช้เครื่องมือ 2 ชนิด ได้แก่ เครื่อง portable NIR spectrometer (Felix handheld spectrometer) ซึ่งวัดสเปกตรัมในช่วง Visible-Near infrared (VIS-NIR) ที่ช่วงความยาวคลื่น 310 - 1135 นาโนเมตร ด้วยรูปแบบการวัดสะท้อนกลับ (Reflectance mode) แต่เนื่องจากสัญญาณรบกวน (Noise) ที่ค่อนข้างสูงจึงเลือกใช้ความยาวคลื่นที่ช่วง 400 - 1135 นาโนเมตร และเครื่อง DLP NIR Scan Nano ที่ช่วงความยาวคลื่นสั้น (Short wave infrared, SWIR) 900 - 1700 nm ด้วยรูปแบบการวัดสะท้อนกลับแบบแพร่ (Diffuse reflectance mode) ที่ความละเอียด 6.35 nm integration time เท่ากับ 8 ms พบว่าการใช้ข้อมูลจากทั้งสองเครื่องมือด้วยการรวมช่วงสเปกตรัมทั้งสองช่วงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสมการการทำนายค่า MC และ SSC ได้ดีและถูกต้องยิ่งขึ้น ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการทวนสอบ (Coefficients of determination of the validation models,  $R_p^2$ ) ที่สูงขึ้นและค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (Root mean square error of prediction, RMSEP) ที่ต่ำลง เมื่อเทียบกับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานจากการใช้ข้อมูลจากเครื่อง DLP NIR Scan Nano เพียงเครื่องมือเดียว โดยใช้เทคนิค SO-PLS (Sequential and orthogonalized partial least squares regression) สำหรับดึงข้อมูลจากเครื่องมือที่ต่างกันเพื่อให้ได้สมการเทียบมาตรฐานที่มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และเทคนิค SO-CovSel (Sequential orthogonalized covariate selection) เป็นเทคนิคการเลือกตัวแปรหลายบล็อกใช้เพื่อเลือกตัวแปร ซึ่งก็คือความยาวคลื่นที่สำคัญจากทั้งสองช่วงความยาวคลื่นที่ได้จากแต่ละเครื่องมือซึ่งสัมพันธ์กับคุณภาพ MC และ SSC ของลูกแพร์ ในการสร้างสมการการทำนายที่ได้จากการใช้ข้อมูลจากเครื่องมือทั้งสองเครื่องรวมกันด้วยเทคนิค SO-PLS และเทคนิค SO-CovSel พบว่าให้ผลในการทำนายค่า MC

ที่ดีกว่ากล่าวคือให้ค่า  $R_p^2$  ที่เพิ่มขึ้น 2.5% และ 23% ตามลำดับ และค่า RMSEP ที่ลดลง 6.5% และ 30% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ดีที่สุดที่ได้จากจากเครื่อง Felix handheld spectrometer และเครื่อง DLP NIR Scan Nano เพียงเครื่องเดียว ในขณะที่การทำนายค่า SSC พบว่าค่า  $R_p^2$  เพิ่มขึ้น 56% สำหรับเครื่อง DLP NIR Scan Nano และค่า RMSEP ที่ลดลง 6% และ 47% ตามลำดับ นอกจากนี้ Özdemir และคณะ (2018) ใช้เทคนิค NIRS ในการทำนายหาปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ความแน่นเนื้อ และปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในแอปเปิ้ลอบแห้งแบบทั้งผลที่ ช่วงความยาวคลื่น 833-2500 nm ด้วยรูปแบบการวัดสะท้อนกลับแบบแพร่ (Diffuse reflectance mode) ที่ค่า resolution  $8 \text{ cm}^{-1}$  และจำนวนครั้งของการสแกนตัวอย่าง (scan time) เท่ากับ 32 ครั้ง พบว่าค่า  $R_p^2$  ของสมการทำนายปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตีให้ผลการทำนายที่ดีและสามารถยอมรับได้ โดยมีค่าเท่ากับ 0.986 และ 0.987 ตามลำดับ และ RMSEP เท่ากับ 1.22% และ 0.016 ตามลำดับ รวมถึงค่าสัดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบสมการ (Ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP, RPD) เท่ากับ 9.15 และ 9.37 ตามลำดับ เช่นเดียวกับสมการทำนายความแน่นเนื้อและปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่าสมการที่ใช้ให้ค่า  $R_p^2$  เท่ากับ 0.845 และ 0.804 ตามลำดับ ค่า RMSEP เท่ากับ 0.445 และ 349 มิลลิกรัม/กิโลกรัมวัตถุแห้ง และค่า RPD เท่ากับ 2.55 และ 2.27 ตามลำดับ นอกจากนี้ Rongtong และคณะ (2018) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS ในการติดตามค่า วอเตอร์แอกติวิตี ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด รวมไปถึง ปริมาณน้ำตาลซูโครส น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโตสในมะละกอแช่อบแห้งที่ช่วงความยาวคลื่น 800-2400 nm ด้วยรูปแบบการวัดสะท้อนกลับแบบแพร่ พบว่าสมการที่ได้ให้ผลการทำนายที่เหมาะสมโดยมีค่า RMSEP เท่ากับ 0.014, 0.69% (ปริมาณความชื้นฐานแห้ง), 0.58 °Brix, 14.44 กรัม/100 กรัมตัวอย่าง, 6.72 กรัม/100 กรัมตัวอย่าง และ 4.89 กรัม/100 กรัมตัวอย่าง ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, R) อยู่ในช่วง 0.981-0.994

ทั้งนี้จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าเครื่องมือประเภท portable NIRS (portable Near-Infrared Spectrometers) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณสำหรับตรวจวัดคุณภาพในผลไม้อบแห้งหลากหลายชนิดยังมีจำกัด และยังไม่มีการพัฒนาสมการทำนายของ NIRS ที่ใช้กับผลไม้อบแห้งหลายชนิดพร้อมๆ กัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาสมการทำนายคุณภาพของผลไม้อบแห้งหลายชนิดและผักด้วยเครื่อง portable NIR spectrometer เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีความคงทนแข็งแรง และมีประสิทธิภาพ (Dos Santos และคณะ, 2013; Choi และคณะ, 2017; Posom และคณะ, 2020) มีขนาดเล็ก พกพาได้ และมีราคา ย่อมเยากว่าเครื่อง NIR แบบตั้งโต๊ะ (Benchtop NIR spectrometer) เนื่องจากมีช่วงความยาวคลื่นในการวิเคราะห์ที่แคบกว่าและครอบคลุมช่วง visible (Guo และคณะ, 2016; Mishra และคณะ,

2021) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้ในระบบอุตสาหกรรมโดยการติดตั้งกับสายพานหรือใช้ในการตรวจวัดแบบ on-line การตรวจติดตามการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวอย่างได้โดยตรง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานทั่วไป (Common calibration model) ในการติดตามคุณภาพด้านปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity,  $a_w$ ) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total soluble solids, TSS) ในผักและผลไม้อบแห้งที่มีกระบวนการทำแห้งที่แตกต่างกัน

## 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

น้ำและน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งประกอบด้วยอะตอมของ C, H และ O ซึ่งมีความจำเพาะต่อการดูดกลืนของรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของโมเลกุล ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้มาใช้ในการติดตามปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้คือผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีจำหน่ายทางการค้าและผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ผลิตขึ้นเองจำนวน 3 กลุ่ม ได้แก่ ผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Natural dried fruits, Nat), ผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (Osmotic dehydrated fruits, OD) และ ผักและผลไม้อบแห้งแบบฟรีซดราย (Freeze-dried vegetable and fruits, FD) ทั้งหมด 11 ชนิด 29 ยี่ห้อ ยี่ห้อละ 8 ตัวอย่าง เป็นจำนวนทั้งสิ้น 232 ตัวอย่าง โดยเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีชนิดของผลไม้และยี่ห้อที่แตกต่างกัน เพื่อให้สามารถเทียบมาตรฐานที่ได้มีช่วงความแปรปรวนที่ครอบคลุมตัวอย่างในอนาคต

1.4.2 ดัชนีคุณภาพของผลไม้อบแห้งที่ศึกษา คือ คุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity,  $a_w$ ) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total soluble solids, TSS)

1.4.3 วัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างด้วยเครื่อง Portable vis/NIR spectrometer (HandySpec Field 1000, tec5 AG, Oberursel, Germany) พร้อมซอฟต์แวร์ MultiSpec® Pro ของ tec5 AG ในช่วงความยาวคลื่น 305-1140 นาโนเมตร (nm) และรูปแบบการวัดที่ใช้คือการวัดแบบ Interactance

1.4.4 วิธีวิเคราะห์มาตรฐาน (Chemical analysis or Reference analysis) ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด

1.4.5 พัฒนาสมการเทียบมาตรฐานทั่วไป (Common calibration model) สำหรับการติดตามปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ในผักและผลไม้อบแห้ง ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร และ 700-1140 นาโนเมตร ด้วยเทคนิควิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) โดยอาศัยข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงและค่าคุณภาพทางเคมีจากผักและผลไม้อบแห้งทั้ง 29 ยี่ห้อ ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานจากข้อมูลของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้ซอฟต์แวร์ The Unscrambler (Version 9.7, CAMO Software AS, Oslo, Norway) เป็นพื้นฐานช่วยในการสร้างสมการและตรวจสอบประสิทธิภาพของสมการเทียบมาตรฐาน

1.4.6 ประเมินประสิทธิภาพความถูกต้องของสมการเทียบมาตรฐานที่ได้และคัดเลือกวิธีปรับแต่งสเปกตรัมที่เหมาะสมที่สุดเบื้องต้น เพื่อหาสมการเทียบมาตรฐานที่ให้ค่าการทำนายที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ), ค่าสัดส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าทางเคมีและค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (The ratio of the standard deviation of validation set to standard error of prediction, RPD), ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการสร้างสมการของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Standard error of calibration, SEC), ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Standard error of prediction, SEP), ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทวนสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Standard error of cross-validation, SECV) และค่าความเอนเอียงหรือค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการทำนาย (Bias) ร่วมกับการพิจารณาเลือกจำนวนตัวแปร PLS (PLS factors หรือ Latent variables)

1.4.7 ประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานที่ให้การทำนายที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง เพื่อพิจารณาความถูกต้องของสมการเทียบมาตรฐานและตรวจสอบความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้อีกครั้งด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) โดยจะทำการประเมินค่าทางสถิติได้แก่ ค่า SEP, Bias และค่าความชัน (Slope) สำหรับสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการทดสอบแบบภายนอกกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (External test set validation) ขณะที่สมการเทียบมาตรฐาน (Internal cross-validation) ที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Leave one-out full cross-validation จะถูกนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample  $t$ -Test ด้วยซอฟต์แวร์ IBM® SPSS® Statistics

1.4.8 ศึกษาความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐาน สำหรับทำนายปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดในผักและผลไม้อบแห้ง โดยนำสมการเทียบมาตรฐานที่มีประสิทธิภาพในการทำนายมากที่สุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่างมาใช้ในการทำนายเพื่อ

ติดตามคุณภาพของผักและผลไม้บ่มแห้งของชุดข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่อยู่ภายนอกกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมเทียบมาตรฐาน (Independent validation set หรือ Prediction set) เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนาย

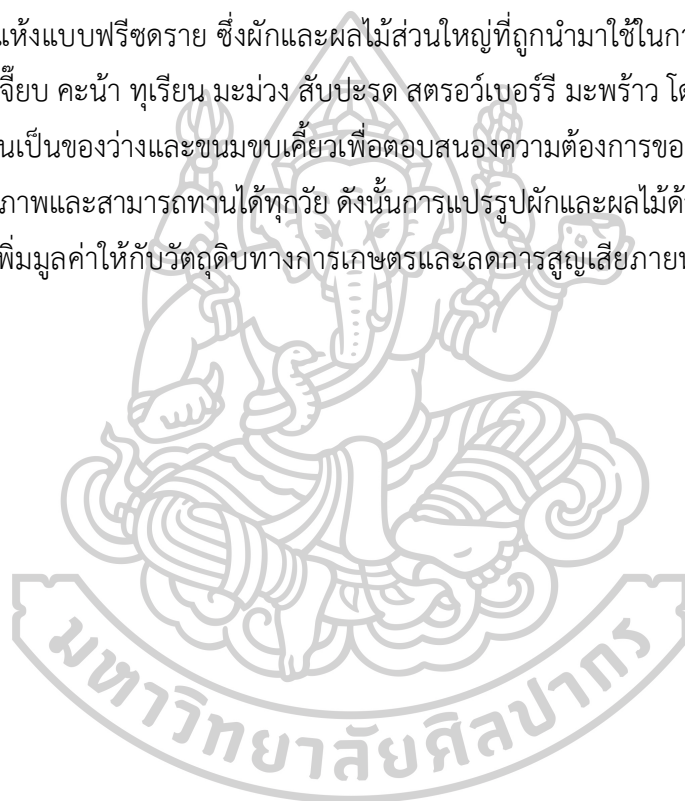


## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ประเภทของผักหรือผลไม้อบแห้งที่มีการผลิตและจำหน่ายในประเทศไทย

จากการสำรวจผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้อบแห้งที่มีการผลิตและจำหน่ายในร้านค้าสะดวกซื้อ และห้างสรรพสินค้าในประเทศไทยในปัจจุบันพบว่า ผักและผลไม้หลายชนิดถูกนำมาแปรรูปด้วยวิธีการทำแห้งรูปแบบต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์แช่อิ่มอบแห้ง (สับปะรด มะม่วง มะละกอ) ผลิตภัณฑ์อบแห้งแบบธรรมชาติ ได้แก่ ลำไยอบแห้งแบบธรรมชาติ กล้วยตาก มะม่วงอบแห้งแบบธรรมชาติ ผลิตภัณฑ์อบแห้งแบบพรีซดราย ซึ่งผักและผลไม้ส่วนใหญ่ที่ถูกนำมาใช้ในการผลิต ได้แก่ บรอกโคลี ข้าวโพด กระจับปี่ คื่นช่าย มะม่วง สับปะรด สตอร์ว์เบอร์รี่ มะพร้าว โดยรูปแบบผลิตภัณฑ์เน้นให้สามารถทานเป็นของว่างและขนมขบเคี้ยวเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการทานอาหารเพื่อสุขภาพและสามารถทานได้ทุกวัย ดังนั้นการแปรรูปผักและผลไม้ด้วยวิธีการอบแห้ง จึงเป็นวิธีที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบทางการเกษตรและลดการสูญเสียภายหลังการเก็บเกี่ยวได้เป็นอย่างดี





ตารางที่ 1 ผลิตภัณฑ์อบแห้งยี่ห้อต่างๆ ที่มีการผลิตและจำหน่ายในประเทศไทย

กลุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้ง	ภาพตัวอย่างสินค้ายี่ห้อต่างๆ
ผลิตภัณฑ์แช่อบแห้ง	
ผลิตภัณฑ์อบแห้งแบบธรรมชาติ	
ผลิตภัณฑ์อบแห้งแบบฟรีซดราย	

## 2.2 กระบวนการทำแห้งอาหาร (Food Dehydration or Food Drying)

กระบวนการทำแห้งอาหาร เป็นวิธีการถนอมอาหารที่เป็นที่รู้จักมานานและเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย โดยอาศัยการกำจัดน้ำออกจากอาหารที่เป็นของแข็งหรือของเหลว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งซึ่งมีปริมาณน้ำที่ต่ำเพียงพอ กระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา (United States Department of Agriculture, USDA) ให้นิยามคำว่า dried และ dehydrated ในความหมายที่ต่างกัน กล่าวคือ dehydrated food คือ อาหารแห้งที่มีความชื้นไม่เกิน 2.5% (น้ำหนักแห้งหรือ dry basis) ขณะที่ dried food คือ ผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความชื้นสูงกว่า 2.5% (น้ำหนักแห้ง) (Vega-Mercado และคณะ, 2001) ทั้งนี้ข้อดีของกระบวนการทำแห้งได้แก่ ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์จากการลดลงของปริมาณน้ำอิสระหรือค่าวอเตอร์แอกติวิตี ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียในอาหารจากการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ เช่น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (Lipid oxidation) การเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Enzymatic reactions) และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย เป็นต้น ช่วยลดน้ำหนักและปริมาตรของผลิตภัณฑ์ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวกยิ่งขึ้นในการลดต้นทุนด้านการจัดการ การจัดเก็บ การบรรจุ และการขนส่ง (Ratti, 2008) นอกจากนี้กระบวนการทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งที่ต่างกันยังให้ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแตกต่างกันออกไปด้วย เช่น ในด้านของกลิ่นรส (Flavor) ด้านลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture) ได้แก่ ความกรอบ (Crispness) ความเคี้ยวได้ (Chewiness) เป็นต้น และยังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในด้านของโครงสร้าง ลักษณะปรากฏ สี รสชาติ (Taste) และคุณค่าทางโภชนาการในระหว่างการทำแห้ง (Jayas, 2016 และ Berk, 2018)

กระบวนการทำแห้งอาหารมีมากมายหลายวิธี ได้แก่ กระบวนการทำแห้งแบบธรรมชาติหรือการตากแดดตามธรรมชาติ (Sun drying หรือ Natural sun drying หรือ Natural Dehydration) กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying) กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-drying) กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) กระบวนการทำแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum drying) ฯ เป็นต้น โดยการประยุกต์ใช้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการ ประสิทธิภาพด้านพลังงาน ต้นทุนของกระบวนการทำแห้ง เป็นต้น (Ratti, 2008) ทั้งนี้แต่ละกระบวนการทำแห้งต่างก็มีหลักการ ข้อดี และข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 หลักการ ข้อดี และข้อเสียของกระบวนการทำแห้งแบบธรรมชาติ กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน และกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ประเภทของกระบวนการทำแห้ง	หลักการของการทำแห้ง	ข้อดี	ข้อเสีย
กระบวนการทำแห้งแบบธรรมชาติ	<p>การทำแห้งโดยอาศัยรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ เป็นวิธีที่ง่าย ใช้ต้นทุนต่ำ เสียค่าใช้จ่ายน้อย รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผลิตภัณฑ์บางส่วนจะถูกสะท้อนออกไปยังภายนอก ในขณะที่บางส่วนจะถูกผลิตภัณฑ์เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งช่วยให้น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยออกมาสู่อากาศ แวดล้อมจากการที่อาหารสัมผัสกับรังสีจากแสงอาทิตย์โดยตรง ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่อุณหภูมิมาตากแห้ง ได้แก่ ผลไม้ ผัก ธัญพืช และปลา ทั้งนี้ ความร้อนที่เกิดขึ้นบางส่วนจะสูญเสียไปโดยการพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural convection) การพาความร้อนโดยลม และการแผ่รังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าและสิ่งแวดล้อม (เสริม จันทร์ฉาย, 2560; Zeki Berk, 2018)</p>	<p>ข้อดี</p>	<p>ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนาน (ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแสงแดดและสภาพอากาศในแต่ละวัน) ใช้พื้นที่ในบริเวณกว้าง เกิดการเสื่อมสภาพทางเคมี ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจมีคุณภาพต่ำ เนื่องจากเกิดการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ได้รับความเสียหายจากแมลงสัตว์ต่างๆ และฝุ่นละอองและสิ่งสกปรก รวมถึงการเปียกฝนในระหว่างการตากแห้ง คุณค่าทางอาหารเสื่อมเสีย เนื่องจากโปรตีนและวิตามินในอาหารอาจถูกทำลาย (เจนจิรา ผลโคกุล, 2558)</p>

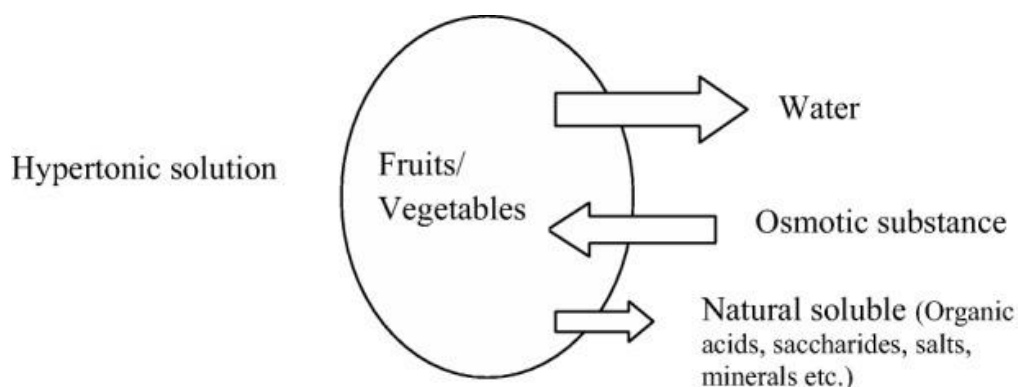
ตารางที่ 2 (ต่อ) หลักการ ข้อดี และข้อเสียของกระบวนการทำแห้งแบบธรรมชาติ กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อน และกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

<p>กระบวนการทำแห้งด้วยลมร้อนจากเครื่องทำความร้อนที่สร้างขึ้นจากเครื่องทำความร้อน (Heater) ไปสู่อาหาร ลมร้อนที่อยู่ภายในจะช่วยให้กระบวนการทำความร้อนที่สร้างขึ้นจากเครื่องทำความร้อน (Heater) ดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง ใช้ต้นทุนต่ำ ลดการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์และฝุ่นผงต่างๆ ในระหว่างการทำแห้ง</p>	<p>การทำแห้งโดยอาศัยการให้น้ำในชั้นอาหาร ผลิตภัณฑ์ที่ได้คงคุณค่าทางโภชนาการและกลายเป็นน้ำแข็งจะถูกระเหิด (Sublimation) ออกจากอาหารด้วยสภาวะความดันบรรยากาศที่เป็นสุญญากาศ เป็นกระบวนการที่ทำให้น้ำแข็งกลายเป็นไอสุดท้ายของอาหารเปลี่ยนแปลงไปน้อยที่สุด</p>	<p>คุณค่าทางโภชนาการลดลงเนื่องจากใช้ความร้อนที่สูง เกิดการหดตัวของชิ้นอาหาร (Shrinkage) ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งที่ค่อนข้างนานแต่เนยกว่าการทำแห้งแบบธรรมชาติ ใช้ระยะเวลาในการทำแห้งนาน ใช้พลังงานมากในระหว่างกระบวนการทำแห้ง ต้นทุนในการดำเนินการค่อนข้างสูง เนื่องจากเครื่องมือมีราคาสูง ผลิตภัณฑ์หลังการทำแห้งเกิดการดูดกลับของความชื้นได้เร็ว และมีราคาแพง</p> <p>ช่วยให้ผลิตภัณฑ์สามารถกลับคืนสู่สภาวะเดิมหรือคืนตัวได้อย่างรวดเร็ว เมื่อถูกน้ำหรือให้ความชื้น เช่น ผลิตภัณฑ์จำพวกซูปเป็นต้น (อรรถรรณ จันทร์เรืองฤทธิ์ และ อัจจารี สายบุญยัง, 2550)</p>
<p>กระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง</p>		

### 2.2.1 กระบวนการทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิส (Osmotic Dehydration)

กระบวนการทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิสหรือการดึงน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสเป็นหนึ่งในวิธีการเตรียมตัวอย่างขั้นต้นก่อนการแปรรูปด้วยวิธีอื่น (Pre-treatment) หรืออาจเรียกได้ว่าวิธีการแช่อิม (วิชมณี ยืนยงพุทธกาล, 2013) เป็นเทคนิคการผสมผสานระหว่างกระบวนการทำแห้ง (Dehydration) และกระบวนการแทรกซึม (Impregnation process) ซึ่งจะช่วยลดการเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เป็นผลเชิงลบในอาหารสด เมื่อนำชิ้นอาหารแช่ลงในสารละลายไฮเปอร์โทนิก (Hypertonic solution) ที่มีการเติมน้ำตาล เกลือ ฯ กล่าวคือ สารละลายน้ำตาลหรือสารละลายน้ำเชื่อม เป็นต้น จะส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนในการกำจัดน้ำออกจากชิ้นอาหาร ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างสารละลายและของเหลวภายในเซลล์ เนื่องจากความซับซ้อนของโครงสร้างภายในและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตจึงส่งผลให้เยื่อหุ้มเซลล์ภายในชิ้นอาหารไม่สามารถทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่านได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจึงทำให้ตัวถูกละลายสามารถเคลื่อนที่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปสู่ภายในเซลล์ได้ ทำให้เกิดกระบวนการถ่ายโอนแบบหลายองค์ประกอบพร้อมกันกล่าวคือเกิดการไหลของของเหลว โดยสารละลายที่ไหลออกจากอาหารคือส่วนที่เป็นน้ำผสมกับตัวถูกละลาย เช่น กรดอินทรีย์ (Organic acids) น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugars) แร่ธาตุต่างๆ (Minerals) และสารประกอบที่ให้กลิ่นรส (Flavor compounds)

ในระหว่างกระบวนการทำแห้งแบบออสโมซิส เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน (Semipermeable membrane) ซึ่งยอมให้โมเลกุลขนาดเล็กผ่าน เช่น โมเลกุลน้ำสามารถผ่านเข้า-ออกได้ แต่จะไม่ยอมให้โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าผ่านได้ เช่น โมเลกุลของน้ำตาล น้ำ จะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์จนกระทั่งความเข้มข้นของโมเลกุลน้ำทั้งสองฝั่งนั้นเท่ากัน ความแตกต่างของความต่างศักย์ทางเคมีของน้ำและตัวถูกละลายในระบบส่งผลให้เกิดแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) โดยแรงดันออสโมติกที่เกิดขึ้นในระดับที่ต่างกันเป็นผลมาจากความเข้มข้นของสารละลายภายนอกที่เติมลงไปเช่น เกลือ น้ำตาล ฯ ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลของสาร สารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้นสูง โดยทั่วไปจะมีปริมาณของตัวถูกละลายอยู่ 50 – 80 กรัมตัวถูกละลายต่อ 100 กรัมของสารละลาย น้ำภายในเซลล์จะเกิดการไหลออกจากชิ้นอาหารไปยังสารละลายออสโมติก เนื่องจากสารละลายภายนอกมีความเข้มข้นที่สูงกว่าและมีปริมาณน้ำที่น้อยกว่า ในขณะที่ตัวถูกละลายธรรมชาติ (Natural solutes) ที่ละลายอยู่ในสารละลายภายนอกก็จะถูกถ่ายเทมวลหรือถูกดูดซึมเข้าสู่ชิ้นอาหารไปพร้อมๆ กัน แสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งในกระบวนการออสโมซิสที่มีการไหลของสารไปพร้อมกันและการไหลย้อนกลับ โดยมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ และไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงสถานะ จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในเชิงโครงสร้าง เช่น การหดตัว (Shrinkage) หรือการบวม (Swelling) (Shi และ Xue, 2009)



ภาพที่ 1 การถ่ายเทมวลในผลไม้หรือผักในระหว่างกระบวนการทำแห้งแบบออสโมซิส  
ที่มา : Ramya และ Jain (2017)

### 2.3 ค่าแอกทีวิตีหรือปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, $a_w$ )

ค่าแอกทีวิตี หมายถึง อัตราส่วนของความดันย่อยของน้ำในอาหาร ( $p$ ) ต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน ( $p_0$ )

$$a_w = \frac{p}{p_0}$$

จากกฎของ Raoult กล่าวว่าตัวถูกละลายจะลดความดันย่อยของน้ำ มีผลทำให้ค่า  $a_w$  ลดลงด้วย เนื่องจากอาหารทุกชนิดมีน้ำเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่แตกต่างกัน น้ำจึงมีบทบาทเกี่ยวข้องกับธรรมชาติของอาหาร กล่าวคือทำให้อาหารเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและทางชีวภาพ ซึ่งส่งผลให้อาหารเกิดการเน่าเสียได้ง่าย สถานภาพของน้ำในอาหารสามารถอธิบายได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่รอบๆ อาหารนั้น ซึ่งอัตราส่วนปัจจัยทั้งสองนี้เป็นค่า  $a_w$  ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่สัมพันธ์กับค่าความชื้นเฉพาะหนึ่งๆ ของอาหาร เรียกว่า Equilibrium relative humidity (ERH)

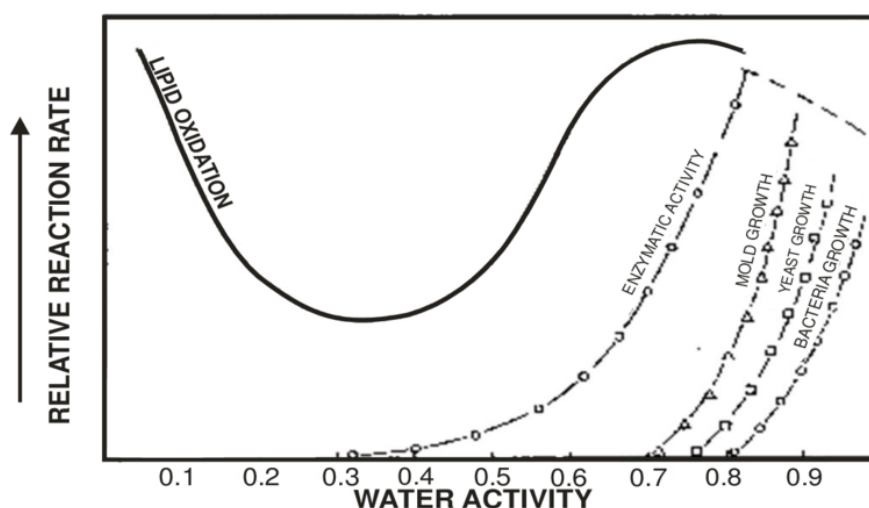
$$a_w = \frac{ERH}{100}$$

อาหารที่มีความชื้นสูงหรือมีปริมาณน้ำมากกว่าส่วนที่เป็นของแข็งจะมีค่า  $a_w$  เท่ากับ 1.0 และเมื่ออาหารมีความชื้นต่ำลงหรือมีปริมาณน้ำน้อยกว่าส่วนที่เป็นของแข็ง ค่า  $a_w$  จะลดลงต่ำกว่า 1.0 ทั้งนี้ค่า  $a_w$  มีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้น กล่าวคือเมื่ออาหารมีปริมาณความชื้นลดลงก็จะส่งผลให้ค่า  $a_w$  ลดลงด้วย นอกจากนี้ปริมาณความชื้นและค่า  $a_w$  ยังมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้วย

ทั้งนี้รูปแบบสถานะภาพของน้ำที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการเสื่อมเสียของอาหารมี 2 รูปแบบโดยหลัก กล่าวคือน้ำที่อยู่ในรูป Free water (Loosely bound water) โดยเป็นน้ำที่อยู่ในรูปอิสระพบอยู่ในเนื้อเยื่ออาหารและเป็นน้ำที่นำมาใช้เป็นตัวทำละลายของสารต่างๆ ได้ สามารถกำจัดออกได้

โดยง่าย และเป็นน้ำส่วนที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้สำหรับการเจริญเติบโตและการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เป็นส่วนที่มีค่า  $a_w$  อยู่ในช่วง 0.8-1.0 และน้ำที่อยู่ในรูปของ Capillary water ซึ่งเป็นน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของเนื้อเยื่อ แม้ว่าจะเป็นน้ำส่วนที่กำจัดออกได้ แต่การกำจัดออกนั้นทำได้ค่อนข้างยาก หากว่าปริมาณน้ำส่วนนี้ลดลงจะทำให้ค่า  $a_w$  ลดลงด้วย ในขณะที่น้ำที่อยู่ในรูปของ Monolayer water (Very tightly bound หรือ True bound water หรือ Langmuir) เป็นน้ำส่วนที่มีความคงตัวมาก สามารถถูกยึดเกาะได้อย่างเหนียวแน่น มีระเบียบ ไม่สามารถนำไปใช้เป็นตัวทำละลายได้ เป็นน้ำที่ไม่แข็งตัว และจุลินทรีย์ไม่สามารถดึงน้ำส่วนนี้ไปใช้สำหรับการเจริญเติบโตได้

เนื่องจากค่า  $a_w$  เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพและการเน่าเสียของอาหาร รวมไปถึงอายุการเก็บรักษา และลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารเพราะความชื้นและค่า  $a_w$  ในอาหารทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แสดงดังภาพที่ 2 ดังนั้นการชะลอการเน่าเสียของอาหารจึงใช้วิธีการลดปริมาณน้ำในอาหารให้เหลือน้อยที่สุดหรือลดค่า  $a_w$  ให้ต่ำที่สุดเพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่างๆ เช่น กระบวนการอบแห้งหรือการทำแห้ง และเมื่อปริมาณน้ำในอาหารลดน้อยลงจึงทำให้ตัวถูกละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นหรืออาจใช้การเติมตัวถูกละลายลงไป เช่น กระบวนการแช่แข็งที่มีการเติมตัวถูกละลายกล่าวคือน้ำตาลหรือการเติมเกลือลงไปในผักดอง ซึ่งเป็นหลักการสำคัญที่ใช้ในกระบวนการถนอมอาหารด้วยวิธีต่างๆ เพื่อให้สามารถเก็บรักษาอาหารได้นานขึ้น (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2539)



ภาพที่ 2 แผนภาพ Labuza map แสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในอาหารที่ผันแปรตามค่าปริมาณน้ำอิสระหรือค่าแอกติวิตี

ที่มา : Jose Martin Ramos-Diaz (2014) (ดัดแปลงจาก Labuza และคณะ, 1972)

## 2.4 มาตรฐานข้อกำหนดปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ได้ทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้อบแห้งตามมาตรฐานต่างๆ ที่กำหนดขึ้นในแต่ละประเทศ

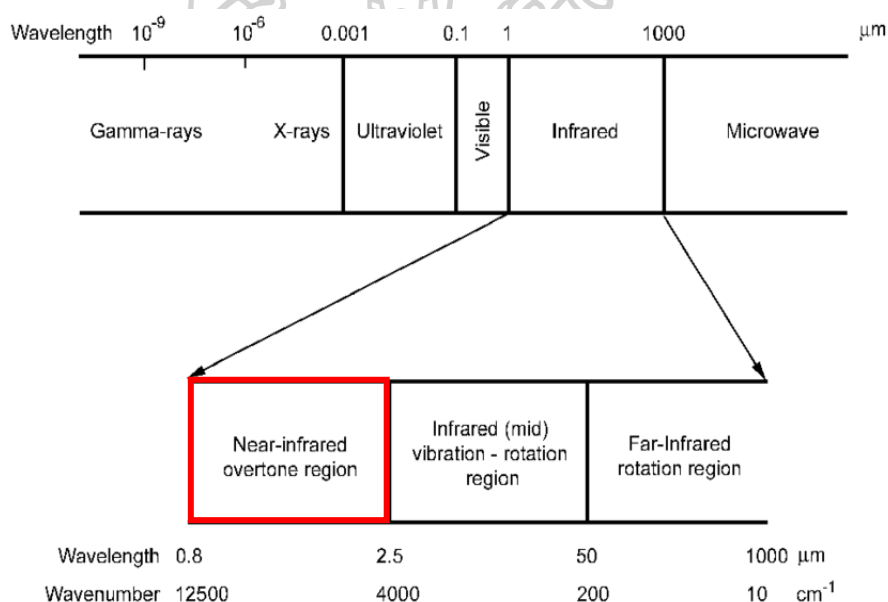
ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยทางคุณภาพที่มีความสำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถดึงน้ำในชิ้นอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโต ก่อให้เกิดการเน่าเสียในผลิตภัณฑ์อาหาร (Özdemir และคณะ, 2018; Zambrano และคณะ, 2019) โดยการเสื่อมเสียส่วนใหญ่อาจเกิดได้ในระหว่างกระบวนการเก็บรักษา การขนส่ง เป็นต้น และเนื่องด้วยปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ ) มีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นปริมาณความชื้นและค่า  $a_w$  จึงถูกใช้เป็นปัจจัยที่สำคัญเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งและมักจะมีการตรวจสอบปริมาณความชื้นควบคู่ไปกับการวัดค่า  $a_w$  โดยทั่วไปค่า  $a_w$  ควรจะมีค่าต่ำกว่า 0.6-0.7 (Rongtong และคณะ, 2018) เนื่องจากเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้แสดงดังภาพที่ 5 ดังนั้นเพื่อให้มั่นใจว่าในระหว่างขั้นตอนของกระบวนการเก็บรักษาหรือการขนส่งผลิตภัณฑ์สินค้าไปสู่ผู้บริโภคสินค้าจะยังคงมีความปลอดภัยอยู่ แต่ละประเทศจึงมีการตั้งข้อกำหนดทางกฎหมายของมาตรฐานปริมาณความชื้นในกลุ่มผลิตภัณฑ์อบแห้งขึ้น เพื่อให้สามารถมั่นใจได้ว่าผู้บริโภคจะได้รับสินค้าที่มีมาตรฐานอยู่บนความปลอดภัย ตัวอย่างข้อกำหนดที่มีการใช้ในผลิตภัณฑ์อบแห้งได้แก่ ตามมาตรฐานของคณะกรรมการโครงการมาตรฐานอาหาร FAO/WHO (Codex Alimentarius Commission - CAC) หรือ Codex กำหนดให้แอปริคอตอบแห้งมีความชื้นได้ไม่เกินร้อยละ 20.0 สำหรับวัตถุดิบที่ไม่ผ่านการเติมวัตถุกันเสียหรือผ่านกระบวนการใดๆ ในขณะที่แอปริคอตที่ผ่านการเติมวัตถุกันเสีย หรือการเก็บรักษาด้วยวิธีอื่น เช่น การพาสเจอร์ไรส์ กำหนดให้มีความชื้นได้ไม่เกินร้อยละ 25.0 หรือแม้แต่ในประเทศไทยเองที่มีการกำหนดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์อบแห้งแต่ละชนิดออกมา (กล้วย ลำไย มะเขือเทศ มะละกอ ฯ) ในระดับที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับวัตถุดิบเริ่มต้นที่นำมาใช้ในการแปรรูปและลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการ แสดงดังตารางที่ 36 ในภาคผนวก ก

## 2.5 หลักการพื้นฐานเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-infrared spectroscopy, NIRS)

เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared spectroscopy, NIRS) เป็นเทคนิคที่อาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่น 700-2500 หรือในบางตำราอาจเริ่มตั้งแต่ที่ช่วงความยาวคลื่น 750 - 2500 (Pasquini, 2003) 800 - 2500 นาโนเมตร (Siesler และคณะ, 2001) หรือที่เลขคลื่น 12500 - 4000  $\text{cm}^{-1}$  แสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งสสารดูดกลืนเข้าไป เมื่อโมเลกุล



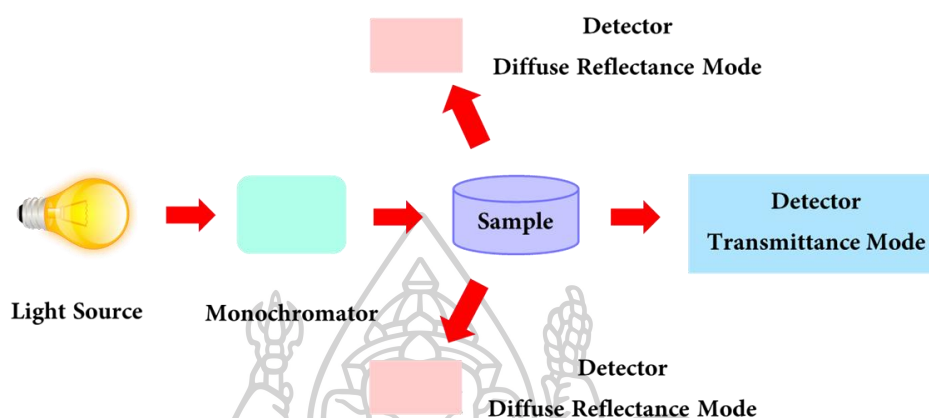
ภายในสารที่ประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจน เช่น C-H, O-H, N-H, C-O และรวมไปถึง S-H ดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วง NIR เข้าไปจะสามารถเกิดอันตรกิริยากับรังสี NIR ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นสะเทือน (Vibration) และเปลี่ยนระดับพลังงานการสั่นที่สถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นแบบข้ามชั้น ซึ่งการสั่นของพันธะเกิดได้ 2 แบบ ได้แก่การสั่นแบบโอเวอร์โทน (Overtone vibration) และการสั่นแบบคอมบิเนชัน (Combination vibration) เนื่องจากสารประกอบไปด้วยพันธะของโมเลกุลที่ต่างกันส่งผลให้ระดับการดูดกลืนของรังสี NIR ที่ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ แตกต่างกันไป เกิดเป็นแถบการดูดกลืนที่ปรากฏอยู่บนเส้นสเปกตรัมการดูดกลืนในช่วงคลื่น NIR และเนื่องจากข้อมูลสเปกตรัมที่ได้มีความซับซ้อนมากจึงถูกนำไปประมวลผลด้วยวิธีเคโมเมทริกซ์ (Chemometrics) ซึ่งเป็นหลักการที่อาศัยการหาความสัมพันธ์ทางสถิติกับข้อมูลของตัวอย่างร่วมกับวิธีการทางเคมี เพื่อช่วยดึงข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้องหรือไม่สำคัญออกจากสเปกตรัม ก่อนการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration equation หรือ Calibration model) เพื่อใช้ทำนายค่าปัจจัยคุณภาพของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดทั้งเชิงปริมาณ (Quantitative) และเชิงคุณภาพ (Qualitative)



ภาพที่ 3 ตำแหน่งรังสีสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในแถบสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า  
ที่มา: Jakobs และคณะ (2000)

แหล่งกำเนิดแสงจะให้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการวัด จากนั้นแสงจะถูกส่งผ่านไปยัง Monochromator ซึ่งจะทำหน้าที่แยกลำแสงออกเป็นทีละความยาวคลื่น เพื่อให้แสงความยาวคลื่นนั้นส่องไปยังตัวอย่าง จากนั้นตัวอย่างจะดูดกลืนพลังงานแสงเอาไว้บางส่วน ในขณะที่แสงบางส่วนที่

ตัวอย่างไม่ได้ดูดกลืนจะถูกส่องผ่านออกมาแล้วไปยังเครื่องตรวจจับสัญญาณ (Detector) ซึ่งจะทำหน้าที่บันทึกปริมาณแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนไว้เทียบกับความยาวคลื่นต่างๆ รวมทั้งเก็บพลังงานแสงที่เหลือจากตัวอย่างแล้วแปลงพลังงานออกมา จากนั้นคอมพิวเตอร์จะทำการประมวลผลและแสดงผลออกมาในรูปของสเปกตรัมพลังงานแสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 องค์ประกอบของเครื่องสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้  
ที่มา: ดัดแปลงจาก Reich (2005)

คลื่นแสง NIRS เมื่อผ่านไปยังตัวอย่างจะเกิดปฏิกิริยากับตัวอย่างได้หลายแบบ ดังนั้นระบบการวัด NIRS หรือรูปแบบการวัดของเทคนิค NIRS (Modes of measurements employed in NIR spectroscopy) ในปัจจุบันจึงถูกแบ่งออกเป็น 5 รูปแบบ ดังนี้ แสดงดังภาพที่ 5

1. ระบบการวัดแบบส่องผ่าน (Transmittance mode) อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสง (Detector) จะวัดปริมาณแสงที่ส่องผ่านออกมาจากตัวอย่าง โดยที่แหล่งกำเนิดแสงและเครื่องตรวจจับสัญญาณ อยู่ตรงข้ามกัน

2. ระบบการวัดแบบส่องผ่านสะท้อน (Transflectance mode) อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงจะวัดปริมาณแสงที่มีการสะท้อนและส่องผ่านในตัวอย่าง กล่าวคือเมื่อแหล่งกำเนิดแสงในช่วง NIR ตกกระทบบนผิวของตัวอย่างและส่องผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบบนวัตถุที่ไม่ดูดกลืนแสงซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนกลับมายังเครื่องตรวจจับสัญญาณ เช่น แผ่นเซรามิก ทอง อะลูมิเนียม โดยจะวางอยู่ที่บริเวณด้านล่างของตัวอย่าง

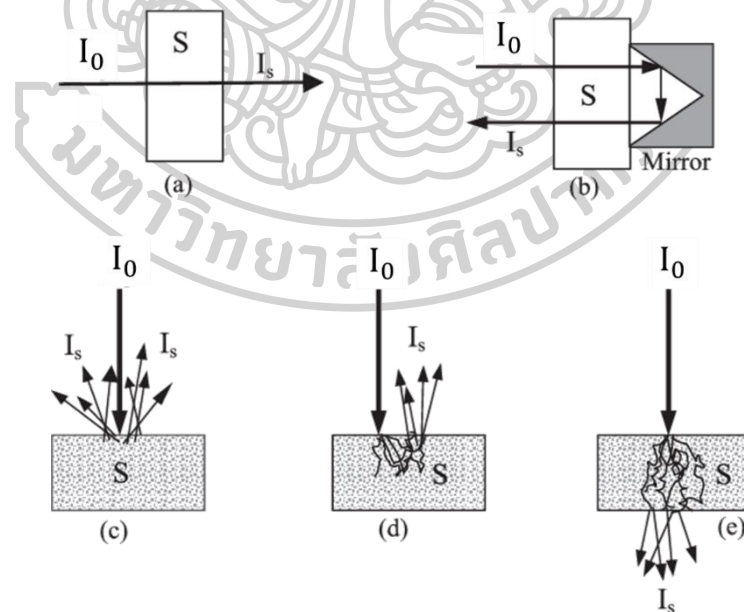
3. ระบบการวัดแบบสะท้อน (Reflectance mode) หรือการสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse reflectance mode) ในการวัดตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นของแข็ง เมื่อแสงในช่วง NIR จากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบบนผิวของตัวอย่าง แสงบางส่วนจะแพร่กระจายเข้าสู่ตัวอย่างเกิดการดูดกลืนแสงของอนุภาคที่เป็นของแข็ง ในปริมาณหนึ่ง จากนั้นแสงจะถูกสะท้อนกลับ ในขณะที่แสงบางส่วนอาจเกิดการกระเจิงของแสงที่บริเวณผิวของวัตถุ ซึ่งส่งผลให้ความเข้มของสัญญาณ

เปลี่ยนแปลงไป โดยอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงจะวัดความเข้มแสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่าง ซึ่งมีแหล่งกำเนิดแสงอยู่ด้านเดียวกับตัวรับแสง

4. ระบบการวัดแบบอินเทอร์แอคแทนซ์ (Interactance mode) เป็นระบบที่เกิดขึ้นเมื่อใช้หัววัดใยแก้วนำแสง (Fiber optic probe) เพื่อวัดปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่าง โดยใช้หัววัดใยแก้วนำแสงสัมผัสกับตัวอย่าง แสงจะออกมาจากส่วนวงแหวนด้านนอกของหัววัด แล้วตกกระทบกับตัวอย่าง และแสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่างจะถูกส่งไปยังบริเวณส่วนกลางของหัววัดใยแก้วนำแสง

5. ระบบการวัดแบบส่องผ่านที่มีการกระเจิงของแสง (Transmittance through scattering medium) เป็นการวัดความเข้มแสงของตัวอย่างประเภทของแข็งที่มีความหนาแน่นสูง เช่น เม็ดยา ซึ่งการวัดประเภทนี้มีความเหมาะสมสำหรับการหาปริมาณของการออกฤทธิ์ของตัวยาที่ใช้ในการผลิตยาเม็ด เนื่องจากทางเดินของแสงที่ยาวกว่าซึ่งเป็นผลมาจากการกระเจิงของแสงภายใน โดยสามารถให้ข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณของตัวอย่างโดยเฉลี่ยได้ดีกว่า (ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ และอนุพันธ์ เท็ดวงศ์วรกุล, 2555; Pasquini, 2003)

จากภาพ  $I_0$  คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบ  
 $I_s$  คือ ความเข้มแสงที่มาจากตัวอย่าง



ภาพที่ 5 ระบบการวัดหรือโหมดการวัดของเทคนิค NIRS (a) ระบบการวัดแบบส่องผ่าน, (b) ระบบการวัดแบบส่องผ่านสะท้อน, (c) ระบบการวัดแบบสะท้อนแบบแพร่ (d) ระบบการวัดแบบอินเทอร์แอคแทนซ์ และ (e) ระบบการวัดแบบส่องผ่านที่มีการกระเจิงของแสง

ที่มา : ดัดแปลงจาก Pasquini (2003)

ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานจะอาศัยค่าทางสถิติเป็นพื้นฐานช่วยในการตัดสินใจเพื่อหาสมการเทียบมาตรฐานที่ให้การทำนายที่ดีที่สุด ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการสร้างสมการของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Standard error of calibration, SEC), ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Standard error of prediction, SEP) และค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทวนสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Standard error of cross-validation, SECV) กล่าวคือควรมีค่า  $R^2$  ที่สูงทั้งในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration samples set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation samples set) ในทางกลับกันควรมีค่า SEC, SECV, และ SEP ที่ต่ำ ทั้งนี้ค่าทางสถิติที่ได้เช่น ค่า  $R^2$  สามารถใช้อธิบายหรือตีความประสิทธิภาพของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ได้แสดงดังตารางที่ 3 เป็นต้น

ตารางที่ 3 แนวทางการอธิบายความสามารถของสมการเทียบมาตรฐานด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, R) หรือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ )

R	$R^2$	ประสิทธิภาพของสมการทำนาย
± 0.5	0.25	ไม่ควรใช้ในการทำนาย
± 0.51-0.70	0.26-0.49	ความสัมพันธ์ไม่ดีพอ
± 0.71-0.80	0.50-0.64	สามารถใช้คัดเลือกเบื้องต้นได้อย่างหยาบ
± 0.81-0.90	0.65-0.81	สามารถใช้ในการคัดเลือกหรือประมาณค่าเบื้องต้นได้อย่างหยาบ
± 0.91-0.95	0.82-0.91	สามารถประยุกต์ใช้ในงานตรวจคุณภาพและการวิจัยได้อย่างระมัดระวัง
± 0.96-0.98	0.92-0.96	สามารถประยุกต์ใช้ในงานส่วนใหญ่และงานประกันคุณภาพได้
± 0.99 ขึ้นไป	0.98 ขึ้นไป	สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทุกงาน

ที่มา : Williams (2006)

## 2.6 การประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared spectroscopy, NIRS) ในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพของผลไม้และผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาพบว่างานวิจัยมากมายที่นำเทคนิค NIRS มาประยุกต์ใช้ในการติดตามคุณภาพต่างๆ ในผลไม้และผลิตภัณฑ์ Barzaghi และคณะ (2008) ศึกษาเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรด

ย่านใกล้ (NIRS) สำหรับติดตามปริมาณน้ำที่หลงเหลืออยู่ภายในชั้นแอปเปิลแช่อิ่มอบแห้งแบบวงแหวนที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร ที่เตรียมจากแอปเปิลสองสายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์ Golden Delicious และสายพันธุ์ Pink Lady โดยมีการควบคุมระยะเวลาในการแช่ชั้นแอปเปิลในสารละลายน้ำเชื่อมทั้งหมดสามสถานะ ได้แก่ 30, 60 และ 90 นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีเดียวกันคือ 0.90 และใช้ชนิดของสารละลายน้ำเชื่อมและความเข้มข้นที่แตกต่างกันได้แก่ สารละลายน้ำเชื่อมกลูโคส สารละลายน้ำเชื่อมมอลโทส และสารละลายน้ำเชื่อมน้ำตาลผสม (ฟรุกโตส กลูโคส และซูโครส) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 59, 62 และ 53 โดยมวล ตามลำดับ โดยแอปเปิลทั้งสองสายพันธุ์ที่แช่ในสารละลายน้ำเชื่อมผสมจะถูกควบคุมอัตราส่วนของน้ำเชื่อมที่แตกต่างกัน กล่าวคือสายพันธุ์ Golden Delicious ถูกแช่ในสารละลายน้ำเชื่อมผสมซึ่งใช้อัตราส่วนของสารละลายน้ำเชื่อมฟรุกโตส กลูโคส และซูโครสเท่ากับร้อยละ 49, 13 และ 38 ตามลำดับ ในขณะที่สายพันธุ์ Pink Lady ถูกแช่ในสารละลายน้ำเชื่อมผสมซึ่งใช้อัตราส่วนของสารละลายน้ำเชื่อมฟรุกโตส กลูโคส และซูโครสเท่ากับร้อยละ 47, 4 และ 49 ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนโดยมวลของชั้นแอปเปิลต่อสารละลายน้ำเชื่อมเท่ากับ 1 ต่อ 3 จากนั้นนำไปทำแห้งซึ่งกำหนดให้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งแตกต่างกัน ได้แก่ 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นชั้นแอปเปิลแบบวงแหวนแช่อิ่มอบแห้งจะถูกนำไปวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่มาพร้อมกับหัววัดใยแก้วนำแสง (Fiber optic probe) ที่ช่วงเลขคลื่น  $10000 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  ด้วยรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ พบว่าสมการเทียบมาตรฐานในการทำนายปริมาณน้ำที่หลงเหลืออยู่ในชั้นแอปเปิลที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) มีค่า  $R^2$  และ RPD เท่ากับ 0.93 และ 3.33 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเทคนิค NIRS มีความเหมาะสมและสามารถใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของแอปเปิลแช่อิ่มอบแห้งแบบวงแหวนได้สำหรับควบคุมกระบวนการทำแห้ง นอกจากนี้มีการใช้เทคนิค PLS-DA (Partial least square discrimination analysis) เพื่อแยกความแตกต่างของตัวแปรของชั้นแอปเปิลที่ถูกควบคุมด้วยสถานะต่างกัน ได้แก่ สายพันธุ์ของแอปเปิล องค์ประกอบของสารละลายน้ำเชื่อม ระยะเวลาในการแช่ชั้นแอปเปิลในสารละลายน้ำเชื่อม และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง พบว่าเทคนิค PLS-DA สามารถจัดกลุ่มชั้นแอปเปิลแช่อิ่มอบแห้งแบบวงแหวนที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ได้ดีที่สุด แสดงให้เห็นว่าการใช้อุณหภูมิต่ำที่สุดในการอบแห้งทำให้กระบวนการทำแห้งยังไม่สมบูรณ์ส่งผลให้มีปริมาณน้ำหลงเหลืออยู่ในชั้นตัวอย่างมากที่สุด จึงสามารถแยกกลุ่มตัวอย่างได้อย่างชัดเจน ในทำนองเดียวกันพบว่าให้ผลการจัดกลุ่มตัวอย่างที่ดีที่สุดสำหรับการจัดกลุ่มสายพันธุ์ของแอปเปิลและองค์ประกอบของสารละลายน้ำเชื่อม เนื่องจากสารละลายที่ใช้ในการแช่อัตราส่วนของน้ำตาลแต่ละชนิดที่ต่างกัน ส่งผลต่อการดูดกลืนของพันธะภายในโมเลกุลน้ำตาลที่ต่างกัน นอกจากนี้มีการใช้เทคนิคการวิเคราะห์สหสัมพันธ์แบบสองมิติ (Two-dimensional correlation analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ

องค์ประกอบหลัก น้ำตาล และน้ำ ด้วยการแยกสเปกตรัมที่ได้จากแต่ละสภาวะ พบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและน้ำตาลในระหว่างกระบวนการแช่แข็ง เนื่องจากความแตกต่างของพันธะภายในโมเลกุลนั้นแตกต่างกัน

Kapoor และคณะ (2022) ใช้เทคนิค NIR ในการติดตามปริมาณความชื้นของแอปเปิ้ลแผ่นอบกรอบ (Apple chips) ที่ผ่านการเคลือบด้วยผงแคโรทีนในระหว่างกระบวนการทำแห้งโดยใช้เครื่อง NIR spectrometer ขนาดเล็กที่มีราคาต่อหน่วยต่ำกว่า วัดสเปกตรัมแอปเปิ้ลแผ่นอบกรอบจำนวน 102 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งออกเป็นชิ้นที่ผ่านการเคลือบและชิ้นที่ไม่ผ่านการเคลือบจำนวน 54 และ 48 ชิ้น ตามลำดับ ที่ช่วงความยาวคลื่น 900 – 1700 นาโนเมตร scan time เท่ากับ 32 ครั้ง พบว่าเทคนิค PLSR ให้ผลการทำนายปริมาณความชื้นได้ดี โดยให้ค่า  $R^2_p$  เท่ากับ 0.93 และ RMSEP เท่ากับ 0.63% นอกจากนี้มีการใช้เทคนิค PCA เพื่อแยกกลุ่มตัวอย่างโดยพิจารณาจากปริมาณความชื้นที่ลดลงตลอดระยะเวลาการทำแห้ง พบว่าสามารถแยกกลุ่มตัวอย่างของการทำแห้งได้ดีทั้งในชิ้นแอปเปิ้ลที่ผ่านการเคลือบและไม่ผ่านการเคลือบโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 30 นาทีแรก เนื่องจากความแตกต่างของแถบการดูดกลืนของน้ำตาลและน้ำ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการติดตามความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากการระเหยของน้ำเป็นหลักในระหว่างกระบวนการทำแห้ง จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเครื่อง NIR spectrometer ขนาดเล็กมีความสามารถในการติดตามพฤติกรรมการทำแห้งได้แบบ real-time ทั้งในชิ้นแอปเปิ้ลที่ผ่านการเคลือบและไม่ผ่านการเคลือบ

Moscetti และคณะ (2018) ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงทางด้านคุณภาพในชิ้นแอปเปิ้ลอินทรีย์ (Organic apple wedges) พันธุ์กาล่าในระหว่างการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยนำชิ้นแอปเปิ้ลอินทรีย์ซึ่งแบ่งออกเป็น 9 ถาด ถาดละ 30 ตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างจะถูกสุ่มออกมาวัดสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2300 นาโนเมตร ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 0 ถึง ชั่วโมงที่ 8 จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปกตรัมกับค่าคุณภาพทางเคมีด้วยเทคนิค PLS พบว่าในการติดตามค่าปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตีให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.98 และ 0.97 ในขณะที่ค่า RMSEP เท่ากับ 0.05 และ 0.04 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิค NIR ในการติดตามปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตีในระหว่างกระบวนการทำแห้ง นอกจากนี้ผู้วิจัยใช้เทคนิค K means และเทคนิค PLS-DA ในการแยกกลุ่มตัวอย่าง พบว่าสามารถแยกกลุ่มตัวอย่างออกได้เป็น 3 เฟสหลักตามระยะเวลาในการทำแห้งที่ต่างกัน กล่าวคือที่เฟสที่หนึ่งระยะเวลาในการทำแห้ง 0-2 ชั่วโมง เฟสที่สองที่ระยะเวลาในการทำแห้ง 3-5 ชั่วโมง และเฟสที่สามที่ระยะเวลาในการทำแห้ง 6-8 ชั่วโมง เนื่องจากที่แต่ละเฟสของการทำแห้งจะให้ลักษณะสเปกตรัมที่มีความจำเพาะกับปริมาณน้ำที่อยู่ภายในชิ้นตัวอย่างที่ต่างกันซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี

Sinelli และคณะ (2011) ศึกษาเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR) สำหรับเป็นเครื่องมือในการติดตามกระบวนการทำแห้งแบบออสโมซิสที่สภาวะบรรยากาศปกติ (Osmo-air dehydration process) ของบลูเบอร์รี่ ซึ่งผ่านการแช่ในสารละลายน้ำเชื่อมซูโครส 60 °Brix และสารละลายน้ำเชื่อมกลูโคสผสมฟรุคโตสในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ที่ 48.6 °Brix ที่ค่าวอเตอร์แอกติวิตีเดียวกันคือ 0.90 โดยใช้ระยะเวลาในการแช่ที่ต่างกัน ได้แก่ 0.5, 1, 2, 4, 5, 6 และ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ช่วงเลขคลื่น 12500-3600  $\text{cm}^{-1}$  ด้วยรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ แล้วใช้เทคนิค PCA ในการแยกกลุ่มตัวอย่างบลูเบอร์รี่ที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายต่างชนิดกันและระยะเวลาที่ใช้ในแช่ที่ต่างกัน พบว่าเทคนิค PCA สามารถใช้ในการติดตามโมเลกุลที่เกี่ยวข้องกับน้ำและน้ำตาลในบลูเบอร์รี่แช่อบแห้งได้ ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะของสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงไปที่เป็นผลมาจากการดูดกลืนของพันธะภายในโมเลกุลซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับน้ำและน้ำตาล ได้แก่ OH stretch+OH bending, CH stretch+CH bending และ OH stretch+OH bending

Ding และคณะ (2016) ติดตามปริมาณไลโคปีน ปริมาณกรดทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในตัวอย่างมะเขือเทศผอบแห้ง โดยใช้มะเขือเทศที่ซื้อมาจากแหล่งผลิตที่แตกต่างกัน 4 แหล่ง ได้แก่ Xinjiang, Jiangsu-1, Jiangsu-2 และ Ningxis จากนั้นมะเขือเทศจากแต่ละแหล่งจะถูกล้างและนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ  $40 \pm 5$  องศาเซลเซียส แล้วนำไปบดให้เป็นผง ก่อนนำไปวัดสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-2500 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV/Vis/NIR Spectrophotometer แล้วใช้เทคนิค LDA และ KNN ร่วมกับเทคนิค PCA เพื่อศึกษาการแยกกลุ่มของตัวอย่างจากลักษณะสเปกตรัม พบว่าสามารถแยกกลุ่มตัวอย่างมะเขือเทศผอบแห้งที่มาจากแหล่งผลิตที่ต่างกันได้อย่างชัดเจน และเมื่อพิจารณาค่าทางเคมีจากแหล่งที่มาที่ต่างกันพบว่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับมะเขือเทศที่มาจากแหล่ง Xinjiang มากที่สุด นอกจากนี้ผู้วิจัยได้สมการที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปกตรัมและค่าคุณภาพทางเคมีทั้ง 5 ชนิด ซึ่งอาศัยเทคนิค Genetic algorithm-partial least squares (GA-PLS) เพื่อเลือกช่วงความยาวคลื่นที่สำคัญ และสร้างสมการเทียบมาตรฐานจากเทคนิค PLS และเทคนิค Radial basis function neural networks (RBF-NN) พบว่าเทคนิค RBF-NN ให้ผลการทำนายคุณภาพได้ดีกว่าการใช้เทคนิค PLS เนื่องจากความแตกต่างของเทคนิคที่ใช้ในการเลือกจำนวนตัวแปรเพื่อนำไปใช้ในการสร้างสมการ โดยให้ค่า R, RMSEP และ RPD ในแต่ละค่าคุณภาพทางเคมีดังนี้ ปริมาณไลโคปีน ( $R = 0.939$ ,  $\text{RMSEP} = 16.1 \text{ mg lycopene/kg DW}$  และ  $\text{RPD} = 2.84$ ) ปริมาณกรดทั้งหมด ( $R = 0.880$ ,  $\text{RMSEP} = 0.18 \text{ g citric acid/100 g DW}$  และ  $\text{RPD} = 1.98$ ) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ( $R = 0.972$ ,  $\text{RMSEP} = 1.22 \text{ g glucose/100 g DW}$  และ  $\text{RPD} = 4.07$ ) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ( $R = 0.954$ ,  $\text{RMSEP} = 0.08 \text{ g gallic acid/100 g DW}$  และ  $\text{RPD} =$

3.33) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ( $R = 0.968$ ,  $RMSEP = 3.44 \mu\text{mol trolox}/100 \text{ g DW}$  และ  $RPD = 3.98$ ) จะเห็นได้ว่าเทคนิค NIR ร่วมกับการใช้เทคนิคอื่นๆ ร่วมสามารถใช้สำหรับการทำนายคุณสมบัติคุณภาพทางเคมีที่สำคัญของผงมะเขือเทศอบแห้งได้

Amodio และคณะ (2017) ศึกษาเทคนิค NIRS สำหรับการทำนายคุณภาพภายในของสตรอว์เบอร์รีที่มีระบบการปลูกที่ต่างกันสามระบบ สตรอว์เบอร์รีที่ได้จากระบบการปลูกทั้งสามระบบถูกนำไปวัดสเปกตรัมด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับในช่วงเลขคลื่น  $12500\text{--}3600 \text{ cm}^{-1}$  แล้วนำไปหาคุณภาพทางเคมี ได้แก่ TSS, pH และ TA จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปกตรัมกับค่าคุณภาพทางเคมีด้วยเทคนิค PLS พบว่าสมการการทำนายค่า TSS, pH และ TA มีค่า  $R^2$  เท่ากับ  $0.85$  °Brix,  $0.86$ ,  $0.58\%$  ตามลำดับ และค่า RMSEP เท่ากับ  $0.58$  °Brix,  $0.09$ ,  $0.15\%$  ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าสมการการทำนายคุณภาพ TSS และ pH ของสตรอว์เบอร์รีมีความสามารถในการทำนายแบบการตรวจสอบคุณภาพได้ ในขณะที่สมการการทำนาย TA พบว่าเป็นสมการที่สามารถคัดเลือกเบื้องต้นได้ ทั้งนี้สมการการทำนาย TA มีความแม่นยำน้อยกว่าเนื่องมาจากคุณภาพภายในของสตรอว์เบอร์รี

Liu และคณะ (2015) ศึกษาการใช้เทคนิค NIRS ในการติดตามคุณภาพของผลไม้ 3 ชนิด ได้แก่ แอปเปิล พีช และแพร์แบบทั้งผลด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับในการตรวจสอบ SSC ในช่วงความยาวคลื่น  $500\text{--}1010$  นาโนเมตร หาความสัมพันธ์ด้วยเทคนิค PLS และ MLR ซึ่งพบว่าสมการการทำนาย SSC ของแอปเปิล พีช และแพร์ที่หาความสัมพันธ์ด้วย PLS มีค่า  $R^2$  และ SEP ดังนี้  $0.61$ ,  $0.38$ ,  $0.56$  และ  $0.75$ ,  $1.02$ ,  $0.92$  องศาบริกซ์ ตามลำดับ และสมการการทำนาย SSC ของแอปเปิล พีช และแพร์ที่หาความสัมพันธ์ด้วย MLR ที่ความยาวคลื่น  $876$ ,  $890$ ,  $900$  นาโนเมตร มีค่า  $R^2$  และ SEP ดังนี้  $0.79$ ,  $0.81$ ,  $0.87$  และ  $0.55$ ,  $0.48$ ,  $0.36$  องศาบริกซ์ ซึ่งจะเห็นว่าสมการการทำนาย SSC ที่สร้างด้วยเทคนิค PLS และ MLR ของแอปเปิลมีความแม่นยำต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษาผู้วิจัยได้เลือกแอปเปิลที่มีระยะเวลาการเก็บ และสถานที่ในการเก็บเกี่ยวต่างกัน ทำให้ส่งผลต่อค่า SSC เป็นต้น

Rungpichayapichet และคณะ (2016) ศึกษาการใช้เทคนิค NIRS สำหรับติดตามคุณภาพภายหลังการเก็บเกี่ยวของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองซึ่งมีอายุการเก็บเกี่ยว 120 วัน หลังดอกบานและถูกเก็บเกี่ยวในปีที่ต่างกัน ได้แก่ ปี 2009 2012 และ 2013 จากนั้นมะม่วงที่ถูกเก็บเกี่ยวในแต่ละปีจะถูกนำไปบ่มเพื่อให้มะม่วงเข้าสู่กระบวนการสุกเป็นเวลา 8 วัน แล้วนำไปวัดสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น  $700\text{--}1100$  นาโนเมตร ด้วยเครื่อง portable vis/NIR photo-diode array spectrometer ซึ่งใช้ระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์คุณภาพปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (TA) ความแน่นเนื้อ และดัชนีการสุก (RPI) แล้วสร้างสมการการทำนายด้วยเทคนิค PLS พบว่าสมการการทำนายรวมทั้ง 3 ปี ของค่า



คุณภาพ TSS TA ความแน่นเนื้อ และ RPI ให้ผลการทำนายที่ดีเนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการสร้างสมการ มีค่าอยู่ในช่วงที่กว้าง โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9, 0.82, 0.74 และ 0.8 ตามลำดับ และมีค่า SEP เท่ากับ 1.2%, 4.22 N, 0.38% และ 0.8 ตามลำดับ

Posom และคณะ (2020) ศึกษาอิทธิพลของ integration time และการเลือกช่วงความยาวคลื่นในการทำนายคุณภาพด้านปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Soluble solids content, SSC), ค่า pH (the potential of hydrogen ions) และปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ (Titratable acidity, TA) ในมะยมชนิดโดยใช้เครื่อง Visible/Near-Infrared Spectroscopy แบบพกพา พบว่าการเลือกใช้ช่วงความยาวคลื่นที่ 670-1000 นาโนเมตร และ integration time เท่ากับ 30 ms เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการติดตามค่า SSC เนื่องจากช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของพันธะ C-H stretching ของน้ำตาลซูโครส และการสั่นสะเทือนของพันธะ O-H stretching ของน้ำ ในขณะที่การเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ 570-1031 นาโนเมตร และ integration time เท่ากับ 20 ms เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการติดตามค่า pH และค่า TA เนื่องจากช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับช่วง Visible ที่เกี่ยวข้องกับรงควัตถุที่ให้สีเขียวและสีแดง รวมถึงพันธะ C-H stretching ของคาร์โบไฮเดรตและไฮโดรคาร์บอน และพันธะ O-H stretching ของน้ำซึ่งสัมพันธ์กับการทำนายค่า pH และค่า TA ทั้งนี้สมการที่ได้จากทั้งสองสภาวะผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (Multiplicative scatter correction, MSC) ทั้งนี้สมการการทำนายค่า SSC, pH และ TA มีค่า  $r^2$  และค่า RMSEP เท่ากับ 0.66 °Brix และ 0.86 °Brix, 0.79 และ 0.15 และ 0.71% และ 1.91% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายคุณภาพดังกล่าวมีความสามารถในการนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายเพื่อตรวจสอบคุณภาพของผลมะยมชนิดก่อนการเก็บเกี่ยวได้

Abasi และคณะ (2019) ใช้เทคนิค NIR ในการศึกษาปริมาณความชื้น (MC), ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (SSC), ค่า pH และความแน่นเนื้อ (Firmness) ในแอปเปิลพันธุ์ Gala ที่ช่วงความยาวคลื่น 350 - 2500 นาโนเมตร ร่วมกับการใช้เทคนิค Wavelet transform ก่อนการปรับแต่งสเปกตรัม เพื่อลดสัญญาณรบกวนส่งผลให้สมการการทำนายที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น รวมถึงช่วยให้กระบวนการสร้างสมการรวดเร็วขึ้น จากนั้นข้อมูลสเปกตรัมจะถูกนำไปหาความสัมพันธ์กับค่าทางเคมีด้วยวิธี PLSR พบว่าสมการเทียบมาตรฐานสำหรับค่า MC, SSC, pH และความแน่นเนื้อ ที่ดีที่สุดให้ค่า  $R^2_{CV}$  เท่ากับ 0.88, 0.86, 0.84 และ 0.59 ตามลำดับ ในขณะที่ให้ค่า RMSECV เท่ากับ 0.0047%, 0.45%, 0.05 และ 3.04 N ตามลำดับ โดยพบช่วงความยาวคลื่นที่สำคัญกับการติดตามคุณภาพดังกล่าว ได้แก่ ช่วง 970 นาโนเมตร ซึ่งมีความสัมพันธ์กับน้ำ และช่วง 1150 และ 1450 นาโนเมตร ซึ่งมีความสัมพันธ์กับน้ำและคาร์โบไฮเดรต ทั้งนี้เมื่อนำสมการที่ได้ไปใช้ในการทำนาย พบว่าให้ค่า  $R^2_p$  เท่ากับ 0.6, 0.87, 0.72 และ 0.65 ตามลำดับ ในขณะที่ให้ค่า RMSEP เท่ากับ 0.009%,

0.55%, 0.06 และ 3.86 N ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการใช้เทคนิค NIR ร่วมกับการใช้เทคนิค Wavelet transform เป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่สามารถนำไปใช้ในการประเมินคุณภาพของผลไม้ได้

de Oliveira และคณะ (2014) ศึกษาการใช้เทคนิค NIRS ในการติดตามคุณภาพได้แก่ SSC และ TA ในเสาวรสมะเขือเทศ และแอปเปิ้ลคอกแบบทั้งผลด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับแบบแพร่ ในช่วงความยาวคลื่น 800-2700 นาโนเมตร โดยพบว่าสมการทำนาย SSC และ TA ของเสาวรสมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.63, 0.50 และมะเขือเทศมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.53, 0.51 ตามลำดับ ในขณะที่สมการการทำนาย SSC และ TA ของแอปเปิ้ลคอกพบว่ามีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.93, 0.95 และ RMSEP เท่ากับ 3.3%, 14.2% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าสมการการทำนายของเสาวรสมะเขือเทศมีความแม่นยำน้อยกว่าสมการการทำนายของแอปเปิ้ลคอก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าแอปเปิ้ลคอกเป็นผลไม้ที่มีเปลือกบางและมีเนื้อผลไม้ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันกับเปลือกหุ้มเมล็ด แต่เสาวรสมะเขือเทศเป็นผลไม้ที่มีเปลือกหนาส่งผลต่อการทะลุผ่านของลำแสง NIR ต่อเนื้อเสาวรสมะเขือเทศอีกทั้งมะเขือเทศยังเป็นผลไม้ที่มีลักษณะของเนื้อที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

Choi และคณะ (2017) ศึกษาการติดตามปริมาณน้ำตาลในสายพันธุ์ Manpungba โดยใช้ portable VIS/NIRS spectrometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 710 - 930 นาโนเมตร โดยสายพันธุ์ Manpungbae ที่เก็บเกี่ยวในช่วง 150-170 วันหลังดอกบาน จะถูกนำไปวัดสเปกตรัมและวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาล พบว่าสมการการทำนายที่ได้จากการใช้สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแก้ด้วยวิธีที่ต่างกัน ได้แก่ วิธีการปรับเรียบแบบซาวิตซ์กี-โกเลย์ (SG-Sm) การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (SNV) และการปรับแนวโน้ม และการทำอนุพันธ์อันดับสอง (2D) ให้ประสิทธิภาพการทำนายที่ดี โดยให้ค่า  $r$  เท่ากับ 0.92 และค่า SEP อยู่ในช่วงเท่ากับ 0.41 - 0.43 °Brix จากนั้นผู้วิจัยจึงนำสมการที่ได้จากการปรับแก้สเปกตรัมด้วยวิธี SG-Sm ซึ่งให้ค่า SEP ต่ำที่สุดกล่าวคือ 0.41 °Brix มาใช้ในการทำนายปริมาณน้ำตาลในสายพันธุ์อื่นๆ ได้แก่ สายพันธุ์ Wonhwang, Chuhwangbae และ Niitaka พบว่าให้ผลการทำนายในสายพันธุ์อื่นๆ ที่ดี กล่าวคือมีค่า  $r$ , SEP และ bias อยู่ในช่วงเท่ากับ 0.90-0.96, 0.29 - 0.33 °Brix และ 0.000125-0.000167 ตามลำดับ เนื่องจากช่วงของค่าคุณภาพที่ได้จากการเก็บเกี่ยวที่ต่างกันของสายพันธุ์ Manpungbae นั้นกว้าง จึงสามารถนำไปใช้ในการทำนายปริมาณน้ำตาลในสายพันธุ์อื่นได้ดี

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่เลือกใช้ในการศึกษาคั้งนี้คือ ผลไม้แห้งอบแห้งที่มีจำหน่ายทางการค้าและผลไม้แห้งที่ผลิตขึ้นเองจำนวน 3 กลุ่ม ได้แก่ ผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Natural dried fruits, Nat) จำนวน 72 ตัวอย่าง (ค่า TSS อยู่ในช่วง 63.2 - 89.4), ผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (Osmotic dehydrated fruits, OD) จำนวน 136 ตัวอย่าง (ค่า TSS อยู่ในช่วง 30.9 - 89.3), และ ผักและผลไม้อบแห้งแบบฟรียดราย (Freeze-dried fruits and vegetable, FD) จำนวน 24 ตัวอย่าง (ค่า TSS อยู่ในช่วง 58.5 - 95.0) ทั้งหมด 11 ชนิด 29 ยี่ห้อ ยี่ห้อละ 8 ตัวอย่าง ทั้งนี้ตัวอย่างส่วนใหญ่ถูกซื้อจากร้านสะดวกซื้อและซูเปอร์มาร์เก็ตจำนวน 208 ตัวอย่าง ขณะที่ตัวอย่างที่ผลิตขึ้นเองในห้องปฏิบัติการประกอบด้วยกล้วยและสับปะรดในกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ และบรอกโคลีในกลุ่มผักและผลไม้อบแห้งแบบฟรียดรายเป็นจำนวน 24 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 232 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4

##### 3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้ง

###### 3.1.1.1 การเตรียมตัวอย่างกล้วยตาก

นำกล้วยน้ำว้าดิบแก่มาบ่มให้สุกงอม จากนั้นตัดออกจากหวี ปอกเปลือกและลอกเส้นข้างออก นำไปจัดเรียงบนตะแกรงให้มีระยะห่างที่สม่ำเสมอ ทำแห้งกล้วยตากด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโคมเป็นเวลาประมาณ 3-4 วัน โดยอุณหภูมิของระบบจะอยู่ในช่วง 50-60 องศาเซลเซียส และมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ไม่เกิน 40% กล้วยจะถูกเก็บในทุกช่วงเย็นของแต่ละวัน ในวันที่สี่จะนำกล้วยมาทับแบนด้วยฝ่ามือ จากนั้นบรรจุใส่กล่องสุญญากาศ แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส ระหว่างรอนำไปวัดสเปกตรัมและวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีต่อไป

###### 3.1.1.2 การเตรียมตัวอย่างสับปะรดอบแห้งแบบธรรมชาติ

นำสับปะรด (*Ananas comosus* (L.) Merr.) พันธุ์ปัตตาเวีย เนื้อ 2 ซึ่งอยู่ในระดับการสุกที่พร้อมรับประทานสังเกตจากสีของเปลือกที่มีสีเขียวประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ต่อสีเหลือง 30 เปอร์เซ็นต์ นำมาล้างทำความสะอาด สะเด็ดน้ำ ตัดจุกและนำไปออก หั่นบริเวณส่วนหัวและส่วนท้ายของผลออก จากนั้นหั่นชิ้นสับปะรดตามแนวขวางให้มีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร แล้วนำชิ้นสับปะรดที่ได้ไปเจาะเปลือกและแกนออกด้วยพิมพ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร และ 2.5 เซนติเมตร ตามลำดับ จะได้ชิ้นสับปะรดที่มีลักษณะเป็นรูปวงแหวน ต่อมานำชิ้น





สับปะรดไปจัดเรียงบนถาดแบบชั้นเดียว (Single layer) แล้วนำเข้าอบด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบ ถาด (Tray dryer) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งค่าวอเตอร์แอกติวิตีของผลิตภัณฑ์สุดท้าย มีค่าต่ำกว่า 0.6000 แสดงถึงภาคผนวก ข จากนั้นบรรจุตัวอย่างใส่ถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ แล้วนำไปเก็บ ในกล่องสุญญากาศที่บรรจุซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส เพื่อรอนำไปวัดสเปกตรัมและ วิเคราะห์คุณภาพทางเคมีต่อไป

### 3.1.1.3 การเตรียมตัวอย่างบรอกโคลีอบแห้งแบบฟรีซดราย





นำบรอกโคลีมาล้างทำความสะอาด สะเด็ดน้ำ เลือกเฉพาะส่วนที่เป็นดอกอ่อนไปปั่น ให้ละเอียดจนมีเนื้อสัมผัสเนียนเป็นเนื้อเดียวกัน (paste) จากนั้นนำไปกรองผ่านกระชอนสแตนเลส แล้วบรรจุใส่ในพิมพ์ซิลิโคนขนาด  $6 \times 3 \times 1$  เซนติเมตร (กว้าง×ยาว×สูง) ใช้พายปาดผิวหน้าให้เรียบ แล้วนำไปแช่เยือกแข็งด้วยตู้แช่เยือกแข็ง (Blast Chiller Shock Freezer) ที่อุณหภูมิ  $-40$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา แกะตัวอย่างออกจากพิมพ์ แล้ววางบนถาดสำหรับ เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Basic Research Benchtop Freeze Dryer) จากนั้นนำไปแช่เยือก แข็งด้วยตู้แช่แข็ง (Freezer) ที่อุณหภูมิ  $-18$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปเข้า เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $-80$  องศาเซลเซียส ที่สภาวะความดัน เท่ากับ 0.500 mBar เมื่อครบกำหนดเวลา นำตัวอย่างออกจากเครื่องแล้วบรรจุตัวอย่างใส่ถุง อะลูมิเนียมฟอยล์ปิดสนิทเก็บในกล่องสุญญากาศที่บรรจุซิลิกาเจล แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส เพื่อรอนำไปวัดสเปกตรัมและวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีต่อไป แสดงถึงภาคผนวก ข








ตารางที่ 4 รายละเอียดของกลุ่มของตัวอย่าง ลักษณะปรากฏ ชนิด รหัสตัวอย่าง ยี่ห้อหรือแบรนด์ วันที่ผลิต วันที่หมดอายุ จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมดของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งที่ใช้ในการศึกษา

ชื่อของตัวอย่างที่	ลักษณะปรากฏของ	ชนิดของผักและ	รหัส	ยี่ห้อหรือแบรนด์ของผัก	วันที่ผลิต	วันที่หมดอายุ	จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมด
ศึกษา	ผักและผลไม้อบแห้ง	ผลไม้อบแห้ง	ตัวอย่าง	และผลไม้อบแห้ง			
ผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Natural dried fruits, Nat)		ลำไย	LF-N	Fruit Mania	5/3/2020	2/2/2021	8
		สับปะรด	PI-N	ผลิตในห้องปฏิบัติการ	-	-	8
		กล้วย	Ba-N	ผลิตในห้องปฏิบัติการ	7/1/2021	-	8
		กล้วย	BaSt-N	สีดา	5/6/2021	5/9/2021	8


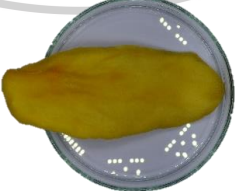
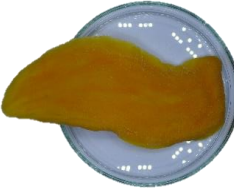

ตารางที่ 4 (ต่อ) รายละเอียดของกลุ่มของตัวอย่าง ลักษณะปรากฏ ชนิด รหัสตัวอย่าง ยี่ห้อหรือแบรนด์ วันที่ผลิต วันที่หมดอายุ จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมดของตัวอย่างผักและผลไม้แช่แข็งที่ใช้ในการศึกษา

กลุ่มของตัวอย่างที่ศึกษา	ลักษณะปรากฏของผักและผลไม้แช่แข็ง	ชนิดของผักและผลไม้แช่แข็ง	รหัสตัวอย่าง	ยี่ห้อหรือแบรนด์ของผักและผลไม้แช่แข็ง	วันที่ผลิต	วันที่หมดอายุ	จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมด
ผลไม้แช่แข็งแบบธรรมชาติ (Natural dried fruits, Nat)		กล้วย	BaPP-N	ป่าเพียน	29/5/2021	29/9/2021	8
		กล้วย	BaRB-N	ไร่บ้านข้าวหอม	-	24/12/2021	8
		กล้วย (หวานน้อย)	BaRB-N	ไร่บ้านข้าวหอม	-	24/12/2021	8
		สับปะรด	PIFH-N	FRUIT HOUSE	-	4/8/2022	8

ตารางที่ 4 (ต่อ) รายละเอียดของกลุ่มของตัวอย่าง ลักษณะปรากฏ ชนิด รหัสตัวอย่าง ยี่ห้อหรือแบรนด์ วันที่ผลิต วันที่หมดอายุ จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมดของตัวอย่างผักและผลไม้แช่แข็งที่ใช้ในการศึกษา


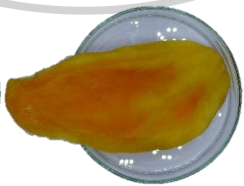


กลุ่มของตัวอย่างที่ศึกษา	ลักษณะปรากฏของผักและผลไม้แช่แข็ง	ชนิดของผักและผลไม้แช่แข็ง	รหัสตัวอย่าง	ยี่ห้อหรือแบรนด์ของผักและผลไม้แช่แข็ง	วันที่ผลิต	วันที่หมดอายุ	จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมด
ผลไม้แช่แข็งแบบธรรมชาติ (Natural dried fruits, Nat)		มะม่วง	MFH-N	FRUIT HOUSE	-	4/8/2022	8
ผลไม้แช่แข็งแบบแช่ (Osmotic dehydrated fruits, OD)		มะม่วง	MD-OD	Doikham	3/22/2021	3/22/2022	8
		มะละกอ	PYF-OD	Fareeda Dried Fruits	-	-	8
		ส้ม	OF-OD	Fareeda Dried Fruits	-	-	8
							

ตารางที่ 4 (ต่อ) รายละเอียดของกลุ่มของตัวอย่าง ลักษณะปรากฏ ชนิด รหัสตัวอย่าง ยี่ห้อหรือแบรนด์ วันที่ผลิต วันที่หมดอายุ จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมดของตัวอย่างผักและผลไม้แช่แข็งที่ใช้ในการศึกษา


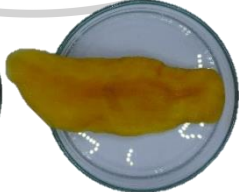

กลุ่มของตัวอย่างที่ศึกษา	ลักษณะปรากฏของผักและผลไม้แช่แข็ง	ชนิดของผักและผลไม้แช่แข็ง	รหัสตัวอย่าง	ยี่ห้อหรือแบรนด์ของผักและผลไม้แช่แข็ง	วันที่ผลิต	วันที่หมดอายุ	จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมด
ผลไม้แช่แข็งแช่แข็ง (Osmotic dehydrated fruits, OD)		มะพร้าว	CoG-OD	Glendee	11/26/2020	11/26/2021	8
		มะม่วง	MN-OD	NANA FRUIT	4/20/2021	4/20/2022	8
		มะม่วง	MF-OD	Fareeda Dried Fruits	-	-	8
		สับปะรด	PIF-OD	Fareeda Dried Fruits	-	-	8






ตารางที่ 4 (ต่อ) รายละเอียดของกลุ่มของตัวอย่าง ลักษณะปรากฏ ชนิด รหัสตัวอย่าง ยี่ห้อหรือแบรนด์ วันที่ผลิต วันที่หมดอายุ จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมดของตัวอย่างผักและผลไม้แช่แข็งที่ใช้ในการศึกษา

ลักษณะตัวอย่างที่ศึกษา	ลักษณะปรากฏของผักและผลไม้แช่แข็ง	ชนิดของผักและผลไม้แช่แข็ง	รหัสตัวอย่าง	ยี่ห้อหรือแบรนด์ของผักและผลไม้แช่แข็ง	วันที่ผลิต	วันที่หมดอายุ	จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมด
ผลไม้แช่แข็ง (Osmotic dehydrated fruits, OD)		สับปะรด	PiB-OD	benefruit	5/21/2021	5/22/2022	8
		มะม่วง	MB-OD	benefruit	5/21/2021	5/22/2022	8
		ส้ม	OB-OD	benefruit	5/8/2021	5/8/2022	8
		มะพร้าว	CoB-OD	benefruit	5/10/2021	5/10/2022	8


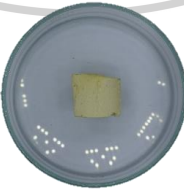
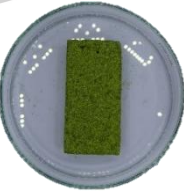
ตารางที่ 4 (ต่อ) รายละเอียดของกลุ่มของตัวอย่าง ลักษณะปรากฏ ชนิด รหัสตัวอย่าง ยี่ห้อหรือแบรนด์ วันที่ผลิต วันที่หมดอายุ จำนวนตัวอย่างทั้งหมดของตัวอย่างผักและผลไม้แช่แข็งที่ใช้ในการศึกษา

ลักษณะตัวอย่างที่ศึกษา	ลักษณะปรากฏของผักและผลไม้แช่แข็ง	ชนิดของผักและผลไม้แช่แข็ง	รหัสตัวอย่าง	ยี่ห้อหรือแบรนด์ของผักและผลไม้แช่แข็ง	วันที่ผลิต	วันที่หมดอายุ	จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมด
ผลไม้แช่แข็ง (Osmotic dehydrated fruits, OD)		มะม่วง	MS-OD	SRIWANNA	2/4/2021	2/4/2022	8
		มะม่วง	MBs-OD	Best	5/3/2021	5/3/2022	8
		มะม่วง	MM-OD	mom's mango	23/1/2021	23/1/2022	8

ตารางที่ 4 (ต่อ) รายละเอียดของกลุ่มของตัวอย่าง ลักษณะปรากฏ ชนิด รหัสตัวอย่าง ยี่ห้อหรือแบรนด์ วันที่ผลิต วันที่หมดอายุ จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมดของตัวอย่างผักและผลไม้แช่แข็งที่ใช้ในการศึกษา

กลุ่มของตัวอย่างที่ศึกษา	ลักษณะปรากฏของผักและผลไม้แช่แข็ง	ชนิดของผักและผลไม้แช่แข็ง	รหัสตัวอย่าง	ยี่ห้อหรือแบรนด์ของผักและผลไม้แช่แข็ง	วันที่ผลิต	วันที่หมดอายุ	จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมด
ผลไม้แช่แข็งแช่แข็ง (Osmotic dehydrated fruits, OD)		มะม่วง	MSM-F-OD	Mr. mango	15/6/2021	13/2/2022	8
		มะปราง	MPSW-OD	SAWADEE FARM	-	-	8
		มะยงชิด	MYSW-OD	SAWADEE FARM	-	-	8

ตารางที่ 4 (ต่อ) รายละเอียดของกลุ่มของตัวอย่าง ลักษณะปรากฏ ชนิด รหัสตัวอย่าง ยี่ห้อหรือแบรนด์ วันที่ผลิต วันที่หมดอายุ จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมดของตัวอย่างผักและผลไม้แช่แข็งที่ใช้ในการศึกษา

ชื่อของตัวอย่างที่ศึกษา	ลักษณะปรากฏของผักและผลไม้แช่แข็ง	ชนิดของผักและผลไม้แช่แข็ง	รหัสตัวอย่าง	ยี่ห้อหรือแบรนด์ของผักและผลไม้แช่แข็ง	วันที่ผลิต	วันที่หมดอายุ	จำนวนตัวอย่างที่สุ่มทั้งหมด
ผักและผลไม้แช่แข็งแบบฟรียูไร		มะม่วง	MS-FD	SRIWANNA	2/27/2021	2/27/2022	8
ฟรียูไรผลไม้และผักแช่แข็ง (Freeze-dried fruits and vegetable, FD)		ทุเรียน	DS-FD	SRIWANNA	4/24/2021	4/24/2022	8
		บรอกโคลี	B-FD	ผลิตภัณฑ์ปฏิบัติการ	-	-	8

### 3.2 สารเคมี

น้ำกลั่น (Distilled water)

### 3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง Portable vis/NIR spectrometer (HandySpec Field 1000, tec5 AG, Oberursel, Germany) พร้อมซอฟต์แวร์ MultiSpec® Pro ของ tec5 AG
2. เครื่องปั่นผสมด้วยความเร็วสูง (Homogenizer รุ่น T 25 digital ULTRA-TURRAX®, IKA®, Staufen, Germany)
3. เครื่องชั่งชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical balance รุ่น BP 211S Sartorius AG, Inc., Germany)
4. เครื่องชั่งชนิดหยาบ 2 ตำแหน่ง (Digital balance, TE 3102S Sartorius, Germany)
5. ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (Hot air oven, รุ่น FED53, Binder, Germany)
6. เครื่องวัดค่าความหวานแบบดิจิตอล (Digital refractometer, รุ่น Pal-1, Atago, Japan)
7. เครื่องเขย่าผสมสารละลาย (Vortex mixer รุ่น Vortex-Genie 2, Scientific Industries, Inc., USA)
8. เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (รุ่น AQUALAB® 4TE, METER®, Pullman, Washington, United States)
9. เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (LyoQuest, Telstar®, Terrassa, Spain)
10. ตู้แช่เยือกแข็ง (Blast Chiller Shock Freezer, รุ่น GCM 015S 3500 W, Hiber, Italy)
11. ตู้แช่แข็ง (Freezer, SF-PC697, บริษัท พานาโซนิค แอ็พไลแอนซ์ โคลด์เซน (ประเทศไทย) จำกัด, ประเทศไทย)
12. เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด (Tray dryer, บริษัท กล้วยน้ำไท เทรตติ้ง กรุ๊ป จำกัด, ประเทศไทย)
13. เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic baths, รุ่น Bandelin DK 512 P, SONOREX™, Germany)
14. เครื่องปั่น (รุ่น HR2115 600W, Philips, Indonesia)
15. เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper)
16. พิมพ์ซิลิโคนขนาด 6×3×1 เซนติเมตร (กว้าง×ยาว×สูง)
17. พิมพ์สำหรับเจาะเปลือกสับปรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร
18. พิมพ์สำหรับเจาะแกนสับปรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร
19. ตะแกรงร่อนสแตนเลส (Test sieve) ขนาด 40 mesh

20. จานแก้ว (petri dish)
21. ซอฟต์แวร์ The Unscrambler (Version 9.7, CAMO Software AS, Oslo, Norway)
22. ซอฟต์แวร์ IBM® SPSS® Statistics (Version 23, SPSS Inc., USA)

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการ ทำนายคุณภาพผักและผลไม้อบแห้ง

##### 3.4.1.1 การวัดสเปกตรัมของผักและผลไม้อบแห้ง (Spectral measurement)

ก่อนทำการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้ง ซึ่งถูกเก็บอยู่ในกล่องสุญญากาศจะถูกนำไปควบคุมอุณหภูมิ โดยนำไปวางไว้ในห้องปรับอากาศที่มีอุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นตัวอย่างจะถูกนำไปวัดความหนาของชิ้นตัวอย่างบริเวณส่วนหัว ส่วนกลาง และส่วนท้ายด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Caliper) แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Portable vis/NIR spectrometer (HandySpec Field 1000, tec5AG, Oberursel, Germany) โดยใช้ซอฟต์แวร์ MultiSpec® Pro ของ tec5 AG ในช่วงความยาวคลื่น 305-1140 นาโนเมตร (nm) ด้วยหัววัดใยแก้วนำแสง (Fiber optic probe) ในรูปแบบการวัดแบบอินเทอร์แอคแตนซ์ (Interactance mode) โดยเพิ่มความยาวคลื่นทีละ 1 นาโนเมตร มีค่า wavelength accuracy เท่ากับ 0.3 นาโนเมตร ค่า resolution เท่ากับ 10 นาโนเมตร และ integration time เท่ากับ 2300 ms ทั้งนี้ในขั้นตอนการวัดค่าการดูดกลืนแสง ชิ้นตัวอย่างจะถูกวางไว้บนแท่งเทฟลอน (Teflon cylinder) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวอย่างอ้างอิง (ภาพที่ 6) จากนั้นจึงวางหัววัด (Probe) ลงบนชิ้นตัวอย่างโดยตรงในลักษณะตั้งฉากกับชิ้นตัวอย่าง กรณีที่ชิ้นผักและผลไม้อบแห้งมีขนาดใหญ่จะวัดสเปกตรัมทั้งหมดบริเวณ 3 ตำแหน่งของชิ้นตัวอย่างแบบสุ่ม หากชิ้นผลไม้อบแห้งมีขนาดเล็กจะวัดสเปกตรัมของชิ้นตัวอย่างแบบสุ่มทั้งหมดบริเวณ 2 ตำแหน่ง (ภาพที่ 7) ทั้งนี้ในการวัดตัวอย่างแต่ละชนิดจะดำเนินการวัดตัวอย่างอ้างอิง (White reference measurement) ได้แก่ แท่งเทฟลอน ก่อนทุกครั้ง ซึ่งข้อมูลจะปรากฏไปยังซอฟต์แวร์ MultiSpec® Pro ของ tec5 AG บนหน้าจอแสดงผลของเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่อง Portable vis/NIR spectrometer ด้วย USB 2.0 port โดยข้อมูลที่ได้รับจะเป็นค่าความเข้มแสง (Intensity value) และสามารถคำนวณหาสเปกตรัมการสะท้อนกลับของแสง (Reflectance spectra) ได้ในรูปแบบของ  $\log\left(\frac{1}{R}\right)$  โดยใช้สมการที่ (1) (รณฤทธิ์ ฤทธิธิน, 2563; ออมสิน และคณะ, 2562)

จาก 
$$\text{Absorbance} = \log \left( \frac{1}{R} \right)$$

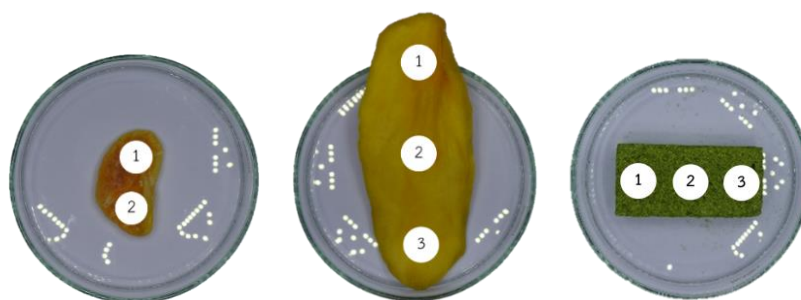
$$\log \left( \frac{1}{R} \right) = \log \left( \frac{I_{\text{white}}}{I_{\text{sample}}} \right) \quad \text{หรือ} \quad \log \left( \frac{1}{R} \right) = \log \left( \frac{I_{\text{white}}}{I_{\text{reference}}} \right) \quad (1)$$

ทั้งนี้  $R$  คือ ค่าการสะท้อนกลับของแสงแบบสัมพัทธ์ (Relative reflectance)  
 $I_{\text{sample}}$  คือ ค่าความเข้มแสงของตัวอย่าง (Intensity value of the sample)  
 $I_{\text{white}}$  หรือ  $I_{\text{reference}}$  คือ ค่าความเข้มแสงของตัวอย่างอ้างอิง กล่าวคือ แท่งเทฟลอน (Intensity value of the white reference)

จากนั้นสเปกตรัมของตัวอย่างที่แต่ละตำแหน่งจะถูกนำไปเฉลี่ย (Averaging) เพื่อเป็นตัวแทนสเปกตรัมของตัวอย่างแต่ละชิ้น หลังจากการวัดสเปกตรัมตัวอย่างทั้งหมดจะถูกนำไปแก้แชนท์ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ในขณะที่บรอกโคลีอบแห้งแบบพรีชดรายจะถูกนำไปบดผงด้วยเครื่องปั่นแล้วบรรจุใส่ถุงอะลูมิเนียมพอยล์ปิดสนิทก่อนนำไปแก้แชนท์ สำหรับรอนำไปวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี (Chemical analysis หรือ Reference analysis) ต่อไป โดยขั้นตอนการวัดสเปกตรัมและการสร้างสมการแสดงดังภาพที่ 8



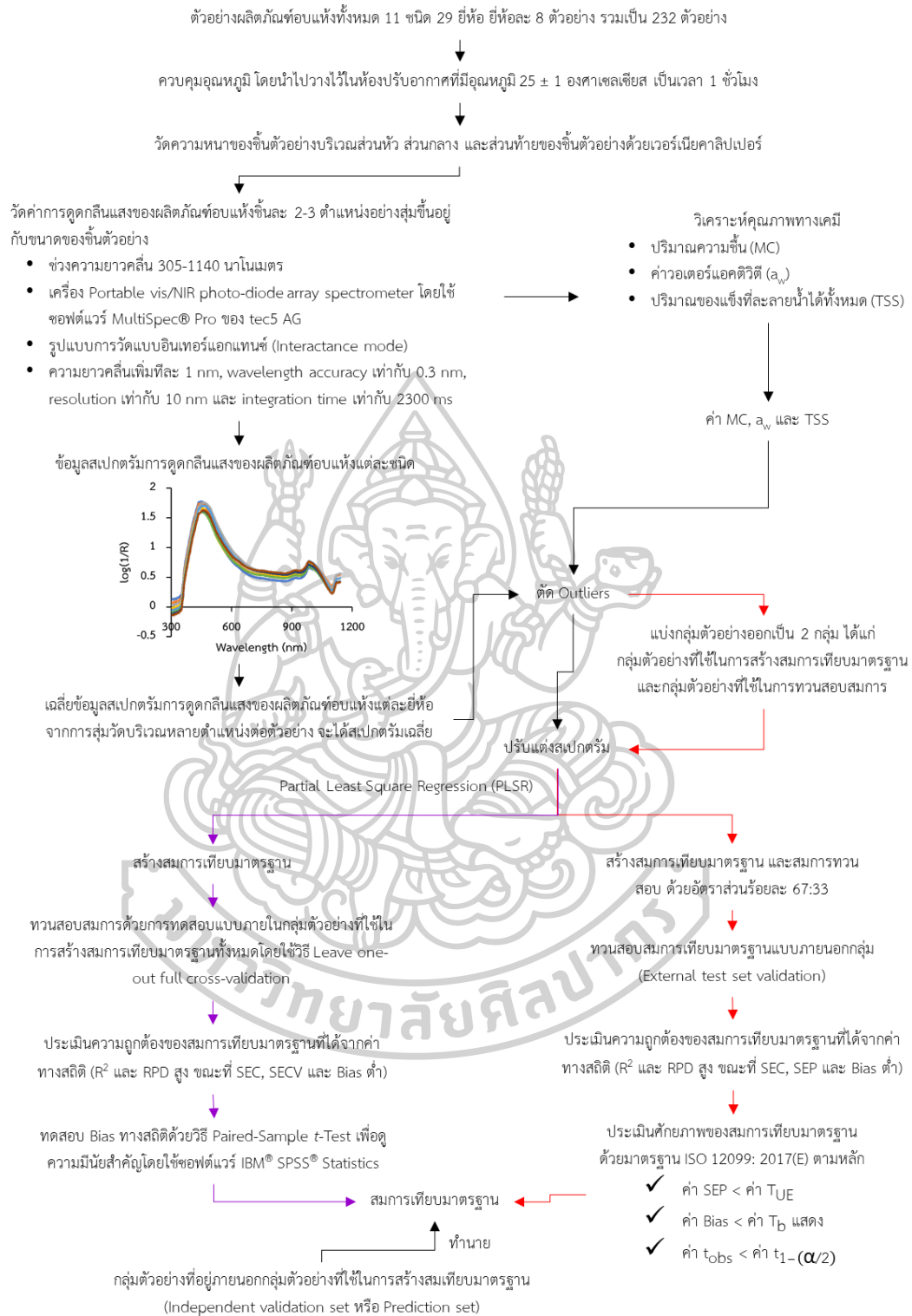
ภาพที่ 6 การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งด้วยเครื่อง portable vis/NIR spectrometer



ภาพที่ 7 ตำแหน่งการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งด้วยเครื่อง Portable vis/NIR spectrometer







ภาพที่ 8 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งด้วยเครื่อง Portable vis/NIR spectrometer และการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

### 3.4.1.2 การตรวจสอบข้อมูลผิดปกติ (Outliers) และวิธีการปรับแต่งสเปกตรัม (Spectral pre-processing methods)

หลังจากทำการวัดสเปกตรัมตัวอย่างผลิตภัณฑ์อย่างผลิตภัณฑ์อบแห้งยี่ห้อต่างๆ แล้ว ก่อนทำการวิเคราะห์ข้อมูลควรทำการตรวจสอบข้อมูลผิดปกติ (Outliers) ก่อนการสร้างสมการเทียบมาตรฐานเพื่อพิจารณาตัดข้อมูลสเปกตรัม (Spectral outliers) หรือค่าทางเคมี (Chemical data outliers) ที่ผิดปกติออก โดยใช้การตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA) ซึ่งอาศัยการพิจารณาข้อมูลจากการกระจายตัวบนแกน PCA ด้วยการทดสอบ Hotelling T-squared distribution หากตัวอย่างใดมีการกระจายตัวห่างออกจากกลุ่ม จะถูกตัดออกจากกลุ่มตัวอย่าง จากนั้นจึงนำข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการตัดข้อมูลผิดปกติออกแล้วไปปรับแต่งสเปกตรัม (Pre-treatment spectra) เพื่อลดสัญญาณรบกวนและอิทธิพลอื่นๆ จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งที่สามารถและไม่สามารถควบคุมได้ เช่น การกระเจิงของแสง ระยะทางเดินของแสงหรือความหนาของตัวอย่าง ลักษณะของผิวหน้าตัวอย่าง อุณหภูมิของตัวอย่าง เป็นต้น ใช้ซอฟต์แวร์ The Unscrambler (Version 9.7, CAMO Software AS, Oslo, Norway) โดยวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมที่ใช้มีดังนี้

- การปรับเรียบ (Smoothing) แบบซาวิตซ์กี-โกเลย์ (Savitzky-Golay, SG) เป็นวิธีที่ช่วยปรับสเปกตรัมให้เรียบซึ่งช่วยลดสัญญาณรบกวนออกจากสเปกตรัมได้ โดยวิธีของซาวิตซ์กี-โกเลย์จะช่วยรักษาน้ำหนักของยอดแหลมในสเปกตรัมให้มีขนาดเท่ากับสเปกตรัมเริ่มต้นไม่ว่าจะเป็นยอดแหลมที่มีฐานกว้างหรือฐานแคบ
- การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (Multiplicative scatter correction, MSC) เป็นวิธีที่ช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการกระเจิงของแสงซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยหลักในด้านของขนาดอนุภาคของตัวอย่างและความชื้นในตัวอย่างที่แตกต่างกัน
- การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน และการปรับแนวโน้ม (Standard normal variate, SNV) เป็นวิธีที่ช่วยกำจัดอิทธิพลที่เกิดจากการกระเจิงของแสง
- การทำอนุพันธ์อันดับหนึ่งแบบซาวิตซ์กี-โกเลย์ (Savitzky-Golay first derivative, SG-1D) ช่วยลดความผันแปรในด้านการเคลื่อนตัวของสเปกตรัมแบบเบสไลน์ออฟเซต (Baseline offset)
- การทำอนุพันธ์อันดับสองแบบซาวิตซ์กี-โกเลย์ (Savitzky-Golay second derivative, SG-2D) ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการกระเจิงของแสง ช่วยลดการซ้อนทับกันของสเปกตรัม (Overlapping) ทำให้ลักษณะของสเปกตรัมเด่นชัดขึ้น รวมถึงลดความผันแปรในด้านการเคลื่อนตัวของสเปกตรัมแบบเบสไลน์ชิฟต์ (Baseline shift) (อนุพันธ์ เท็ดวอร์กุล, 2555)

- การใช้หลายวิธีร่วมกัน

### 3.4.1.3 การสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration models) สำหรับติดตามคุณภาพในผักและผลไม้อบแห้ง

ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลการดูดกลืนหรือสเปกตรัมกับค่าคุณภาพทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน โดยใช้วิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) โดยสมการเทียบมาตรฐานจะสร้างจากกลุ่มตัวอย่างชนิดเดียวกันและจากการรวมกลุ่มตัวอย่างของผักและผลไม้ต่างชนิดกัน จากนั้นสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปทดสอบความแม่นยำโดยใช้วิธีการทวนสอบสมการที่แตกต่างกัน ได้แก่ การทดสอบแบบภายในในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานทั้งหมด (Internal cross-validation) โดยใช้วิธี Leave one-out full cross-validation สำหรับทวนสอบสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากข้อมูลของผลไม้ในกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Nat) และกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้อบแห้งแบบพรีซดราย (Nat+FD) เนื่องจากข้อจำกัดของจำนวนตัวอย่างที่มีน้อย ขณะที่สมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากข้อมูลของผลไม้ในกลุ่มผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (OD), กลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติร่วมกับกลุ่มผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (Nat+OD), กลุ่มผลไม้แช่อิ่มอบแห้งร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้อบแห้งแบบพรีซดราย (OD+FD) และกลุ่มผลไม้อบแห้งทั้งสามกลุ่ม (Nat+OD+FD) ดังแสดงในตารางที่ 5 จะถูกทวนสอบสมการด้วยวิธีการทดสอบแบบภายนอกกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (External test set validation หรือ Separated test set) โดยกลุ่มตัวอย่างจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration samples set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation samples set) ในการเลือกกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานนั้นจะใช้ซอฟต์แวร์ The Unscrambler ช่วยในการเลือกข้อมูลตัวอย่างแบบสุ่มจากสามในสี่ของข้อมูลทั้งหมด โดยกำหนดให้ค่าทางเคมีที่น้อยที่สุดสามค่าแรกและค่าทางเคมีที่มากที่สุดสามค่าสุดท้ายจัดอยู่ในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration samples set) เพื่อให้สมการเทียบมาตรฐานที่ได้ครอบคลุมกลุ่มตัวอย่างที่จะถูกนำมาใช้ในการทวนสอบสมการ ในขณะที่ข้อมูลที่เหลือจะถูกสลับตามสัดส่วนเท่ากับ 2 ต่อ 1 ซึ่งกำหนดเป็นตัวอย่างในกลุ่มที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน 2 ตัวอย่าง และตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ 1 ตัวอย่าง กำหนดเช่นนี้ไปจนครบจำนวนข้อมูลทั้งหมด ซึ่งสามารถคิดเป็นอัตราส่วนของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานต่อกลุ่มตัวอย่างที่ใช้การทวนสอบสมการโดยประมาณเท่ากับร้อยละ 67 ต่อ ร้อยละ 33 ตามลำดับ

ทั้งนี้สมการเทียบมาตรฐานที่ได้จะถูกประเมินประสิทธิภาพความถูกต้องและคัดเลือกวิธีปรับแต่งสเปกตรัมที่เหมาะสมที่สุดเบื้องต้น เพื่อหาสมการเทียบมาตรฐานที่ให้ค่าการทำนายที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) ที่สูงทั้งในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration samples set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation samples set) เช่นเดียวกับค่าสัดส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าทางเคมีและค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (The ratio of the standard deviation of validation set to standard error of prediction, RPD) ในทางกลับกันควรมีค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการสร้างสมการของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Standard error of calibration, SEC), ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Standard error of prediction, SEP), ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทวนสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Standard error of cross-validation, SECV) และค่าความเอนเอียงหรือค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการทำนาย (Bias) ที่ต่ำ นอกจากนี้พิจารณาเลือกจำนวนตัวแปร PLS (PLS factors หรือ Latent variables) ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด Over-fitting จากการสร้างสมการโดยใช้จำนวนตัวแปรที่มากเกินไป (Nicolai และคณะ, 2007; Jamshidi และคณะ, 2012; Li และคณะ, 2013; และ Phuphaphud และคณะ, 2019)

ตารางที่ 5 รายละเอียดของกลุ่มตัวอย่างและวิธีที่ใช้ในการทวนสอบสมการเทียบมาตรฐาน MC,  $a_w$  และ TSS ของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง

สมการเทียบมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง	วิธีที่ใช้ในการทวนสอบสมการเทียบมาตรฐาน
Nat	Leave one-out full cross-validation
OD	External test set validation
Nat + OD	External test set validation
Nat + FD	Leave one-out full cross-validation
OD + FD	External test set validation
Nat + OD + FD	External test set validation

หมายเหตุ : Nat คือ ผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Natural dried fruits), OD คือ ผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (Osmotic dehydrated fruits), FD คือ ผักและผลไม้อบแห้งแบบฟรียซ์ดราย (Freeze-dried fruits and vegetable)

ภายหลังจากการประเมินประสิทธิภาพความถูกต้องและคัดเลือกวิธีปรับแต่งสเปกตรัมที่เหมาะสมที่สุดโดยอาศัยค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่า  $R^2$ , SEC, SECV, SEP และ RPD ช่วยในการคัดเลือกเบื้องต้น สมการเทียบมาตรฐานที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดจากการสร้างขึ้นด้วยวิธีการทดสอบแบบภายนอกกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (External test set validation) จะถูกนำมาประเมินศักยภาพในด้านความถูกต้องของสมการเทียบมาตรฐานเพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้อีกครั้งด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) (Animal feeding stuffs, cereals, and milled cereal products - Guidelines for the application of near infrared spectrometry) (รณฤทธิ์ ฤทธิธ, 2560) โดยจะทำการประเมินค่าทางสถิติดังต่อไปนี้ กล่าวคือ ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย (Standard error of prediction; SEP) สามารถตรวจสอบได้โดยการคำนวณค่า The unexplained error confidence limits (UECLs หรือค่า  $T_{UE}$ ) จากการทดสอบทางสถิติ F-test ทั้งนี้ค่า SEP ควรมีค่าน้อยกว่าค่า  $T_{UE}$  หากค่า SEP มีค่าน้อยกว่าค่า  $T_{UE}$  แสดงว่าค่า SEP ของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการไม่มีนัยสำคัญ ขณะที่การตรวจสอบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการทำนาย (Bias) ใช้การทดสอบทางสถิติ paired t-test ซึ่งเป็นการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มที่ไม่เป็นอิสระจากกัน ในที่นี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR เพื่อดูความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หากค่า Bias มีค่าน้อยกว่าค่า  $T_b$  (Bias confidence limits, BCLs หรือค่า  $T_b$ ) แสดงว่าค่า Bias หรือค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการทำนายไม่แตกต่างจาก 0 อย่างมีนัยสำคัญ หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานไม่แตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และการตรวจสอบค่าความชัน (Slope) โดยใช้การทดสอบทางสถิติ t-test เพื่อคำนวณค่า  $t_{obs}$  สำหรับใช้ในการตรวจสอบ Slope หากค่า  $t_{obs}$  มีค่าน้อยกว่าค่า  $t_{(1-\alpha/2)}$  แสดงว่าความชัน (Slope) ของกราฟ Scatter plots ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานไม่แตกต่างจาก 1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และหากว่าค่า  $t_{(1-\alpha/2)}$  มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า  $t_{obs}$  แสดงว่า Slope แตกต่างจาก 1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (อมสิน และคณะ, 2562; Pochanagone และคณะ, 2019; Bantadjan และคณะ, 2020 และ Singpoonga และคณะ, 2020) โดยวิธีการคำนวณค่า  $T_{UE}$ , ค่า  $T_b$  และ ค่า  $t_{obs}$  แสดงดังภาคผนวก ค ทั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าการประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) ค่าทางสถิติที่ได้ควรเป็นไปตามหลักการดังนี้

- ✓ ค่า SEP < ค่า T<sub>UE</sub>
- ✓ ค่า Bias < ค่า T<sub>b</sub>
- ✓ ค่า t<sub>obs</sub> < ค่า t<sub>(1-α/2)</sub>

ขณะที่สมการเทียบมาตรฐานที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดจากการสร้างขึ้นด้วยวิธีการทดสอบแบบภายในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Internal cross-validation) ด้วยวิธี Leave one-out full cross-validation จะถูกนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample t-Test เพื่อเปรียบเทียบว่าค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือไม่ โดยใช้ซอฟต์แวร์ IBM® SPSS® Statistics (Version 23, SPSS Inc., USA)

#### 3.4.1.4 ศึกษาความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐาน สำหรับทำนายปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดในผักและผลไม้อบแห้ง

ภายหลังจากการประเมินศักยภาพในการทำนายค่าคุณภาพของสมการเทียบมาตรฐานด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) สมการเทียบมาตรฐานที่มีประสิทธิภาพในการทำนายมากที่สุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่างจะถูกนำมาใช้ในการทำนายเพื่อติดตามคุณภาพของผักและผลไม้อบแห้งของชุดข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่อยู่ภายนอกกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมเทียบมาตรฐาน (Independent validation set หรือ Prediction set) เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนาย ทั้งนี้ข้อมูลสเปกตรัมที่นำมาใช้ในการทำนายจะผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมให้ตรงกับวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานก่อนนำมาใช้ในการทำนายแสดงดังตารางที่ 6 จากนั้นค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่เหมาะสมที่สุดจะถูกนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample t-Test เพื่อดูความมีนัยสำคัญโดยใช้ซอฟต์แวร์ IBM® SPSS® Statistics (Version 23, SPSS Inc., USA)

ตารางที่ 6 รายละเอียดของสมการเทียบมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่นำไปใช้ในการทำนาย และวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมที่ใช้สำหรับการทำนายสมการเทียบมาตรฐานค่า MC,  $a_w$  และ TSS ของแต่ละช่วงความยาวคลื่น

พารามิเตอร์	สมการเทียบมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง	ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ถูกนำไปใช้ในการทำนาย	วิธีการปรับแต่งสเปกตรัมของแต่ละช่วงความยาวคลื่น	
			400-1140 นาโนเมตร	700-1140 นาโนเมตร
MC	Nat	OD	SNV + SG-1D 19 pts	SG-1D 15 pts
		FD		
	OD	Nat	SG-Sm 27 pts + SNV	SNV+SG-1D 9 pts
		FD		
	Nat + OD	FD	SG-1D 11 pts	SG-Sm 3 pts
	Nat + FD	OD	SNV + SG-1D 9 pts	SG-1D 19 pts
	OD + FD	Nat	SG-1D 21 pts	SG-1D 9 pts
	Nat + OD + FD	Nat		
		OD	SG-1D 17 pts	SG-1D 7 pts
		FD		
$a_w$	Nat	OD	MSC	SG-Sm 9 pts
		FD		
	OD	Nat	SG-1D 15 pts	SNV+SG-1D 19 pts
		FD		
	Nat + OD	FD	SNV	SNV+SG-1D 15 pts
	Nat + FD	OD	SNV + SG-1D 7 pts	SG-1D 17 pts
	OD + FD	Nat	SG-Sm 15 pts	SG-1D 19 pts
	Nat + OD + FD	Nat		
	OD	SG-1D 27 pts	สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	
	FD			

ตารางที่ 6 (ต่อ) รายละเอียดของสมการเทียบมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่นำไปใช้ในการทำนาย และวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมที่ใช้สำหรับการทำนายสมการเทียบมาตรฐานค่า MC,  $a_w$  และ TSS ของแต่ละช่วงความยาวคลื่น

พารามิเตอร์	สมการเทียบมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง	ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ถูกนำไปใช้ในการทำนาย	วิธีการปรับแต่งสเปกตรัมของแต่ละช่วงความยาวคลื่น	
			400-1140 นาโนเมตร	700-1140 นาโนเมตร
TSS	Nat	OD	MSC + SG-1D 23 pts	SG-1D 21 pts
		FD		
	OD	Nat	SG-2D 17 pts	SG-Sm 17 pts + SNV
		FD		
	Nat + OD	FD	SG-2D 17 pts	SG-Sm 9 pts + SNV
	Nat + FD	OD	SNV + SG-1D 13 pts	SG-1D 19 pts
	OD + FD	Nat	SNV + SG-1D 7 pts	SG-Sm 19 pts
	Nat + OD + FD	Nat OD FD	SNV + SG-1D 7 pts	SG-1D 13 pts

หมายเหตุ : SG-Sm (Savitzky-Golay Smoothing second order polynomial), SNV (Standard normal variate), SG-1D (Savitzky-Golay first derivative second order polynomial), SG-2D (Savitzky-Golay Smoothing second derivative second order polynomial)

### 3.4.2 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของผักและผลไม้อบแห้ง

ดำเนินการศึกษาคุณภาพทางเคมีของผลไม้อบแห้งแต่ละชนิด ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity,  $a_w$ ) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total soluble solid, TSS) ตามวิธีดังต่อไปนี้

#### 3.4.2.1 การหาปริมาณความชื้น (Moisture content, MC)

ชั่งถั่วยอะลูมิเนียมและตัวอย่างที่หั่นหยาบแล้วประมาณ 3-5 กรัม พร้อมบันทึกน้ำหนัก จากนั้นนำไปวิเคราะห์ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ  $105 \pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา



24 ชั่วโมง ด้วยวิธีของ AOAC (2000) พร้อมทั้งคำนวณหาปริมาณความชื้น ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างทั้งหมด 2 ซ้ำต่อตัวอย่าง โดยสามารถคำนวณหาปริมาณความชื้นฐานเปียกด้วยสูตรคำนวณ ดังนี้

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%wet basis)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

#### 3.4.2.2 การหาปริมาณน้ำอิสระหรือค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity, $a_w$ )

นำตัวอย่างไปหั่นให้เล็กลง จากนั้นนำไปใส่ใน cup พลาสติกสำหรับใส่ตัวอย่าง แล้วนำไปวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีด้วยเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Benchtop Dew Point Water Activity Meter) ที่อุณหภูมิห้อง  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส โดยทำการวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีทั้งหมดจำนวน 2 ซ้ำต่อตัวอย่าง

#### 3.4.2.3 การหาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total soluble solids, TSS)

นำตัวอย่างไปหั่นหรือลดขนาดให้เล็กลง จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตรสองเท่าของน้ำหนักตัวอย่าง วางทิ้งไว้เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปปั่นให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องปั่นผสมด้วยความเร็วสูง (Homogenizer) แล้วกรองผ่านผ้าขาวบางหนา 2 ชั้น จากนั้นนำของเหลวที่ได้จากการกรองมาวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดด้วยเครื่องวัดดัชนีหักเหแสงหรือเครื่องวัดค่าความหวานแบบดิจิตอล (Digital refractometer) แล้วทำการบันทึกผล จากนั้นคำนวณหาค่า TSS ที่แท้จริงโดยการคูณกลับด้วยค่าคงที่ที่ได้มาจากค่าน้ำหนักตัวอย่างบวกกับปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในการเจือจาง โดยทำการวัดค่า TSS ทั้งหมดจำนวน 2 ซ้ำ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 คุณภาพทางเคมีของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้ง

ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดในผักและผลไม้อบแห้ง ซึ่งจำแนกตามกลุ่มของตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม ได้แก่ ผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Natural dried fruits, Nat), ผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (Osmotic dehydrated fruits, OD) และ ผักและผลไม้อบแห้งแบบฟรียดราย (Freeze-dried fruits and vegetable, FD) แสดงดังตารางที่ 7 พบว่าค่า  $a_w$  และค่า MC ของกลุ่มตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ขณะที่ค่า TSS ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \geq 0.05$ ) โดยตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งแบบฟรียดรายมีค่า  $a_w$  และค่า MC น้อยที่สุด รองลงมาได้แก่ ผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง ขณะที่ตัวอย่างผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติมีค่า  $a_w$  และค่า MC สูงที่สุด แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \geq 0.05$ ) จะเห็นได้ว่าวิธีการทำแห้งและการเตรียมตัวอย่างก่อนการทำแห้ง (Pre-treatment method) มีผลต่อค่า  $a_w$  และค่า MC ของตัวอย่าง เนื่องจากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งซึ่งเป็นการแช่เยือกแข็งแบบรวดเร็ว ส่งผลให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลต่อการถูกทำลายของโครงสร้างของเซลล์ในชั้นอาหารลดลง เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสุญญากาศจะส่งผลให้ความดันลดต่ำกว่าความดันบรรยากาศปกติ เป็นผลให้อุณหภูมิของอาหารลดลงต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของอาหาร แต่น้ำภายในชั้นอาหารยังคงอยู่ในสถานะของเหลว จากนั้นความร้อนจะถูกกำจัดออกจากชั้นอาหาร ส่งผลให้เกิดผลึกน้ำแข็งภายในชั้นอาหาร เมื่อความดันลดลงผลึกน้ำแข็งจะเกิดการระเหิดกลายเป็นไอออกไปจากผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งดึงเอาความชื้นที่เหลืออยู่ออกไปด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความดันไอของน้ำที่บริเวณผิวของอาหารกับความดันไอของน้ำในอากาศ จึงส่งผลให้ค่า  $a_w$  และค่า MC มีค่าต่ำที่สุด (พิสิฐ วงศ์สง่าศรี, 2563; Akkarachaneeyakorn และคณะ, 2021) ในขณะที่การเตรียมตัวอย่างขั้นต้นก่อนการทำแห้งด้วยวิธีออสโมซิสเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนโมเลกุลของน้ำ น้ำตาล และองค์ประกอบอื่นๆ ภายในชั้นอาหาร โดยน้ำจะเคลื่อนออกจากเซลล์ส่งผลให้ปริมาณน้ำภายในชั้นอาหารลดลง ในขณะที่โมเลกุลของน้ำตาลเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นอาหารแทน ซึ่งเป็นขั้นตอนในการดึงน้ำออกบางส่วน ช่วยให้ค่า  $a_w$  และค่า MC ลดลงจากตอนต้น และเมื่อนำไปผ่านกระบวนการทำแห้งโดยใช้ลมร้อนซึ่งช่วยในการระเหยน้ำที่อยู่ภายในชั้นอาหารออกไปมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่า  $a_w$  และค่า MC ลดลงต่ำกว่าการอบแห้งแบบธรรมชาติ เนื่องจากการทำแห้งแบบธรรมชาติไม่ได้มีการนำตัวอย่างไปผ่านขั้นตอนการการเตรียมตัวอย่างขั้นต้นแต่เป็นการนำตัวอย่างไปทำแห้งในทันทีจึงส่งผลให้มีค่า  $a_w$  และค่า MC สูงที่สุด (สุนัน และคณะ, 2020; Pravitha และคณะ, 2022)

ตารางที่ 7 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดในผักและผลไม้อบแห้งจำแนกตามกลุ่มของตัวอย่าง

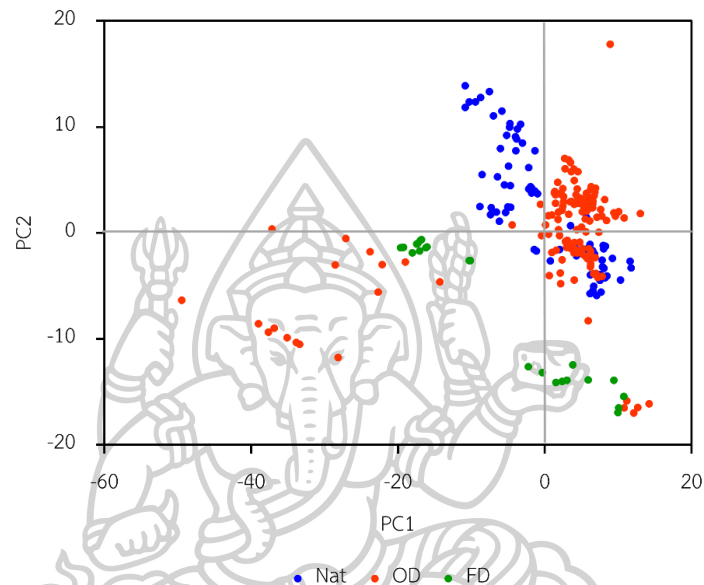
Parameters	กลุ่มของตัวอย่าง	N	Range (Min – Max)	Mean±S.D.	CV (%)
MC (%)	Nat	72	16.26 - 31.21	22.69 ± 4.28 <sup>a</sup>	18.88
	OD	136	1.57 - 39.71	20.68 ± 6.22 <sup>b</sup>	30.09
	FD	24	6.36 - 15.37	9.93 ± 3.42 <sup>c</sup>	34.49
a <sub>w</sub>	Nat	72	0.48 - 0.74	0.60 ± 0.06 <sup>a</sup>	10.33
	OD	136	0.25 - 0.69	0.57 ± 0.08 <sup>ab</sup>	14.25
	FD	24	0.18 - 0.24	0.21 ± 0.02 <sup>c</sup>	7.71
TSS (°Brix) <sup>ns</sup>	Nat	72	63.20 - 89.40	76.96 ± 7.91	10.28
	OD	136	30.93 - 89.30	77.32 ± 10.98	14.20
	FD	24	58.50 - 95.00	79.05 ± 13.62	17.22

หมายเหตุ : Nat คือ ผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Natural dried fruits), OD คือ ผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (Osmotic dehydrated fruits), FD คือ ผักและผลไม้อบแห้งแบบฟรีซดราย (Freeze-dried fruits and vegetable), N คือ จำนวนของตัวอย่าง (Number of samples), Min คือ ค่าน้อยที่สุด (Minimum), Max คือ ค่ามากที่สุด (Maximum), S.D. คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation) ตัวอักษร <sup>a, b, c</sup> ที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน ตัวอักษร <sup>ns</sup> หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \geq 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

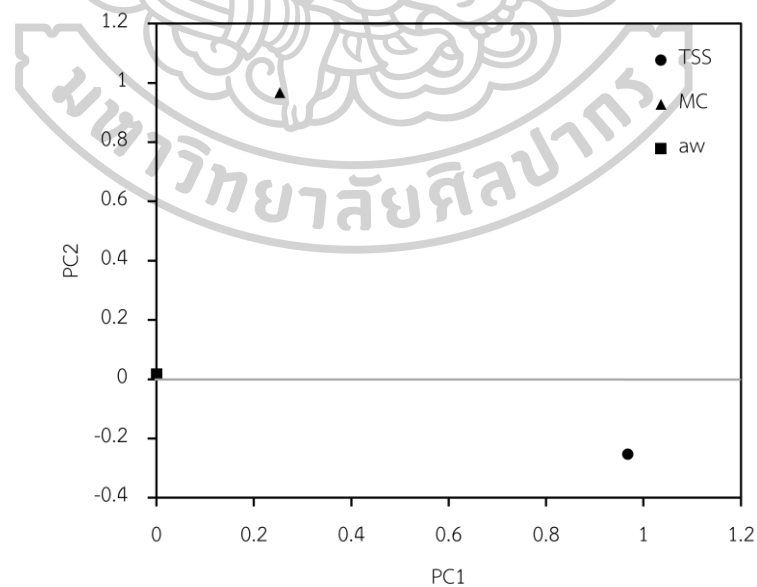
เมื่อนำค่า a<sub>w</sub> ค่า MC และค่า TSS ไปหาความสัมพันธ์ด้วยวิธี Principal component analysis (PCA) เพื่อจัดแบ่งกลุ่มตัวอย่าง พบว่าไม่สามารถจำแนกหรือแบ่งกลุ่มตัวอย่างได้อย่างชัดเจนด้วยค่าทั้งสามนี้สังเกตได้จาก PCA score plot แสดงดังภาพที่ 9 (ก) ที่กลุ่มข้อมูลของตัวอย่างกระจายตัวซ้อนทับกัน เมื่อพิจารณาจาก Loadings plot ดังแสดงในภาพที่ 9 (ข) พบว่าการกระจายตัวของกลุ่มตัวอย่าง Nat ซึ่งพบมากบนแกน PC2 (+) เป็นส่วนใหญ่ (ภาพที่ 9 (ก)) มีความสัมพันธ์กับค่า a<sub>w</sub> และ MC ที่สูง สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยในตารางที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลุ่มตัวอย่าง Nat มีค่า a<sub>w</sub> และ MC ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \geq 0.05$ ) ในขณะที่กลุ่มตัวอย่าง FD ซึ่งกระจาย

ตัวอย่างในแกน PC2 (-) จะมีความสัมพันธ์กับค่า TSS สูงกว่า รองลงมาได้แก่ กลุ่มตัวอย่าง OD และ Nat ตามลำดับ สอดคล้องกับค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง FD ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 58.50 – 95.00 °Brix (ตารางที่ 7)

(ก)



(ข)



ภาพที่ 9 PCA score plot (ก) และ Loadings plot (ข) แสดงการกระจายตัวค่าพารามิเตอร์ทางเคมีของค่า MC,  $a_w$  และ TSS ของกลุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้งทั้ง 3 กลุ่ม

จากวิธีการทำแห้งและความหลากหลายของชนิดตัวอย่างจึงส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์  $a_w$ , MC และ TSS ของตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานั้นมีช่วงของข้อมูลที่กว้างแสดงดังตารางที่ 8 ด้วยเหตุนี้จึงมีความน่าสนใจในการที่จะสร้างสมการเทียบมาตรฐานในการติดตามปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity,  $a_w$ ) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total soluble solids, TSS) ในผักและผลไม้อบแห้งหลายชนิด ซึ่งพบว่ามีค่า MC,  $a_w$  และ TSS อยู่ในช่วง 1.57% - 39.71%, 0.1750 - 0.7374 , 30.9 - 95.0 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 8 โดยพบว่าค่าพารามิเตอร์ MC และ  $a_w$  มีความแปรผันของข้อมูล (CV%) เท่ากับ 32.28% และ 24.74% ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าในกลุ่ม TSS ที่มีค่าเท่ากับ 13.46%

ตารางที่ 8 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดในผักและผลไม้อบแห้งรวมทั้งรวมทั้งหมด 232 ตัวอย่าง

Parameters	N	Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)
MC (%)	232	1.57	39.71	20.19	6.52	32.28
$a_w$	232	0.18	0.74	0.54	0.13	24.74
TSS (°Brix)	232	30.93	95.00	77.38	10.42	13.46

หมายเหตุ : N คือ จำนวนของตัวอย่าง (Number of samples), Min คือ ค่าน้อยที่สุด (Minimum), Max คือ ค่ามากที่สุด (Maximum), S.D. คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation)

#### 4.2 ลักษณะสเปกตรัมของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้ง

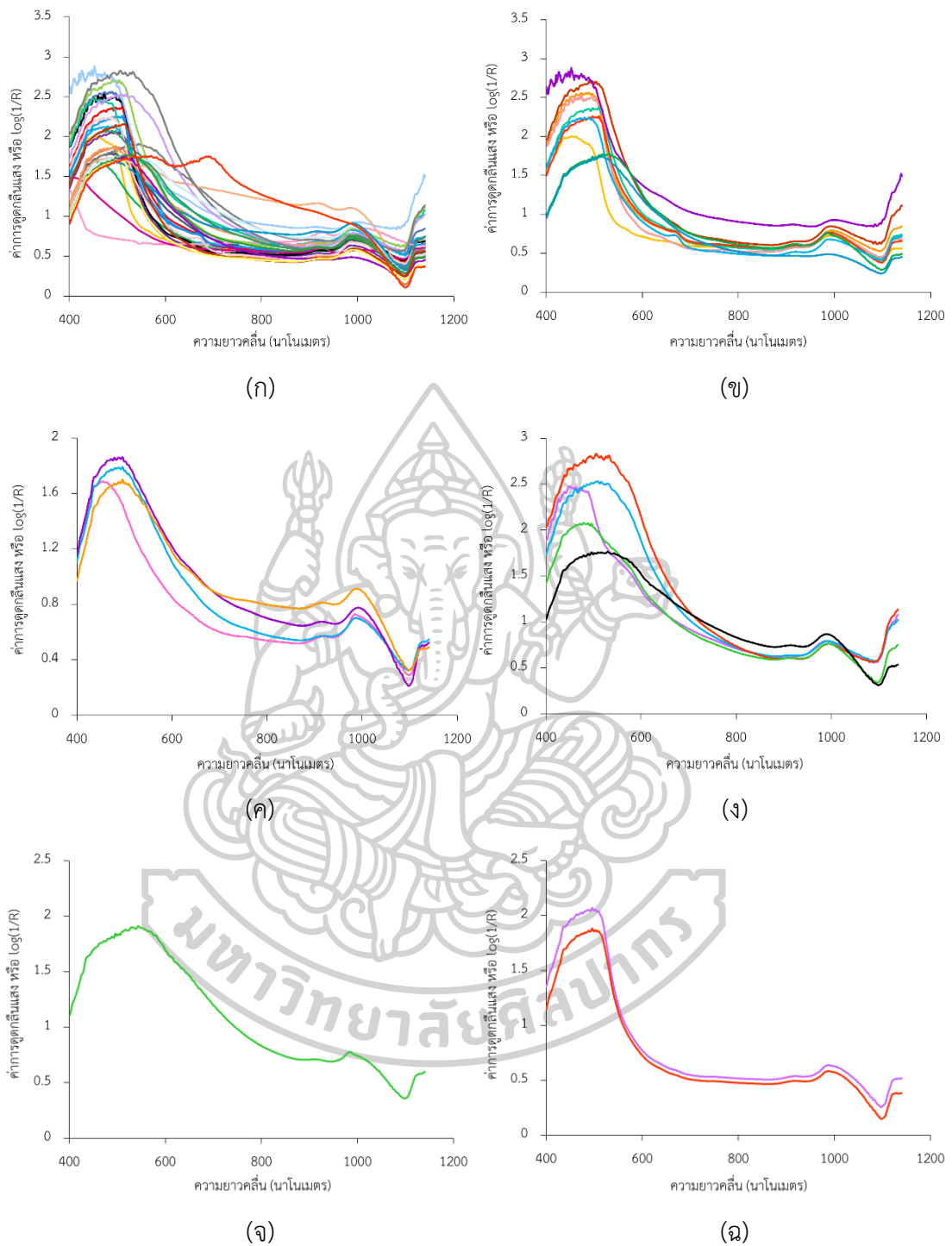
จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้ง พบว่ามีเส้นสเปกตรัมของตัวอย่างในกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติแตกต่างไปจากตัวอย่างที่มาจากยี่ห้อเดียวกันจึงพิจารณาตัดเส้นสเปกตรัมของตัวอย่างออกไปจำนวน 5 เส้นสเปกตรัม สเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นก่อน 400 นาโนเมตร มีสัญญาณรบกวนมากจึงเลือกศึกษาในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-1140 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 25 ในภาคผนวก ง สเปกตรัมดิบ (Raw spectrum) ของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งจำนวน 11 ชนิด ทั้งหมด 29 ยี่ห้อแสดงดังภาพที่ 10 (ก) พบว่าแถบการดูดกลืนของสเปกตรัมบริเวณช่วงความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร ค่อนข้างหลากหลายและชัดเจน ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนของรงควัตถุต่างๆ ที่อยู่ภายในตัวอย่างซึ่งสามารถดูดกลืนแสงในช่วง Visible ได้ เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีความหลากหลายของชนิดผลไม้ซึ่งมีอิทธิพลของด้านสีเข้ามาเกี่ยวข้อง เมื่อศึกษาลักษณะของเส้นสเปกตรัมตามลักษณะปรากฏทางด้านสีของตัวอย่างสามารถแบ่งลักษณะสเปกตรัมตามสีของตัวอย่างได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ กลุ่มตัวอย่างที่มีสีอยู่ในโทนสีเหลือง ส้ม น้ำตาล (มะม่วง, สับปะรด,

กล้วย, ลำไย, ส้ม, มะละกอ, มะปราง, มะยงชิด และทุเรียน) จากรังควัตถุในกลุ่มแคโรทีนอยด์ (400 - 550 นาโนเมตร) และกลุ่มโทนสีซีเขียว (บรอกโคลี) จากกลุ่มคลอโรฟิลล์ (550 - 690 นาโนเมตร) (dos Santos และคณะ, 2013; Li และคณะ, 2013; Ecartot และคณะ, 2013; Choi และคณะ, 2017; Posom และคณะ, 2020) นอกจากนี้จากการศึกษาการติดตามปริมาณรงควัตถุแคโรทีนอยด์ คลอโรฟิลล์ และแอนโทไซยานินสีในผลแอปเปิลของ Merzlyak และคณะ (2003) ด้วยรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับแบบแพร่ (Diffuse reflectance mode) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 800 นาโนเมตร พบแถบการดูดกลืนที่สำคัญของรงควัตถุแคโรทีนอยด์ที่ช่วงความยาวคลื่น 425, 455 และ 480 นาโนเมตร สำหรับรงควัตถุแอนโทไซยานินสีพบที่ช่วงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และรงควัตถุคลอโรฟิลล์พบที่ช่วงความยาวคลื่น 550 - 705 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการดูดกลืนในช่วงกว้างของรงควัตถุคลอโรฟิลล์ เอ และ บี นอกจากนี้จากการรายงานของ Walsh และคณะ (2020) จะพบการดูดกลืนของรงควัตถุสูงกลุ่มแคโรทีนอยด์และแซนโทฟิลล์ (Xanthophylls) ที่ช่วงความยาวคลื่น 420 - 503 นาโนเมตร โดยรงควัตถุเบตา-แคโรทีน (beta-carotene) ซึ่งมีสีเหลืองจนถึงสีส้มแดงสามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุดที่ช่วงความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร ในขณะที่รงควัตถุกลุ่มแซนโทฟิลล์ ลูทีน (Lutein) และไวโอลาแซนทิน (Violaxanthin) สามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุดที่ช่วงความยาวคลื่น 350 - 500 นาโนเมตร ในส่วนของรงควัตถุกลุ่มแอนโทไซยานินสี (Anthocyanins) พบการดูดกลืนแสงที่ช่วง 530 - 550 นาโนเมตร และรงควัตถุกลุ่มคลอโรฟิลล์พบการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร ในทำนองเดียวกัน Wang และคณะ (2014) ศึกษาอิทธิพลของการวัดสีของเปลือกส้มในช่วง Visible ต่อการติดตามปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Soluble solids content, SSC) ด้วยเทคนิค visible-shortwave near infrared (VIS - SWNIR) spectroscopy พบแถบการดูดกลืนของรงควัตถุคลอโรฟิลล์ที่ช่วงความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร และเนื่องจากสีของตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้งที่เลือกนำมาใช้ในการศึกษานั้นค่อนข้างแตกต่างกัน จึงส่งผลให้ที่ช่วงการดูดกลืนบริเวณแถบ Visible นี้มีความโดดเด่นกว่าช่วงแถบการดูดกลืนที่สนใจศึกษากว่าคือ ช่วงแถบการดูดกลืนของน้ำและน้ำตาล

นอกจากนี้จากลักษณะของสเปกตรัมตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งจะพบช่วงการดูดกลืนที่สำคัญอีกหนึ่งช่วงซึ่งเป็นช่วง NIR (700-1140 นาโนเมตร) พบว่ามีช่วงการดูดกลืนหลักที่มีความสัมพันธ์กับการดูดกลืนของพันธะ C-H และ O-H แถบการดูดกลืนดังกล่าวใกล้เคียงกับการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลแบบโอเวอร์โทนอันดับสองของพันธะ O-H (O-H stretching of second overtone) ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างโมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในตัวอย่าง การเกิดโอเวอร์โทนอันดับสามของพันธะ C-H (C-H stretch third overtones) ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับโมเลกุลของน้ำตาลที่พบภายในตัวอย่าง (Osborne, 1993; Bantadjan และคณะ, 2020; Mishra และคณะ, 2021) รวมถึงการเกิดการสั่นแบบคอมบิเนชันของหมู่  $\text{CH}_2$  (combinations of  $\text{CH}_2$  stretching +  $\text{CH}_2$

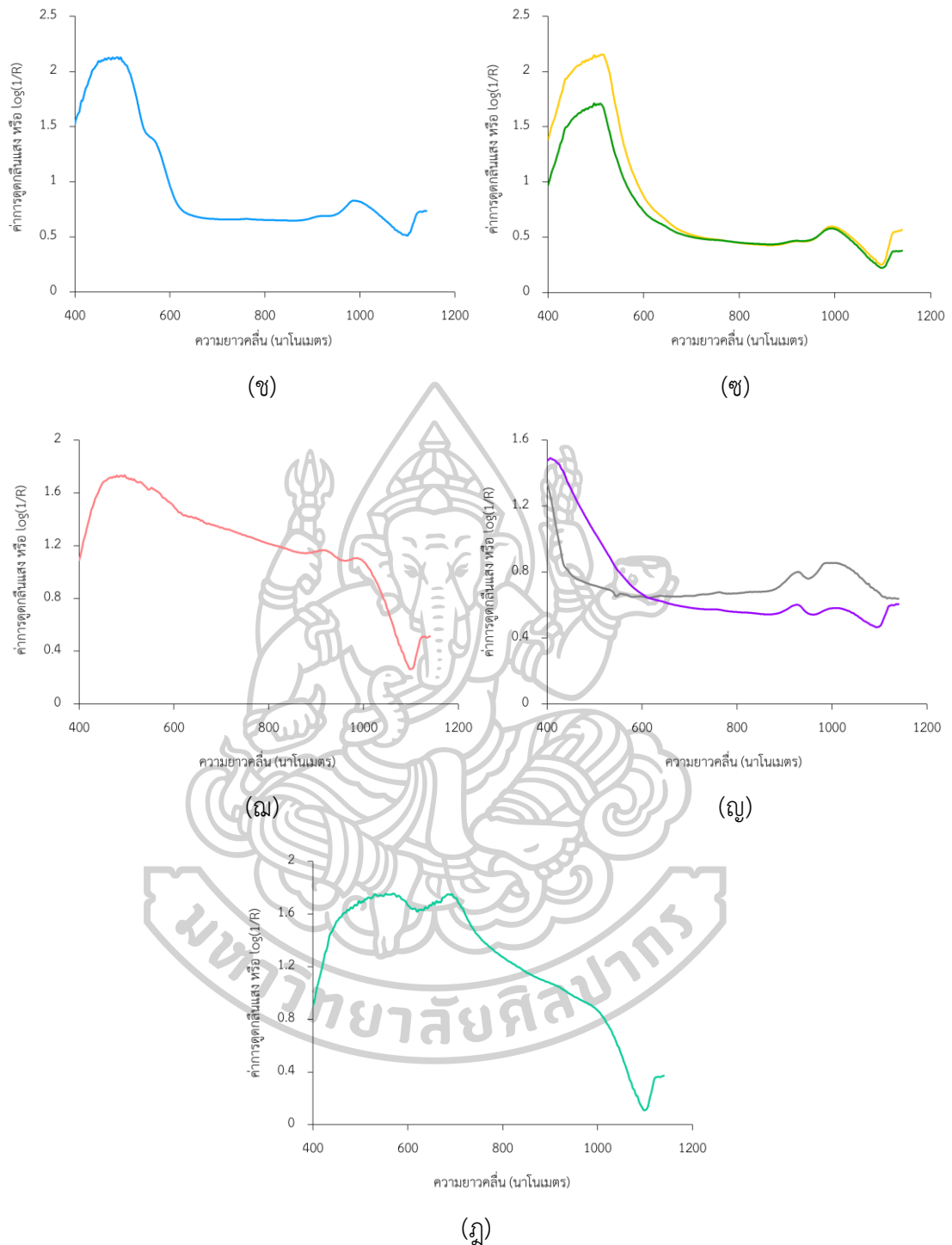
deformation +  $(\text{CH}_2)_n$ ) ซึ่งอาจมีความสัมพันธ์กับโมเลกุลของน้ำตาลที่มีพันธะ C-H เป็นองค์ประกอบหลัก (Mishra และคณะ, 2021; Yang และคณะ, 2021) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิค vis/NIR ในการติดตามปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) ค่าวอเตอร์-แอกติวิตี (Water activity,  $a_w$ ) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total soluble solids, TSS)





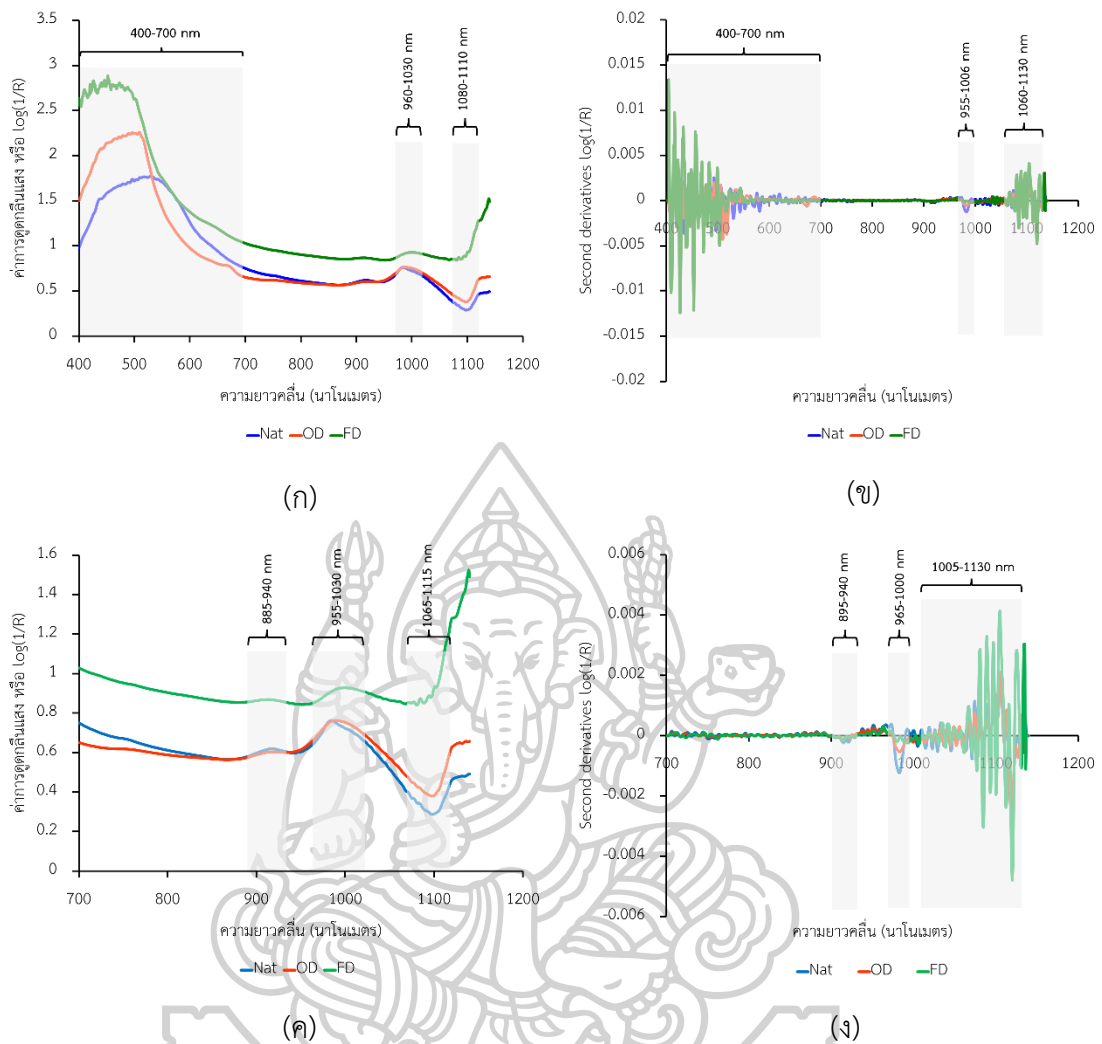
ภาพที่ 10 สเปกตรัมของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งทั้ง 11 ชนิด จำนวน 29 ยี่ห้อ (ก) สเปกตรัมดิบ (Raw spectrum) ที่ความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร (ข) มะม่วง (ค) สับปะรด (ง) กัลย (จ) ลำไย (ฉ) ส้ม (ช) มะละกอ (ซ) มะพร้าวและมะยงชิด (ฅ) ทุเรียน (ณ) มะพร้าว (ฏ) บรอกโคลี





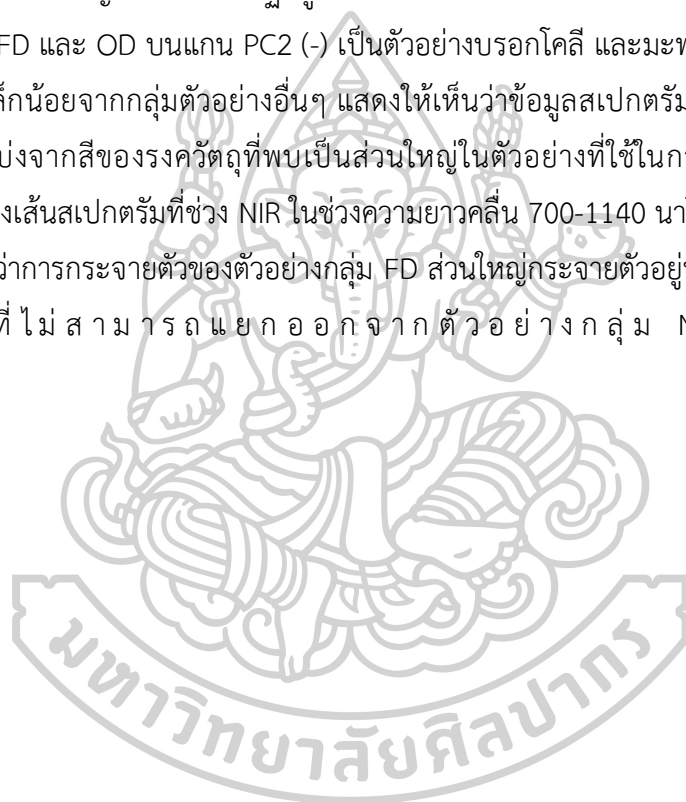
ภาพที่ 10 (ต่อ) สเปกตรัมของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งทั้ง 11 ชนิด จำนวน 29 ยี่ห้อ (ก) สเปกตรัมดิบ (Raw spectrum) ที่ความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร (ข) มะม่วง (ค) สับปะรด (ง) กัลฉ่าย (จ) ลำไย (ฉ) ส้ม (ช) มะละกอ (ซ) มะปรางและมะยงชิด (ฌ) ทูเรียน (ญ) มะพร้าว (ฎ) บรอกโคลี

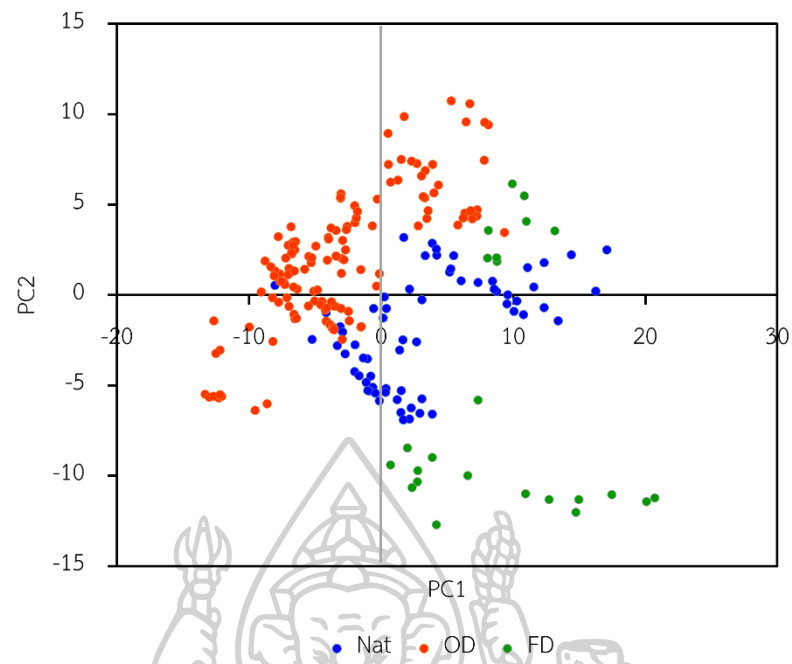
เมื่อพิจารณาเส้นสเปกตรัมเฉลี่ยจากตัวอย่างมะม่วงที่มีกระบวนการทำแห้งทั้งสามวิธี ได้แก่ Nat OD และ FD พบว่าลักษณะของเส้นสเปกตรัมดิบในช่วงความยาวคลื่น vis/NIR มีการดูดกลืนที่สำคัญซึ่งสอดคล้องกับค่า MC,  $a_w$  และ TSS บริเวณ 3 ช่วงความยาวคลื่น ได้แก่ ช่วง 400 - 700, 960 - 1030 และ 1080 - 1110 นาโนเมตร (ภาพที่ 11 (ก)) และเมื่อนำไปปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับเรียบแบบซาวิตซ์กี-โกเลย์พหุนามอันดับสอง จำนวน 9 จุด ร่วมกับการทำอนุพันธ์อันดับสอง (SG-2D 9 pts) เพื่อลดปัญหาการซ้อนทับกันหรือเหลื่อมล้ำกันของพีค ทำให้พีคการดูดกลืนแสงมีความแคบลดลง (ภาพที่ 11 (ข)) ซึ่งจะเห็นช่วงการดูดกลืนที่สำคัญสอดคล้องกับสเปกตรัมดิบ โดยพบว่าบริเวณช่วงการดูดกลืนบริเวณช่วง visible นั้นโดดเด่นกว่าช่วงการดูดกลืนบริเวณ NIR ในขณะที่สเปกตรัมดิบของการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่น NIR พบการดูดกลืนที่บริเวณตำแหน่ง 885 - 940, 955 - 1030 และ 1065 - 1115 นาโนเมตร (ภาพที่ 11 (ค)) และเมื่อนำไปปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับเรียบแบบซาวิตซ์กี-โกเลย์พหุนามอันดับสอง จำนวน 9 จุด ร่วมกับการทำอนุพันธ์อันดับสอง (SG-2D 9 pts) ดังแสดงในภาพที่ 11 (ง) ซึ่งจะเห็นช่วงการดูดกลืนที่สำคัญสอดคล้องกับสเปกตรัมดิบ และสัมพันธ์กับการเกิดโอเวอร์โทนอันดับสามของพันธะ C-H (C-H stretch third overtones) ซึ่งอาจมีความสัมพันธ์กับโมเลกุลของน้ำตาลที่มีพันธะ C-H เป็นองค์ประกอบหลัก (Mishra และคณะ, 2021; Yang และคณะ, 2021) จึงอาจมีความเป็นไปได้ในการติดตามปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในผลิตภัณฑ์อบแห้ง นอกจากนี้แถบการดูดกลืนดังกล่าวใกล้เคียงกับการสั่นของพันธะภายในโมเลกุลแบบโอเวอร์โทนอันดับสองของพันธะ O-H (O-H stretching of second overtone) ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างโมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในตัวอย่าง (Osborne, 1993; Mishra และคณะ, 2021) แม้ว่าผลิตภัณฑ์อบแห้งจะผ่านการทำแห้งเพื่อลดปริมาณน้ำในชิ้นอาหาร แต่ก็ยังคงมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการใช้ติดตามปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี รวมถึงการเกิดการสั่นแบบคอมบิเนชันของหมู่  $\text{CH}_2$  (combinations of  $\text{CH}_2$  stretching +  $\text{CH}_2$  deformation +  $(\text{CH}_2)_n$ ) ตามลำดับ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าลักษณะของเส้นสเปกตรัมจากตัวอย่างเดียวกันแม้จะมีกระบวนการทำแห้งที่ต่างกันแต่ก็มีช่วงความยาวคลื่นของการดูดกลืนที่ไม่แตกต่างกันมาก แต่เมื่อพิจารณาจากกลุ่มตัวอย่าง FD จะพบว่าในช่วงการดูดกลืนต่ำกว่ากลุ่มอื่นๆ เนื่องจากตัวอย่างกลุ่ม FD จะมีปริมาณน้ำที่หลงเหลืออยู่ภายในตัวอย่างน้อยที่สุดส่งผลให้มีการดูดกลืนต่ำกว่ากลุ่มอื่นๆ



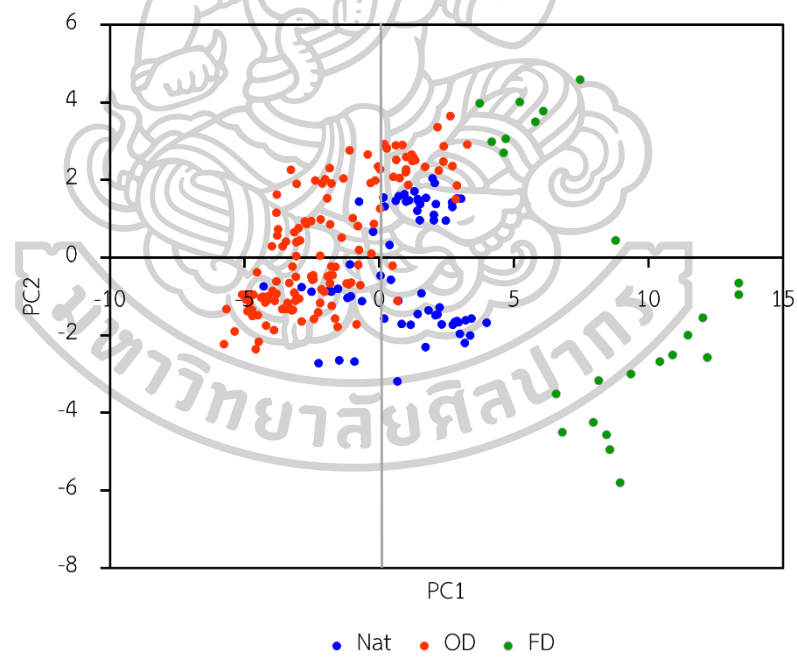
ภาพที่ 11 สเปกตรัมของตัวอย่างมะม่วงอบแห้งที่มีกรรมวิธีการผลิตด้วยวิธีที่แตกต่างกัน  
 (ก) สเปกตรัมดิบช่วง vis-NIR (Raw spectrum) ที่ความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร  
 (ข) สเปกตรัม vis-NIR ที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการปรับเรียบแบบซาวิตซ์กี-โกเลย์พหุนามอันดับสอง  
 จำนวน 9 จุด  
 (ค) สเปกตรัมดิบช่วง NIR (Raw spectrum) ที่ความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร  
 (ง) สเปกตรัม NIR ที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการปรับเรียบแบบซาวิตซ์กี-โกเลย์พหุนามอันดับสอง  
 จำนวน 9 จุด

และเมื่อนำสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน ได้แก่ ช่วง vis/NIR และช่วง NIR ไปหาความสัมพันธ์ด้วยวิธี PCA เพื่อดูความสามารถในการแบ่งกลุ่มตัวอย่างจากกระบวนการทำแห้งที่แตกต่างกัน พบว่าไม่สามารถใช้ลักษณะของเส้นสเปกตรัมจำแนกกลุ่มตัวอย่างที่มีกระบวนการทำแห้งที่ต่างกันได้อย่างชัดเจนสังเกตได้จาก PCA score plot (ภาพที่ 12) เนื่องจากกลุ่มข้อมูลของตัวอย่างกระจายตัวซ้อนทับกัน เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของเส้นสเปกตรัมในช่วง vis-NIR ในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร (ภาพที่ 12 (ก)) การกระจายตัวของข้อมูลส่วนใหญ่บริเวณตรงกลางพบว่าเป็นการกระจายตัวของตัวอย่างจำพวกกล้วย มะม่วง ลำไย ทูเรียน สับปะรด ส้ม มะปราง มะยงชิด ซึ่งตัวอย่างส่วนใหญ่จะมีสีที่ปรากฏอยู่ในโทนสีเหลือง-ส้ม น้ำตาล ในขณะที่การกระจายตัวของตัวอย่างกลุ่ม FD และ OD บนแกน PC2 (-) เป็นตัวอย่างบรอกโคลี และมะพร้าวจึงมีการกระจายตัวแยกออกมาเล็กน้อยจากกลุ่มตัวอย่างอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วง vis/NIR ถูกแบ่งจากสีของรงควัตถุที่พบเป็นส่วนใหญ่ในตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา ในขณะที่การกระจายตัวของเส้นสเปกตรัมในช่วง NIR ในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 12 (ข) พบว่าการกระจายตัวของตัวอย่างกลุ่ม FD ส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่บนแกน PC1 (-) แต่ยังมีบางส่วนที่ไม่สามารถแยกออกจากตัวอย่างกลุ่ม Nat และ OD ได้ดี





(ก) ช่วง vis/NIR (400-1140 nm)



(ข) ช่วง NIR (700-1140 nm)

ภาพที่ 12 PCA score plot แสดงสเปกตรัมของกลุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้งทั้ง 3 กลุ่ม ที่ช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน (ก) ช่วง vis/NIR และ (ข) ช่วง NIR

4.3 การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้สำหรับติดตามปริมาณความชื้น (MC) ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ ) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ในผักและผลไม้อบแห้ง ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 1140 นาโนเมตร และ 700 - 1140 นาโนเมตร

จากการตรวจสอบข้อมูลผิดปกติหรือค่าผิดปกติ (Outliers) ของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของตัวอย่างผักและผลไม้อบแห้งจำนวน 232 ตัวอย่าง พบว่ามีเส้นสเปกตรัมที่ผิดปกติอยู่จำนวน 5 ตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 25 ภาคผนวก ง ดังนั้นจึงตัดข้อมูลสเปกตรัมที่ผิดปกติออกเหลือจำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 227 ตัวอย่าง ในส่วนของค่าทางเคมี ได้แก่ ค่า MC,  $a_w$  และ TSS เมื่อตรวจสอบค่าความผิดปกติโดยใช้วิธีการทดสอบ Hotelling T-squared distribution ซึ่งอาศัยการกระจายตัวของข้อมูลส่วนใหญ่ในการกำหนดเส้นแบ่ง จึงส่งผลให้ข้อมูลที่สำคัญซึ่งมีปริมาณน้อยถูกกำหนดให้เป็นค่าผิดปกติที่อยู่นอกเส้นแบ่ง เนื่องจากการกระจายตัวห่างออกมาจากกลุ่ม (ภาพที่ 26 ภาคผนวก ง) ดังนั้นจึงเลือกพิจารณาค่าผิดปกติในตัวอย่างแต่ละกลุ่มแบบเฉพาะกลุ่มและเฉพาะค่าทางเคมี พบว่าตัวอย่างกลุ่ม Nat พบค่าผิดปกติจำนวน 1 ค่า (ภาพที่ 27 ภาคผนวก ง) ในขณะที่ตัวอย่างกลุ่ม OD (ภาพที่ 28 ภาคผนวก ง) ที่มีข้อมูลที่สำคัญสำหรับการเทียบมาตรฐานในปริมาณน้อยเพื่อให้มีช่วงของข้อมูลที่กว้าง ด้วยเหตุนี้จึงอาศัยการใช้แผนภาพการกระจายระหว่างตัวแปรอิสระและส่วนเหลือ (Residual X-variance plot) มาพิจารณาร่วมด้วย เพื่อตัดค่าผิดปกติที่อาจมีอิทธิพลต่อการสร้างสมการด้วยเทคนิค PLSR จริงออกไป ซึ่งพบค่าผิดปกติจำนวน 2 ค่า ที่ถูกทำเครื่องหมายไว้แสดงดังภาพที่ 29 ภาคผนวก ง ดังนั้นค่าผิดปกติเหล่านี้จึงถูกตัดออกก่อนนำตัวอย่างที่เหลือไปใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

ทั้งนี้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานเพื่อติดตามค่า MC,  $a_w$  และ TSS ทำการสร้างสมการทั้งหมด 6 รูปแบบ ได้แก่ สมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากข้อมูลของผลไม้ในกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Nat), สมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากข้อมูลของผลไม้ในกลุ่มผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (OD), สมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติร่วมกับกลุ่มผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง (Nat+OD), สมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มผลไม้แช่อิ่มอบแห้งร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้อบแห้งแบบฟรีซดราย (OD+FD) และสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มผลไม้อบแห้งทั้งสามกลุ่ม (Nat+OD+FD) โดยในการทวนสอบสมการเทียบมาตรฐานของ Nat และ Nat+FD ใช้การทดสอบแบบภายในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานทั้งหมด (Internal cross-validation) โดยใช้วิธี Leave one-out full cross-validation ในขณะที่สมการเทียบมาตรฐานของ OD,

Nat+OD, OD+FD และ Nat+OD+FD จะถูกทวนสอบสมการด้วยวิธีการทดสอบแบบภายนอกกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (External test set validation หรือ Separated test set) ด้วยอัตราส่วนของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานต่อกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการเท่ากับร้อยละ 67 ต่อร้อยละ 33

#### 4.3.1 ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่า MC ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 1140

##### นาโนเมตร

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานปริมาณความชื้นจากผักและผลไม้อบแห้งทั้ง 11 ชนิด ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 1140 และ 700 - 1140 นาโนเมตร จากตารางที่ 9 พบว่าปริมาณความชื้นของผักและผลไม้อบแห้งของกลุ่มตัวอย่าง Nat, OD, Nat+OD, Nat+FD, OD+FD และ Nat+OD+FD ที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานอยู่ในช่วง 16.26% - 31.21%, 1.57% - 27.72%, 1.57% - 31.21%, 6.36% - 31.21%, 1.57% - 27.72% และ 1.57% - 31.21% ตามลำดับ ซึ่งค่าปริมาณความชื้นในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการมีค่าอยู่ภายในช่วงของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน ทั้งนี้เป็นผลดีต่อสมการเทียบมาตรฐานในการที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายค่า MC ของตัวอย่างในอนาคต นอกจากนี้พบว่าค่าพารามิเตอร์ MC จากกลุ่มตัวอย่าง OD+FD มีความแปรผันของข้อมูล (CV%) มากที่สุดเท่ากับ 37.04% รองลงมาได้แก่ Nat+FD (36.17%), Nat+OD+FD (32.81%), OD (30.53%), Nat+OD (27.23%) และ Nat (18.64%) ตามลำดับ

ตารางที่ 9 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation set) ของปริมาณความชื้น (MC) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร และ 700-1140 นาโนเมตร

กลุ่มตัวอย่าง	Calibration set (67%)					Cross-validation set					Validation set (33%)				
	Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)	Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)	Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)
Nat	16.26	31.21	22.99	4.29	18.64	16.26	31.21	22.99	4.29	18.64					
OD	1.57	27.72	20.43	6.24	30.53						1.68	27.05	20.77	5.62	27.07
Nat+OD	1.57	31.21	21.24	5.78	27.23						1.68	29.89	21.58	5.31	24.59
Nat+FD	6.36	31.21	19.55	7.07	36.17	6.36	31.21	19.55	7.07	36.17					
OD+FD	1.57	27.72	18.86	6.99	37.04						1.68	27.05	19.09	6.64	34.79
Nat+OD+FD (Overall)	1.57	31.21	20.04	6.58	32.81						1.68	29.89	20.33	6.29	30.92

หมายเหตุ : Min คือ ค่าน้อยที่สุด (Minimum), Max คือ ค่ามากที่สุด (Maximum), S.D. คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation)



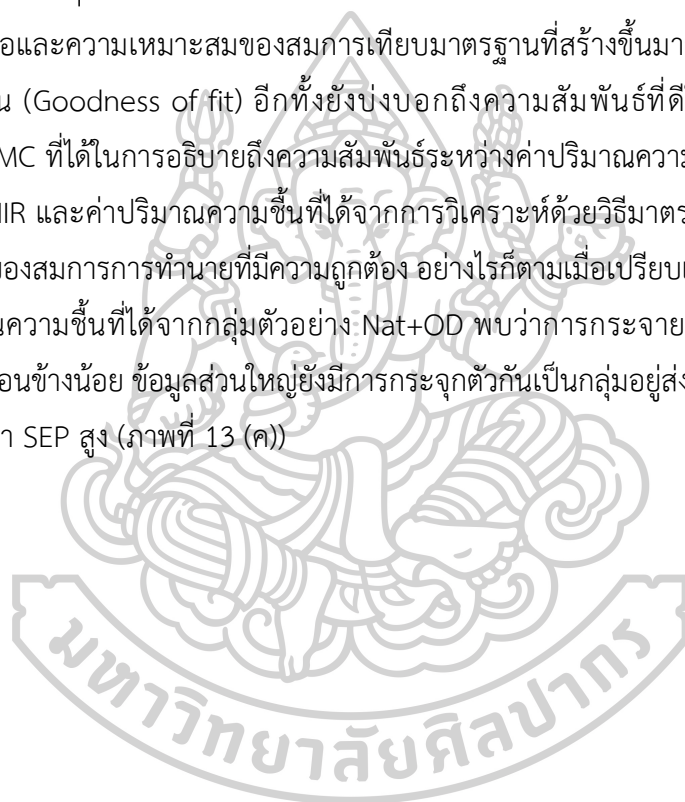
จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับการทำนายปริมาณความชื้นด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร พบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากข้อมูลของกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD โดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน และการปรับแนวโน้มร่วมกับการทำอนุพันธ์อันดับหนึ่งแบบซาวิตซ์กี-โกเลย์พหุนามอันดับสอง จำนวน 9 จุด (SNV + SG-1D 9 pts) เนื่องจากเป็นวิธีที่ช่วยกำจัดอิทธิพลที่เกิดจากการกระเจิงของแสงและลดความผันแปรในด้านของการเคลื่อนตัวของสเปกตรัมแบบเบสไลน์ออฟเซต (Baseline offset) มีความเหมาะสมที่สุดโดยให้ค่า  $R^2$  และ RPD สูงที่สุดเท่ากับ 0.94 และ 3.92 ตามลำดับ ในขณะที่มีค่า SECV ต่ำเท่ากับ 1.81% แสดงดังตารางที่ 10 เมื่อพิจารณาจากค่าทางสถิติ  $R^2$  จากการรายงานของ Williams (2006) ถึงประสิทธิภาพของสมการเทียบมาตรฐานซึ่งแสดงดังตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานประเภทการตรวจคุณภาพและงานประกันคุณภาพได้เนื่องจากมีค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.82-0.90 ขึ้นไป นอกจากนี้จากการรายงานของ Zornoza และคณะ (2008) รายงานว่าค่า RPD เป็นดัชนีทางสถิติที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่ใช้ในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสมการเทียบมาตรฐาน จากค่า RPD ของสมการเทียบมาตรฐานที่ได้ซึ่งมีค่ามากกว่า 3.0 ขึ้นไป สามารถบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพของสมการการทำนายค่า MC ที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD นั้นมีความถูกต้องอยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้ในการทำนายได้ดีมาก อย่างไรก็ตามพบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง Nat+OD ให้ค่า  $R^2$  และ RPD ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.71 และ 1.86 ตามลำดับ ในขณะที่มีค่า SEP สูงเท่ากับ 2.86%

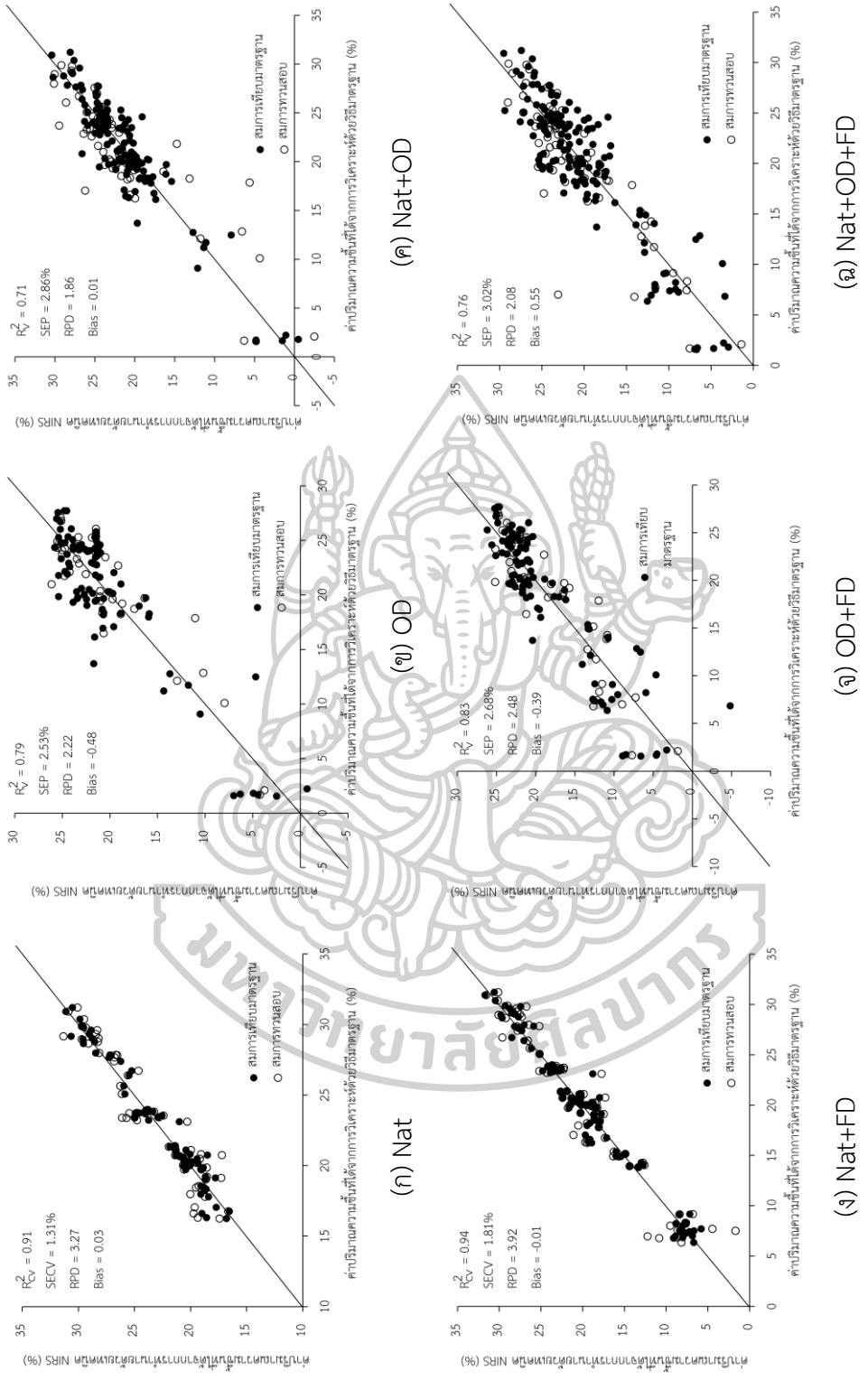
ตารางที่ 10 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation set) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) สำหรับปริมาณความชื้น (MC)

กลุ่มตัวอย่าง	วิธีการ																	
	Calibration set (67%)					Cross-validation set					Validation set (33%)							
ปรับแต่ง สเปกตรัม	LVs	N	$n_c$	$R^2_c$	SEC	$n_{cv}$	$R^2_{cv}$	SECV	Bias	Slope	RPD	$n_v$	$R^2_v$	SEP	Bias	Slope	RPD	
Nat	SNV + SG- 1D 19 pts	8	67	67	0.96	0.89	67	0.91	1.31	0.03	0.91	3.27						
OD	SG-Sm 27 pts + SNV	4	135	91	0.80	2.78						44	0.79	2.53	-0.48	0.87	2.22	
Nat+OD	SG-1D 11 pts	5	202	135	0.80	2.59						67	0.71	2.86	0.01	0.89	1.86	
Nat+FD	SNV + SG- 1D 9 pts	8	91	91	0.97	1.23	91	0.94	1.81	-0.01	0.94	3.92						
OD+FD	SG-1D 21 pts	5	159	107	0.82	2.97						52	0.83	2.68	-0.39	0.79	2.48	
Nat+OD+FD (Overall)	SG-1D 17 pts	5	226	151	0.81	2.89						75	0.76	3.02	0.55	0.78	2.08	

หมายเหตุ : SG-Sm (Savitzky-Golay Smoothing second order polynomial), SNV (Standard normal variate), SG-1D (Savitzky-Golay first derivative second order polynomial), SG-2D (Savitzky-Golay Smoothing second derivative second order polynomial), LVs (Number of Latent variables), N (Number of total samples),  $n_c$  (Number of samples in calibration set),  $n_{cv}$  (Number of samples in cross-validation set),  $n_v$  (Number of samples in validation set),  $R^2_c$  (Coefficients of determination in calibration set),  $R^2_{cv}$  (Coefficients of determination in cross-validation set),  $R^2_v$  (Coefficients of determination in validation set), SEC (Standard error of calibration), SECV (Standard error of cross-validation), SEP (Standard error of prediction), RPD (The ratio of the standard error of performance to standard deviation)

จากภาพที่ 13 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR (Predicted moisture content) และค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (Actual moisture content) ของสมการเทียบมาตรฐานในการทำนายปริมาณความชื้นจากกลุ่มตัวอย่างทั้ง 6 รูปแบบ พบว่าแผนภาพการกระจายที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD มีความสัมพันธ์ที่ดีในเชิงเส้นตรง เนื่องจากข้อมูลเข้าใกล้และมีการกระจายตัวแนวเดียวกับเส้นตรงทแยงมุมหรือเส้นเป้าหมาย (Target line) ที่มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 1 ดังนั้นจึงให้ค่า  $R^2$  ที่อยู่ในระดับที่ดี แสดงดังภาพที่ 13 (ง) เมื่อเทียบกับแผนภาพการกระจายที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างอื่นๆ ซึ่งถ้าหากสมการการทำนายที่ได้ยังมีค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 มากเพียงใดจะบ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือและความเหมาะสมของสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นมาสำหรับการทำนายได้มากเท่านั้น (Goodness of fit) อีกทั้งยังบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่ดีในการใช้สมการเทียบมาตรฐานค่า MC ที่ได้ในการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน และประสิทธิภาพความแม่นยำของสมการการทำนายที่มีความถูกต้อง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของข้อมูลปริมาณความชื้นที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง Nat+OD พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลตลอดเส้นเป้าหมายยังคงค่อนข้างน้อย ข้อมูลส่วนใหญ่ยังมีการกระจุกตัวกันเป็นกลุ่มอยู่ส่งผลให้มีค่า  $R^2$  และ RPD ต่ำที่สุด และค่า SEP สูง (ภาพที่ 13 (ค))

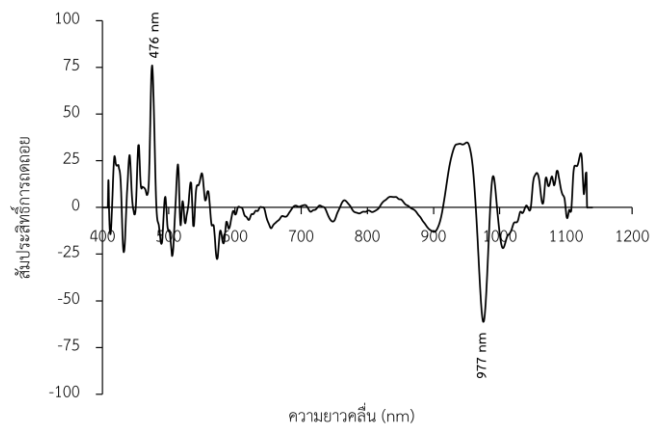




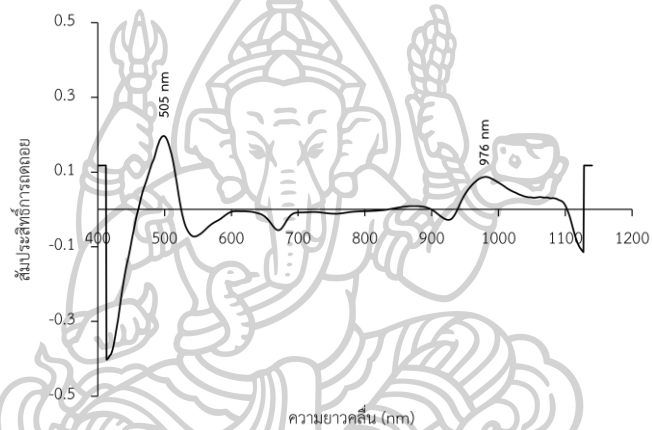
ภาพที่ 13 ลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

จากภาพที่ 14 แสดงสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients plot) ของความยาวคลื่นที่สำคัญสำหรับใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานทำนายค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ 400 - 1140 นาโนเมตร จากแต่ละกลุ่มตัวอย่างมีความยาวคลื่นที่สำคัญซึ่งพบในช่วงเดียวกัน สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณความชื้นที่ได้จากสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วย SNV + SG-1D 9 pts จากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD แสดงดังภาพที่ 14 (ง) พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลและมีความสำคัญต่อแบบจำลองสมการพบที่บริเวณความยาวคลื่น 978 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงของน้ำในช่วงความยาวคลื่น 970 นาโนเมตร เนื่องจากการเกิดโอเวอร์โทนอันดับสองของพันธะ O-H (Second overtone of O-H stretching band) (Osborne, 1993; Rongtong และคณะ, 2018; Özdemir และคณะ, 2018)

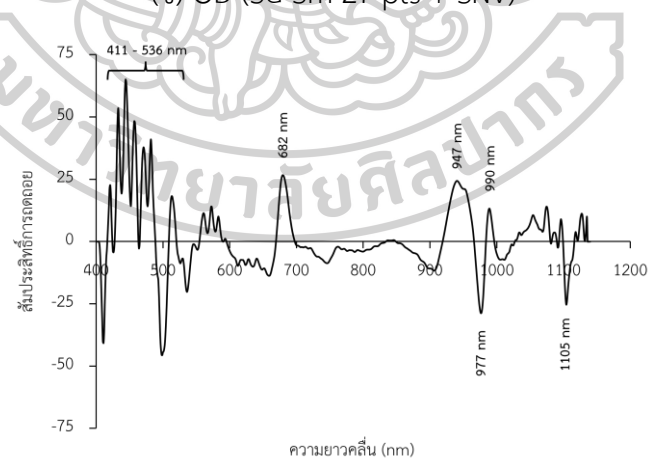




(ก) Nat (SNV + SG-1D 19 pts)

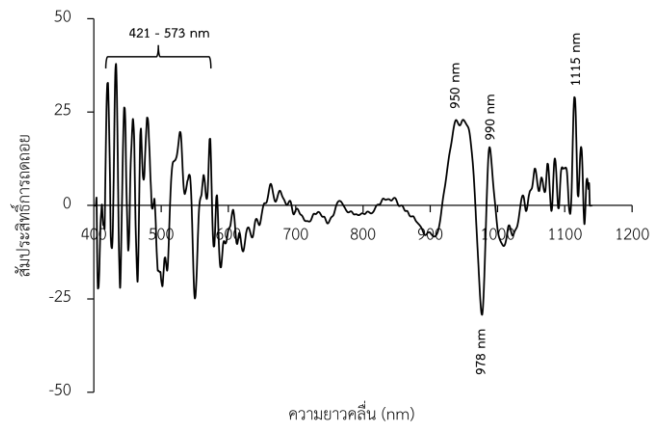


(ข) OD (SG-Sm 27 pts + SNV)

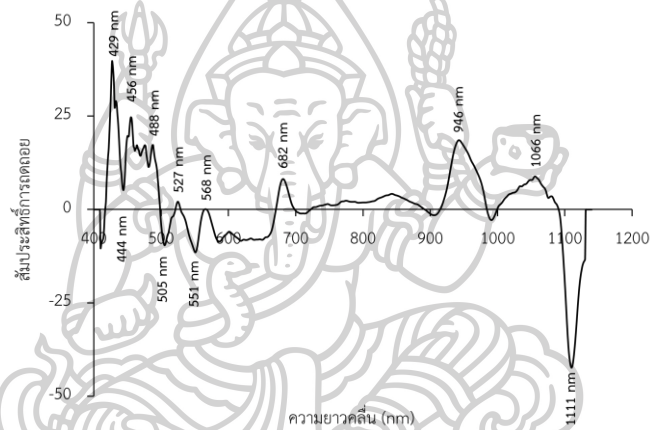


(ค) Nat+OD (SG-1D 11 pts)

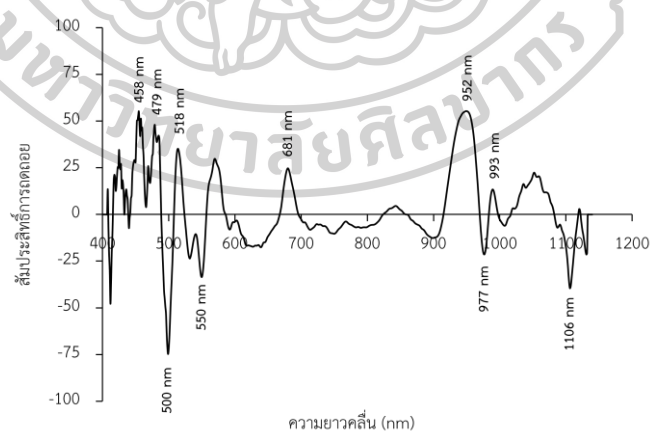
ภาพที่ 14 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับปริมาณความชื้นของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน



(ง) Nat+FD (SNV + SG-1D 9 pts)



(จ) OD+FD (SG-1D 21 pts)



(ข) Nat+OD+FD (SG-1D 17 pts)

ภาพที่ 14 (ต่อ) สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับปริมาณความชื้นของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

สำหรับการประเมินศักยภาพในด้านความถูกต้องของสมการเทียบมาตรฐานปริมาณความชื้น เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) (Animal feeding stuffs, cereals, and milled cereal products - Guidelines for the application of near infrared spectrometry) (รณฤทธิ์ ฤทธิธรม, 2560) พบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากการใช้กลุ่มตัวอย่างที่ต่างกัน ได้แก่ OD, Nat+OD, OD+FD และ Nat+OD+FD เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) ดังนี้

- ✓ ค่า SEP < ค่า  $T_{UE}$
- ✓ ค่า Bias < ค่า  $T_b$
- ✓ ค่า  $t_{obs}$  < ค่า  $t_{(1-\alpha/2)}$

แสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายปริมาณความชื้นทั้งหมดมีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ขณะที่สมการเทียบมาตรฐานการทำนายปริมาณความชื้นจากกลุ่มตัวอย่าง Nat และ Nat+OD ที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Leave one-out full cross-validation ถูกนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample *t*-Test เพื่อเปรียบเทียบว่าค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยจากการทดสอบพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p \geq 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายปริมาณความชื้นจากทั้งสองกลุ่มตัวอย่างมีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้เช่นเดียวกันแสดงดังตารางที่ 11

ด้วยเหตุนี้จึงนำสมการเทียบมาตรฐานสำหรับทำนายปริมาณความชื้นที่ได้มาศึกษาความแม่นยำโดยการทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน ยกเว้นสมการรวม (Nat+OD+FD) ที่นำกลุ่มตัวอย่างเดิมมาลองทำนายสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้น ดังตารางที่ 12 พบว่าสมการรวม (Nat+OD+FD) สามารถใช้ในการทำนายกลุ่มตัวอย่างในแต่ละกลุ่มได้ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพด้านความแม่นยำของสมการที่ถูกสร้างขึ้น ในขณะที่สมการที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่างอื่นๆ ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่าง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากข้อมูลที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานไม่ครอบคลุมตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทำนายดังแสดงในตารางที่ 13



ตารางที่ 11 ผลการประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานที่ให้การทำนายที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่างด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) สำหรับปริมาณความชื้น (MC) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

กลุ่มตัวอย่าง	Bias	$\pm T_b$	Bias < $T_b$	SEP	$T_{UE}$	SEP < $T_{UE}$	$t_{obs}$	$t_{value}$	$t_{obs} < t_{value}$	Application
Nat										Paired-Sample t-Test
OD	-0.48	0.77	✓	2.53	3.43	✓	1.08	2.02	✓	✓
Nat+OD	0.01	0.70	✓	2.86	3.08	✓	1.77	2.00	✓	✓
Nat+FD										Paired-Sample t-Test
OD+FD	-0.39	0.75	✓	2.68	3.61	✓	0.97	2.01	✓	✓
Nat+OD+FD (Overall)	0.55	0.69	✓	3.02	3.39	✓	0.09	1.99	✓	✓

หมายเหตุ : ค่า UECLs หรือค่า  $T_{UE}$  (The unexplained error confidence limits), ค่า  $T_b$  (Bias confidence limits, BCLs หรือค่า  $T_b$ ) และค่า  $t_{obs}$  (The observed t value)

สมการเทียบมาตรฐานในกลุ่มตัวอย่าง Nat และ Nat+FD จะถูกนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample t-Test เพื่อดูความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 12 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ของปริมาณความชื้น (MC) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

กลุ่มตัวอย่าง	ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ถูกนำไปใช้	Prediction set				
		Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)
Nat	OD	1.57	39.71	20.68	6.22	30.09
	FD	6.36	15.37	9.93	3.42	34.49
OD	Nat	16.26	31.21	22.99	4.29	18.64
	FD	6.36	15.37	9.93	3.42	34.49
Nat+OD	FD	6.36	15.37	9.93	3.42	34.49
Nat+FD	OD	1.57	39.71	20.68	6.22	30.09
OD+FD	Nat	16.26	31.21	22.99	4.29	18.64
Nat+OD+FD (Overall)	Nat	16.26	31.21	22.99	4.29	18.64
	OD	1.57	27.72	20.54	6.02	29.33
	FD	6.36	15.37	9.93	3.42	34.49

หมายเหตุ : Min คือ ค่าน้อยที่สุด (Minimum), Max คือ ค่ามากที่สุด (Maximum), S.D. คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่า

สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation)

ตารางที่ 13 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ปริมาณความชื้น (MC) ที่ได้จากการศึกษาความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานในแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

ผลการเทียบมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง	ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้	วิธีการปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	Prediction set					Paired-Sample t-Test
				$R_p^2$	SEP	Bias	Slope	RPD	
Nat	OD	SNV + SG-1D 19 pts	8	-13.51	20.00	-12.67	0.17	0.31	✗
	FD			-3.62	4.96	5.32	0.02	0.69	✗
OD	Nat	SG-Sm 27 pts + SNV	4	-1.83	6.44	-3.20	-1.32	0.67	✗
	FD			-6.83	3.58	8.70	0.46	0.96	✗
Nat+OD	FD	SG-1D 11 pts	5	-8.57	4.54	9.37	0.22	0.75	✗
Nat+FD	OD	SNV + SG-1D 9 pts	8	-10.14	14.54	-14.78	0.20	0.43	✗
OD+FD	Nat	SG-1D 21 pts	5	-1.96	6.52	-3.43	-0.61	0.66	✗
Nat+OD+FD	Nat			0.74	2.17	-0.13	1.16	1.98	✓
(Overall)	OD	SG-1D 17 pts	5	0.76	2.95	0.09	0.93	2.05	✓
	FD			-0.75	4.24	1.56	0.24	0.81	✓

หมายเหตุ : SG-Sm (Savitzky-Golay Smoothing second order polynomial), SNV (Standard normal variate), SG-1D (Savitzky-Golay first derivative second order polynomial), SG-2D (Savitzky-Golay Smoothing second derivative second order polynomial), LVs (Number of Latent variables),  $n_p$  (Number of samples in prediction set),  $R_p^2$  (Coefficients of determination of prediction), SEC (Standard error of calibration), SECV (Standard error of cross-validation), SEP (Standard error of prediction), RPD (The ratio of the standard error of performance to standard deviation)

### 4.3.2 ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่า MC ที่ช่วงความยาวคลื่น 700 - 1140

#### นาโนเมตร

จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับการทำนายปริมาณความชื้นด้วยวิธี PLSR ที่ช่วงความยาวคลื่น 700 - 1140 นาโนเมตร พบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากข้อมูลของกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD โดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยการทำอนุพันธ์อันดับหนึ่งแบบซาวิตซ์กี-โกเลย์พหุนามอันดับสอง จำนวน 19 จุด (SG-1D 19 pts) พบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่ได้มีความเหมาะสมที่สุดโดยให้ค่า  $R^2$  และ RPD สูงที่สุด เท่ากับ 0.96 และ 4.73 ตามลำดับ ในขณะที่มีค่า SECV ต่ำเท่ากับ 1.49% แสดงดังตารางที่ 14 จากการรายงานของ Williams (2006) ถึงประสิทธิภาพของสมการเทียบมาตรฐานโดยพิจารณาจากค่าทางสถิติ  $R^2$  (ตารางที่ 3) แสดงให้เห็นว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานประเภทการตรวจคุณภาพและงานประกันคุณภาพได้เนื่องจากมีค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.82-0.90 ขึ้นไป นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่า RPD ของสมการเทียบมาตรฐานซึ่งมีค่ามากกว่า 3.0 สามารถบ่งบอกได้ว่าประสิทธิภาพของสมการการทำนายค่า MC ที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD นั้นมีความถูกต้องอยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้ในการทำนายได้ดีมาก (Zornoza และคณะ, 2008) อย่างไรก็ตามพบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง Nat+OD ให้ค่า  $R^2$  และ RPD ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.79 และ 2.19 ตามลำดับ ในขณะที่มีค่า SEP สูงเท่ากับ 2.43% เมื่อเปรียบเทียบกับสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นจากช่วงความยาวคลื่น 400 - 1140 นาโนเมตร (vis/NIR) พบว่าสมการเทียบมาตรฐานทั้ง 6 รูปแบบจากช่วงความยาวคลื่น NIR ให้ผลการทำนายปริมาณความชื้นที่ดีกว่าทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานในช่วง vis/NIR ได้รับอิทธิพลจากช่วงความยาวคลื่น Visible (400 - 700 นาโนเมตร) ที่เกี่ยวข้องกับรงควัตถุที่พบในตัวอย่างมากกว่า ดังจะเห็นได้จากสัมประสิทธิ์การถดถอยของความยาวคลื่นที่สำคัญที่พบในแต่ละสมการเทียบมาตรฐานทั้ง 6 รูปแบบดังภาพที่ 16

จากการศึกษาของ Bobasa และคณะ (2021) วิเคราะห์ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์คาคาดูพลัม (Kakadu plum) แบบผงและแบบสารละลายเข้มข้น (puree) ด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีแบบพกพา (Hand-held near infrared spectroscopy) ในช่วงความยาวคลื่น 950 - 1600 นาโนเมตร ด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ พบว่าสมการที่ได้มีค่า  $R^2$ , SEP และ RPD เท่ากับ 0.71 และ 0.86, 0.59% และ 0.68%, และ 2.2 และ 2.8 สำหรับผลิตภัณฑ์คาคาดูพลัมแบบผงและแบบสารละลายเข้มข้น ตามลำดับ นอกจากนี้ Özdemir และคณะ (2018) ใช้เทคนิค FT-NIRS ในการติดตามปริมาณความชื้นในแอปเปิ้ลอบแห้งแบบทั้งผลซึ่งผ่านการเติมสารกลุ่มซัลไฟต์ ที่ช่วงความยาวคลื่น

833 - 2500 นาโนเมตร ด้วยรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับแบบแพร่ พบว่าสมการทำนายปริมาณความชื้นที่ได้ให้ผลการทำนายที่ดีเช่นเดียวกันโดยมีค่า  $R^2$ , RMSEP และ RPD เท่ากับ 0.986, 1.22% และ 9.15 ตามลำดับ

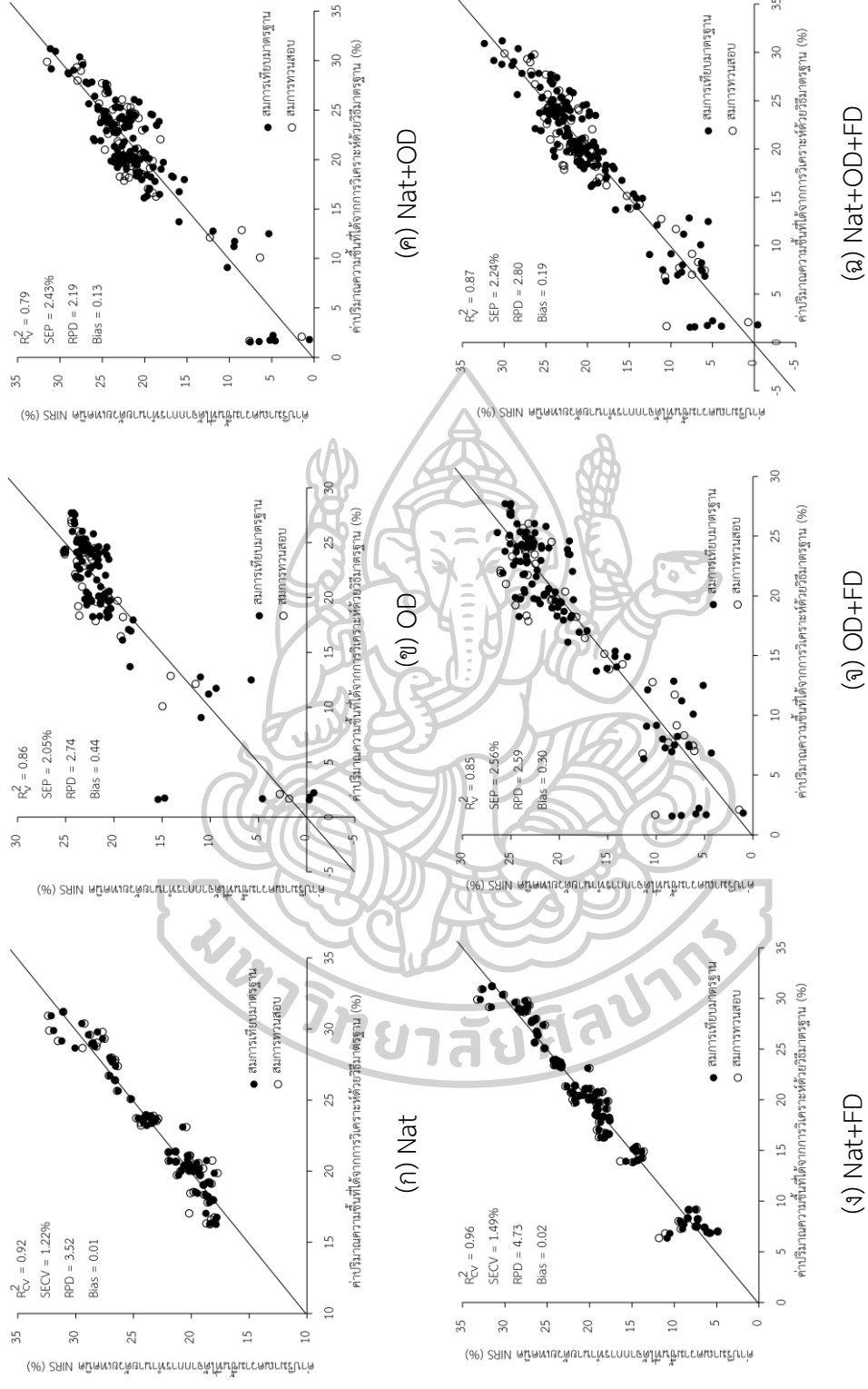


ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Validation set) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) สำหรับปริมาณความชื้น (MC)

กลุ่มตัวอย่าง	วิธีการ			Calibration set (67%)						Cross-validation set						Validation set (33%)					
	ปรับแต่ง	LVs	N	$n_c$	$R^2_c$	SEC	$n_{cv}$	$R^2_{cv}$	SECV	Bias	Slope	RPD	$n_v$	$R^2_v$	SEP	Bias	Slope	RPD			
Nat	SG-1D 15 pts	6	67	67	0.95	0.99	67	0.92	1.22	0.01	0.92	3.52									
OD	SNV+SG- 1D 9 pts	4	135	91	0.77	2.97							44	0.86	2.05	0.44	0.83	2.74			
Nat+OD	SG-Sm 3 pts	8	202	135	0.82	2.45							67	0.79	2.43	0.13	0.81	2.19			
Nat+FD	SG-1D 19 pts	6	91	91	0.97	1.31	91	0.96	1.49	0.02	0.96	4.73									
OD+FD	SG-1D 9 pts	6	159	107	0.87	2.55							52	0.85	2.56	0.30	0.89	2.59			
Nat+OD+FD (Overall)	SG-1D 7 pts	7	226	151	0.89	2.21							75	0.87	2.24	0.19	0.86	2.80			

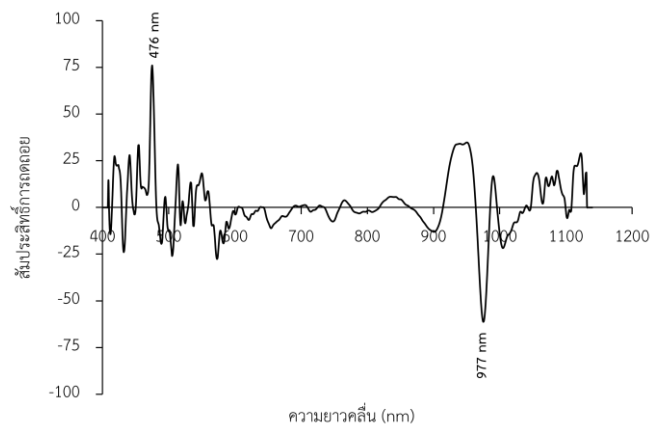
หมายเหตุ : SG-Sm (Savitzky-Golay Smoothing second order polynomial), SNV (Standard normal variate), SG-1D (Savitzky-Golay first derivative second order polynomial), SG-2D (Savitzky-Golay Smoothing second derivative second order polynomial), LVs (Number of Latent variables), N (Number of total samples),  $n_c$  (Number of samples in calibration set),  $n_{cv}$  (Number of samples in cross-validation set),  $n_v$  (Number of samples in validation set),  $R^2_c$  (Coefficients of determination in calibration set),  $R^2_{cv}$  (Coefficients of determination in cross-validation set),  $R^2_v$  (Coefficients of determination in validation set), SEC (Standard error of calibration), SECV (Standard error of cross-validation), SEP (Standard error of prediction), RPD (The ratio of the standard error of performance to standard deviation)

จากภาพที่ 15 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของสมการเทียบมาตรฐานในการทำนายปริมาณความชื้นจากกลุ่มตัวอย่างทั้ง 6 รูปแบบ พบว่าแผนภาพการกระจายที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD มีความสัมพันธ์ที่ดีในเชิงเส้นตรง เนื่องจากข้อมูลเข้าใกล้และมีการกระจายตัวตลอดแนวกับเส้นเป้าหมาย (Target line) ที่มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 1 ดังนั้นจึงให้ค่า  $R^2$  ที่อยู่ในระดับที่ดี แสดงดังภาพที่ 15 (ง) เมื่อเทียบกับแผนภาพการกระจายที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างอื่นๆ ซึ่งถ้าหากสมการการทำนายที่ได้ยังมีค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 มากเพียงใด จะบ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือและความเหมาะสมของสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นมาสำหรับใช้ในการทำนายได้มากเท่านั้น (Goodness of fit) อีกทั้งยังบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่ดีในการใช้สมการเทียบมาตรฐานค่า MC ที่ได้ในการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน และประสิทธิภาพความแม่นยำของสมการการทำนายที่มีความถูกต้อง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของข้อมูลปริมาณความชื้นที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง Nat+OD พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลตลอดเส้นเป้าหมายยังค่อนข้างน้อย และมีบางส่วนที่กระจายออกจากเส้นเป้าหมาย นอกจากนี้ข้อมูลส่วนใหญ่ยังมีการกระจุกตัวกันเป็นกลุ่มส่งผลให้มีค่า  $R^2$  และ RPD ต่ำที่สุด และค่า SEP สูง (ภาพที่ 15 (ค)) สำหรับสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients plot) แสดงดังภาพที่ 16 ของความยาวคลื่นที่สำคัญสำหรับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานทำนายค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ 700-1140 นาโนเมตร จากแต่ละกลุ่มตัวอย่างพบว่ามีความยาวคลื่นที่สำคัญซึ่งพบในช่วงเดียวกัน สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการการทำนายปริมาณความชื้นที่ได้จากสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วย SG-1D 19 pts จากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD แสดงดังภาพที่ 16 (ง) พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลและมีความสำคัญต่อแบบจำลองสมการการทำนายปริมาณความชื้นพบที่บริเวณความยาวคลื่น 955 และ 980 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการดูดกลืนแสงของน้ำ จากการเกิดโอเวอร์โทนอันดับสองของพันธะ O-H (Second overtone of O-H stretching band) (Osborne, 1993; Pan และคณะ, 2015; Rongtong และคณะ, 2018; Özdemir และคณะ, 2018)

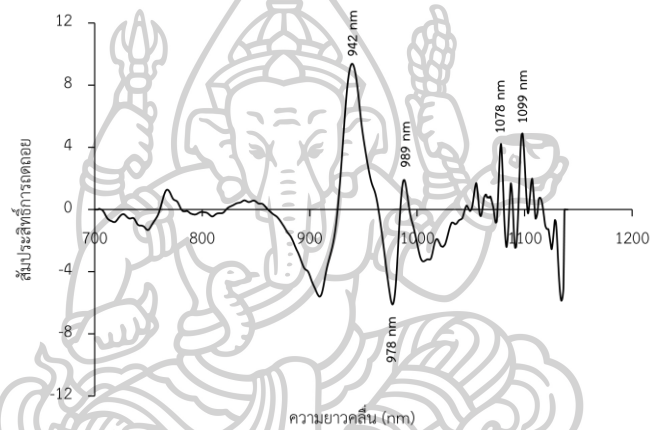


ภาพที่ 15 ลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

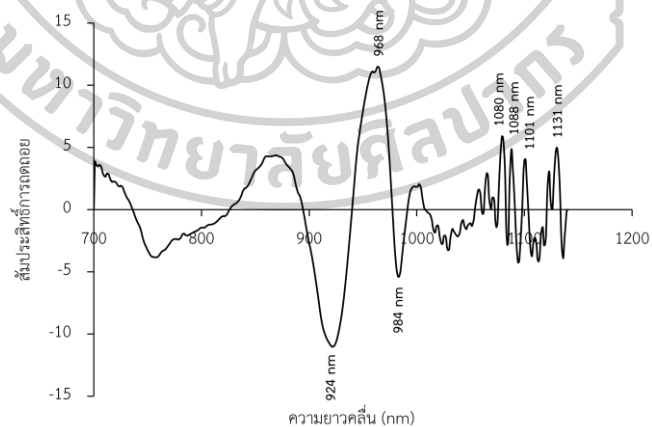




(ก) Nat (SG-1D 15 pts)

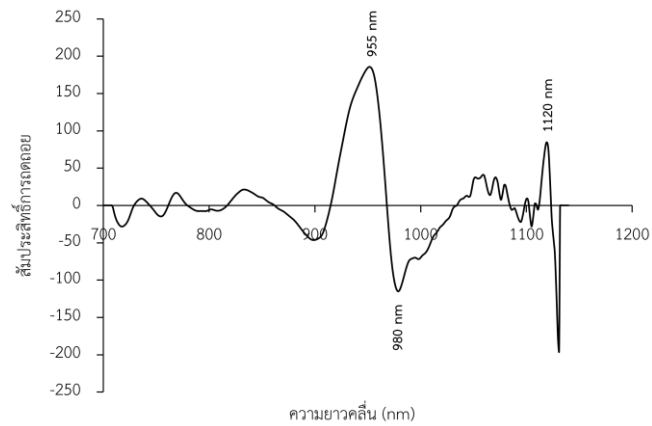


(ข) OD (SNV+SG-1D 9 pts)

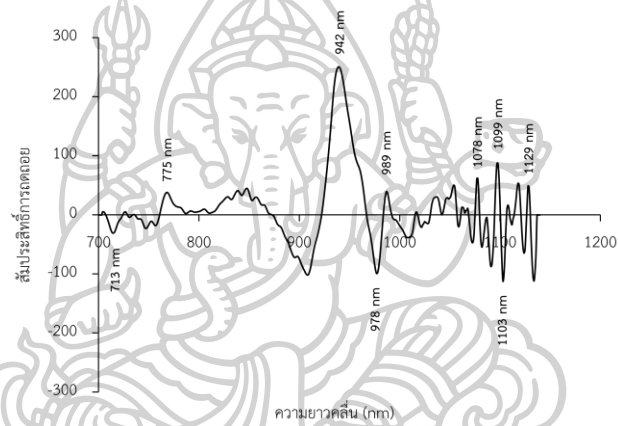


(ค) Nat+OD (SG-Sm 3 pts)

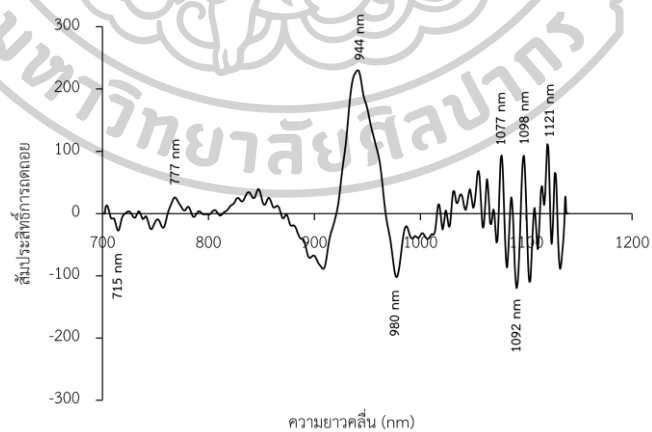
ภาพที่ 16 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับปริมาณความชื้นของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน



(ง) Nat+FD (SG-1D 19 pts)



(จ) OD+FD (SG-1D 9 pts)



(ฉ) Nat+OD+FD (SG-1D 7 pts)

ภาพที่ 16 (ต่อ) สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับปริมาณความชื้นของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

สำหรับการประเมินศักยภาพในด้านความถูกต้องของสมการเทียบมาตรฐานปริมาณความชื้นเพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) พบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากแต่ละกลุ่มตัวอย่างที่ต่างกัน ได้แก่ OD, Nat+OD, OD+FD และ Nat+OD+FD เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) ดังนี้

- ✓ ค่า SEP < ค่า  $T_{UE}$
- ✓ ค่า Bias < ค่า  $T_b$
- ✓ ค่า  $t_{obs}$  < ค่า  $t_{(1-\alpha/2)}$

แสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายปริมาณความชื้นในช่วงความยาวคลื่น 700 – 1140 นาโนเมตรทั้งหมดมีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่นเดียวกับกับสมการเทียบมาตรฐานการทำนายปริมาณความชื้นจากกลุ่มตัวอย่าง Nat และ Nat+OD ที่สร้างขึ้นด้วย Leave one-out full cross-validation แล้วนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample t-Test เพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าความผิดพลาดที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานมีความแตกต่างกันหรือไม่ จากการทดสอบพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p \geq 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายปริมาณความชื้นจากทั้งสองกลุ่มตัวอย่างมีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้ แสดงดังตารางที่ 15

จากการประเมินศักยภาพในด้านความถูกต้องของสมการเทียบมาตรฐานปริมาณความชื้นซึ่งพบว่าให้ผลที่ดีจึงนำสมการเทียบมาตรฐานที่ได้ไปศึกษาความแม่นยำโดยการทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน ยกเว้นสมการรวม (Nat+OD+FD) ที่นำกลุ่มตัวอย่างเดิมมาลองทำนายสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้น ดังตารางที่ 16 พบว่าสมการรวม (Nat+OD+FD) สามารถใช้ในการทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่างในแต่ละกลุ่มได้ทั้งหมดซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้น ในขณะที่สมการที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง Nat และ OD สามารถนำไปใช้ในการทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่างของกันและกันได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าหากมีสมการเทียบมาตรฐานปริมาณความชื้นที่สร้างจากข้อมูลของตัวอย่างกลุ่ม Nat หรือ OD เพียงสมการใดสมการหนึ่งแล้วต้องการนำไปประยุกต์ใช้ในการติดตามปริมาณความชื้นในผลไม้อบแห้งกลุ่ม Nat และ OD ก็สามารถนำไปใช้ในการทำนายตัวอย่างจากทั้งสองกลุ่มได้ดังแสดงในตารางที่ 17

ตารางที่ 15 ผลการประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานที่ใช้การกำหนดค่าที่สูงสุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่างด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) สำหรับปริมาณความชื้น (MC) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

กลุ่มตัวอย่าง	Bias	$\pm T_b$	Bias < $T_b$	SEP	$T_{UE}$	SEP < $T_{UE}$	$t_{obs}$	$t_{value}$	$t_{obs} < t_{value}$	Application
Nat										Paired-Sample t-Test
OD	0.44	0.62	✓	2.05	3.67	✓	0.64	2.02	✓	✓
Nat+OD	0.13	0.59	✓	2.43	2.90	✓	0.44	2.00	✓	✓
Nat+FD										Paired-Sample t-Test
OD+FD	0.30	0.71	✓	2.56	3.10	✓	0.80	2.01	✓	✓
Nat+OD+FD	0.19	0.52	✓	2.24	2.60	✓	0.40	1.99	✓	✓
(Overall)										

หมายเหตุ : ค่า UECLs หรือค่า  $T_{UE}$  (The unexplained error confidence limits), ค่า  $T_b$  (Bias confidence limits, BCLs หรือค่า  $T_b$ ) และค่า  $t_{obs}$  (The observed t value)

สมการเทียบมาตรฐานในกลุ่มตัวอย่าง Nat และ Nat+FD จะถูกนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample t-Test เพื่อดูความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 16 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ของปริมาณความชื้น (MC) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

กลุ่มตัวอย่าง	ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ถูกนำไปใช้	Prediction set				
		Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)
Nat	OD	1.57	39.71	20.68	6.22	30.09
	FD	6.36	15.37	9.93	3.42	34.49
OD	Nat	16.26	31.21	22.99	4.29	18.64
	FD	6.36	15.37	9.93	3.42	34.49
Nat+OD	FD	6.36	15.37	9.93	3.42	34.49
Nat+FD	OD	1.57	39.71	20.68	6.22	30.09
OD+FD	Nat	16.26	31.21	22.99	4.29	18.64
Nat+OD+FD (Overall)	Nat	16.26	31.21	22.99	4.29	18.64
	OD	1.57	27.72	20.54	6.02	29.33
	FD	6.36	15.37	9.93	3.42	34.49

หมายเหตุ : Min คือ ค่าน้อยที่สุด (Minimum), Max คือ ค่ามากที่สุด (Maximum), S.D. คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่า

สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation)

ตารางที่ 17 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ปริมาณความชื้น (MC) ที่ได้จากการศึกษาความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานในแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

สมการเทียบมาตรฐาน ของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง	ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ ถูกนำไปใช้ในการทำนาย	วิธีการปรับแต่ง สเปกตรัม	LVs	Prediction set				Paired- Sample t- Test		
				$n_p$	$R_p^2$	SEP	Bias		Slope	RPD
Nat	OD	SG-1D 15 pts	6	136	0.63	3.79	0.02	0.52	1.64	✓
	FD			24	-0.42	3.74	1.59	0.07	0.92	✗
OD	Nat	SNV+SG-1D 9 pts	4	67	0.30	3.56	0.61	0.22	1.21	✓
	FD			24	-12.60	2.28	12.16	0.61	1.50	✗
Nat+OD	FD	SG-Sm 3 pts	8	24	-0.19	3.40	1.51	1.32	1.01	✗
Nat+FD	OD	SG-1D 19 pts	6	136	0.62	3.65	-1.11	0.70	1.70	✗
OD+FD	Nat	SG-1D 9 pts	6	67	0.47	2.65	-1.62	0.59	1.62	✗
Nat+OD+FD (Overall)	Nat	SG-1D 7 pts	7	67	0.88	1.46	0.01	0.87	2.94	✓
	OD			135	0.82	2.58	0.05	0.82	2.33	✓
	FD			24	0.72	1.80	0.29	0.85	1.90	✓

หมายเหตุ : SG-Sm (Savitzky-Golay Smoothing second order polynomial), SNV (Standard normal variate), SG-1D (Savitzky-Golay first derivative second order polynomial), SG-2D (Savitzky-Golay Smoothing second derivative second order polynomial), LVs (Number of Latent variables),  $n_p$  (Number of samples in prediction set),  $R_p^2$  (Coefficients of determination of prediction), SEC (Standard error of calibration), SECV (Standard error of cross-validation), SEP (Standard error of prediction), RPD (The ratio of the standard error of performance to standard deviation)

### 4.3.3 ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่า $a_w$ ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 1140

#### นาโนเมตร

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่าแอมพลิจูดแอกติวิตีจากผักและผลไม้อบแห้งทั้ง 11 ชนิด ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 1140 และ 700 - 1140 นาโนเมตร จากตารางที่ 18 พบว่าปริมาณความชื้นของผักและผลไม้อบแห้งของกลุ่มตัวอย่าง Nat, OD, Nat+OD, Nat+FD, OD+FD และ Nat+OD+FD ที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานอยู่ในช่วง 0.48 - 0.74, 0.25 - 0.69, 0.25 - 0.74, 0.18 - 0.74, 0.18 - 0.69 และ 0.18 - 0.74 ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานควรจะต้องมีค่าสูงสุดและต่ำสุด เพื่อให้ครอบคลุมข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ ทั้งนี้เป็นผลดีต่อสมการเทียบมาตรฐานในการที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายค่า  $a_w$  ของตัวอย่างในอนาคต นอกจากนี้พบว่าค่าพารามิเตอร์  $a_w$  ที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานจากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD มีความแปรผันของข้อมูล (CV%) มากที่สุดเท่ากับ 36.43% รองลงมาได้แก่ OD+FD (29.45%), Nat+OD+FD (25.51%), OD (15.17%), Nat+OD (14.05%) และ Nat (10.69%) ตามลำดับ

จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับการทำนายค่าแอมพลิจูดแอกติวิตีด้วยเทคนิคการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (PLSR) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร พบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากข้อมูลของกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD โดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแก้ด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน และการปรับแนวโน้มร่วมกับการทำอนุพันธ์อันดับหนึ่งแบบซาวิตซ์กี-โกเลย์พหุนามอันดับสอง จำนวน 7 จุด (SNV + SG-1D 7 pts) มีความเหมาะสมที่สุดโดยให้ค่า  $R^2$  และ RPD สูงที่สุด เท่ากับ 0.93 และ 3.71 ตามลำดับ ในขณะที่มีค่า SECV ต่ำเท่ากับ 0.05 แสดงดังตารางที่ 19 เมื่อพิจารณาจากค่าทางสถิติ  $R^2$  จากการรายงานของ Williams (2006) ถึงประสิทธิภาพของสมการเทียบมาตรฐานซึ่งแสดงดังตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานประเภทการตรวจคุณภาพและงานประกันคุณภาพได้เนื่องจากมีค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.82-0.90 ขึ้นไป นอกจากนี้จากการรายงานของ Zornoza และคณะ (2008) รายงานว่าค่า RPD ที่มีค่าตั้งแต่ 3.0 ขึ้นไป สามารถบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพของสมการการทำนายค่า  $a_w$  ที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD นั้นมีความถูกต้องอยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้ในการทำนายได้ดีมาก อย่างไรก็ตามพบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง OD ให้ค่า  $R^2$  และ RPD ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.75 และ 1.98 ตามลำดับ

ตารางที่ 18 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation set) ของค่าออร์เตอร์แอดคิวิตี ( $a_{11}$ ) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร และ 700-1140 นาโนเมตร

กลุ่มตัวอย่าง	Calibration set (67%)					Cross-validation set					Validation set (33%)				
	Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)	Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)	Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)
Nat	0.48	0.74	0.60	0.06	10.69	0.48	0.74	0.60	0.06	10.69					
OD	0.25	0.69	0.56	0.09	15.17						0.28	0.69	0.57	0.07	12.35
Nat+OD	0.25	0.74	0.57	0.08	14.05						0.28	0.71	0.58	0.07	11.80
Nat+FD	0.18	0.74	0.49	0.18	36.43	0.18	0.74	0.49	0.18	36.43					
OD+FD	0.18	0.69	0.51	0.15	29.45						0.20	0.69	0.52	0.14	27.90
Nat+OD+FD (Overall)	0.18	0.74	0.54	0.14	25.51						0.20	0.71	0.54	0.13	24.12

หมายเหตุ : Min คือ ค่าน้อยที่สุด (Minimum), Max คือ ค่ามากที่สุด (Maximum), S.D. คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation)



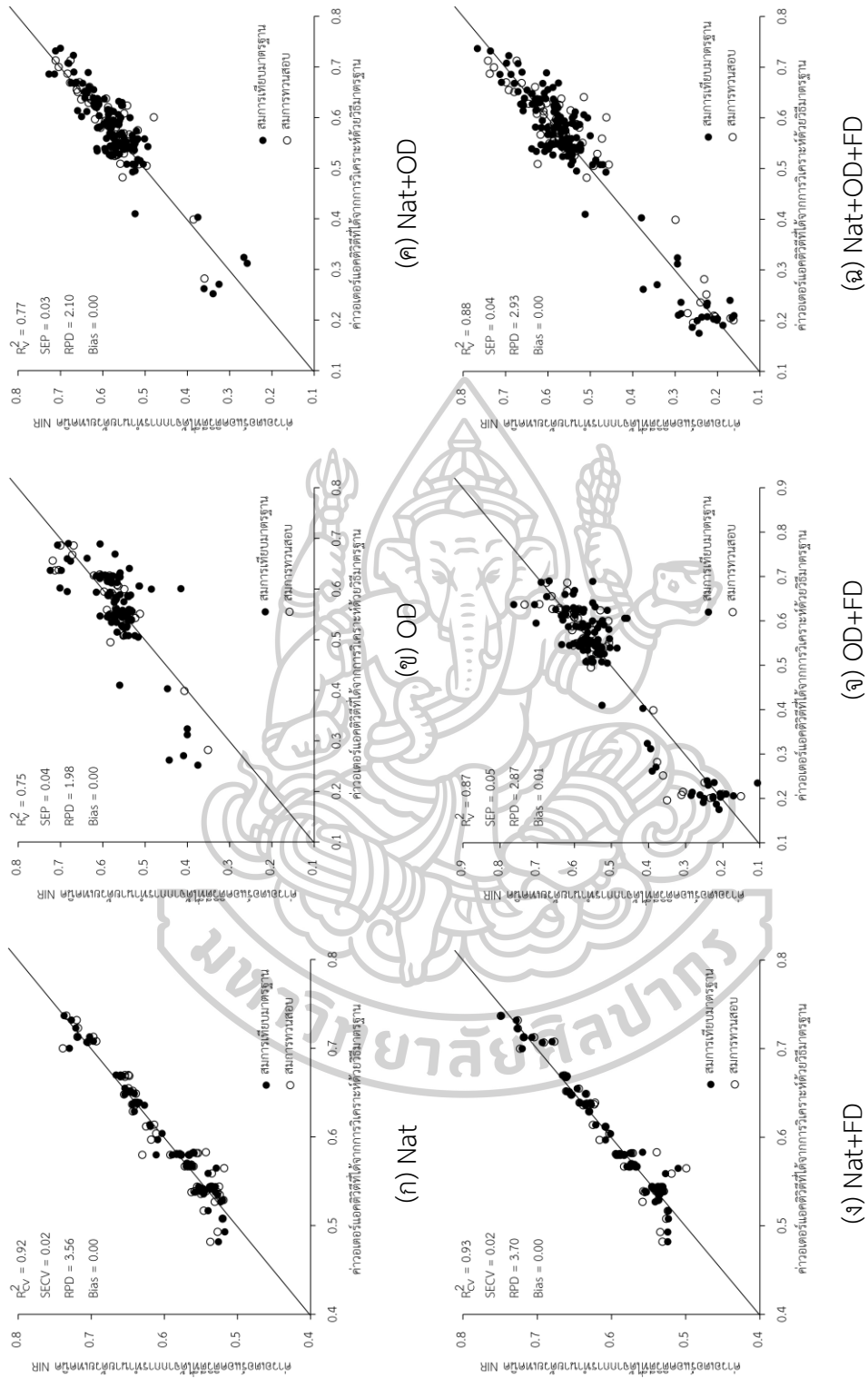
ตารางที่ 19 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation set) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) สำหรับค่าแอมพลิจูดแอมพลิจูด (a<sub>w</sub>)

กลุ่มตัวอย่าง	วิธีการ		Calibration set (67%)					Cross-validation set					Validation set (33%)					
	ปรับแต่ง	LVs	N	n <sub>c</sub>	R <sub>c</sub> <sup>2</sup>	SEC	n <sub>cv</sub>	R <sub>cv</sub> <sup>2</sup>	SECV	Bias	Slope	RPD	n <sub>v</sub>	R <sub>v</sub> <sup>2</sup>	SEP	Bias	Slope	RPD
Nat	MSC	9	67	67	0.96	0.01	67	0.92	0.02	0.00	0.93	3.56						
OD	SG-1D 15 pts	4	136	91	0.55	0.06							45	0.75	0.04	0.00	0.82	1.98
Nat+OD	SNV	10	203	136	0.81	0.04							67	0.77	0.03	0.00	0.77	2.10
Nat+FD	SNV + SG-1D 7 pts	7	91	91	0.98	0.03	91	0.93	0.05	0.00	0.91	3.71						
OD+FD	SG-Sm 15 pts	9	160	107	0.87	0.05							53	0.87	0.05	0.01	0.83	2.87
Nat+OD+FD (Overall)	SG-1D 27 pts	10	227	152	0.91	0.04							75	0.88	0.04	0.00	0.99	2.93

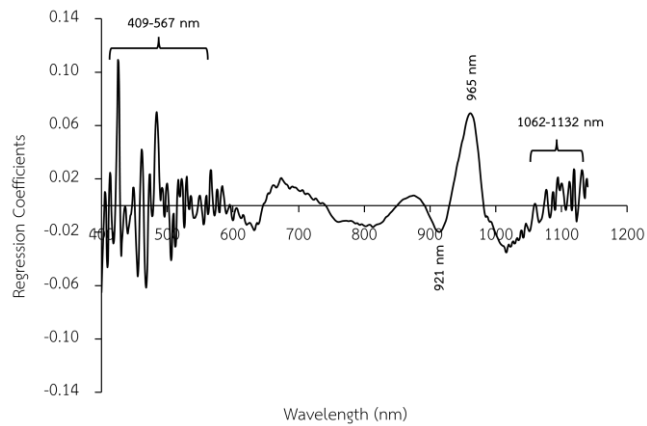
หมายเหตุ : SG-Sm (Savitzky-Golay Smoothing second order polynomial), SNV (Standard normal variate), SG-1D (Savitzky-Golay first derivative second order polynomial), SG-2D (Savitzky-Golay Smoothing second derivative second order polynomial), LVs (Number of Latent variables), N (Number of total samples), n<sub>c</sub> (Number of samples in calibration set), n<sub>cv</sub> (Number of samples in cross-validation set), n<sub>v</sub> (Number of samples in validation set), R<sub>c</sub><sup>2</sup> (Coefficients of determination in calibration set), R<sub>cv</sub><sup>2</sup> (Coefficients of determination in cross-validation set), R<sub>v</sub><sup>2</sup> (Coefficients of determination in validation set), SEC (Standard error of calibration), SECV (Standard error of cross-validation), SEP (Standard error of prediction), RPD (The ratio of the standard error of performance to standard deviation)

จากภาพที่ 17 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของสมการเทียบมาตรฐานในการทำนายค่าวอเตอร์แอกติวิตีจากกลุ่มตัวอย่างทั้ง 6 รูปแบบ พบว่าแผนภาพการกระจายที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD มีความสัมพันธ์ที่ดีในเชิงเส้นตรงมากที่สุด เนื่องจากข้อมูลเข้าใกล้และมีการกระจายตัวแนวเดียวกับเส้นตรงทแยงมุมหรือเส้นเป้าหมาย (Target line) ที่มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 1 ดังนั้นจึงให้ค่า  $R^2$  ที่อยู่ในระดับที่ดีเท่ากับ 0.93 แสดงดังภาพที่ 17 (ง) เมื่อเทียบกับแผนภาพการกระจายที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างอื่นๆ ซึ่งสมการการทำนายที่ได้ยังมีค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 มากเพียงใดจะบ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือและความเหมาะสมของสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นมาสำหรับใช้ในการทำนายได้มากเท่านั้น (Goodness of fit) รวมทั้งบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่ดีในการใช้สมการเทียบมาตรฐานค่า  $a_w$  ที่ได้ในการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $a_w$  ที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่า  $a_w$  ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานและประสิทธิภาพความแม่นยำของสมการการทำนายที่มีความถูกต้อง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของข้อมูลค่า  $a_w$  ที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง OD พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลตลอดเส้นเป้าหมายยังค่อนข้างน้อย ข้อมูลส่วนใหญ่ยังมีการกระจุกตัวกันเป็นกลุ่ม รวมถึงมีการกระจายตัวออกจากเส้นเป้าหมายส่งผลให้มีค่า  $R^2$  และ RPD ต่ำที่สุด (ภาพที่ 17 (ข))

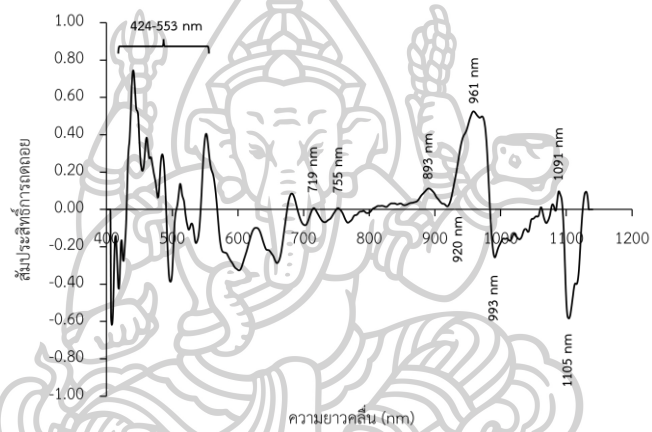
จากภาพที่ 18 แสดงสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients plot) ของความยาวคลื่นที่สำคัญสำหรับใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานทำนายค่า  $a_w$  ที่ได้จากการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ 400-1140 นาโนเมตร จากแต่ละกลุ่มตัวอย่าง พบว่ามีความยาวคลื่นที่สำคัญซึ่งพบในช่วงเดียวกันและสอดคล้องกับพันธะ O-H ซึ่งพบในโมเลกุลของน้ำ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายค่า  $a_w$  ที่ได้จากสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วย SNV + SG-1D 7 pts จากกลุ่มตัวอย่าง Nat+FD แสดงดังภาพที่ 18 (ง) พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลและมีความสำคัญต่อแบบจำลองสมการพบที่บริเวณความยาวคลื่น 728, 952, 976 และ 989 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงของน้ำโดยเกิดโอเวอร์โทนอันดับสามของพันธะ O-H (Third overtone of O-H stretching band) และการเกิดโอเวอร์โทนอันดับสองของพันธะ O-H (Second overtone of O-H stretching band) (Osborne, 1993; Pan และคณะ, 2015; Rongtong และคณะ, 2018; Özdemir และคณะ, 2018)



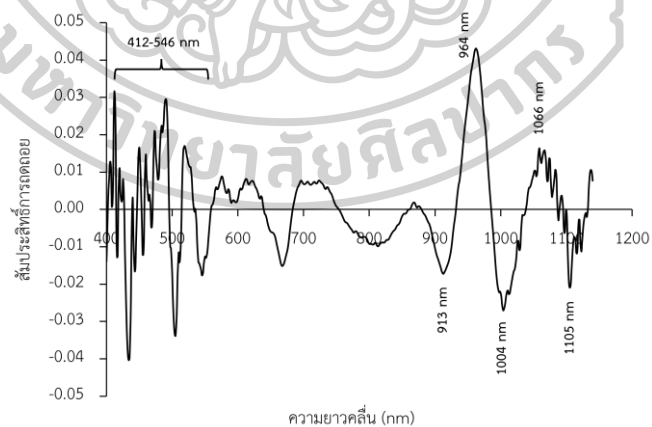
ภาพที่ 17 ลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแอมพลิจูดที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร



(ก) Nat (MSC)

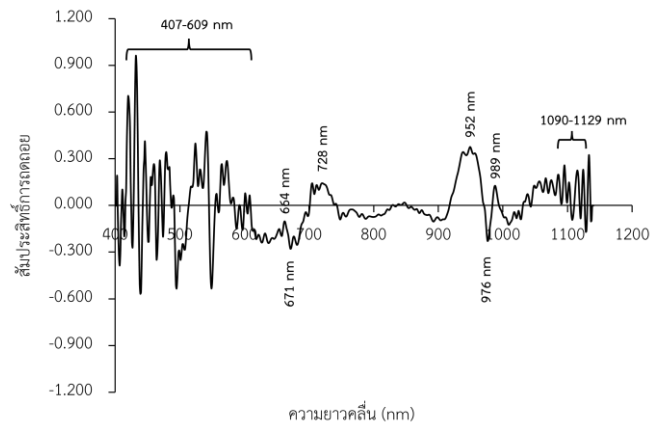


(ข) OD (SG-1D 15 pts)

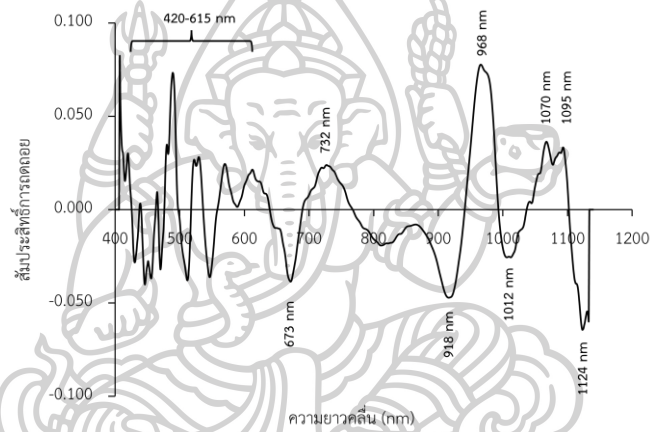


(ค) Nat+OD (SNV)

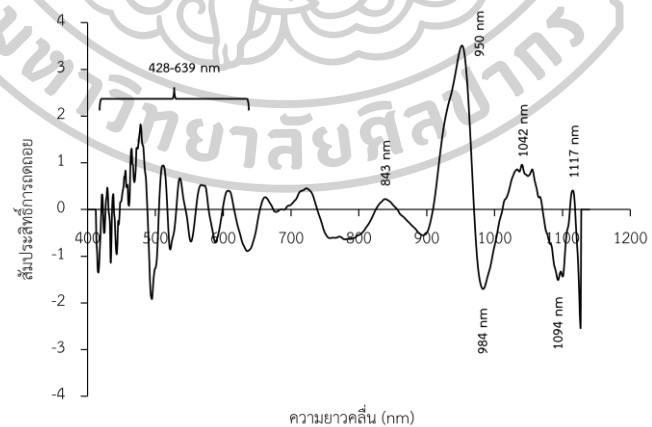
ภาพที่ 18 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับค่าวอเตอร์แอกติวิตีของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน



(ง) Nat+FD (SNV + SG-1D 7 pts)



(จ) OD+FD (SG-Sm 15 pts)



(ฉ) Nat+OD+FD (SG-1D 27 pts)

ภาพที่ 18 (ต่อ) สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับค่าอเตอร์แอกติวิตีของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

สำหรับการประเมินศักยภาพในด้านความถูกต้องของสมการเทียบมาตรฐานค่าอวเทอร์-แอกติวิตีเพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) (รณฤทธิ์ ฤทธิธณ, 2560) พบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากการใช้กลุ่มตัวอย่าง OD, Nat+OD, OD+FD และ Nat+OD+FD เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) กล่าวคือ

- ✓ ค่า SEP < ค่า  $T_{UE}$
- ✓ ค่า Bias < ค่า  $T_b$
- ✓ ค่า  $t_{obs}$  < ค่า  $t_{(1-\alpha/2)}$

แสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายค่า  $a_w$  ทั้งหมดมีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้สมการเทียบมาตรฐานการทำนายค่า  $a_w$  จากกลุ่มตัวอย่าง Nat และ Nat+FD ที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Leave one-out full cross-validation ถูกนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample t-Test เพื่อเปรียบเทียบว่าค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยจากการทดสอบพบว่าค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p \geq 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายค่า  $a_w$  จากทั้งสองกลุ่มตัวอย่างมีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้เช่นเดียวกันแสดงดังตารางที่ 20

จากนั้นนำสมการเทียบมาตรฐานสำหรับทำนายค่า  $a_w$  ที่ได้มาศึกษาความแม่นยำโดยการทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน ยกเว้นสมการรวม (Nat+OD+FD) ที่นำกลุ่มตัวอย่างเดิมมาลองทำนายสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นดังตารางที่ 21 พบว่ามีเพียงแค่สมการ OD+FD และสมการรวม (Nat+OD+FD) ที่สามารถใช้ในการทำนายตัวอย่างได้ แล้วให้ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p \geq 0.05$ ) ในขณะที่สมการ OD, Nat+OD และ Nat+FD เมื่อนำไปใช้ในการทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่างพบว่าค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าความแม่นยำของประสิทธิภาพของสมการทำนายค่า  $a_w$  ยังไม่ดีเพียงพอเพราะไม่สามารถทำนายข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานได้ จึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่าง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากข้อมูลที่ใช้ในการสร้าง

สมการเทียบมาตรฐานไม่ครอบคลุมตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทำนายสามารถสังเกตได้จากค่า Max-Min ดังแสดงในตารางที่ 22



ตารางที่ 20 ผลการประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานที่ใช้การทำนายที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่างด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) สำหรับค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ ) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

กลุ่มตัวอย่าง	Bias	$\pm T_b$	Bias < $T_b$	SEP	$T_{UE}$	SEP < $T_{UE}$	$t_{obs}$	$t_{value}$	$t_{obs} < t_{value}$	Application
Nat										✓
OD	0.00	0.01	✓	0.04	0.07	✓	0.98	2.02	✓	✓
Nat+OD	0.00	0.01	✓	0.03	0.04	✓	0.03	2.00	✓	✓
Nat+FD										✓
OD+FD	0.01	0.01	✓	0.05	0.07	✓	1.10	2.01	✓	✓
Nat+OD+FD	0.00	0.01	✓	0.04	0.05	✓	1.63	1.99	✓	✓
(Overall)										✓

หมายเหตุ : ค่า UECLs หรือค่า  $T_{UE}$  (The unexplained error confidence limits), ค่า  $T_b$  (Bias confidence limits, BCLs หรือค่า  $T_b$ ) และค่า  $t_{obs}$  (The observed t value)

สมการเทียบมาตรฐานในกลุ่มตัวอย่าง Nat และ Nat+FD จะถูกนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample t-Test เพื่อดูความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ตารางที่ 21 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ของค่าวอเตอร์แอสติวิตี ( $a_w$ ) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

ผลการเทียบมาตรฐานของแต่ละ กลุ่มตัวอย่าง	ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ดูนำไปใช้ ในการทำนาย	Prediction set				
		Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)
Nat	OD	0.25	0.69	0.57	0.08	14.25
	FD	0.18	0.24	0.21	0.02	7.73
OD	Nat	0.48	0.74	0.60	0.06	10.69
	FD	0.18	0.24	0.21	0.02	7.73
Nat+OD	FD	0.18	0.24	0.21	0.02	7.73
Nat+FD	OD	0.25	0.69	0.57	0.08	14.25
OD+FD	Nat	0.48	0.74	0.60	0.06	10.69
Nat+OD+FD (Overall)	Nat	0.48	0.74	0.60	0.06	10.69
	OD	0.25	0.69	0.57	0.08	14.25
	FD	0.18	0.24	0.21	0.02	7.73

หมายเหตุ : Min คือ ค่าน้อยที่สุด (Minimum), Max คือ ค่ามากที่สุด (Maximum), S.D. คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่า

สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation)

ตารางที่ 22 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ค่าอเวอเจอร์แอดคิวิตี ( $a_w$ ) ที่ได้จากการศึกษาความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานในแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

สมการเทียบ	ข้อมูลของกลุ่ม	วิธีการปรับแต่งสเปกตรัม				Prediction set					Paired-Sample t-Test
		ตัวอย่างที่ถูกนำไปใช้ในการทำนาย	LVs	$n_p$	$R_p^2$	SEP	Bias	Slope	RPD		
Nat	OD		MSC	9	136	-1335.85	2.95	0.08	0.00	0.03	✓
	FD				24	-1039.95	0.20	0.47	0.01	0.08	✗
OD	Nat		SG-1D 15 pts	4	67	-1.12	0.09	0.03	-0.12	0.73	✗
	FD				24	-378.01	0.02	0.03	-0.33	0.84	✗
Nat+OD	FD		SNV	10	24	-341.10	0.09	0.28	0.01	0.18	✗
Nat+FD	OD		SNV + SG-1D 7 pts	7	136	-32.63	0.36	-0.30	-0.02	0.23	✗
OD+FD	Nat		SG-Sm 15 pts	9	67	-3.30	0.13	0.03	-0.04	0.50	✓
Nat+OD+FD (Overall)	Nat				67	0.67	0.04	0.00	0.78	1.74	✓
	OD		SG-1D 27 pts	10	136	0.69	0.04	-0.01	0.86	1.80	✓
	FD				24	-6.69	0.04	0.01	0.03	0.38	✓

หมายเหตุ : SG-Sm (Savitzky-Golay Smoothing second order polynomial), SNV (Standard normal variate), SG-1D (Savitzky-Golay first derivative second order polynomial), SG-2D (Savitzky-Golay Smoothing second derivative second order polynomial), LVs (Number of Latent variables),  $n_p$  (Number of samples in prediction set),  $R_p^2$  (Coefficients of determination of prediction), SEC (Standard error of calibration), SECV (Standard error of cross-validation), SEP (Standard error of prediction), RPD (The ratio of the standard error of performance to standard deviation)

#### 4.3.4 ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่า $a_w$ ที่ช่วงความยาวคลื่น 700 - 1140

##### นาโนเมตร

จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับการทำนายค่าวอเตอร์แอกติวิตีด้วยเทคนิคการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (PLSR) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร พบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากข้อมูลของกลุ่มตัวอย่าง OD+FD โดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแก้ด้วยการทำอนุพันธ์อันดับหนึ่งแบบซาวิตซ์กี-โกเลย์พหุนามอันดับสอง จำนวน 19 จุด (SG-1D 19 pts) ให้ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานในการทำนายค่า  $a_w$  ดีที่สุดโดยให้ค่า  $R^2$  และ RPD สูงที่สุดเท่ากับ 0.96 และ 5.33 ตามลำดับ ในขณะที่มีค่า SEP ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.03 แสดงดังตารางที่ 23 เมื่อพิจารณาจากค่าทางสถิติ  $R^2$  เพื่อดูประสิทธิภาพของสมการเทียบมาตรฐานดังแสดงดังตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง OD+FD สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานประเภทการตรวจคุณภาพและงานประกันคุณภาพได้เนื่องจากมีค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.82-0.90 ขึ้นไป (Williams, 2006) นอกจากนี้จากการรายงานของ Zornoza และคณะ (2008) รายงานว่าค่า RPD ที่มีค่าตั้งแต่ 3.0 ขึ้นไป สามารถบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพของสมการการทำนายค่า  $a_w$  ที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง OD+FD นั้นมีความถูกต้องอยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้ในการทำนายได้ดีมาก อย่างไรก็ตามพบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง Nat+OD ให้ค่า  $R^2$  และ RPD ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.89 และ 2.96 ตามลำดับ แม้ว่าจะมีผลการทำนายที่ต่ำที่สุดแต่ก็พบว่ามีความ RPD อยู่ในช่วง 2.5 ขึ้นไป อีกทั้งอีกทั้งสมการอื่นๆ ก็มีค่า  $R^2$  มีค่าสูง ขณะที่ค่า SECV และ SEP มีค่าต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการเทียบมาตรฐานการทำนายค่า  $a_w$  ที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง Nat+OD และกลุ่มตัวอย่างอื่นๆ ก็อยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้ในการทำนายได้ดีจนถึงดีมากเช่นกัน (Nicolai และคณะ, 2007; Zornoza และคณะ, 2008) ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการเลือกใช้ช่วงความยาวคลื่นในช่วง NIR มาใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับการทำนายค่าวอเตอร์แอกติวิตีมีความเหมาะสมมากกว่าช่วง vis/NIR เนื่องจากไม่ถูกรบกวนจากอิทธิพลของรงควัตถุที่ให้สีภายในตัวอย่าง จากการรายงานของ Özdemir และคณะ (2018) ใช้เทคนิค FT-NIRS ในการติดตามค่าวอเตอร์แอกติวิตีในแอปเปิ้ลคอกเทลแห้งแบบทั้งผลซึ่งผ่านการเติมสารกลุ่มซัลไฟด์ที่ช่วงความยาวคลื่น 833 - 2500 นาโนเมตร ด้วยรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับแบบแพร่ พบว่าสมการการทำนายค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่ได้จากเทคนิค PLSR ซึ่งสร้างขึ้นในช่วงความยาวคลื่น 1063 - 2175 นาโนเมตร ให้ค่า  $R^2$ , RMSEP และ RPD เท่ากับ 0.987, 0.016 และ 9.37 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของสมการการทำนายได้อย่างดี สอดคล้องกับการศึกษาของ Rongtong และคณะ (2018) ซึ่งใช้เทคนิค NIRS ในการทำนายค่าวอเตอร์แอกติวิตีในมะละกอแช่หิมอบแห้งด้วยเทคนิค NIRS ที่ช่วงความยาวคลื่น 800 - 2400

นาโนเมตร ด้วยรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ พบว่าสมการการทำนายค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่ได้จากเทคนิค PLSR ซึ่งสร้างขึ้นในช่วงความยาวคลื่น 800 – 1200 และ 1330 – 2400 นาโนเมตร ให้ค่า  $R^2$ , RMSEP และ RPD เท่ากับ 0.976, 0.026 และ 4.77 ตามลำดับ และใช้จำนวนตัวแปร (Factor) เท่ากับ 8 ตัว ในขณะที่สมการการทำนายค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่ได้จากเทคนิค Moving window partial least squares regression (MWPLSR) ซึ่งสร้างขึ้นในช่วงความยาวคลื่น 890 - 1190, 1400 – 1700 และ 1900 - 2150 นาโนเมตร โดยใช้จำนวนตัวแปร (Factor) เท่ากับ 7 ตัว ให้ค่า  $R^2$ , RMSEP และ RPD เท่ากับ 0.990, 0.019 และ 7.03 ตามลำดับ ที่ดีกว่า แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้เทคนิค MWPLSR ช่วยดึงข้อมูลตัวแปรที่สำคัญซึ่งมีความสัมพันธ์กับช่วงการดูดกลืนแสงของน้ำได้ดีกว่าสำหรับใช้ในการทำนายค่า  $a_w$



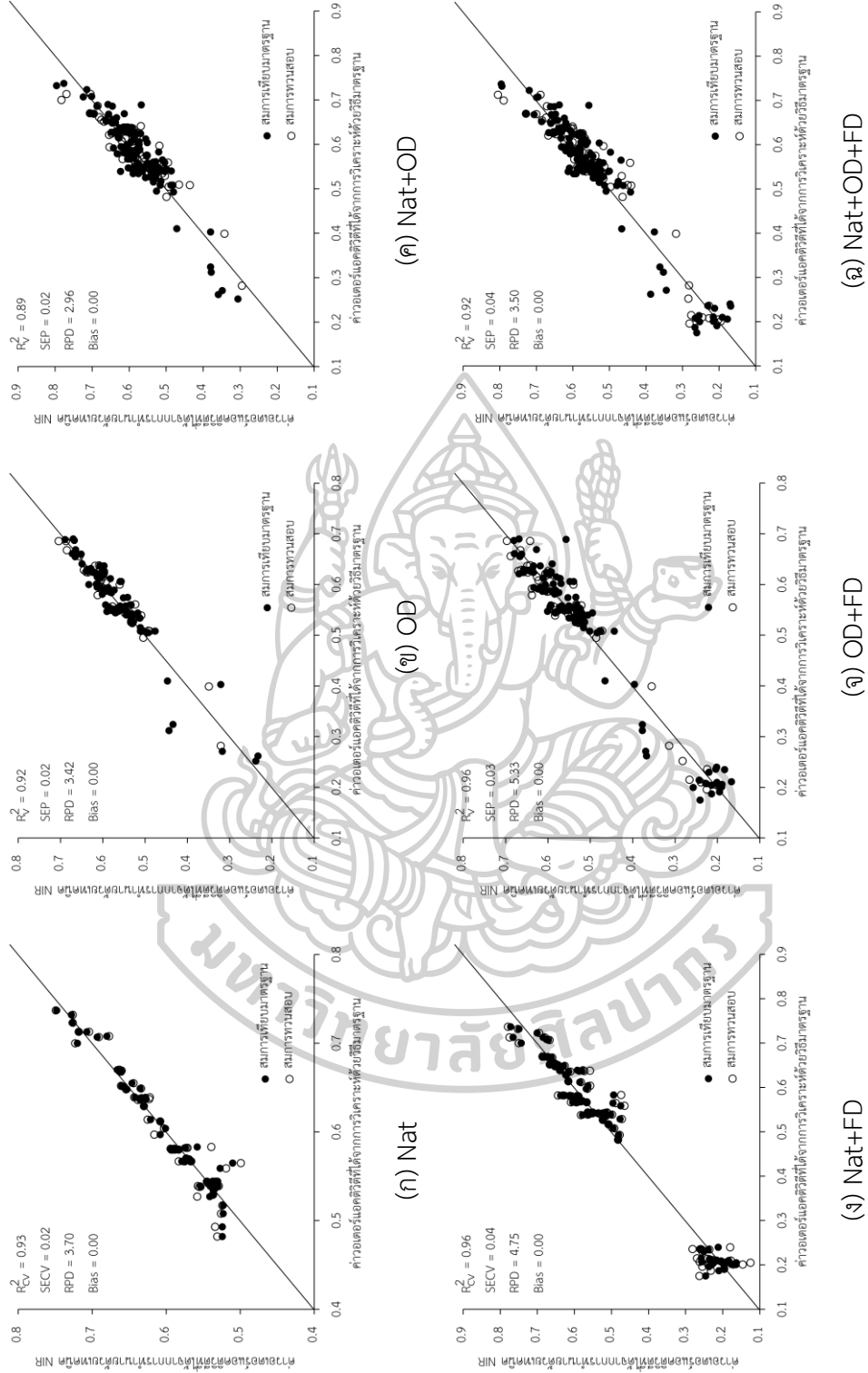
ตารางที่ 23 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Validation set) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) สำหรับค่าอัตรแอดคิวิตี ( $a_w$ )

กลุ่มตัวอย่าง	วิธีการ		Calibration set (67%)					Cross-validation set					Validation set (33%)					
	ปรับแต่ง	LVs	N	$n_c$	$R_c^2$	SEC	$n_{cv}$	$R_{cv}^2$	SECV	Bias	Slope	RPD	$n_v$	$R_v^2$	SEP	Bias	Slope	RPD
Nat	SG-Sm 9 pts	7	67	67	0.95	0.01	67	0.93	0.02	0.00	0.94	3.70						
		8	136	91	0.89	0.03							45	0.92	0.02	0.00	0.97	3.42
Nat+OD	SNV+SG-1D 15 pts	7	203	136	0.88	0.03							67	0.89	0.02	0.00	0.98	2.96
		8	91	91	0.97	0.03	91	0.96	0.04	0.00	0.96	4.75						
OD+FD	SG-1D 19 pts	7	160	107	0.95	0.03							53	0.96	0.03	0.00	0.98	5.33
		8	227	152	0.93	0.04							75	0.92	0.04	0.00	0.98	3.50

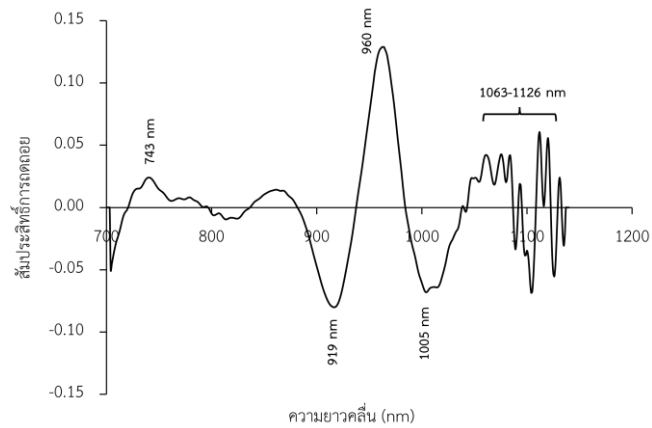
หมายเหตุ : SG-Sm (Savitzky-Golay Smoothing second order polynomial), SNV (Standard normal variate), SG-1D (Savitzky-Golay first derivative second order polynomial), SG-2D (Savitzky-Golay Smoothing second derivative second order polynomial), LVs (Number of Latent variables), N (Number of total samples),  $n_c$  (Number of samples in calibration set),  $n_{cv}$  (Number of samples in cross-validation set),  $n_v$  (Number of samples in validation set),  $R_c^2$  (Coefficients of determination in calibration set),  $R_{cv}^2$  (Coefficients of determination in cross-validation set),  $R_v^2$  (Coefficients of determination in validation set), SEC (Standard error of calibration), SECV (Standard error of cross-validation), SEP (Standard error of prediction), RPD (The ratio of the standard error of performance to standard deviation)

จากภาพที่ 19 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของสมการเทียบมาตรฐานในการทำนายค่าวอเตอร์แอกติวิตีจากกลุ่มตัวอย่างทั้ง 6 รูปแบบ พบว่าแผนภาพการกระจายที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง OD+FD มีความสัมพันธ์ที่ดีในเชิงเส้นตรงมากที่สุด เนื่องจากข้อมูลเข้าใกล้และมีการกระจายตัวแนวเดียวกับเส้นตรงทแยงมุมหรือเส้นเป้าหมาย (Target line) ที่มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 1 ดังนั้นจึงให้ค่า  $R^2$  ที่อยู่ในระดับที่ดีเท่ากับ 0.96 แสดงดังภาพที่ 19 (จ) เมื่อเทียบกับแผนภาพการกระจายที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างอื่นๆ ซึ่งสมการการทำนายที่ได้มีค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 บ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือและความเหมาะสมของสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นมาสำหรับใช้ในการทำนายได้ดี รวมทั้งบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่ดีในการใช้สมการเทียบมาตรฐานค่า  $a_w$  ที่ได้ในการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $a_w$  ที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่า  $a_w$  ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน และประสิทธิภาพความแม่นยำของสมการการทำนายที่มีความถูกต้อง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของข้อมูลค่า  $a_w$  ที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง OD พบว่ามีการกระจายตัวของข้อมูลบางส่วนออกจากเส้นเป้าหมายส่งผลให้มีค่า  $R^2$  และ RPD ต่ำกว่าสมการจากกลุ่มอื่น (ภาพที่ 19 (ข))

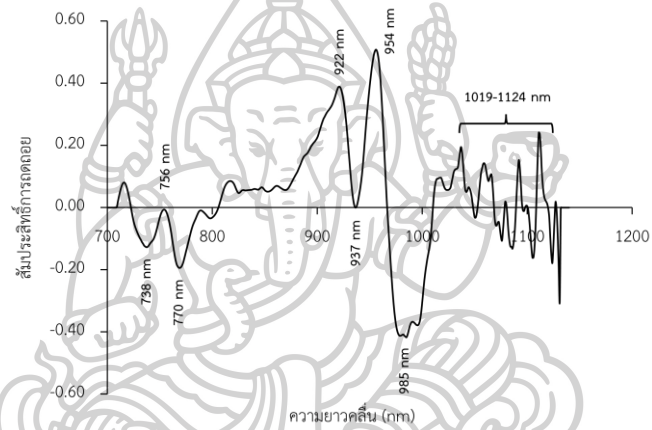
จากภาพที่ 20 แสดงสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients plot) ของความยาวคลื่นที่สำคัญสำหรับใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานทำนายค่า  $a_w$  ที่ได้จากการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ 700-1140 นาโนเมตร จากแต่ละกลุ่มตัวอย่าง พบว่ามีความยาวคลื่นที่สำคัญซึ่งพบในช่วงเดียวกันและสอดคล้องกับพันธะ O-H ซึ่งพบในโมเลกุลของน้ำ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายค่า  $a_w$  ที่ได้จากสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วย SG-1D 19 pts จากกลุ่มตัวอย่าง OD+FD แสดงดังภาพที่ 20 (จ) พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลและมีความสำคัญต่อแบบจำลองสมการพบที่บริเวณตำแหน่งความยาวคลื่น 730, 925, 957, และ 985 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงของโมเลกุลของน้ำส่งผลให้เกิดการสั่นแบบโอเวอร์โทนอันดับสามของพันธะ O-H (Third overtone of O-H stretching band) และโอเวอร์โทนอันดับสองของพันธะ O-H (Second overtone of O-H stretching band) (Osborne, 1993; Pan และคณะ, 2015; Rongtong และคณะ, 2018; Özdemir และคณะ, 2018)



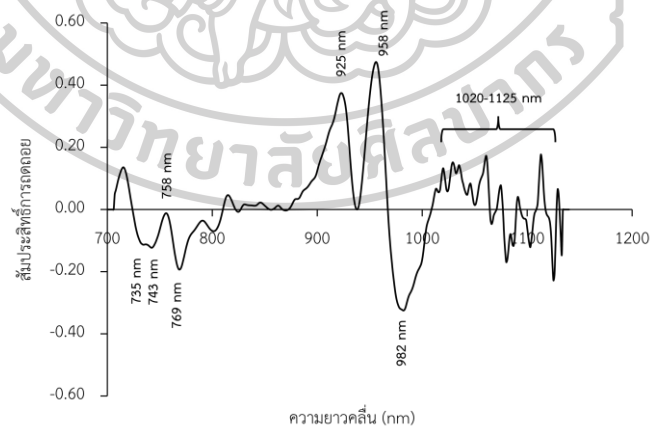
ภาพที่ 19 ลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของเทอร์แอดคิตีวี่ที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณความชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร



(ก) Nat (SG-Sm 9 pts)



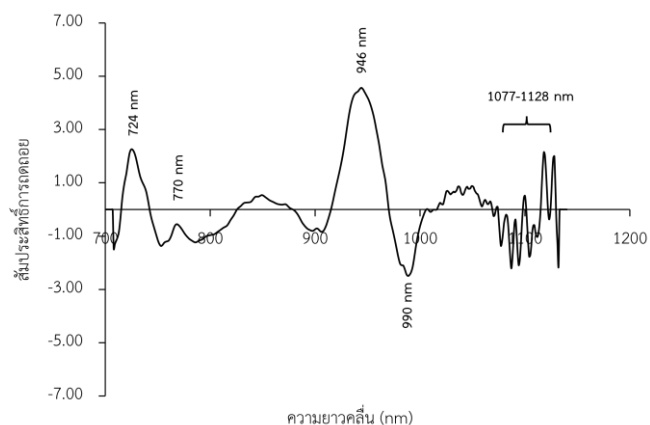
(ข) OD (SNV+SG-1D 19 pts)



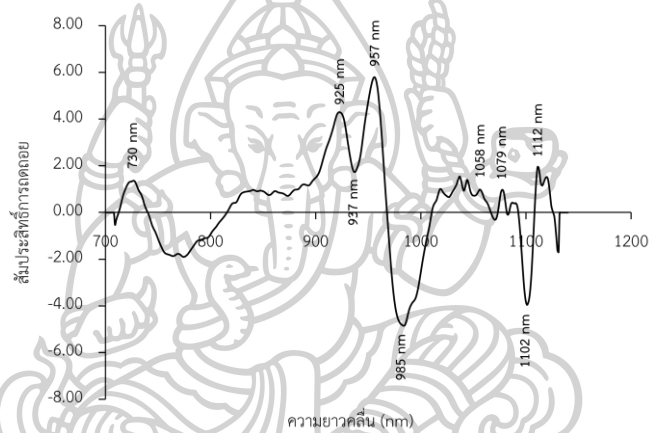
(ค) Nat+OD (SNV+SG-1D 15 pts)

ภาพที่ 20 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับค่าวอเตอร์แอกติวิตีของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

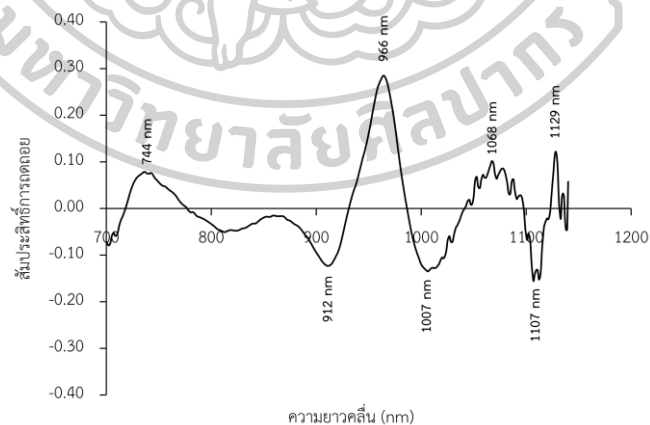




(ง) Nat+FD (SG-1D 17 pts)



(จ) OD+FD (SG-1D 19 pts)



(ฉ) Nat+OD+FD (สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง)

ภาพที่ 20 (ต่อ) สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับค่าอแอดติวิตีของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

สำหรับการประเมินศักยภาพในด้านความถูกต้องของสมการเทียบมาตรฐานค่าอวเทอร์-แอกติวิตีเพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) (รณฤทธิ์ ฤทธิธณ, 2560) พบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากการใช้กลุ่มตัวอย่าง OD, OD+FD และ Nat+OD+FD เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) กล่าวคือ

- ✓ ค่า SEP < ค่า  $T_{UE}$
- ✓ ค่า Bias < ค่า  $T_b$
- ✓ ค่า  $t_{obs}$  < ค่า  $t_{(1-\alpha/2)}$

แสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายค่า  $a_w$  ที่สร้างจากช่วงความยาวคลื่น NIR ทั้งหมดมีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ยกเว้นสมการการทำนายค่า  $a_w$  ที่สร้างจากข้อมูลกลุ่ม Nat+OD เนื่องจากไม่ผ่านมาตรฐานในส่วน of ค่า  $t_{obs}$  ที่ควรน้อยกว่าค่า  $t_{(1-\alpha/2)}$  แสดงให้เห็นว่าความชัน (Slope) ของกราฟ Scatter plots ระหว่างค่า  $a_w$  ที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่า  $a_w$  ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานแตกต่างจาก 1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ขณะที่สมการเทียบมาตรฐานการทำนายค่า  $a_w$  จากกลุ่มตัวอย่าง Nat และ Nat+FD ที่ถูกนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample  $t$ -Test พบว่าค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p \geq 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายค่า  $a_w$  จากทั้งสองกลุ่มตัวอย่างมีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดังแสดงในตารางที่ 24

จากนั้นนำสมการเทียบมาตรฐานสำหรับทำนายค่า  $a_w$  ที่ได้มาศึกษาความแม่นยำโดยการทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน ยกเว้นสมการรวม (Nat+OD+FD) ที่นำกลุ่มตัวอย่างเดิมมาลองทำนายสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นดังตารางที่ 25 พบว่ามีเพียงแค่สมการของ OD+FD ที่สามารถใช้ในการทำนายกลุ่มตัวอย่าง Nat ได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากข้อมูลค่า  $a_w$  ของกลุ่ม Nat อยู่ในช่วงที่ถูกนำไปใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานกลุ่ม OD+FD นอกจากนี้พบว่าสมการรวม (Nat+OD+FD) สามารถใช้ในการทำนายกลุ่มตัวอย่างในกลุ่ม Nat, OD และ FD ได้ แล้วให้ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p \geq 0.05$ ) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพความแม่นยำของสมการการทำนายค่า  $a_w$  ที่สามารถทำนายกลุ่มตัวอย่างที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานได้ ดังแสดงในตารางที่ 26

ตารางที่ 24 ผลการประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานที่ใช้การทำนายที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่างด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) สำหรับค่าวอเตอร์แอกติวิตี ( $a_w$ ) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

กลุ่มตัวอย่าง	Bias	$\pm T_b$	Bias < $T_b$	SEP	$T_{UE}$	SEP < $T_{UE}$	$t_{obs}$	$t_{value}$	$t_{obs} < t_{value}$	Application
Nat										Paired-Sample t-Test
OD	0.00	0.01	✓	0.02	0.03	✓	1.35	2.02	✓	✓
Nat+OD	0.00	0.01	✓	0.02	0.03	✓	5.50	2.00	✗	✗
Nat+FD										Paired-Sample t-Test
OD+FD	0.00	0.01	✓	0.03	0.04	✓	0.63	2.01	✓	✓
Nat+OD+FD (Overall)	0.00	0.01	✓	0.04	0.04	✓	1.76	1.99	✓	✓

หมายเหตุ : ค่า UECLs หรือค่า  $T_{UE}$  (The unexplained error confidence limits), ค่า  $T_b$  (Bias confidence limits, BCLs หรือค่า  $T_b$ ) และค่า  $t_{obs}$  (The observed t value)

สมการเทียบมาตรฐานในกลุ่มตัวอย่าง Nat และ Nat+FD จะถูกนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample t-Test เพื่อดูความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 25 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ของค่าวอเตอร์แอสติติ ( $a_w$ ) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

กลุ่มตัวอย่าง	ข้อมูลของกรุปตัวอย่างที่ดูนำไปใช้ ในการทำนาย	Prediction set				
		Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)
Nat	OD	0.25	0.69	0.57	0.08	14.25
	FD	0.18	0.24	0.21	0.02	7.73
OD	Nat	0.48	0.74	0.60	0.06	10.69
	FD	0.18	0.24	0.21	0.02	7.73
Nat+OD	FD	0.18	0.24	0.21	0.02	7.73
Nat+FD	OD	0.25	0.69	0.57	0.08	14.25
	Nat	0.48	0.74	0.60	0.06	10.69
OD+FD	Nat	0.48	0.74	0.60	0.06	10.69
	OD	0.25	0.69	0.57	0.08	14.25
Nat+OD+FD (Overall)	OD	0.25	0.69	0.57	0.08	14.25
	FD	0.18	0.24	0.21	0.02	7.73

หมายเหตุ : Min คือ ค่าน้อยที่สุด (Minimum), Max คือ ค่ามากที่สุด (Maximum), S.D. คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่า

สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation)

ตารางที่ 26 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ค่าอเวอเจอร์แอดติวิตี ( $a_{av}$ ) ที่ได้จากการศึกษาความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานในแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

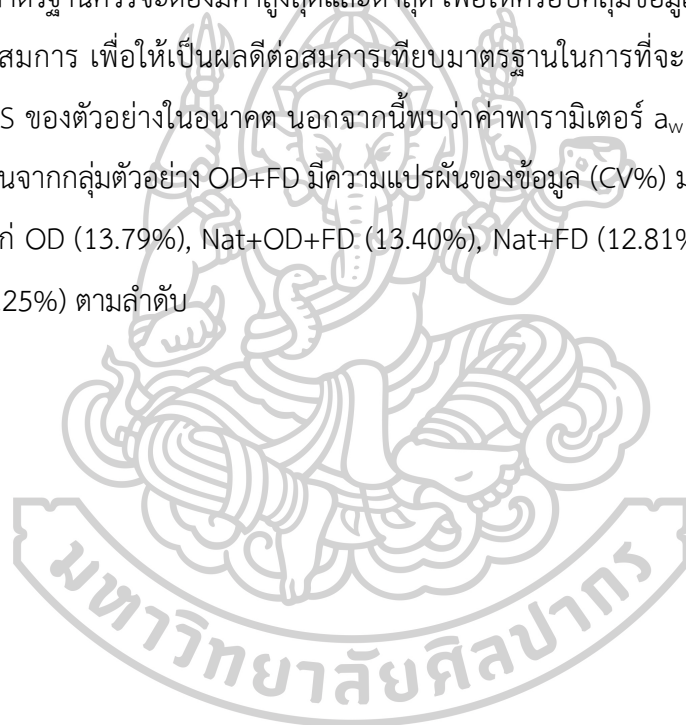
สมการเทียบมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง	ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ถูกลำไ้ใช้ในการทำนาย	วิธีการรับแต่งสเปกตรัม	LVs		Prediction set				Paired-Sample t-Test	
			$n_p$	$R_p^2$	SEP	Bias	Slope	RPD		
Nat	OD	SG-Sm 9 pts	7	136	0.27	0.07	0.01	0.24	1.20	✗
	FD			24	-442.73	0.05	0.33	0.73	0.32	✗
OD	Nat	SNV+SG-1D 19 pts	8	67	0.61	0.04	-0.01	0.78	1.71	✗
	FD			24	-282.11	0.09	0.25	-0.31	0.18	✗
Nat+OD	FD	SNV+SG-1D 15 pts	7	24	-321.95	0.07	0.28	-0.27	0.22	✗
Nat+FD	OD	SG-1D 17 pts	8	136	-0.21	0.08	-0.03	0.84	0.97	✗
OD+FD	Nat	SG-1D 19 pts	7	67	0.34	0.05	0.00	1.36	1.24	✓
Nat+OD+FD	Nat	สเปกตรัมที่ผ่าน	8	67	0.61	0.04	0.00	1.23	1.60	✓
(Overall)	OD			การปรับแต่ง	136	0.82	0.03	0.00	0.84	2.37
	FD		24	-7.11	0.04	0.02	-0.83	0.38	✓	

หมายเหตุ : SG-Sm (Savitzky-Golay Smoothing second order polynomial), SNV (Standard normal variate), SG-1D (Savitzky-Golay first derivative second order polynomial), SG-2D (Savitzky-Golay Smoothing second derivative second order polynomial), LVs (Number of Latent variables),  $n_p$  (Number of samples in prediction set),  $R_p^2$  (Coefficients of determination of prediction), SEC (Standard error of calibration), SECV (Standard error of cross-validation), SEP (Standard error of prediction), RPD (The ratio of the standard error of performance to standard deviation)

#### 4.3.5 ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 – 1140

##### นาโนเมตร

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) จากผักและผลไม้บดแห้งทั้ง 11 ชนิด ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 1140 และ 700 - 1140 นาโนเมตร จากตารางที่ 27 พบว่าปริมาณความชื้นของผักและผลไม้บดแห้งของกลุ่มตัวอย่าง Nat, OD, Nat+OD, Nat+FD, OD+FD และ Nat+OD+FD ที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานอยู่ในช่วง 63.20 - 89.40 °Brix, 41.10 - 89.30 °Brix, 41.10 - 89.40 °Brix, 58.50 - 95.20 °Brix, 41.10 - 95.20 °Brix, และ 41.10 - 95.20 °Brix ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานควรจะต้องมีค่าสูงสุดและต่ำสุด เพื่อให้ครอบคลุมข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ เพื่อให้เป็นผลดีต่อสมการเทียบมาตรฐานในการที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายค่า TSS ของตัวอย่างในอนาคต นอกจากนี้พบว่าค่าพารามิเตอร์  $a_w$  ที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานจากกลุ่มตัวอย่าง OD+FD มีความแปรผันของข้อมูล (CV%) มากที่สุดเท่ากับ 14.46% รองลงมาได้แก่ OD (13.79%), Nat+OD+FD (13.40%), Nat+FD (12.81%), Nat+OD (12.74%), และ Nat (10.25%) ตามลำดับ



ตารางที่ 27 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation set) ของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร และ 700-1140 นาโนเมตร

กลุ่มตัวอย่าง	Calibration set (67%)				Cross-validation set				Validation set (33%)						
	Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)	Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)	Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)
Nat	63.20	89.40	76.44	7.84	10.25	63.20	89.40	76.44	7.84	10.25	43.80	86.10	78.11	9.43	12.07
OD	41.10	89.30	77.44	10.68	13.79						43.80	88.30	77.52	8.96	11.56
Nat+OD	41.10	89.40	77.13	9.82	12.74										
Nat+FD	58.50	95.20	77.26	9.90	12.81	58.50	95.20	77.26	9.90	12.81					
OD+FD	41.10	95.20	77.78	11.25	14.46						43.80	93.60	78.28	10.20	13.04
Nat+OD+FD (Overall)	41.10	95.20	77.38	10.37	13.40						43.80	93.60	77.74	9.57	12.31

หมายเหตุ : Min คือ ค่าน้อยที่สุด (Minimum), Max คือ ค่ามากที่สุด (Maximum), S.D. คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation)

จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดด้วยเทคนิคการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (PLSR) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร พบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากข้อมูลของกลุ่มตัวอย่าง Nat โดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน และการปรับแนวโน้มร่วมกับการทำอนุพันธ์อันดับหนึ่งแบบซาวิตซ์กี-โกเลย์พหุนามอันดับสองจำนวน 23 จุด (SNV+SG-1D 23 pts) มีความเหมาะสมที่สุดโดยให้ค่า  $R^2$  และ RPD สูงที่สุด เท่ากับ 0.92 และ 3.43 ตามลำดับ ในขณะที่มีค่า SECV เท่ากับ 2.28 °Brix แสดงดังตารางที่ 28 จากการรายงานของ Williams (2006) โดยพิจารณาจากค่าทางสถิติ  $R^2$  เพื่อบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสมการเทียบมาตรฐาน (ตารางที่ 3) แสดงให้เห็นว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง Nat สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานประเภทการตรวจคุณภาพและงานประกันคุณภาพได้เนื่องจากมีค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.82-0.90 ขึ้นไป นอกจากนี้พบว่าค่า RPD ที่มีค่าตั้งแต่ 3.0 ขึ้นไป สามารถบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพของสมการการทำนายค่า TSS ที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง Nat นั้นมีความถูกต้องอยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้ในการทำนายได้ดีมาก (Zornoza และคณะ, 2008) อย่างไรก็ตามพบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง Nat+OD+FD ให้ค่า  $R^2$  และ RPD ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.74 และ 2.03 ตามลำดับ ขณะที่ให้ค่า SEP สูงที่สุดเท่ากับ 4.71 °Brix แม้ว่าจะมีผลการทำนายที่ต่ำที่สุดแต่ก็พบว่ามีความ RPD อยู่ในช่วง 2.0 – 2.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการเทียบมาตรฐานการทำนายค่า TSS ที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง Nat+OD+FD มีความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายเชิงปริมาณ (Nicolai และคณะ, 2007; Zornoza และคณะ, 2008)



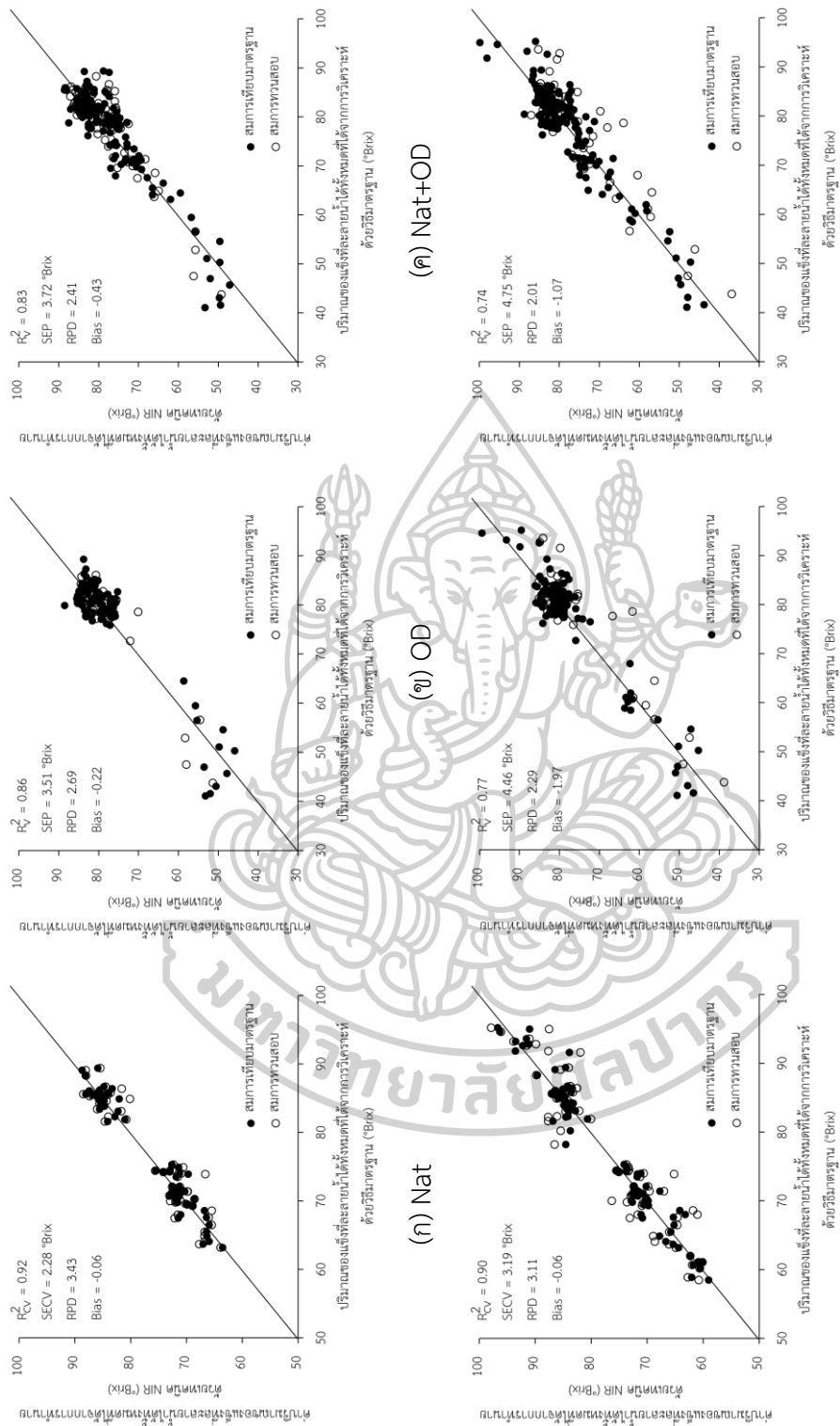
ตารางที่ 28 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Cross-validation set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Validation set) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) สำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS)

กลุ่มตัวอย่าง	วิธีการปรับแต่ง สเปกตรัม	LVs	N	Calibration set (67%)				Cross-validation set				Validation set (33%)						
				$n_c$	$R_c^2$	SEC	$n_{cv}$	$R_{cv}^2$	SECV	Bias	Slope	RPD	$n_v$	$R_v^2$	SEP	Bias	Slope	RPD
Nat	MSC + SG-1D 23 pts	7	66	66	0.95	1.72	66	0.92	2.28	-0.06	0.93	3.43						
OD	SG-2D 17 pts	6	135	91	0.88	3.73							44	0.86	3.51	-0.22	0.78	2.69
Nat+OD	SG-2D 17 pts	8	201	135	0.86	3.64							66	0.83	3.72	-0.43	0.81	2.41
Nat+FD	SNV + SG-1D 13 pts	9	90	90	0.95	2.16	90	0.90	3.19	-0.06	0.92	3.11						
OD+FD	SNV + SG-1D 7 pts	6	159	107	0.90	3.58							52	0.77	4.46	-1.97	0.95	2.29
Nat+OD+FD (Overall)	SNV + SG-1D 7 pts	8	225	151	0.88	3.62							74	0.74	4.75	-1.07	0.93	2.01

หมายเหตุ : SG-Sm (Savitzky-Golay Smoothing second order polynomial), SNV (Standard normal variate), SG-1D (Savitzky-Golay first derivative second order polynomial), SG-2D (Savitzky-Golay Smoothing second derivative second order polynomial), LVs (Number of Latent variables), N (Number of total samples),  $n_c$  (Number of samples in calibration set),  $n_{cv}$  (Number of samples in cross-validation set),  $n_v$  (Number of samples in validation set),  $R_c^2$  (Coefficients of determination in calibration set),  $R_{cv}^2$  (Coefficients of determination in cross-validation set),  $R_v^2$  (Coefficients of determination in validation set), SEC (Standard error of calibration), SECV (Standard error of cross-validation), SEP (Standard error of prediction), RPD (The ratio of the standard error of performance to standard deviation)

จากภาพที่ 21 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของสมการเทียบมาตรฐานในการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดจากกลุ่มตัวอย่างทั้ง 6 รูปแบบ พบว่าแผนภาพการกระจายที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง Nat มีความสัมพันธ์ที่ดีในเชิงเส้นตรงมากที่สุด เนื่องจากข้อมูลเข้าใกล้กับเส้นตรงทแยงมุมหรือเส้นเป้าหมาย (Target line) ที่มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 1 ดังนั้นจึงให้ค่า  $R^2$  ที่อยู่ในระดับที่ดีเท่ากับ 0.92 แสดงดังภาพที่ 21 (ก) แต่จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของข้อมูลตลอดแนวเส้นเป้าหมายยังไม่ดีเนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่ยังมีการรวมกันเป็นกลุ่มอยู่ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของข้อมูลค่า TSS ที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง Nat+OD+FD พบว่ามีการกระจายตัวของข้อมูลบางส่วนออกจากเส้นเป้าหมายและมีการกระจายตัวลงมาด้านล่างตามแนวแกน y ส่งผลให้มีค่า  $R^2$  และ RPD ต่ำกว่าสมการจากกลุ่มอื่น และค่า Bias ติดลบ (ภาพที่ 21 (ฉ))

จากภาพที่ 22 แสดงสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients plot) ของความยาวคลื่นที่สำคัญสำหรับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานทำนายค่า TSS ที่ได้จากการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ 400-1140 นาโนเมตร จากแต่ละกลุ่มตัวอย่าง พบว่ามีความยาวคลื่นที่สำคัญซึ่งพบในช่วงเดียวกันและสอดคล้องกับพันธะซึ่งพบในโมเลกุลของน้ำตาล สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายค่า TSS ที่ได้จากสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วย MSC + SG-1D 23 pts จากกลุ่มตัวอย่าง Nat แสดงดังภาพที่ 22 (ก) พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลและมีความสำคัญต่อแบบจำลองสมการพบที่บริเวณตำแหน่งความยาวคลื่น 752, 959, 974, 990, 1017, 1092, 1107 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดโอเวอร์โทนอันดับสี่ของพันธะ C-H (Fourth overtone of O-H stretching band) การเกิดโอเวอร์โทนอันดับสามของพันธะ C-H (Third overtone of C-H stretching band) การเกิดโอเวอร์โทนอันดับที่สองของพันธะ O-H (O-H stretch second overtones) และการสั่นแบบคอมบิเนชันของ  $\text{CH}_2$  stretching +  $\text{CH}_2$  deformation +  $(\text{CH}_2)_n$  (Osborne และคณะ, 1993; Choi และคณะ, 2017; Saechua และคณะ, 2020) ที่เกี่ยวข้องกับพันธะ C-H และ O-H ในโครงสร้างโมเลกุลของน้ำตาล

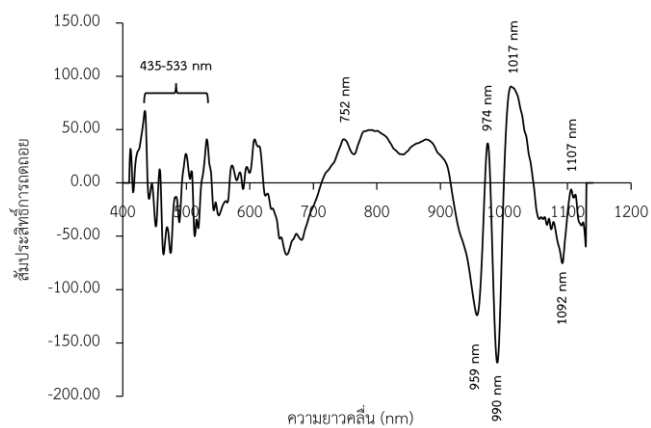


(จ) Nat+OD+FD

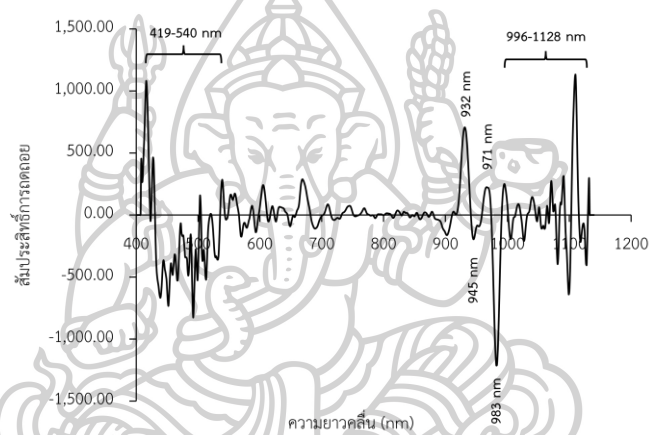
(ข) OD+FD

(ค) Nat+FD

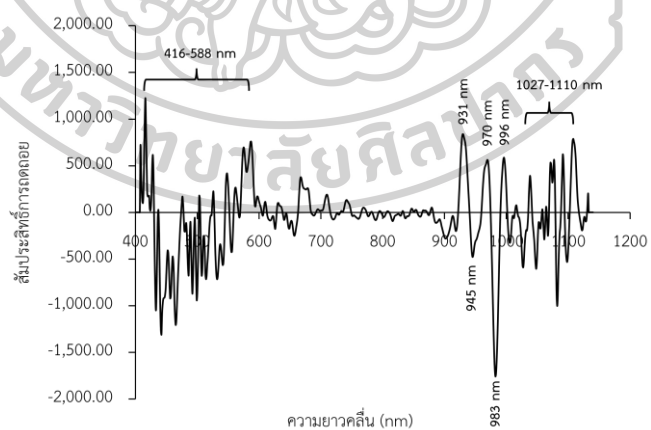
ภาพที่ 21 ลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่างที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร



(ก) Nat (MSC + SG-1D 23 pts)

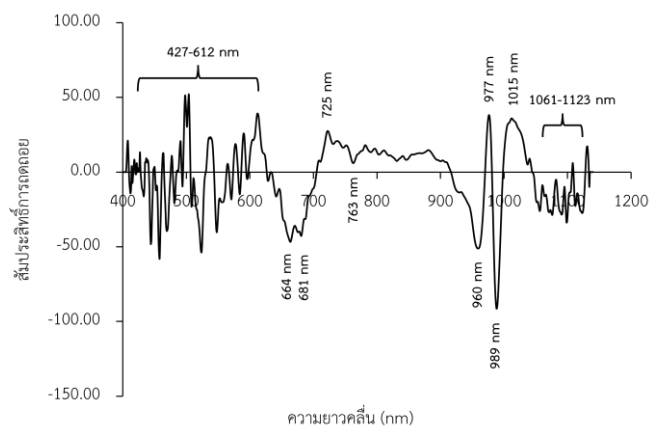


(ข) OD (SG-2D 17 pts)

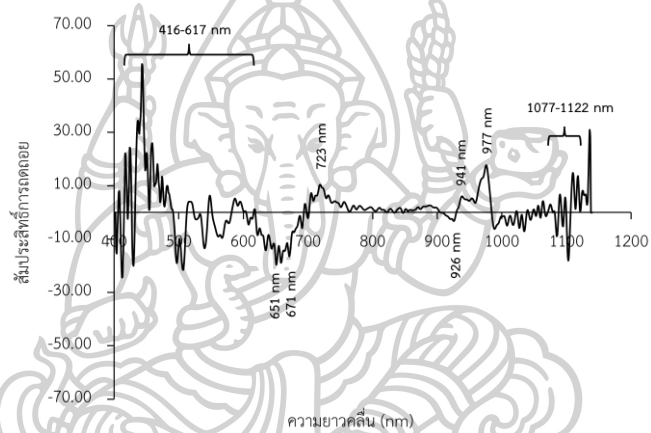


(ค) Nat+OD (SG-2D 17 pts)

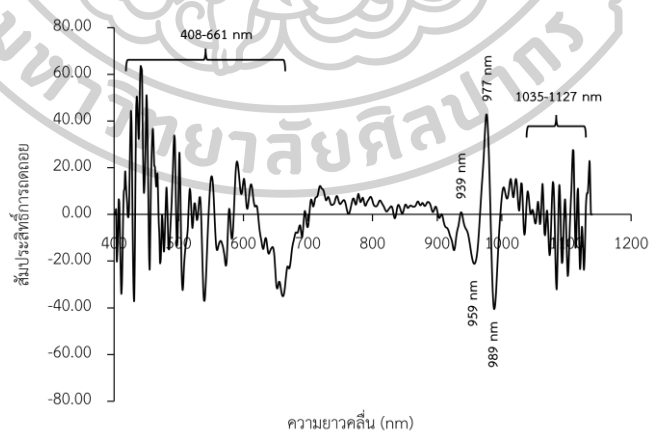
ภาพที่ 22 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน



(ง) Nat+FD (SNV + SG-1D 13 pts)



(จ) OD+FD (SNV + SG-1D 7 pts)



(ฉ) Nat+OD+FD (SNV + SG-1D 7 pts)

ภาพที่ 22 (ต่อ) สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

จากการประเมินศักยภาพในด้านความถูกต้องของสมการเทียบมาตรฐานค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดเพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) (รณฤทธิ์ ฤทธิ์ธรม, 2560) พบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากการใช้กลุ่มตัวอย่าง OD และ Nat+OD เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) กล่าวคือ

- ✓ ค่า SEP < ค่า  $T_{UE}$
- ✓ ค่า Bias < ค่า  $T_b$
- ✓ ค่า  $t_{obs}$  < ค่า  $t_{(1-\alpha/2)}$

แสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายค่า TSS จากกลุ่มดังกล่าวซึ่งสร้างจากข้อมูลในช่วงความยาวคลื่น vis/NIR มีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้สมการเทียบมาตรฐานการทำนายค่า TSS จากกลุ่มตัวอย่าง Nat และ Nat+FD ที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Leave one-out full cross-validation ถูกนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample t-Test เพื่อเปรียบเทียบว่าค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยจากการทดสอบพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p \geq 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายค่า TSS จากทั้งสองกลุ่มตัวอย่างมีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามพบว่าสมการการทำนายค่า TSS ที่สร้างจากข้อมูลกลุ่ม OD+FD และ Nat+OD+FD เนื่องจากไม่ผ่านมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) โดยมีค่า SEP มากกว่าค่า  $T_{UE}$  บ่งชี้ว่าค่า SEP ของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ค่า Bias มีค่ามากกว่าค่า  $T_b$  แสดงว่าค่า Bias แตกต่างจาก 0 อย่างมีนัยสำคัญหรือค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และค่า  $t_{obs}$  มากกว่าค่า  $t_{(1-\alpha/2)}$  แสดงให้เห็นว่าค่าความชันของกราฟ Scatter plots ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานแตกต่างจาก 1 อย่างมีนัยสำคัญ (อมสิน และคณะ, 2562; Pochanagone และคณะ, 2019; Bantadjan และคณะ, 2020 และ Singpoonga และคณะ, 2020) ทั้งนี้บ่งบอกว่าสมการจากข้อมูลกลุ่ม OD+FD และ Nat+OD+FD ไม่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายค่า TSS ดังแสดงในตารางที่ 29

จากนั้นนำสมการเทียบมาตรฐานสำหรับทำนายค่า TSS ที่ได้มาศึกษาความแม่นยำโดยการทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน ยกเว้นสมการรวม (Nat+OD+FD) ที่นำกลุ่มตัวอย่างเดิมมาลองทำนายสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้น พบว่าสมการ

ของ Nat สามารถใช้ในการทำนายกลุ่มตัวอย่าง OD และ FD ได้ เช่นเดียวกับสมการ Nat+OD สามารถใช้ในการทำนายกลุ่มตัวอย่าง FD ได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อมูลค่า TSS อยู่ในช่วงที่ถูกนำไปใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานกลุ่ม Nat และ Nat+OD สังเกตจากค่า Min-Max ดังตารางที่ 30 ในขณะที่สมการ OD ไม่สามารถใช้ในการทำนายตัวอย่างกลุ่ม Nat ได้ เนื่องมาจากสมการที่สร้างจากข้อมูล OD ไม่ครอบคลุมตัวอย่างกลุ่ม Nat ที่ถูกนำไปใช้ในการทำนาย นอกจากนี้พบว่าสมการรวม (Nat+OD+FD) สามารถใช้ในการทำนายกลุ่มตัวอย่างได้ทั้งสามกลุ่ม แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของสมการรวม ซึ่งสมการรวมมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายดังแสดงในตารางที่ 31 ด้วยเหตุนี้หากจะเลือกนำสมการไปประยุกต์ใช้ ผู้วิจัยจึงขอแนะนำให้เลือกสมการรวมเนื่องจากสามารถครอบคลุมข้อมูลของตัวอย่างในช่วงกว้าง อีกทั้งในการสร้างสมการควรสร้างสมการที่มีความกว้างของข้อมูลเพื่อความเป็นไปได้ในการทำนายตัวอย่างในอนาคต



ตารางที่ 29 ผลการประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานที่ให้การทำนายที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่างด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) สำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

กลุ่มตัวอย่าง	Bias	$\pm T_b$	Bias < $T_b$	SEP	$T_{UE}$	SEP < $T_{UE}$	$t_{obs}$	$t_{value}$	$t_{obs} < t_{value}$	Application
Nat										Paired-Sample t-Test
OD	-0.22	1.07	✓	3.51	4.61	✓	1.76	2.02	✓	✓
Nat+OD	-0.43	0.91	✓	3.72	4.32	✓	0.47	2.00	✓	✓
Nat+FD										Paired-Sample t-Test
OD+FD	-1.97	1.24	✗	4.46	4.35	✗	2.22	2.01	✗	✗
Nat+OD+FD	-1.07	1.10	✓	4.75	4.26	✗	3.00	1.99	✗	✗
(Overall)										

หมายเหตุ : ค่า UECLs หรือค่า  $T_{UE}$  (The unexplained error confidence limits), ค่า  $T_b$  (Bias confidence limits, BCLs หรือค่า  $T_b$ ) และค่า  $t_{obs}$  (The observed t value)

สมการเทียบมาตรฐานในกลุ่มตัวอย่าง Nat และ Nat+FD จะถูกนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample t-Test เพื่อดูความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ตารางที่ 30 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

ผลการเทียบมาตรฐานของแต่ละ กลุ่มตัวอย่าง	ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ดูนำไปใช้ ในการทำนาย	Prediction set				
		Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)
Nat	OD	30.90	89.30	77.32	10.98	14.20
	FD	58.50	95.20	79.52	14.08	17.71
OD	Nat	63.20	95.60	76.73	8.12	10.59
	FD	58.50	95.20	79.52	14.08	17.71
Nat+OD	FD	58.50	95.20	79.52	14.08	17.71
Nat+FD	OD	30.90	89.30	77.32	10.98	14.20
	Nat	63.20	89.40	76.44	7.84	10.25
OD+FD	Nat	63.20	89.40	76.44	7.84	10.25
	OD	41.10	89.30	77.66	10.26	13.21
Nat+OD+FD (Overall)	OD	41.10	89.30	77.66	10.26	13.21
	FD	58.50	95.20	79.52	14.08	17.71

หมายเหตุ : Min คือ ค่าน้อยที่สุด (Minimum), Max คือ ค่ามากที่สุด (Maximum), S.D. คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่า

สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation)

ตารางที่ 31 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ที่ได้จากการศึกษาความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานในแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

สมการเทียบมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง	ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ถูกนำไปใช้ในการทำนาย	วิธีการปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	Prediction set				Paired-Sample t-Test		
				$n_p$	$R_p^2$	SEP	Bias		Slope	RPD
Nat	OD	MSC + SG-1D 23 pts	7	136	-9.70	35.90	0.70	0.10	0.31	✓
	FD	pts		24	0.02	13.81	-1.89	0.54	1.02	✓
OD	Nat	SG-2D 17 pts	6	67	-0.18	7.96	3.80	0.65	1.02	✗
	FD			24	-1.24	19.53	-7.79	-0.38	0.72	✓
Nat+OD	FD	SG-2D 17 pts	8	24	-1.98	23.38	-6.56	-0.28	0.60	✓
Nat+FD	OD	SNV + SG-1D 13 pts	9	136	-5.78	19.04	21.26	-0.47	0.58	✗
OD+FD	Nat	SNV + SG-1D 7 pts	6	67	-0.59	7.97	5.80	0.07	0.98	✗
Nat+OD+FD (Overall)	Nat			66	0.79	3.61	0.18	1.19	2.17	✓
	OD	SNV+SG-1D 7 pts	8	135	0.86	3.87	-0.33	0.90	2.65	✓
	FD			24	0.82	5.65	-1.96	0.95	2.49	✓

หมายเหตุ : SG-Sm (Savitzky-Golay Smoothing second order polynomial), SNV (Standard normal variate), SG-1D (Savitzky-Golay first derivative second order polynomial), SG-2D (Savitzky-Golay Smoothing second derivative second order polynomial), LVs (Number of Latent variables),  $n_p$  (Number of samples in prediction set),  $R_p^2$  (Coefficients of determination of prediction), SEC (Standard error of calibration), SECV (Standard error of cross-validation), SEP (Standard error of prediction), RPD (The ratio of the standard error of performance to standard deviation)

#### 4.3.6 ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ที่ช่วงความยาวคลื่น 700 - 1140

##### นาโนเมตร

จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดด้วยเทคนิคการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (PLSR) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร พบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากข้อมูลของกลุ่มตัวอย่าง OD โดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับเรียบแบบซาวิตซ์กี-โกเลย์พหุนามอันดับสอง จำนวน 17 จุดร่วมกับวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน และการปรับแนวโน้ม (SG-Sm 17 pts + SNV) ให้ผลการสร้างสมการเทียบมาตรฐานในการทำนายค่า TSS ดีที่สุด โดยให้ค่า  $R^2$  และ RPD สูงที่สุด เท่ากับ 0.95 และ 4.52 ตามลำดับ ในขณะที่มีค่า SEP เท่ากับ 2.09 °Brix แสดงดังตารางที่ 32 เมื่อพิจารณาจากค่าทางสถิติ  $R^2$  เพื่อบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสมการเทียบมาตรฐาน (ตารางที่ 3) จากการรายงานของ Williams (2006) แสดงให้เห็นว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง OD สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานประเภทการตรวจคุณภาพและงานประกันคุณภาพได้เนื่องจากมีค่า  $R^2$  ที่สูงอยู่ในช่วง 0.82-0.90 ขึ้นไป นอกจากนี้จากการรายงานของ Zornoza และคณะ (2008) รายงานว่าค่า RPD ที่มีค่าตั้งแต่ 3.0 ขึ้นไป สามารถบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพของสมการการทำนายค่า TSS ที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง OD นั้นมีความถูกต้องอยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้ในการทำนายได้ดีมาก อย่างไรก็ตามพบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง Nat+OD+FD ให้ค่า  $R^2$  และ RPD ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.85 และ 2.63 ตามลำดับ ขณะที่ให้ค่า SEP สูงที่สุดเท่ากับ 3.64 °Brix แม้ว่าจะมีผลการทำนายที่ต่ำที่สุดแต่ก็พบว่าสมการรวมและสมการในกลุ่มอื่นๆ มีค่า RPD อยู่ในช่วง 2.5 ขึ้นไป รวมถึงมีค่า  $R^2$  ตั้งแต่ 0.85 ขึ้นไป ขณะที่ค่า SECV และค่า SEP มีค่าต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการเทียบมาตรฐานการทำนายค่า TSS ที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง Nat+OD+FD และกลุ่มตัวอย่างอื่นๆ ก็อยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้ในการทำนายได้ดีจนถึงดีมากเช่นกัน (Nicolai และคณะ, 2007; Zornoza และคณะ, 2008) นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าการเลือกใช้ช่วงความยาวคลื่นในช่วง NIR มาใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับการทำนายค่า TSS มีความเหมาะสมและให้ผลการทำนายที่ดีกว่าการเลือกสร้างสมการเทียบมาตรฐานจากช่วง vis/NIR เนื่องจากความยาวคลื่นที่สำคัญส่วนใหญ่สัมพันธ์กับพันธะที่มีความเกี่ยวข้องกับการติดตามค่า TSS ในขณะที่สมการเทียบมาตรฐานจากช่วง vis/NIR ที่ถูกสร้างขึ้นพบว่าความยาวคลื่นที่สำคัญส่วนใหญ่เป็นช่วงการดูดกลืนแสงของรงควัตถุต่างๆ ที่พบได้ในผลิตภัณฑ์อบแห้งที่เลือกใช้ในการศึกษาซึ่งมีสีที่ค่อนข้างหลากหลาย

นอกจากนี้ Saechua และคณะ (2020) ศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Soluble solids content, SSC) ในทุเรียนด้วยเทคนิค visible and short wave near infrared (Vis-SWNIR)

spectroscopic ขณะลำเลียงบนสายพาน ที่ช่วงความยาวคลื่น 450-1000 นาโนเมตร พบว่าสมการที่เลือกสร้างจากช่วงความยาวคลื่น 800 – 1000 นาโนเมตร ให้ผลการทำนายที่ดีกว่าโดยมีค่า  $R^2$ , RMSEP, bias, และ RPIQ (The ratio of performance to interquartile distance) เท่ากับ 0.70, 4.0 %, 0.4 %, และ 2.2 ตามลำดับ นอกจากนี้ Rongtong และคณะ (2018) ซึ่งใช้เทคนิค NIRS ในการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในมะละกอแช่หีบด้วยเทคนิค NIRS ที่ช่วงความยาวคลื่น 800 - 2400 นาโนเมตร ด้วยรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ พบว่าสมการการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดที่ได้จากเทคนิค PLSR ซึ่งสร้างขึ้นในช่วงความยาวคลื่น 800 – 1200 และ 1330 – 2400 นาโนเมตร ให้ผลการทำนายที่ดีกว่ากล่าวคือค่า  $R^2$ , RMSEP และ RPD เท่ากับ 0.974, 1.11 °Brix และ 3.68 ตามลำดับ และใช้จำนวนตัวแปร (Factor) เท่ากับ 8 ตัว ในขณะที่สมการการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดที่ได้จากเทคนิค moving window partial least squares regression (MWPLSR) ซึ่งสร้างขึ้นในช่วงความยาวคลื่น 866 - 1174, 1434 - 1938 และ 2028 - 2386 นาโนเมตร โดยใช้จำนวนตัวแปรเท่ากับ 6 ตัว ให้ค่า  $R^2$ , RMSEP และ RPD เท่ากับ 0.980, 0.68 °Brix และ 6.11 ตามลำดับ ซึ่งจากการรายงานพบช่วงการดูดกลืนที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 3 ช่วงความยาวคลื่น ได้แก่ 866 - 1174, 1434 - 1938 และ 2028 - 2386 นาโนเมตร สอดคล้องกับการเกิดโอเวอร์โทนอันดับที่สามของพันธะ C-H, การเกิดโอเวอร์โทนอันดับที่สองของพันธะ O-H และการสั่นแบบคอมบิเนชันของ  $\text{CH}_2$  stretching + CH deformation ซึ่งส่งผลให้มีผลการทำนายที่ดีกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากช่วงการดูดกลืนที่สัมพันธ์กับคาร์โบไฮเดรตและน้ำตาลส่วนใหญ่มักพบในช่วงที่ความยาวคลื่นสูงๆ กล่าวคือในช่วงความยาวคลื่น 1152 – 2500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการเกิดโอเวอร์โทนอันดับที่หนึ่งของพันธะ C-H, การเกิดโอเวอร์โทนอันดับที่สองของพันธะ C-H, การสั่นแบบคอมบิเนชันของพันธะ C-H และการสั่นแบบคอมบิเนชันของพันธะ C-H ร่วมกับพันธะ C-C (Osborne, 1993) สอดคล้องกับการศึกษาของ Bobasa และคณะ (2021) ดำเนินการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในผลิตภัณฑ์คาคา ดูพลัมแบบผงและแบบสารละลายเข้มข้น (puree) ด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีแบบพกพา (Hand-held near infrared spectroscopy) ในช่วงความยาวคลื่น 950 - 1600 นาโนเมตร ด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ พบว่าสมการที่ได้มีค่า  $R^2$ , SEP และ RPD เท่ากับ 0.70 และ 0.72, 0.20 °Brix และ 0.58 °Brix, และ 4.2 และ 3.8 สำหรับ ผลิตภัณฑ์คาคา ดูพลัมแบบผงและแบบสารละลายเข้มข้น ตามลำดับ ซึ่งพบช่วงการดูดกลืนที่สำคัญบริเวณตำแหน่ง 994 และ 1180 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิด โอเวอร์โทนอันดับที่สามและอันดับที่สองของพันธะ C-H (Third and second overtone) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในคาร์โบไฮเดรตและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ นอกจากนี้ยังพบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1031, 1199, 1292, 1428, 1433 และ 1459 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดโอเวอร์โทนอันดับที่หนึ่งของพันธะ O-H (OH stretch first overtone) ในคาร์โบไฮเดรตด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 32 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Validation set) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) สำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS)

กลุ่มตัวอย่าง	วิธีการปรับแต่ง สเปกตรัม	LVs		Calibration set (67%)				Cross-validation set				Validation set (33%)						
		N		$n_c$	$R^2_C$	SEC	$n_{cv}$	$R^2_{CV}$	SECV	Bias	Slope	RPD	$n_v$	$R^2_V$	SEP	Bias	Slope	RPD
Nat	SG-1D 21 pts	7	66	66	0.92	2.25	66	0.89	2.64	-0.02	0.91	2.97						
OD	SG-Sm 17 pts + SNV	6	135	91	0.95	2.41							44	0.95	2.09	0.01	0.94	4.52
Nat+OD	SG-Sm 9 pts + SNV	6	201	135	0.91	2.93							66	0.90	2.76	0.32	0.92	3.25
Nat+FD	SG-1D 19 pts	9	90	90	0.94	2.38	90	0.89	3.26	0.01	0.91	3.04						
OD+FD	SG-Sm 19 pts	10	159	107	0.89	3.72							52	0.90	3.11	-0.81	0.88	3.28
Nat+OD+FD (Overall)	SG-1D 13 pts	10	159	107	0.92	3.10							52	0.89	3.33	-0.40	0.88	3.06

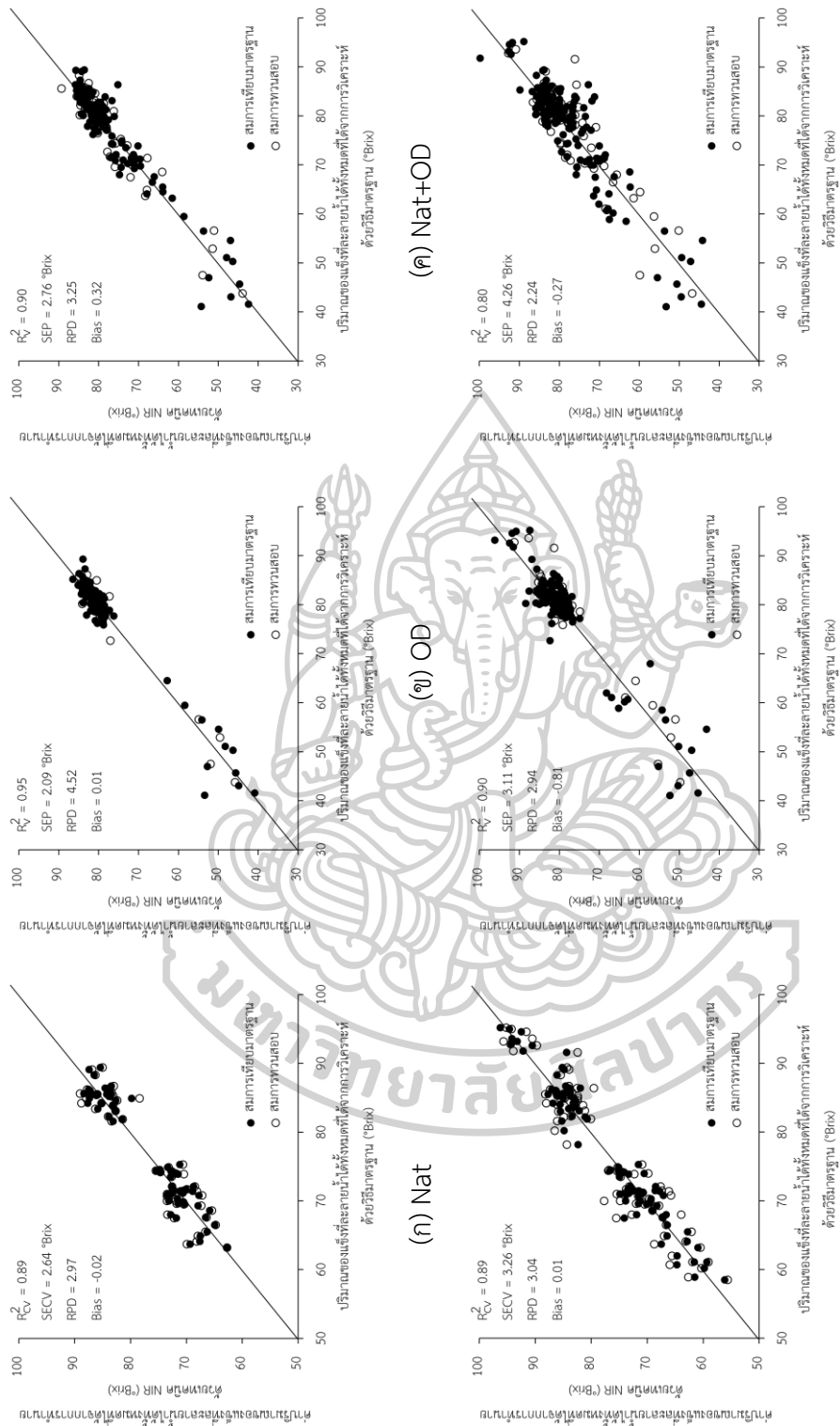
หมายเหตุ : SG-Sm (Savitzky-Golay Smoothing second order polynomial), SNV (Standard normal variate), SG-1D (Savitzky-Golay first derivative second order polynomial), SG-2D (Savitzky-Golay Smoothing second derivative second order polynomial), LVs (Number of Latent variables), N (Number of total samples),  $n_c$  (Number of samples in calibration set),  $n_{cv}$  (Number of samples in cross-validation set),  $n_v$  (Number of samples in validation set),  $R^2_C$  (Coefficients of determination in calibration set),  $R^2_{CV}$  (Coefficients of determination in cross-validation set),  $R^2_V$  (Coefficients of determination in validation set), SEC (Standard error of calibration), SECV (Standard error of cross-validation), SEP (Standard error of prediction), RPD (The ratio of the standard error of performance to standard deviation)

จากภาพที่ 23 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของสมการเทียบมาตรฐานในการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดจากกลุ่มตัวอย่างทั้ง 6 รูปแบบ พบว่าแผนภาพการกระจายที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง OD มีความสัมพันธ์ที่ดีในเชิงเส้นตรงมากที่สุด เนื่องจากข้อมูลเข้าใกล้กับเส้นตรงทแยงมุมหรือเส้นเป้าหมาย (Target line) ที่มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 1 ดังนั้นจึงให้ค่า  $R^2$  ที่อยู่ในระดับที่ดีเท่ากับ 0.95 แสดงดังภาพที่ 23 (ข) แต่จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของข้อมูลตลอดแนวเส้นเป้าหมายยังไม่ดีเนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่ยังมีการรวมกันเป็นกลุ่มอยู่ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของข้อมูลค่า TSS ที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง Nat+OD+FD พบว่ามีการกระจายตัวของข้อมูลบางส่วนออกจากเส้นเป้าหมายมากกว่าส่งผลให้มีค่า  $R^2$  และ RPD ต่ำกว่าสมการจากกลุ่มอื่น (ภาพที่ 23 (ฉ))

จากภาพที่ 24 แสดงสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients plot) ของความยาวคลื่นที่สำคัญสำหรับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานทำนายค่า TSS ที่ได้จากการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ 700-1140 นาโนเมตร จากแต่ละกลุ่มตัวอย่าง พบว่ามีความยาวคลื่นที่สำคัญซึ่งพบในช่วงเดียวกันและสอดคล้องกับพันธะซึ่งพบในโมเลกุลของน้ำตาล สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายค่า TSS ที่ได้จากสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี SG-Sm 17 pts + SNV จากกลุ่มตัวอย่าง OD แสดงดังภาพที่ 24 (ข) พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลและมีความสำคัญต่อแบบจำลองสมการพบที่บริเวณตำแหน่งความยาวคลื่น 765, 929, 952, 967, 984, 1002 - 1124 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดโอเวอร์โทนอันดับสี่ของพันธะ C-H (Fourth overtone of O-H stretching band) การเกิดโอเวอร์โทนอันดับสามของพันธะ C-H (Third overtone of C-H stretching band) การเกิดโอเวอร์โทนอันดับที่สองของพันธะ O-H (O-H stretch second overtones) และการสั่นแบบคอมบิเนชันของ  $\text{CH}_2$  stretching +  $\text{CH}_2$  deformation +  $(\text{CH}_2)_n$  (Osborne และคณะ, 1993; Choi และคณะ, 2017; Saechua และคณะ, 2020) ที่เกี่ยวข้องกับพันธะ C-H และ O-H ในโครงสร้างโมเลกุลของน้ำตาล สอดคล้องกับการรายงานของ Kapoor และคณะ (2022) ซึ่งพบช่วงการดูดกลืนที่สำคัญและมีความสัมพันธ์กับน้ำตาลในช่วงความยาวคลื่น 970 - 1000 นาโนเมตร เกิดจากการเกิดโอเวอร์โทนอันดับที่สองของพันธะ O-H ในโมเลกุลของน้ำตาล เช่นเดียวกับ Rongtong และคณะ (2018) พบช่วงการดูดกลืนที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดที่ความยาวคลื่น ได้แก่ 866 - 1174 นาโนเมตร สัมพันธ์กับการเกิดโอเวอร์โทนอันดับที่สามของพันธะ C-H และการเกิดโอเวอร์โทนอันดับที่สองของพันธะ O-H จากการรายงานของ Bobasa และคณะ (2021) พบช่วงการดูดกลืนที่สำคัญบริเวณตำแหน่ง 994 และ 1180 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดโอเวอร์โทนอันดับที่สามและอันดับที่สองของพันธะ C-H (Third and second overtone) ซึ่งเป็น

องค์ประกอบหลักในคาร์โบไฮเดรต เช่นเดียวกับ Saechua และคณะ (2020) ซึ่งพบช่วงการดูดกลืนที่สำคัญบริเวณตำแหน่ง 916, 954, 966, 981, 986 และ 992 นาโนเมตร ในทุเรียนซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (SSC) ประเภท non-reducing sugar กล่าวคือน้ำตาลซูโครส ซึ่งพบมากในทุเรียน และสัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ O-H และพันธะ C-H ของน้ำตาลซูโครสในน้ำ





(ก) Nat

(ข) OD

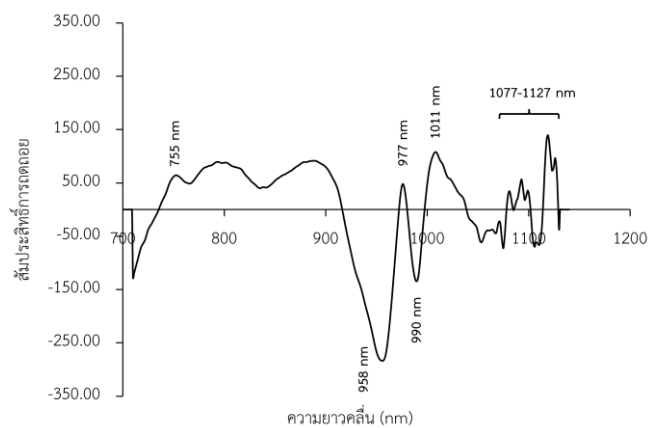
(ค) Nat+OD

(ง) Nat+FD

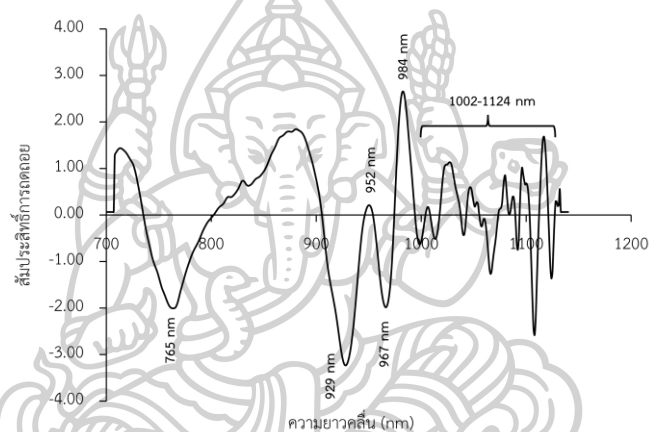
(ฉ) OD+FD

ภาพที่ 23 ลักษณะการกระจายจุดบนแผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR และค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดที่วัดด้วยวิธีมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่างที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

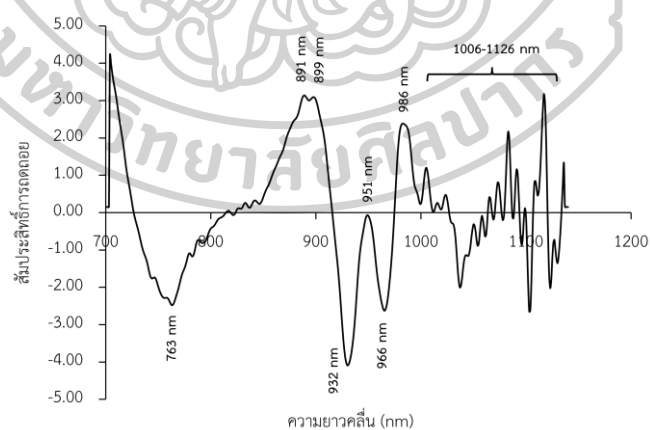




(ก) Nat (SG-1D 21 pts)

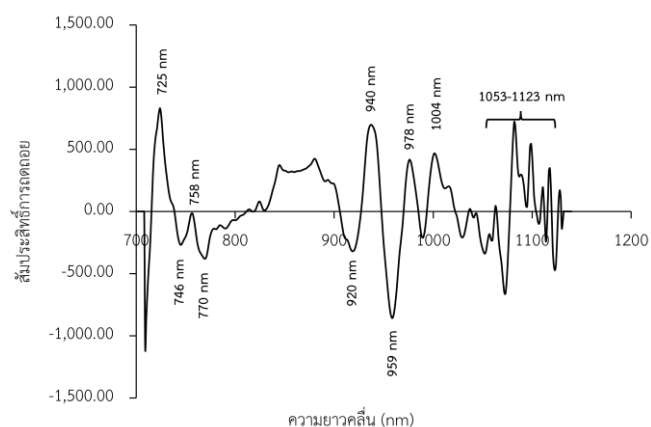


(ข) OD (SG-Sm 17 pts + SNV)

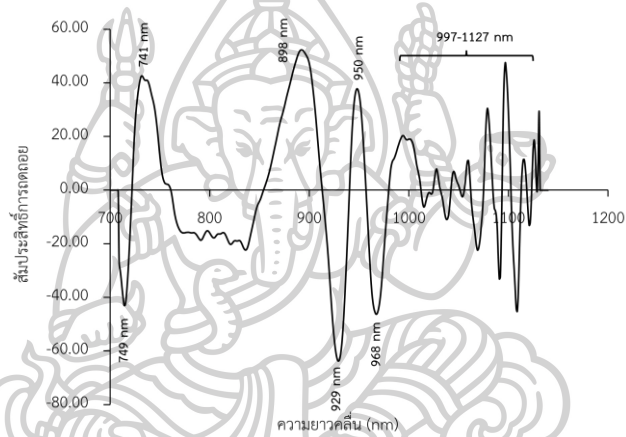


(ค) Nat+OD (SG-Sm 9 pts + SNV)

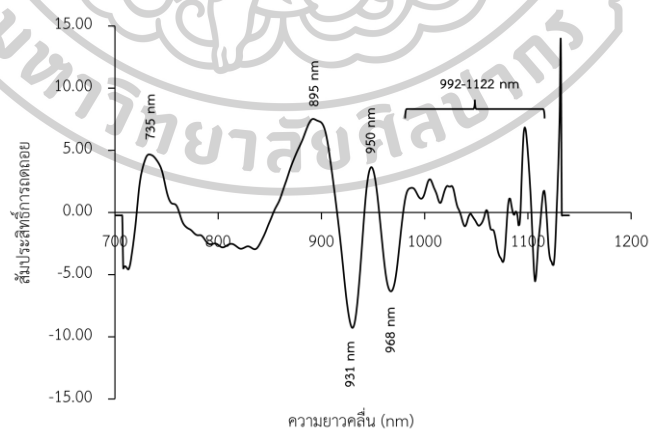
ภาพที่ 24 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน



(ง) Nat+FD (SG-1D 19 pts)



(จ) OD+FD (SG-Sm 19 pts)



(ฉ) Nat+OD+FD (SG-Sm 17 pts+SNV)

ภาพที่ 24 (ต่อ) สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานสำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ได้ทั้งหมดของแต่ละกลุ่มตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

จากการประเมินศักยภาพในด้านความถูกต้องของสมการเทียบมาตรฐานค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดเพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) (รณฤทธิ์ ฤทธิธณ, 2560) พบว่าสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างจากการใช้กลุ่มตัวอย่าง OD, Nat+OD, OD+FD และ Nat+OD+FD เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) กล่าวคือ

- ✓ ค่า SEP < ค่า  $T_{UE}$
- ✓ ค่า Bias < ค่า  $T_b$
- ✓ ค่า  $t_{obs}$  < ค่า  $t_{(1-\alpha/2)}$

แสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายค่า TSS จากกลุ่มดังกล่าวซึ่งสร้างจากข้อมูลในช่วงความยาวคลื่น NIR มีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้สมการจากกลุ่ม Nat และ Nat+FD ที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Leave one-out full cross-validation เมื่อนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample  $t$ -Test เพื่อเปรียบเทียบว่าค่าความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ จากการทดสอบพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p \geq 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าสมการการทำนายค่า TSS จากทั้งสองกลุ่มตัวอย่างมีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้เช่นเดียวกัน ยกเว้นสมการการทำนายค่า TSS ที่สร้างจากข้อมูลกลุ่ม Nat+OD+FD เนื่องจากไม่ผ่านมาตรฐาน ที่ว่าค่า Bias ควรมีค่าน้อยกว่า ค่า  $T_b$  แสดงให้เห็นว่าค่า Bias จากสมการรวมแตกต่างจาก 0 อย่างมีนัยสำคัญหรือค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากมีค่ามากกว่าค่า  $T_b$  (ออมสิน และคณะ, 2562; Pochanagone และคณะ, 2019; Bantadjan และคณะ, 2020 และ Singpoonga และคณะ, 2020) ทั้งนี้บ่งบอกว่าสมการจากข้อมูลกลุ่ม OD+FD และ Nat+OD+FD ไม่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายค่า TSS ดังแสดงในตารางที่ 33

จากนั้นนำสมการเทียบมาตรฐานสำหรับทำนายค่า TSS ที่ได้มาศึกษาความแม่นยำโดยการทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน ยกเว้นสมการรวม (Nat+OD+FD) ที่นำกลุ่มตัวอย่างเดิมมาลองทำนายสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้น พบว่ามีเพียงแค่สมการของ Nat, OD และ Nat+OD ที่สามารถใช้ในการทำนายกลุ่มตัวอย่าง FD ได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อมูลค่า TSS ของสมการทั้งสามครอบคลุมค่าของข้อมูลกลุ่ม FD ที่ถูกนำไปใช้ในการทำนายสังเกตได้จากค่า Min-Max ดังตารางที่ 34 แต่เมื่อพิจารณาการทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่างระหว่างสมการของ Nat และ OD พบว่าสมการทั้งสองกลุ่มไม่สามารถทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่าง OD และ Nat ได้ เนื่องจากข้อมูลค่า TSS ของสมการทั้งสองไม่ครอบคลุมค่าของข้อมูลกลุ่ม Nat และ OD ที่ถูก

นำไปใช้ในการทำนาย นอกจากนี้พบว่าสมการรวม (Nat+OD+FD) สามารถใช้ในการทำนายกลุ่มตัวอย่างทั้งสามกลุ่มได้ ซึ่งเป็นการนำข้อมูลชุดเดิมมาลองทำนายดังแสดงในตารางที่ 35 แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำและความถูกต้องของสมการรวมที่สร้างขึ้น โดยพบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับผลการประเมินตามมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) ซึ่งแนะนำว่าสมการรวมมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนาย



ตารางที่ 33 ผลการประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานที่ใช้การคำนวณที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่มตัวอย่างด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017(E) สำหรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

กลุ่มตัวอย่าง	Bias	$\pm T_b$	Bias < $T_b$	SEP	$T_{UE}$	SEP < $T_{UE}$	$t_{obs}$	$t_{value}$	$t_{obs} < t_{value}$	Application
Nat										Paired-Sample t-Test
OD	0.01	0.63	✓	2.09	2.98	✓	0.30	2.02	✓	✓
Nat+OD	0.32	0.68	✓	2.76	3.49	✓	0.27	2.00	✓	✓
Nat+FD										Paired-Sample t-Test
OD+FD	-0.81	0.87	✓	3.11	4.52	✓	0.73	2.01	✓	✓
Nat+OD+FD	-0.40	0.93	✓	3.33	3.76	✓	0.42	2.01	✓	✓
(Overall)										

หมายเหตุ : ค่า UECLs หรือค่า  $T_{UE}$  (The unexplained error confidence limits), ค่า  $T_b$  (Bias confidence limits, BCLs หรือค่า  $T_b$ ) และค่า  $t_{obs}$  (The observed t value)

สมการเทียบมาตรฐานในกลุ่มตัวอย่าง Nat และ Nat+FD จะถูกนำไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Paired-Sample t-Test เพื่อดูความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 34 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

ผลการเทียบมาตรฐานของแต่ละ กลุ่มตัวอย่าง	ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ดูนำไปใช้ ในการทำนาย	Prediction set				
		Min	Max	Mean	S.D.	CV (%)
Nat	OD	30.90	89.30	77.32	10.98	14.20
	FD	58.50	95.20	79.52	14.08	17.71
OD	Nat	63.20	95.60	76.73	8.12	10.59
	FD	58.50	95.20	79.52	14.08	17.71
Nat+OD	FD	58.50	95.20	79.52	14.08	17.71
Nat+FD	OD	30.90	89.30	77.32	10.98	14.20
	Nat	63.20	95.60	76.73	8.12	10.59
OD+FD	Nat	63.20	95.60	76.44	7.84	10.25
	OD	41.10	89.30	77.66	10.26	13.21
Nat+OD+FD (Overall)	OD	58.50	95.20	79.52	14.08	17.71
	FD	58.50	95.20	79.52	14.08	17.71

หมายเหตุ : Min คือ ค่าน้อยที่สุด (Minimum), Max คือ ค่ามากที่สุด (Maximum), S.D. คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และค่า

สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation)

ตารางที่ 35 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย (Prediction set) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ที่ได้จากการศึกษาความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานในแต่ละกลุ่มตัวอย่างที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

สมการเทียบมาตรฐานของแต่ละกลุ่มตัวอย่าง	ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทำนาย	วิธีการปรับแต่ง	Prediction set					Paired-Sample t-Test
			SEP	Bias	Slope	RPD		
		LVs	$R_p^2$	$n_p$				
Nat	OD	SG-1D 21 pts	19.04	8.91	-0.90	0.58	✗	
	FD		15.84	21.85	-1.21	0.89	✓	
OD	Nat	SG-Sm 17 pts + SNV	8.54	2.25	-0.50	0.95	✗	
	FD		17.08	-3.15	-2.15	0.82	✓	
Nat+OD	FD	SG-Sm 9 pts + SNV	18.60	2.62	-2.01	0.76	✓	
Nat+FD	OD	SG-1D 19 pts	9.47	8.18	1.23	1.16	✗	
OD+FD	Nat	SG-Sm 19 pts	6.02	-0.27	1.04	1.35	✓	
Nat+OD+FD	Nat		4.74	-0.37	0.97	1.65	✓	
(Overall)	OD	SG-Sm 17 pts+SNV	3.56	0.19	0.97	2.88	✓	
	FD		6.73	-0.87	1.13	2.09	✓	

หมายเหตุ : SG-Sm (Savitzky-Golay Smoothing second order polynomial), SNV (Standard normal variate), SG-1D (Savitzky-Golay first derivative second order polynomial), SG-2D (Savitzky-Golay Smoothing second derivative second order polynomial), LVs (Number of Latent variables),  $n_p$  (Number of samples in prediction set),  $R_p^2$  (Coefficients of determination of prediction), SEC (Standard error of calibration), SECV (Standard error of cross-validation), SEP (Standard error of prediction), RPD (The ratio of the standard error of performance to standard deviation)

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่าเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR) มีความเป็นไปได้ในการติดตามปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ในผักและผลไม้อบแห้งซึ่งมีกระบวนการทำแห้งที่แตกต่างกัน

จากการเลือกสร้างสมการเทียบมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง 6 รูปแบบ ได้แก่ Nat, OD, Nat+OD, Nat+FD, OD+FD และ Nat+OD+FD โดยใช้ช่วงความยาวคลื่น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่น vis/NIR (400-1140 นาโนเมตร) และช่วงความยาวคลื่น NIR (700 – 1140 นาโนเมตร) พบว่า ที่ช่วงความยาวคลื่น vis/NIR ประสิทธิภาพของสมการการทำนายค่า MC และ  $a_w$  ทั้ง 6 รูปแบบมีความแม่นยำและมีความถูกต้อง ในขณะที่สมการการทำนายค่า TSS มีประสิทธิภาพในการทำนายต่ำกว่า เนื่องจากช่วงการดูดกลืนของรงควัตถุในตัวอย่างโดดเด่นกว่าช่วงการดูดกลืนที่สัมพันธ์กับองค์ประกอบจำพวกคาร์โบไฮเดรต ในขณะที่การสร้างสมการเทียบมาตรฐานจากช่วงความยาวคลื่น NIR พบว่าประสิทธิภาพของสมการการทำนายค่า MC,  $a_w$  และ TSS มีความแม่นยำสูง สามารถนำสมการไปประยุกต์ใช้กับงานประเภทการตรวจคุณภาพ งานประกันคุณภาพ และงานวิจัยได้

จากการนำสมการทั้ง 6 รูปแบบไปใช้ในการทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่างที่มีกระบวนการทำแห้งที่แตกต่างกัน พบว่าสมการบางส่วนยังไม่สามารถทำนายค่าคุณภาพได้ดีทั้งนี้เนื่องมาจากความแปรปรวนของข้อมูลที่ถูกนำไปใช้ในการสร้างสมการยังไม่ครอบคลุมค่าคุณภาพของตัวอย่างภายนอกกลุ่ม จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทำนายข้ามกลุ่มตัวอย่างที่มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน

จากการทดสอบประสิทธิภาพและความแม่นยำ พบว่าสมการรวม Nat+OD+FD ซึ่งถูกนำไปใช้ไปใช้ในการทดสอบทำนายกลุ่มตัวอย่างเดิมที่นำไปใช้ในการสร้างสมการ มีความแม่นยำในการทำนาย MC  $a_w$  และ TSS และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายตัวอย่างได้



รายการอ้างอิง



- Abasi, S., Minaei, S., Jamshidi, B., Fathi, D., & Khoshtaghaza, M. H. (2019). Rapid measurement of apple quality parameters using wavelet de-noising transform with Vis/NIR analysis. *Scientia Horticulturae*, 252, 7-13.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.085>.
- Akkarachaneeyakorn, S., Phaisarn, R., Artsanthia, W., & Krettaweemonkong, K. (2021). Effect of drying methods and conditions on yield and physicochemical properties of gac aril powder. *The Journal of Applied Science*, 20(2), 220-242.  
<https://doi.org/10.14416/j.appsci.2021.02.016>.
- Aktag, I. G., & Gokmen, V. (2021). Investigations on the formation of alpha-dicarbonyl compounds and 5-hydroxymethylfurfural in fruit products during storage: New insights into the role of Maillard reaction. *Food Chemistry*, 363, 130280.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130280>.
- Amodio, M. L., Ceglie, F., Chaudhry, M. M. A., Piazzolla, F., & Colelli, G. (2017). Potential of NIR spectroscopy for predicting internal quality and discriminating among strawberry fruits from different production systems. *Postharvest Biology and Technology*, 125, 112-121.  
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.11.013>.
- AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis. (17th Edition)*. The Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, USA.
- Bantadjan, Y., Rittiron, R., Malithong, K., & Narongwongwattana, S. (2020a). Establishment of an accurate starch content analysis system for fresh cassava roots using short-wavelength near infrared spectroscopy. *ACS Omega*, 5(25), 15468-15475. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01598>.
- Bantadjan, Y., Rittiron, R., Malithong, K., & Narongwongwattana, S. (2020b). Rapid starch evaluation in fresh cassava root using a developed portable visible and near-infrared spectrometer. *ACS Omega*, 5(19), 11210-11216.  
<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01346>.
- Barzaghi, S., Gobbi, S., Torreggiani, D., Torielli, C., & Giangiacomo, R. (2008). Near infrared spectroscopy for the control of osmo-air dehydrated apple rings. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 16(3), 143-149.  
<https://doi.org/10.1255/jnirs.772>.

- Berk, Z. (2018). Chapter 24 - Frying, baking, and roasting. In Z. Berk (Ed.), *Food Process Engineering and Technology (Third Edition)* (pp. 583-590): Academic Press.
- Choi, J.-H., Chen, P.-A., Lee, B., Yim, S.-H., Kim, M.-S., Bae, Y.-S., Seo, H.-J. (2017). Portable, non-destructive tester integrating VIS/NIR reflectance spectroscopy for the detection of sugar content in Asian pears. *Scientia Horticulturae*, *220*, 147-153. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.03.050>.
- de Oliveira, G. A., de Castilhos, F., Renard, C. M.-G. C., & Bureau, S. (2014). Comparison of NIR and MIR spectroscopic methods for determination of individual sugars, organic acids and carotenoids in passion fruit. *Food Research International*, *60*, 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.10.051>.
- Ding, X., Guo, Y., Ni, Y., & Kokot, S. (2016). A novel NIR spectroscopic method for rapid analyses of lycopene, total acid, sugar, phenols and antioxidant activity in dehydrated tomato samples. *Vibrational Spectroscopy*, *82*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2015.10.004>.
- dos Santos, C. A. T., Lopo, M., Páscoa, R. N. M. J., & Lopes, J. A. (2013). A Review on the applications of portable near-infrared spectrometers in the agro-food industry. *Applied Spectroscopy*, *67*(11), 1215-1233. <http://as.osa.org/abstract.cfm?URI=as-67-11-1215>.
- Ecarnot, M., Baczyk, P., Tessarotto, L., & Chervin, C. (2013). Rapid phenotyping of the tomato fruit model, Micro-Tom, with a portable VIS-NIR spectrometer. *Plant Physiology and Biochemistry*, *70*, 159-163. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.05.019>.
- Fan, S., Wang, Q., Tian, X., Yang, G., Xia, Y., Li, J., & Huang, W. (2020). Non-destructive evaluation of soluble solids content of apples using a developed portable Vis/NIR device. *Biosystems Engineering*, *193*, 138-148. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.017>.
- Guo, Z., Huang, W., Peng, Y., Chen, Q., Ouyang, Q., & Zhao, J. (2016). Color compensation and comparison of shortwave near infrared and long wave near infrared spectroscopy for determination of soluble solids content of 'Fuji' apple. *Postharvest Biology and Technology*, *115*, 81-90. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.12.027>.

- Jamshidi, B., Minaei, S., Mohajerani, E., & Ghassemian, H. (2012). Reflectance Vis/NIR spectroscopy for nondestructive taste characterization of Valencia oranges. *Computers and Electronics in Agriculture*, *85*, 64-69. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.03.008>.
- Jayas, D. S. (2016). Food Dehydration. In *Reference Module in Food Science*: Elsevier.
- Kapoor, R., Malvandi, A., Feng, H., & Kamruzzaman, M. (2022). Real-time moisture monitoring of edible coated apple chips during hot air drying using miniature NIR spectroscopy and chemometrics. *LWT*, *154*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112602>.
- Li, J., Huang, W., Zhao, C., & Zhang, B. (2013). A comparative study for the quantitative determination of soluble solids content, pH and firmness of pears by Vis/NIR spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, *116*(2), 324-332. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.11.007>.
- Liu, F. X., Fu, S. F., Bi, X. F., Chen, F., Liao, X. J., Hu, X. S., & Wu, J. H. (2013). Physico-chemical and antioxidant properties of four mango (*Mangifera indica* L.) cultivars in China. *Food Chemistry*, *138*(1), 396-405. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.111>.
- Liu, Q., Ma, C., Wei, K., Tu, K., & Pan, L. (2021). Quantitative determination of sugar profiles in peach fruit during storage by an integrating sphere system. *Journal of Food Composition and Analysis*, *98*. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103843>.
- Liu, R., Qi, S., Lu, J., & Han, D. (2015). Measurement of soluble solids content of three fruit species using universal near Infrared spectroscopy models. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, *23*(5), 301-309. <https://doi.org/10.1255/jnirs.1156>.
- Martínez-Valdivieso, D., Font, R., Blanco-Díaz, M. T., Moreno-Rojas, J. M., Gómez, P., Alonso-Moraga, Á., & Del Río-Celestino, M. (2014). Application of near-infrared reflectance spectroscopy for predicting carotenoid content in summer squash fruit. *Computers and Electronics in Agriculture*, *108*, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.07.003>.
- Merzlyak, M. N., Solovchenko, A. E., & Gitelson, A. A. (2003). Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and

- anthocyanin content in apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 27(2), 197-211. [https://doi.org/10.1016/s0925-5214\(02\)00066-2](https://doi.org/10.1016/s0925-5214(02)00066-2).
- Mishra, P., Marini, F., Brouwer, B., Roger, J. M., Biancolillo, A., Woltering, E., & Echte, E. H. (2021). Sequential fusion of information from two portable spectrometers for improved prediction of moisture and soluble solids content in pear fruit. *Talanta*, 223(Pt 2), 121733. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121733>.
- Moscetti, R., Raponi, F., Ferri, S., Colantoni, A., Monarca, D., & Massantini, R. (2018). Real-time monitoring of organic apple (var. *Gala*) during hot-air drying using near-infrared spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 222, 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.023>.
- Nicolaï, 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(2), 99-118. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.06.024>.
- Oliveira, J. F., Brossard, M., Vendrame, P. R. S., Mayiliji, S., Corazza, E. J., Marchão, R. L., & Guimarães, M. d. F. (2013). Soil discrimination using diffuse reflectance Vis-NIR spectroscopy in a local toposequence. *Comptes Rendus Geoscience*, 345(11-12), 446-453. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2013.12.001>.
- Osborne, B. G., Fearn, T., & Hindle, P. H. (1993). Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis.
- Ozdemir, I. S., Ozturk, B., Celik, B., Saritepe, Y., & Aksoy, H. (2018). Rapid, simultaneous and non-destructive assessment of the moisture, water activity, firmness and SO<sub>2</sub> content of the intact sulphured-dried apricots using FT-NIRS and chemometrics. *Talanta*, 186, 467-472. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.05.007>.
- Pan, L., Lu, R., Zhu, Q., McGrath, J. M., & Tu, K. (2015). Measurement of moisture, soluble solids, sucrose content and mechanical properties in sugar beet using portable visible and near-infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 102, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.02.005>.

- Pasquini, C. (2003). Near Infrared Spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 14. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532003000200006>.
- Peng, J., Wang, K., Ma, C., Long, J., Tu, K., & Pan, L. (2021). Determination of anthocyanin and moisture content of purple sweet potatoes during drying process by their optical properties in the 400-1050 nm range. *Food Chemistry*, 359, 129811. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129811>.
- Phuphaphud, A., Saengprachatanarug, K., Posom, J., Maraphum, K., & Taira, E. (2020). Non-destructive and rapid measurement of sugar content in growing cane stalks for breeding programmes using visible-near infrared spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 197, 76-90. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.06.012>.
- Pochanagone, S., & Rittiron, R. (2019). Preliminary Study on the Determination of ppm-level concentration of histamine in tuna fish using a dry extract system for infrared coupled with near-infrared spectroscopy. *ACS Omega*, 4(21), 19164-19171. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02438>.
- Posom, J., Klprachan, J., Rattanasopa, K., Sirisomboon, P., Saengprachatanarug, K., & Wongpichet, S. (2020). Predicting marian plum fruit quality without environmental condition impact by handheld visible-near-infrared spectroscopy. *ACS Omega*, 5(43), 27909-27921. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03203>.
- Posom, J., Soonnamtiang, N., Kotethum, P., Konjun, P., Sirisomboon, P., Saengprachatanarug, K., & Wongpichet, S. (2020). Two different portables visible-near infrared and shortwave infrared region for on-tree measurement of soluble solid content of marian plum fruit. *Engineering Journal*, 24(5), 227-236. <https://doi.org/10.4186/ej.2020.24.5.227>.
- Pravitha, M., Manikantan, M. R., Ajesh Kumar, V., Shameena Beegum, P. P., & Pandiselvam, R. (2022). Comparison of drying behavior and product quality of coconut chips treated with different osmotic agents. *LWT*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113432>.

- Rambla, F. J., Garrigues, S., & de la Guardia, M. (1997). PLS-NIR determination of total sugar, glucose, fructose and sucrose in aqueous solutions of fruit juices. *Analytica Chimica Acta*, *344*(1), 41-53.  
[https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(97\)00032-9](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(97)00032-9).
- Diaz, J. M. R., Kirjoranta, S., Tenitz, S., Penttilä, P. A., Serimaa, R., Lampi, A.-M., & Jouppila, K. (2013). Use of amaranth, quinoa and kañiwa in extruded corn-based snacks. *Journal of Cereal Science*, *58*(1), 59–67.  
<https://doi.org/10.1016/J.JCS.2013.04.003>.
- Ramya, V., & Jain, N. K. (2017). A Review on Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables: An Integrated Approach. *Journal of Food Process Engineering*, *40*(3). <https://doi.org/10.1111/jfpe.12440>.
- Ratti, C. (2008). *Advances in Food Dehydration*. Boca Raton: CRC Press.
- Reich, G. (2005). Near-infrared spectroscopy and imaging: basic principles and pharmaceutical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, *57*(8), 1109-1143. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2005.01.020>.
- Rongtong, B., Suwonsichon, T., Ritthiruangdej, P., & Kasemsumran, S. (2018). Determination of water activity, total soluble solids and moisture, sucrose, glucose and fructose contents in osmotically dehydrated papaya using near-infrared spectroscopy. *Agriculture and Natural Resources*, *52*(6), 557-564.  
<https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.11.023>.
- Rungpichayapichet, P., Mahayothee, B., Nagle, M., Khuwijitjaru, P., & Müller, J. (2016). Robust NIRS models for non-destructive prediction of postharvest fruit ripeness and quality in mango. *Postharvest Biology and Technology*, *111*, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.006>.
- Saechua, W., Sharma, S., Nakawajana, N., Leepaitoon, K., Chunsri, R., Posom, J., Pornchaloempong, P. (2021). Integrating Vis-SWNIR spectrometer in a conveyor system for in-line measurement of dry matter content and soluble solids content of durian pulp. *Postharvest Biology and Technology*, *181*.  
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111640>.
- Shi, J., & Xue, S. J. *Advances in Food Dehydration*. (1<sup>st</sup> Edition ed.). Boca Raton: CRC Press.

- Siesler, H. W. (2001). Application to Industrial Process Control. In *Near-Infrared Spectroscopy* (pp. 247-268).
- Simeone, M. L. F., Parrella, R. A. C., Schaffert, R. E., Damasceno, C. M. B., Leal, M. C. B., & Pasquini, C. (2017). Near infrared spectroscopy determination of sucrose, glucose and fructose in sweet sorghum juice. *Microchemical Journal*, *134*, 125-130. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.05.020>.
- Sinelli, N., Casiraghi, E., Barzaghi, S., Brambilla, A., & Giovanelli, G. (2011). Near infrared (NIR) spectroscopy as a tool for monitoring blueberry osmo-air dehydration process. *Food Research International*, *44*(5), 1427-1433. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.046>.
- Singpoonga, N., Rittiron, R., Seang-On, B., Chaiprasart, P., & Bantadjan, Y. (2020). Determination of adenosine and cordycepin concentrations in cordyceps militaris fruiting bodies using near-infrared spectroscopy. *ACS Omega*, *5*(42), 27235-27244. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03403>.
- Tewari, J. C., Dixit, V., Cho, B. K., & Malik, K. A. (2008). Determination of origin and sugars of citrus fruits using genetic algorithm, correspondence analysis and partial least square combined with fiber optic NIR spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *71*(3), 1119-1127. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2008.03.005>.
- Thamasopinkul, C., Ritthiruangdej, P., Kasemsumran, S., Suwonsichon, T., Haruthaithanasan, V., & Ozaki, Y. (2017). Temperature compensation for determination of moisture and reducing sugar of longan honey by near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, *25*(1), 36-44. <https://doi.org/10.1177/0967033516685549>.
- Thanapase, W., Kasemsumran, S., Pathaveerat, S., Terdwongworakul, A., Ritthiruangdej, P., Suwonsichon, T., & Rittiron, R. (2012). *Near-Infrared technology and applications in industries*. Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute. Kasetsart University.
- Vega-Mercado, H., Marcela Góngora-Nieto, M., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2001). Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*, *49*(4), 271-289. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00224-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00224-7).



- Vera Zambrano, M., Dutta, B., Mercer, D. G., MacLean, H. L., & Touchie, M. F. (2019). Assessment of moisture content measurement methods of dried food products in small-scale operations in developing countries: A review. *Trends in Food Science & Technology*, *88*, 484-496.  
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.006>.
- Walsh, K. B., Blasco, J., Zude-Sasse, M., & Sun, X. (2020). Visible-NIR 'point' spectroscopy in postharvest fruit and vegetable assessment: The science behind three decades of commercial use. *Postharvest Biology and Technology*, *168*. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111246>.
- Wang, A., Hu, D., & Xie, L. (2014). Comparison of detection modes in terms of the necessity of visible region (VIS) and influence of the peel on soluble solids content (SSC) determination of navel orange using VIS-SWNIR spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, *126*, 126-132.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.11.011>.
- Williams, P., Saranwong, S., Kawano, S., Isaksson, T., & Segtnan, V. H. (2006). Applications to Agricultural and Marine Products. In *Near-Infrared Spectroscopy in Food Science and Technology* (pp. 163-277).
- Xie, L., Ye, X., Liu, D., & Ying, Y. (2009). Quantification of glucose, fructose and sucrose in bayberry juice by NIR and PLS. *Food Chemistry*, *114*(3), 1135-1140.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.10.076>.
- Xuan, G., Gao, C., Shao, Y., Wang, X., Wang, Y., & Wang, K. (2021). Maturity determination at harvest and spatial assessment of moisture content in okra using Vis-NIR hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology*, *180*.  
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111597>.
- Yang, Y., Tong, H., Yang, L., & Wu, M. (2021). Application of near-infrared spectroscopy and chemometrics for the rapid quality assessment of *Sargassum fusiforme*. *Postharvest Biology and Technology*, *173*.  
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111431>.
- Zhang, Y., Nock, J. F., Al Shoffe, Y., & Watkins, C. B. (2019). Non-destructive prediction of soluble solids and dry matter contents in eight apple cultivars using near-

infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, 151, 111-118.  
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.01.009>.

Zornoza, R., Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Scow, K. M., Arcenegui, V., & Mataix-Beneyto, J. (2008). Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(7), 1923-1930.  
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.04.003>.

เจนจิรา ผลโศกกุล. (2558). *ผลของวิธีการทำแห้งต่อสมบัติการต้านออกซิเดชันของสาหร่ายสไปรูลินา (Spirulina platensis)*. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร (Vol. ปริญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต): มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

เสริม จันทร์ฉาย. (2560). *เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ (Solar Drying Technology)*. (พิมพ์ครั้งที่ 1). บริษัท เพชรเกษมพรินติ้ง จำกัด: หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

นิธิยา รัตนานนท์. (2539). *เคมีอาหาร*. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมและการเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พิสิฐ วงศ์สง่าศรี. (2563). *เทคโนโลยีการแช่เยือกแข็ง (Freezing Technology)*. กลุ่มวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ กองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ กรมประมง.

รณฤทธิ ฤทธิธรม. (2555). *เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร.

รณฤทธิ ฤทธิธรม. (2563). Technical terms in NIR and Pretreatments of NIR spectra. เอกสารประกอบการสอนรายวิชา 02212543 สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดใกล้ (*Near Infrared Spectroscopy*).

รณฤทธิ ฤทธิธรม. (2563). เอกสารประกอบการสอนการสร้างระบบ NIR เพื่อการวิเคราะห์ประจำวัน. ลลิตา ออมสิน, รณฤทธิ ฤทธิธรม, วีระศักดิ์ สุระเรืองชัย และ รัชดาภรณ์ หนูทัศน. (2562). เครื่องวิเคราะห์ค่า CCS ของอ้อยแบบพกพาด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้. *วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย*, 25(2), 50-61.

วารุณี ธนะแพสย์, ศุมาพร เกษมสำราญ, ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, ชงชัย สุวรรณลิขณณ์ และ รณฤทธิ ฤทธิธรม. (2555). *เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร.

- วิษณีย์ ยืนยงพุทธกาล. (2013). ปัจจัยที่มีผลต่อการดองน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสของผักและผลไม้. *Burapha Science Journal*, 18(1), 226-233.
- ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ และ อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. (2555). เครื่องมือและอุปกรณ์สเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2563). ระบบแสดงข้อมูลทางสถิติ เรื่อง การนำเข้าและส่งออกผักและผลไม้อบแห้ง.
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards) (2549). เนื้อลำไยสดอบแห้ง. สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- สุธิดา เรืองชชาปณ์. (2563). การพัฒนาและทดสอบการทำนายความชื้นไม่ย่างพาราแปรรูปด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา. วิศวกรรมเกษตร (Vol. วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต). บัณฑิตวิทยาลัย: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุนัน ปานสาคร, จตุรงค์ ลังกาพินธุ์, ศุภณัฐ พริกบุญจันทร์ และ อาทิพัฒน์ ศรีชุมพล (2020). ผลของการดองน้ำออกบางส่วนโดยวิธีออสโมซิสต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เมล่อนกึ่งแห้ง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (วท.), 29(4). <https://doi.org/10.14456/tstj.2021.60>.
- อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. (2555). การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร.
- อรรวรรณ จันทร์เรืองฤทธิ์ และ อาจารย์ สายบุญยัง. (2550). การศึกษาการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งของผลไม้ต่างชนิด (Study on Freeze Dried of Fruits). สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.







มาตรฐานข้อกำหนดปริมาณความชื้น ค่าอาหารแอกติวิตี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้แช่แข็ง

ตามมาตรฐานต่างๆ ที่กำหนดขึ้นในแต่ละประเทศ

ตารางที่ 36 มาตรฐานข้อกำหนดปริมาณความชื้นในผักและผลไม้แช่แข็งตามมาตรฐานต่างๆ

ผลิตภัณฑ์	ชนิดของผลิตภัณฑ์ หรือการกำหนด ปริมาณความชื้น	ข้อกำหนดร้อยละปริมาณความชื้นมาตรฐานโดยมวล (%)		ข้อกำหนดค่า $a_w$ และค่า TSS	หมายเหตุ	ประเภท มาตรฐานและ เลขเอกสาร
		ไม่ผ่านการเติมวัตถุกัน เสียหรือกระบวนการ ใดๆ	ผ่านการเติมวัตถุกันเสีย หรือเก็บ รักษาด้วยวิธีอื่น (เช่น การพาสเจอร์ไรส์)			
ผัก	ผลไม้แช่แข็ง	ไม่เกินร้อยละ 12.0	-	ไม่เกิน 0.6	รวมถึงผักและผลไม้ที่เป็น สมุนไพรที่ใช้เป็นอาหาร แต่ไม่ ครอบคลุมกล้วยอบ เนื้อ มะพร้าวอบ เนื้อลำใยอบแห้ง	มผช.136/2558
กล้วยอบ		-	-	ไม่เกิน 0.85	-	มผช.112/2558
เนื้อลำใยอบแห้ง		ไม่เกินร้อยละ 18.0	-	ไม่เกิน 0.6 และ ต่ำกว่า 80 องศาบริกซ์ (°Brix)	-	มผช. 1385/2558
เนื้อมะพร้าวอบไม่ ปรุงรสและปรุงรส		ไม่เกินร้อยละ 5.0	-	-	-	มผช.685/2558
เนื้อลำใยสดอบแห้ง		ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 12.0 และไม่เกินร้อยละ 18.0	-	ไม่เกิน 0.6 และ ต่ำกว่า 80 °Brix	-	มาตรฐานสินค้า มกษ-8-2549

ตารางที่ 36 (ต่อ) มาตรฐานข้อกำหนดปริมาณความชื้นในผักและผลไม้อบแห้งตามมาตรฐานต่างๆ

ผลิตภัณฑ์	ชนิดของผลิตภัณฑ์ หรือการกำหนด ปริมาณความชื้น	ข้อกำหนดร้อยละปริมาณความชื้นมาตรฐานโดยมวล (%)		ข้อกำหนดค่า a <sub>w</sub> และค่า TSS	หมายเหตุ	ประเภท มาตรฐานและ เลขเอกสาร	
		ไม่ผ่านการเติมวัตถุกัน เสียหรือกระบวนการ ใดๆ	ไม่ผ่านการเติมวัตถุกันเสียหรือ กระบวนการใดๆ				
เนื้อลำโอบแห้ง สำหรับแปรรูป		ไม่เกินร้อยละ 18.0		ไม่เกิน 0.6	-	มาตรฐานสินค้า มกช. 9-2549	
		ไม่เกินร้อยละ 13.5 หรือเฉพาะเนื้อลำโอบ ไม่เกินร้อยละ 17.0		ไม่เกิน 0.6 และไม่ ต่ำกว่า 76 °Brix	ทั้งผล (เนื้อ เมล็ด และเปลือก)	มาตรฐานสินค้า มกช. 10-2549	
มะเขือเทศอบแห้ง	ความชื้นสูง (High moisture)	อยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 25.0 - 50.0					
		อยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 18.0 - 25.0	อยู่ในช่วง				
	ความชื้นปกติ (Regular moisture)	อยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 12.0 - 18.0	อยู่ในช่วง	ระหว่างร้อยละ 25.0 - 50.0			UNECE STANDARD DDP-19 Dried Tomatoes - 2007
		ความชื้นต่ำ (Reduced moisture)	อยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 6.0 - 12.0				



ตารางที่ 36 (ต่อ) มาตรฐานข้อกำหนดปริมาณความชื้นในผักและผลไม้อบแห้งตามมาตรฐานต่างๆ

ผลิตภัณฑ์	ชนิดของผลิตภัณฑ์ หรือการกำหนด ปริมาณความชื้น	ข้อกำหนดร้อยละปริมาณความชื้นมาตรฐานโดยมวล (%)		ข้อกำหนดค่า a <sub>w</sub> และค่า TSS	หมายเหตุ	ประเภทมาตรฐาน และเลขเอกสาร
		ไม่ผ่านการเติมวัตถุกัน เสียหรือกระบวนการ ใดๆ	ไม่ผ่านการเติมวัตถุกัน เสียหรือ กระบวนการใดๆ			
แอปเปิ้ลอบแห้ง	ไม่เกินร้อยละ 25.0	มากกว่าร้อยละ 25.0 แต่ไม่เกิน ร้อยละ 40.0	ไม่เกิน ร้อยละ 40.0	-	ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นอยู่ใน ในช่วงระหว่างร้อยละ 32.0 - 40.0 ควรระบุว่ามีค่าความชื้น สูงหรือเทียบเท่า	UNECE STANDARD DDP-15 Dried Apricots - 2016
มะละกอบแห้ง	ไม่เกินร้อยละ 18.0	อยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 18.0 - 25.0		-		UNECE STANDARD DDP-32 Dried Ripe Papayas - 2019
แอปเปิ้ลอบแห้ง	ไม่เกินร้อยละ 22.0	ไม่เกินร้อยละ 25.0		-		UNECE STANDARD DDP 16: Dried Apples - 2012
เมลอนอบแห้ง	ไม่เกินร้อยละ 18.0	อยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 18.0 - 25.0				UNECE STANDARD DDP-30 Dried Melons - 2019
กล้วยอบแห้ง	ไม่เกินร้อยละ 18.0	อยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 18.0 - 25.0		-		UNECE STANDARD DDP-29 Dried Bananas - 2018

ตารางที่ 36 (ต่อ) มาตรฐานข้อกำหนดปริมาณความชื้นในผักและผลไม้แห้งตามมาตรฐานต่างๆ

ผลิตภัณฑ์	ชนิดของผลิตภัณฑ์ หรือการกำหนด ปริมาณความชื้น	ข้อกำหนดร้อยละปริมาณความชื้นมาตรฐานโดยมวล (%)		ข้อกำหนดค่า a <sub>w</sub> และค่า TSS	หมายเหตุ	ประเภท มาตรฐานและ เลขเอกสาร
		ไม่ผ่านการเติมวัตถุกัน เสียหรือกระบวนการ ใดๆ	ไม่ผ่านการเติมวัตถุกัน เสียหรือ กระบวนการใดๆ			
สับปะรดอบแห้ง		ไม่เกินร้อยละ 20.0	มากกว่าร้อยละ 20.0 แต่ไม่เกิน ร้อยละ 44.0	-	ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นอยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 26.0 - 44.0 ควรระบุว่าเป็นผลิตภัณฑ์อบแห้ง แบบนุ่ม (Soft dried fruit) หรือ มีความชื้นสูง	UNECE STANDARD DDP-28 Dried Pineapples - 2014
มะม่วงอบแห้ง		ไม่เกินร้อยละ 15.0	มากกว่าร้อยละ 15.0 แต่ไม่เกิน ร้อยละ 35.0	-	ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นอยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 30.0 - 35.0 ควรระบุว่าเป็นผลิตภัณฑ์อบแห้ง แบบนุ่ม (Soft dried fruit) หรือ มีความชื้นสูง	UNECE STANDARD DDP-25 Dried Mangoes - 2013
พีชอบแห้ง		ไม่เกินร้อยละ 20.0	อยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 20.0 - 37.0	-		UNECE STANDARD DDP-20: Dried Peaches 2008
แอปริคอตอบแห้ง		ไม่เกินร้อยละ 20.0	ไม่เกินร้อยละ 25.0	ไม่เกิน 0.65	-	CXS 130-1981 Dried Apricots 2019

ตารางที่ 36 (ต่อ) มาตรฐานข้อกำหนดปริมาณความชื้นในผักและผลไม้อบแห้งตามมาตรฐานต่างๆ

ผลิตภัณฑ์	ชนิดของผลิตภัณฑ์ หรือ การกำหนดปริมาณ ความชื้น	ข้อกำหนดร้อยละปริมาณความชื้นมาตรฐานโดยมวล (%)		ข้อกำหนด ค่า a <sub>w</sub> และ ค่า TSS	หมายเหตุ	ประเภทมาตรฐานและเลข เอกสาร
		ไม่ผ่านการเติมวัตถุกันเสีย หรือกระบวนการใดๆ	ไม่ผ่านการเติมวัตถุกันเสีย หรือกระบวนการใดๆ			
ลูกเกด	ชนิด Malaga Muscatel	ไม่เกินร้อยละ 31.0			-	CXS 67-1981 Raisins 2019
	พันธุ์ที่มีเมล็ด	ไม่เกินร้อยละ 19.0			ทำจากองุ่นที่มีเมล็ด แต่ผ่านการนำเมล็ดออกแล้ว	
	พันธุ์ไร้เมล็ด ยกเว้น พันธุ์ Monukka	ไม่เกินร้อยละ 18.0		ไม่เกิน 0.65	-	
	พันธุ์ Monukka	ไม่เกินร้อยละ 19.0			-	
อินทผลัม	พันธุ์ Cane Sugar <sup>a</sup>	ไม่เกินร้อยละ 26.0	-		-	
	Daglat Nuur	ไม่เกินร้อยละ 30.0	-		ไม่ได้ผ่านกระบวนการทำแห้ง หรือการปรับลดความชื้น รวมถึงกระบวนการล้างและ/หรือการพาสเจอร์ไรส์	CXS 143-1985 Dates 2019
	พันธุ์ Invert Sugar <sup>a</sup>	ไม่เกินร้อยละ 30.0	-		-	
	ลำโอบแห้งทั้งผล <sup>a</sup>	ไม่เกินร้อยละ 13.5	-		นำผลแห้งไปตากแห้ง	Proposed Draft General Standard for Dried Fruits (CX/PFV 20/29/6)
ลำโอบแห้ง	เนื้อลำโอบแห้ง	ไม่เกินร้อยละ 18.0			-	
	เนื้อลำโอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	ไม่เกินร้อยละ 5.0	-		-	

ตารางที่ 36 (ต่อ) มาตรฐานข้อกำหนดปริมาณความชื้นในผักและผลไม้อบแห้งตามมาตรฐานต่างๆ

ผลิตภัณฑ์	ชนิดของผลิตภัณฑ์ หรือ การกำหนดปริมาณ ความชื้น	ข้อกำหนดร้อยละปริมาณความชื้นมาตรฐานโดยมวล (%)		ข้อกำหนดค่า a <sub>w</sub> และค่า TSS	หมายเหตุ	ประเภทมาตรฐาน และเลขเอกสาร
		ไม่ผ่านการเติมวัตถุกันเสีย หรือกระบวนการใดๆ	ไม่ผ่านการเติมวัตถุกันเสีย หรือกระบวนการใดๆ			
ลูกพลับอบแห้ง	ลูกพลับอบแห้งแบบทั้งผล <sup>a</sup>	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 - 25 และไม่เกินร้อยละ 35		ไม่เกิน 0.65	- - -	Proposed Draft General Standard for Dried Fruits (CX/PFV 20/29/6)
	ลูกพลับอบแห้งแบบทั้งผล แบบกึ่งแห้ง <sup>ข</sup>	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 35 และไม่เกินร้อยละ 60				
	ลูกพลับอบแห้งแบบสไลซ์ หรือชิ้น <sup>ค</sup>	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 15 และไม่เกินร้อยละ 40				
ผลไม้อบแห้ง		ขึ้นอยู่กับมาตรฐานของแต่ละชนิด		ไม่เกิน 0.65	-	CXS 177-1991 Desiccated Coconut
เนื้อมะพร้าวขูดฝอยหรือ เกล็ดมะพร้าวอบแห้งแบบ ไม่ปรุงรส (Desiccated coconut)		ไม่น้อยกว่าร้อยละ 4.0		-	-	
ผลไม้อบแห้ง		ไม่เกินร้อยละ 20.0		ไม่เกิน 0.7	-	DKS 2786: 2018
มะม่วงอบแห้ง		ไม่เกินร้อยละ 10.0				
ฝักอบแห้ง		ไม่เกินร้อยละ 8.0		-	-	KS 435: 1992
ผลไม้อบแห้ง		ไม่เกินร้อยละ 25.0		-	-	US 877: 2009

ตารางที่ 36 (ต่อ) มาตรฐานข้อกำหนดปริมาณความชื้นในผักและผลไม้แห้งตามมาตรฐานต่างๆ

ผลิตภัณฑ์	ชนิดของผลิตภัณฑ์ หรือการกำหนดปริมาณความชื้น	ข้อกำหนดร้อยละปริมาณความชื้นมาตรฐานโดยมวล (%)		ข้อกำหนดค่า a <sub>w</sub> และค่า TSS	หมายเหตุ	ประเภทมาตรฐานและเลขเอกสาร
		ไม่ผ่านการเติมวัตถุกันเสียหรือกระบวนการใดๆ	ไม่ผ่านการเติมวัตถุกันเสียหรือกระบวนการใดๆ			
มะเขือเทศอบแห้ง แบบธรรมชาติ	ความชื้นสูง (High moisture)	อยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 25.0 - 50.0		-		FDUS 890:2011
	ความชื้นปกติ (Regular moisture)	อยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 18.0 - 25.0	อยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 25.0 - 50.0	-		
	ความชื้นต่ำ (Reduced moisture)	อยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 12.0 - 18.0		-		
	ความชื้นต่ำมาก (Low moisture)	อยู่ในช่วง ระหว่างร้อยละ 6.0 - 12.0		-		
	แบบไม่มีเม็ด (Whole Pitted)	-		-		
ลูกพรุนอบแห้ง	แบบชิ้น (Pieces)	-	ไม่เกินร้อยละ 33.0	-	-	USDA Dried Fruit April 2020
	แบบทั้งผล (Whole Figs)	-	ไม่เกินร้อยละ 24.0	-	-	
ลูกฟิกซ์อบแห้ง	แบบชิ้น (Pieces)	-	ไม่เกินร้อยละ 30.0	-	-	
	แบบชิ้น (Pieces)	-	ไม่เกินร้อยละ 24.0	-	-	

ตารางที่ 36 (ต่อ) มาตรฐานข้อกำหนดปริมาณความชื้นในผักและผลไม้แห้งตามมาตรฐานต่างๆ

ผลิตภัณฑ์	ชนิดของผลิตภัณฑ์ หรือการกำหนดปริมาณความชื้น	ข้อกำหนดร้อยละปริมาณความชื้นมาตรฐานโดยมวล (%)		ข้อกำหนดค่า a <sub>w</sub> และค่า TSS	หมายเหตุ	ประเภทมาตรฐานและเลขเอกสาร
		ไม่ผ่านการเติมวัตถุกันเสียหรือกระบวนการใดๆ	ไม่ผ่านการเติมวัตถุกันเสียแต่ผ่านการอบหรือกระบวนการใดๆ			
อินทผลัมอบแห้ง	แบบชิ้นหั่นเต๋า (Diced Dates)	-	อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 11.0 - 15.0	-	พันธุ์ Deglet Noor หรือพันธุ์ Zahidi.	USDA Dried Fruit April 2020
	แบบหั่นหรืออัดเป็นรูป (Chopped/Extruded Date Pieces)	-	อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 14.0 - 18.0	-		
	แบบไม่มีเมล็ด (Whole Pitted)	-	ไม่เกินร้อยละ 20.0	-		
แอปเปิ้ลอบแห้ง	แบบชิ้นหั่นเต๋าหรือแบบชิ้น (Diced or pieces)	ไม่เกินร้อยละ 20.0	-	-	-	-
แอปเปิ้ลอบแห้ง	Dried (evaporated) apples -	-	ไม่เกินร้อยละ 26.0	-	-	-

หมายเหตุ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มผศ.) กระทรวงอุตสาหกรรม มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (THAI COMMUNITY PRODUCT STANDARD), สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช. หรือ มกษ.) กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards Ministry of Agriculture and Cooperatives), Codex Alimentarius Commission Proposed Draft General Standard for Dried Fruits (Step 4) (CX/PFV 20/29/6), คณะกรรมาธิการเศรษฐกิจแห่งสหประชาชาติในยุโรป (United Nations Economic Commission for Europe - UNECE) ร่างมาตรฐาน UNECE STANDARDS ON DRY AND DRIED PRODUCE (DDP), KENYA STANDARD (KS และ ๕ DKS), UGANDA STANDARD (US) หรือ FINAL DRAFT UGANDA STANDARD (FDUS), กระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา (United States Department of Agriculture – USDA)

ตามมาตรฐานของคณะกรรมการมาตรฐานอาหาร FAO/WHO (Codex Alimentarius Commission - CAC) หรือ Codex สามารถแบ่งประเภทพันธุ์ของอินทผลัมออกเป็น ดังนี้

- <sup>ก</sup> 1. พันธุ์ Cane sugar (ส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำตาลซูโครส) ได้แก่ Daglat Nuur (Deglet Noor) และ Daglat Beidha (Deglet Beidha)
- <sup>ข</sup> 2. พันธุ์ Invert Sugar (ส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต) กล่าวคือ กลูโคส และฟรุคโตส ได้แก่ Barhi (Barhee), Saidi (Saïdy), Khadhraawi (Khadrawy), Hallaawi (Halawy), Zahdi (Zahidi), และ Sayir (Sayer)

จากการนำเสนอเสนอร่างมาตรฐานทั่วไปสำหรับผลไม้อบแห้ง (Proposed Draft General Standard for Dried Fruits) ของ Codex ได้กำหนดประเภทหรือลักษณะของผลไม้อบแห้งและลูกพลับอบแห้งออกเป็น ดังนี้

ผลไม้อบแห้ง

- <sup>ก</sup> 1. ผลไม้อบแห้งทั้งผล (Dried whole longan) ผลไม้ทั้งผลที่ไม่ผ่านการปอกเปลือกและน้ำเมื่อดูดออก
- <sup>ข</sup> 2. เนื้อผลไม้อบแห้ง (Dried longan flesh) ผลไม้ที่ผ่านการปอกเปลือกและน้ำเมื่อดูดออกจากรูปร่าง ขนาด และความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ
- <sup>ค</sup> 3. เนื้อผลไม้อบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dried longan flesh) นำผลไม้ไปปอกเปลือกและนำเมล็ดออก ซึ่งลำโพงที่ได้อาจมีรูปร่าง ขนาด และความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ จากนั้นจึงนำไปแปรรูปด้วยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ลูกพลับอบแห้ง

- <sup>ก</sup> 1. ลูกพลับอบแห้งแบบทั้งผล (Dried whole persimmon) นำลูกพลับทั้งผลไปปอกเปลือก จากนั้นส่วนของเมล็ดจะถูกนำออกหรือไม่นำออกก็ได้ แล้วทำให้แบน
- <sup>ข</sup> 2. ลูกพลับอบแห้งแบบกึ่งแห้ง (Semi-dried whole persimmon) นำลูกพลับทั้งผลไปปอกเปลือก จากนั้นส่วนของเมล็ดจะถูกนำออกหรือไม่นำออกก็ได้
- <sup>ค</sup> 3. ลูกพลับอบแห้งแบบสไลซ์หรือชิ้น (Sliced/pieces) นำลูกพลับที่ผ่านการทำการทำแห้งแล้วไปปอกเปลือก จากนั้นนำส่วนของเมล็ดออก แล้วนำเนื้อไปสไลซ์ ซึ่งอาจมีลักษณะของขนาด รูปร่าง และความหนาที่ไม่สม่ำเสมอ



ภาคผนวก ข



### แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสับประดอบแห้งแบบธรรมชาติ



นำสับประดพันธุ์ปัตตาเวีย เนื้อ 2 ซึ่งอยู่ในระดับการสุกที่พร้อมรับประทานสังเกตจากสีของเปลือกที่มีสีเขียวประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ต่อสีเหลือง 30 เปอร์เซ็นต์ นำมาล้างทำความสะอาด สะเด็ดน้ำ



ตัดจุกและนำใบออก



หั่นบริเวณส่วนหัวและส่วนท้ายของผลออก จากนั้นหั่นชิ้นสับประดตามแนวขวางให้มีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร แล้วนำชิ้นสับประดที่ได้ไปเจาะเปลือกและแกนออกด้วยพิมพ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 7.5 เซนติเมตร และ 2.5 เซนติเมตร ตามลำดับ จะได้ชิ้นสับประดที่มี

ลักษณะเป็นรูปวงแหวน





นำชิ้นสับปะรดที่ได้ไปเจาะเปลือกและแกนออกด้วยพิมพ์ จะได้ชิ้นสับปะรดที่มีลักษณะเป็นรูปวง



นำชิ้นสับปะรดไปจัดเรียงบนถาดแบบชั้นเดียว (Single layer) แล้วนำเข้าอบด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด (Tray dryer) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งค่าวอเตอร์แอกติวิตีของผลิตภัณฑ์สุดท้าย มีค่าต่ำกว่า 0.6000



แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างบรอกโคลีอบแห้งแบบฟรีซดราย



นำบรอกโคลีมาล้างทำความสะอาด และสะอาดน้ำ



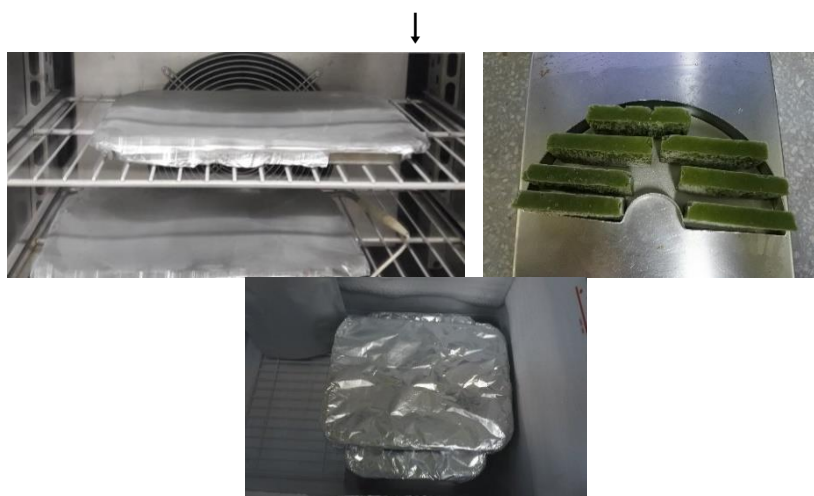
นำส่วนของใบ และก้านออก โดยจะเลือกใช้เฉพาะส่วนที่เป็นดอกอ่อนเท่านั้น



นำส่วนของดอกอ่อนไปปั่นให้ละเอียดจนมีเนื้อสัมผัสเนียนเป็นเนื้อเดียวกัน (paste) แล้วนำไปกรองผ่านกระชอนสเตนเลส



นำ paste ที่ผ่านการกรองไปบรรจุใส่ในพิมพ์ซิลิโคนขนาด 6×3×1 cm (กว้าง×ยาว×สูง) โดยใช้พายปาดผิวหน้าให้เรียบ



นำตัวอย่างที่บรรจุในพิมพ์ซิลิโคนไปแช่เยือกแข็งด้วยตู้แช่เยือกแข็ง (Blast Chiller Shock Freezer) ที่อุณหภูมิ  $-40$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา แกะตัวอย่างออกจากพิมพ์ แล้ววางบนถาดสำหรับเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Basic Research Benchtop Freeze Dryer) จากนั้นนำไปแช่เยือกแข็งด้วยตู้แช่แข็ง (Freezer) ที่อุณหภูมิ  $-18$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



นำตัวอย่างที่ผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยเครื่อง Freezer ไปเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $-80$  องศาเซลเซียส และที่สภาวะความดันเท่ากับ  $0.500$  mBar



บรรจุตัวอย่างใส่ถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ แล้วเก็บใส่ในกล่องสุญญากาศที่บรรจุซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวัดสเปกตรัมและวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีต่อไป



ภาคผนวก ค

สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางสถิติสำหรับวิเคราะห์ความถูกต้องของ  
สมการเทียบมาตรฐานที่ได้จากเทคนิค NIRS

1. ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, R) (Choi และคณะ, 2017)

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)SD_x SD_y}$$

เมื่อ  $x_i$  คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (Reference analysis) ของตัวอย่างที่  $i$   
 $\bar{x}$  คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากตัวอย่าง  $x_i$   
 $y_i$  คือ ค่าที่ได้จากสมการการทำนายด้วยเทคนิค NIR ของตัวอย่างที่  $i$   
 $\bar{y}$  คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากตัวอย่าง  $y_i$   
 $SD_x$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน  
 $SD_y$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ได้จากสมการการทำนายด้วยเทคนิค NIR

2. ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) (Singpoonga และคณะ, 2020)

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

เมื่อ  $x_i$  คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (Reference analysis) ของตัวอย่างที่  $i$   
 $\bar{x}$  คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากตัวอย่าง  $x_i$   
 $y_i$  คือ ค่าที่ได้จากสมการการทำนายด้วยเทคนิค NIR ของตัวอย่างที่  $i$   
 $\bar{y}$  คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากตัวอย่าง  $y_i$

3. ค่าความคลาดเคลื่อนหรือความผิดพลาด (Residuals หรือ error) (ฤทธิธิน, 2563)

$$e_i = \hat{y}_i - y_i$$

เมื่อ  $\hat{y}_i$  คือค่าที่ได้จากสมการการทำนายด้วยเทคนิค NIR ของตัวอย่างที่  $i$

$y_i$  คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (Reference analysis) ของตัวอย่างที่  $i$

4. ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการสร้างสมการของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Standard error of calibration, SEC) (ฤทธิธิน, 2563)

$$SEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i^2)}{n_c - p - 1}}$$

เมื่อ  $e_i$  คือ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (Reference analysis) ของตัวอย่างที่  $i$  กับค่าที่ได้จากสมการการทำนายด้วยเทคนิค NIR ของตัวอย่างที่  $i$   
 $n_c$  คือ จำนวนตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set)

$p$  คือ จำนวนเทอมหรือจำนวนตัวแปร (factors) ที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

5. ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของชุดสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Root mean square error of calibration, RMSEC) (หนูทัศน และคณะ, 2020)

$$RMSEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n - f - 1}}$$

เมื่อ  $y_i$  คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (Reference analysis) ของตัวอย่างที่  $i$

$\hat{y}_i$  คือ ค่าที่ได้จากสมการการทำนายด้วยเทคนิค NIR ของตัวอย่างที่  $i$

$n$  คือ จำนวนตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set)

$f$  คือ จำนวนตัวแปร (Factor) ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

6. ค่าความเอนเอียงหรือค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการทำนาย (Bias) (ฤทธิธิน, 2563)

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} (y_i - \hat{y}_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i$$

เมื่อ  $\hat{y}_i$  คือค่าที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค NIR

$y_i$  คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (Reference analysis) ของตัวอย่างที่  $i$

7. ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Standard error of prediction, SEP) (ฤทธิรณ, 2563)

$$\text{SEP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n_v - 1}}$$

เมื่อ  $\hat{y}_i$  คือ ค่าที่ได้จากสมการการทำนายด้วยเทคนิค NIR ของตัวอย่างที่  $i$

$y_i$  คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (Reference analysis) ของตัวอย่างที่  $i$

$n_v$  คือ จำนวนตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Validation set)

8. ค่าความผิดพลาดในการทำนาย (Root mean square error of prediction, RMSEP) (Jamshidi และคณะ, 2012 และ Posom และคณะ, 2020)

$$\text{RMSEP} = \sqrt{\frac{\sum_i [(y_i - y_{pre})]^2}{n}}$$

เมื่อ  $y_i$  คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (Reference analysis) ของตัวอย่างที่  $i$

$y_{pre}$  คือ ค่าที่ได้จากสมการการทำนายด้วยเทคนิค NIR ของตัวอย่างที่  $i$

$n$  คือ จำนวนตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Validation set)

9. ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการทดสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation (Root mean square error of cross-validation, RMSECV) (Jamshidi และคณะ, 2012 และ หนูทัศนีย์ และคณะ, 2020)



$$\text{RMSECV} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

เมื่อ  $y_i$  คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (Reference analysis) ของตัวอย่างที่  $i$   
 $\hat{y}_i$  คือ ค่าที่ได้จากสมการการทำนายด้วยเทคนิค NIR ของตัวอย่างที่  $i$   
 $n$  คือ จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการด้วยวิธี Cross-validation

#### 10. Ratio of standard deviation of performance to standard deviation (RPD)

$$\text{RPD} = \frac{\text{SD}_v}{\text{SEP}}$$

เมื่อ  $\text{SD}_v$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation set)

#### ประเมินศักยภาพของสมการเทียบมาตรฐานด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017

สมการเทียบมาตรฐานที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดจะถูกนำมาประเมินศักยภาพด้วยมาตรฐาน ISO 12099: 2017 (ฤทธิธณ, 2560) โดยจะทำการประเมินค่าทางสถิติดังต่อไปนี้ กล่าวคือ ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนาย (Standard error of prediction; SEP), ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias) และค่าความชัน (Slope) (ฤทธิธณ, 2019)

#### 11. การตรวจสอบ Bias หรือค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการทำนาย

การตรวจสอบค่า Bias เพื่อดูความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติสามารถคำนวณได้โดยใช้การทดสอบทางสถิติ  $t$ -test (paired  $t$ -test) แสดงวิธีการคำนวณดังสมการ หากค่า Bias มีค่าน้อยกว่า  $T_b$  แสดงว่า Bias หรือค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการทำนายไม่แตกต่างจาก 0 อย่างมีนัยสำคัญ

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

เมื่อ  $T_b$  คือ ขีดจำกัดความเชื่อมั่นของค่า Bias (Bias confidence limits, BCLs)

SEP (Standard error of prediction) คือ ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation set)

$\alpha$  คือ ระดับความน่าจะเป็นหรือระดับนัยสำคัญของการเกิดความผิดพลาดแบบที่ 1 ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% (probability of making a type I error, 5%)

n คือ จำนวนตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ

t คือ ค่า t ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบสมมติฐานแบบสองทาง (two-tailed test) ที่มี degree of freedom สอดคล้องกับค่า SEP และค่า  $\alpha$  ที่เลือก (t value for a two-tailed test with degrees of freedom associated with SEP and the selected probability of a type I error)

## 12. การตรวจสอบค่า SEP

สามารถตรวจสอบได้โดยการคำนวณค่า The unexplained error confidence limits (UECLs) ดังสมการ เพื่อดูความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติสามารถคำนวณได้โดยใช้การทดสอบทางสถิติ F-test หากค่า SEP มีค่าน้อยกว่า  $T_{UE}$  แสดงว่าค่า SEP หรือค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการไม่มีนัยสำคัญ สามารถยอมรับได้

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

เมื่อ  $T_{UE}$  คือ The unexplained error confidence limits (UECLs)

$F(\alpha, v, M)$  คือ ค่า F value

SEC คือ ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการสร้างสมการของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set)

$n_c$  คือ จำนวนตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration set)

$n_v$  คือ จำนวนตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation set)

$v$  เท่ากับ  $n_v - 1$  หมายถึง numerator degree of freedom ที่สอดคล้องกับค่า SEP ของการทวนสอบภายนอกกลุ่ม

$\alpha$  คือ ระดับความน่าจะเป็นของการเกิดความผิดพลาดแบบที่ 1 (type I error) โดยทั่วไปคือ 5% หรือที่ช่วงความเชื่อมั่น 95%

$M$  เท่ากับ  $n_c - p - 1$  หมายถึง denominator degree of freedom ที่สอดคล้องกับค่า SEC

P คือ จำนวนของ factors (สมการ PLS)

### 13. การตรวจสอบความชัน (Slope)

การตรวจสอบความชัน ซึ่งเป็นความชันของกราฟ Scatter plots ระหว่างค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (แกน Y) และค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR (แกน X) ซึ่งสอดคล้องกับสมการเส้นตรง  $y=a+b\hat{y}$  โดยจากสมการเส้นตรงมีค่า Slope และจุดตัดแกน y (Intercept) เป็น b และ a ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$b = \frac{S_{\hat{y}y}}{S_{\hat{y}}^2} \quad (1)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{\hat{y}} \quad (2)$$

เมื่อ b คือ ความชัน (Slope)

a คือ จุดตัดแกน y (Intercept)

$S_{\hat{y}y}$  คือ ความแปรปรวนร่วมระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (Covariance between the reference and predicted values)

$S_{\hat{y}}^2$  คือ ความแปรปรวนของค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR ในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Variance of  $n$  predicted values)

$\bar{y}$  คือ ค่าเฉลี่ยของค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Mean of reference values)

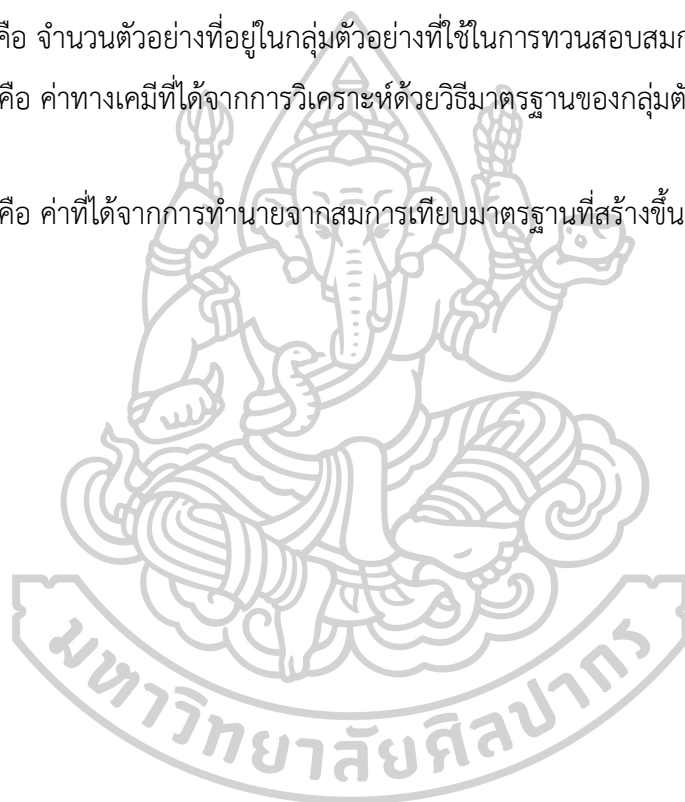
$\bar{\hat{y}}$  คือ ค่าเฉลี่ยของค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR (Mean of predicted values)

จากนั้นทดสอบความชันที่คำนวณได้โดยใช้การทดสอบทางสถิติ  $t$ -test ตามสมการ (3) และ (4) หากค่า  $t_{\text{obs}}$  น้อยกว่า  $t_{(1-\alpha/2)}$  แสดงว่าความชันของกราฟ Scatter plots ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR และค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานไม่แตกต่างจาก 1 อย่างมีนัยสำคัญ

$$S_{\text{res}} = \sqrt{\frac{\sum [y_i - (a + by_i)]^2}{n-2}} \quad (3)$$

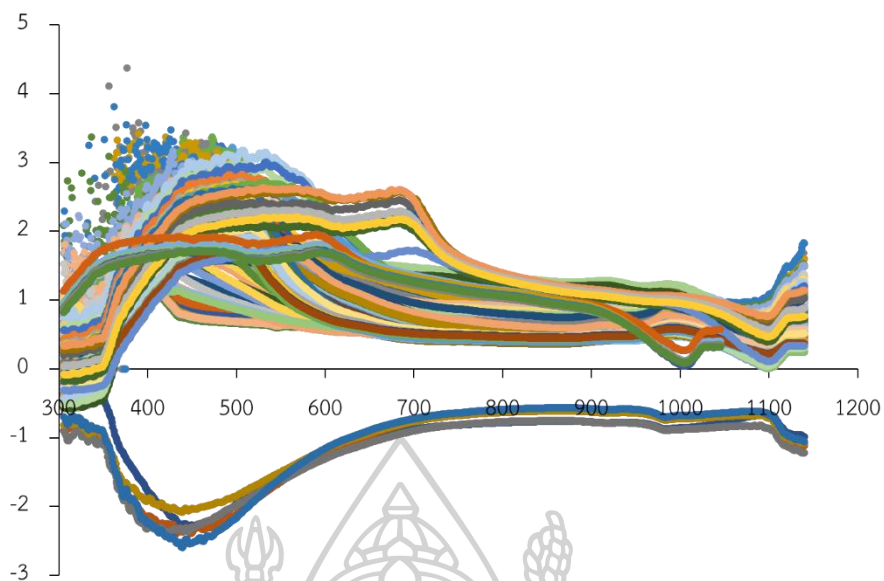
$$t_{\text{obs}} = |b-1| \sqrt{\frac{S_y^2(n-1)}{S_{\text{res}}^2}} \quad (4)$$

- เมื่อ  $S_{\text{res}}$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Residual (Residual standard deviation)
- $t_{\text{obs}}$  คือ The observed t value
- $n$  คือ จำนวนตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Validation set)
- $y_i$  คือ ค่าทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ
- $\hat{y}_i$  คือ ค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค NIR

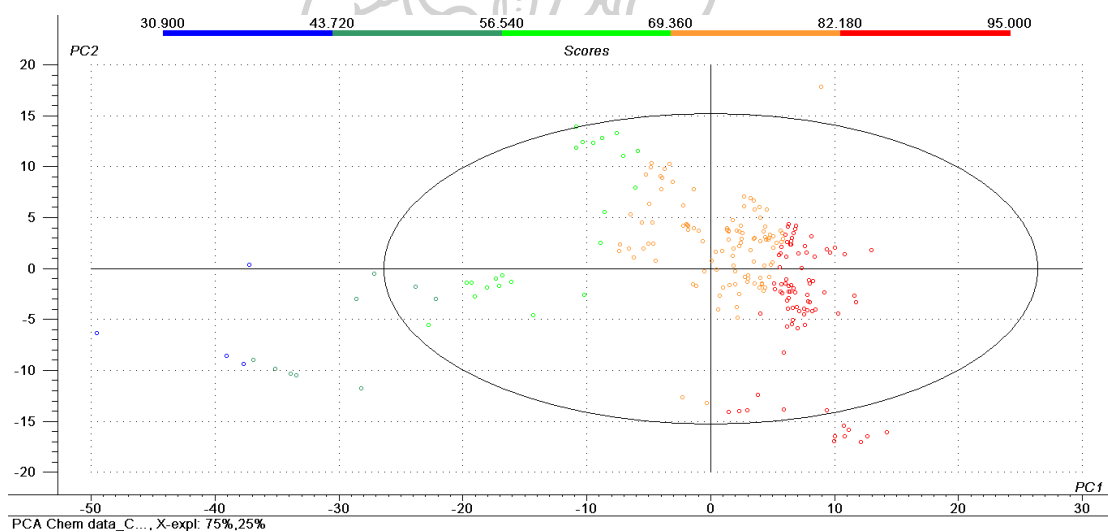




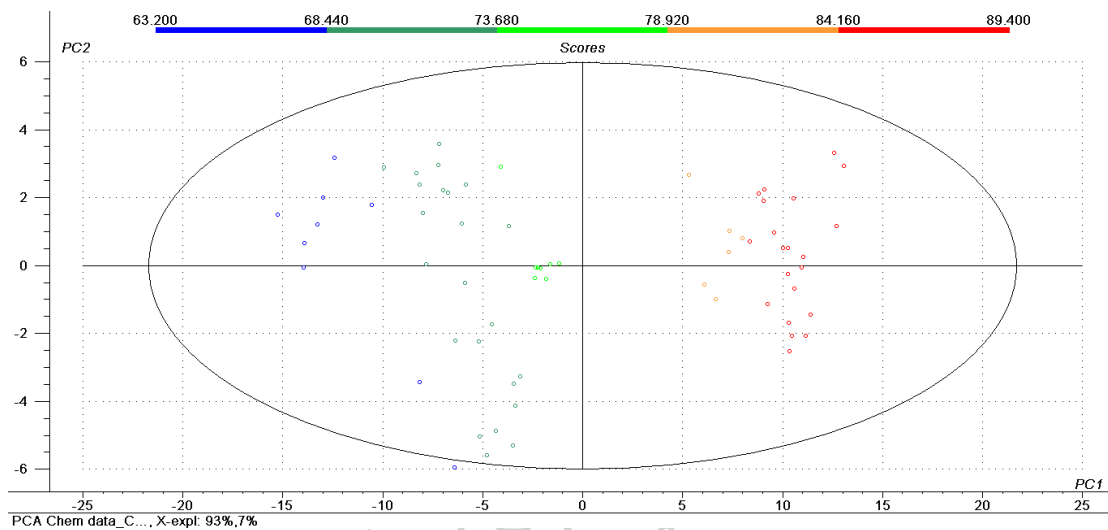
ภาคผนวก ง



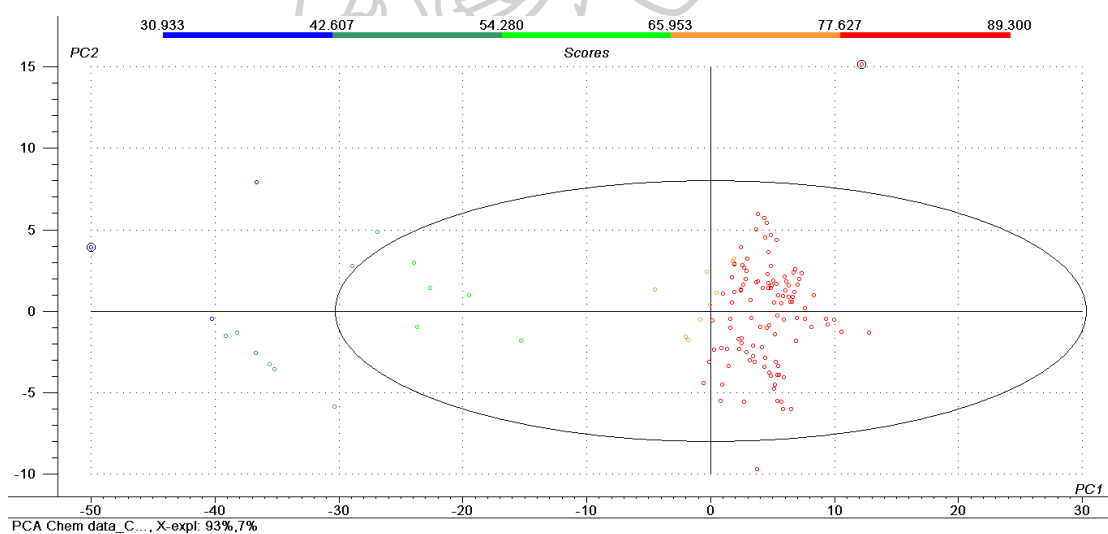
ภาพที่ 25 สเปกตรัมดิบ (Raw spectrum) ของตัวอย่างผักและผลไม้แห้งทั้ง 29 ยี่ห้อ ที่ช่วงความยาวคลื่น 305-1140 นาโนเมตร



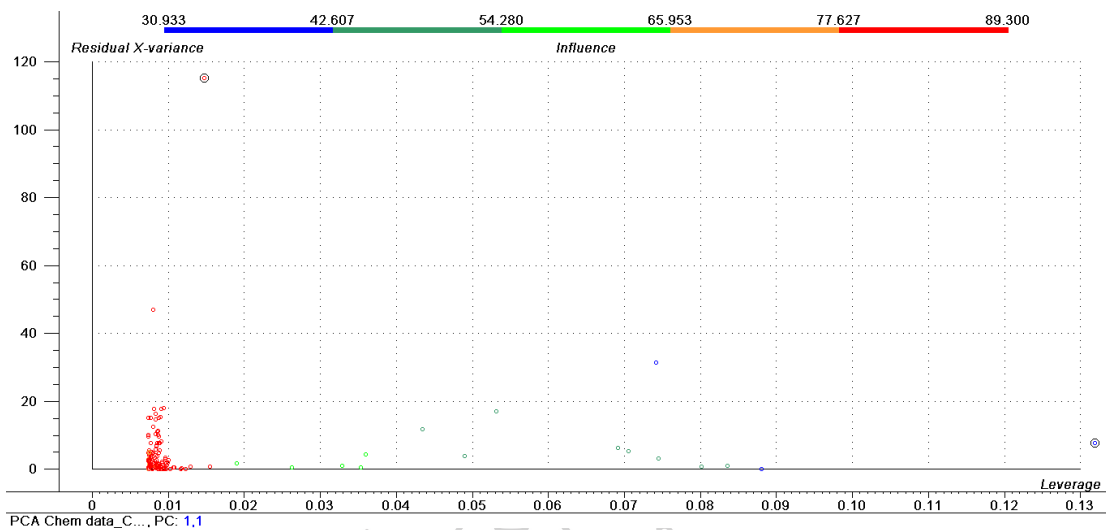
ภาพที่ 26 PCA score plot และ Residual X-variance แสดงข้อมูลผิดปกติ (Outliers) ของค่า MC,  $a_w$  และ TSS ในตัวอย่างผักและผลไม้แห้งทั้งสามกลุ่มที่กระจายตัวอยู่บนแกน PCA นอกเส้นแบ่งโดยใช้วิธีการทดสอบ Hotelling T-squared distribution



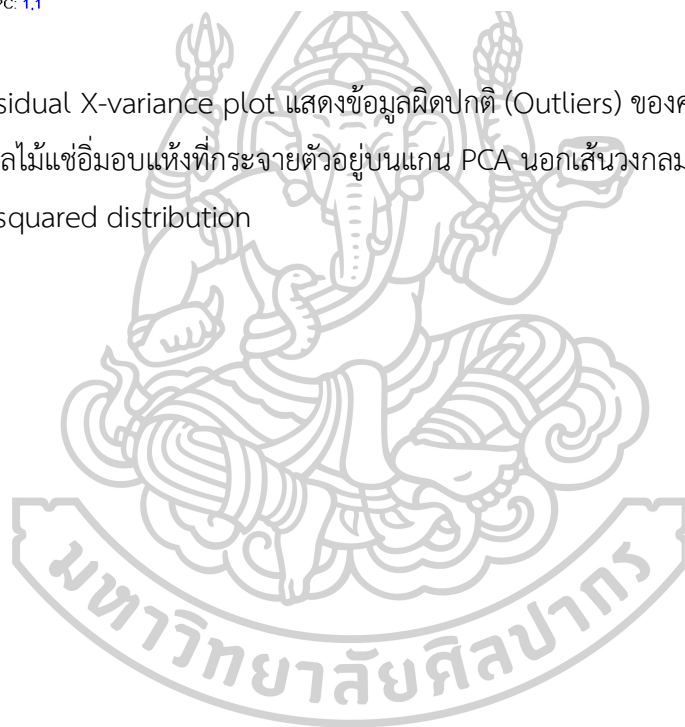
ภาพที่ 27 PCA score plot แสดงข้อมูลผิดปกติ (Outliers) ของค่า MC และ TSS ในตัวอย่างกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติที่กระจายตัวอยู่บนแกน PCA นอกเส้นวงกลมโดยใช้วิธีการทดสอบ Hotelling T-squared distribution



ภาพที่ 28 PCA score plot แสดงข้อมูลผิดปกติ (Outliers) ของค่า MC,  $a_w$  และ TSS ในตัวอย่างกลุ่มผลไม้เชื่อมอบแห้งที่กระจายตัวอยู่บนแกน PCA นอกเส้นวงกลมโดยใช้วิธีการทดสอบ Hotelling T-squared distribution



ภาพที่ 29 Residual X-variance plot แสดงข้อมูลผิดปกติ (Outliers) ของค่า MC,  $a_w$  และ TSS ในตัวอย่างกลุ่มผลไม้แช่อิ่มอบแห้งที่กระจายตัวอยู่บนแกน PCA นอกเส้นวงกลมโดยใช้วิธีการทดสอบ Hotelling T-squared distribution





ตารางที่ 37 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทดสอบของกลุ่มผลไม้แบบธรรมชาติ (Nat) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทดสอบ				RPD
		$R_c^2$	SEC	$R_{cv}^2$	SECv	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง										
										67
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	10	0.95	0.94	0.90	1.41	0.90	0.03	3.04		
SG-Sm 7 pts	10	0.95	0.93	0.90	1.37	0.91	0.04	3.12		
SG-Sm 11 pts	10	0.95	0.94	0.90	1.36	0.91	0.03	3.16		
SG-Sm 15 pts	10	0.95	0.95	0.90	1.35	0.91	0.02	3.18		
SNV+SG-1D 17 pts	8	0.96	0.85	0.90	1.34	0.92	0.00	3.19		
<b>SNV+SG-1D 19 pts</b>	<b>8</b>	<b>0.96</b>	<b>0.89</b>	<b>0.91</b>	<b>1.31</b>	<b>0.91</b>	<b>0.03</b>	<b>3.27</b>		
SNV+SG-1D 21 pts	8	0.95	0.92	0.91	1.32	0.91	0.00	3.24		
MSC	10	0.96	0.90	0.90	1.37	0.91	-0.01	3.13		
MSC+SG-1D 11 pts	6	0.94	1.06	0.87	1.59	0.89	0.01	2.70		
MSC+SG-1D 15 pts	8	0.96	0.83	0.90	1.40	0.93	0.02	3.06		
SG-1D 11 pts	10	0.98	0.67	0.89	1.44	0.94	0.05	2.98		
SG-1D 15 pts	9	0.97	0.70	0.90	1.37	0.94	0.04	3.13		
SG-1D 17 pts	10	0.98	0.62	0.92	1.24	0.96	0.03	3.45		

ตารางที่ 38 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทดสอบของกลุ่มผลไม้แบบธรรมชาติ (Nat) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทดสอบ				RPD
		$R_c^2$	SEC	$R_{cv}^2$	SECv	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง										
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง										
SG-Sm 11 pts	9	0.95	0.91	0.91	1.27	0.93	0.00	3.37		
SG-Sm 13 pts	9	0.96	0.90	0.92	1.20	0.94	-0.01	3.56		
SG-Sm 15 pts	9	0.96	0.90	0.92	1.20	0.94	-0.01	3.58		
SNV	7	0.96	0.91	0.92	1.20	0.94	-0.01	3.57		
SNV+SG-1D 11 pts	4	0.92	1.18	0.89	1.47	0.89	0.04	2.92		
SNV+SG-1D 13 pts	6	0.94	1.19	0.88	1.49	0.88	0.01	2.88		
SNV+SG-1D 15 pts	6	0.93	1.12	0.90	1.36	0.91	0.03	3.15		
MSC	7	0.92	1.21	0.85	1.68	0.91	0.02	2.55		
MSC+SG-1D 7 pts	4	0.88	1.45	0.83	1.77	0.84	0.04	2.43		
SG-1D 11 pts	6	0.95	0.95	0.92	1.23	0.92	0.01	3.48		
SG-1D 13 pts	6	0.94	1.03	0.87	1.59	0.90	0.06	2.69		
<b>SG-1D 15 pts</b>	<b>6</b>	<b>0.95</b>	<b>0.99</b>	<b>0.92</b>	<b>1.22</b>	<b>0.92</b>	<b>0.01</b>	<b>3.52</b>		

ตารางที่ 39 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า  $a_w$  ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มไม้อัดแห้งแบบธรรมชาติ (Nat) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

จำนวนตัวอย่าง	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	สมการเทียบมาตรฐาน			สมการทวนสอบ			RPD	
		LVS	$R^2_c$	SEC	$R^2_{cv}$	SECV	Slope		Bias
							67		
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง		10	0.96	0.01	0.92	0.02	0.94	0.00	3.55
SG-Sm 7 pts		9	0.96	0.01	0.91	0.02	0.92	0.00	3.33
SG-Sm 7 pts+SNV		10	0.96	0.01	0.92	0.02	0.93	0.00	3.55
SG-Sm 7 pts+MSC		10	0.97	0.01	0.93	0.02	0.94	0.00	3.77
SG-Sm 9 pts+MSC		10	0.96	0.01	0.93	0.02	0.94	0.00	3.68
SNV		10	0.97	0.01	0.92	0.02	0.93	0.00	3.57
SNV+SG-1D 7 pts		6	0.96	0.01	0.92	0.02	0.91	0.00	3.41
SNV+SG-1D 11 pts		7	0.96	0.01	0.92	0.02	0.92	0.00	3.45
SNV+SG-1D 13 pts		7	0.96	0.01	0.91	0.02	0.91	0.00	3.29
<b>MSC</b>		<b>9</b>	<b>0.96</b>	<b>0.01</b>	<b>0.92</b>	<b>0.02</b>	<b>0.93</b>	<b>0.00</b>	<b>3.56</b>
MSC+SG-1D 7 pts		6	0.96	0.01	0.92	0.02	0.91	0.00	3.42
MSC+SG-1D 11 pts		7	0.96	0.01	0.92	0.02	0.92	0.00	3.43
SG-1D 11 pts		7	0.96	0.01	0.90	0.02	0.91	0.00	3.18

ตารางที่ 40 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า  $a_w$  ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ (Nat) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

จำนวนตัวอย่าง	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	สมการเทียบมาตรฐาน			สมการทวนสอบ			RPD	
		LVS	$R^2_{cv}$	SEC	$R^2_{cv}$	SECV	Slope		Bias
							67		
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง		7	0.95	0.01	0.93	0.02	0.94	0.00	3.70
SG-Sm 7 pts		7	0.95	0.01	0.93	0.02	0.94	0.00	3.69
<b>SG-Sm 9 pts</b>		<b>7</b>	<b>0.95</b>	<b>0.01</b>	<b>0.93</b>	<b>0.02</b>	<b>0.94</b>	<b>0.00</b>	<b>3.70</b>
SG-Sm 13 pts		7	0.95	0.01	0.93	0.02	0.94	0.00	3.69
SNV		7	0.94	0.02	0.89	0.02	0.93	0.00	3.03
SNV+SG-1D 11 pts		4	0.92	0.02	0.89	0.02	0.90	0.00	2.97
SNV+SG-1D 13 pts		4	0.92	0.02	0.89	0.02	0.90	0.00	2.99
SNV+SG-1D 15 pts		4	0.92	0.02	0.89	0.02	0.90	0.00	2.93
MSC		5	0.88	0.02	0.81	0.03	0.87	0.00	2.27
MSC+SG-1D 15 pts		5	0.91	0.02	0.83	0.03	0.89	0.00	2.42
SG-1D 15 pts		6	0.95	0.01	0.92	0.02	0.93	0.00	3.50
SG-1D 17 pts		6	0.95	0.01	0.92	0.02	0.93	0.00	3.52
SG-1D 19 pts		5	0.94	0.02	0.91	0.02	0.92	0.00	3.33

ตารางที่ 41 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทดสอบของกลุ่มผลไม้แบบธรรมชาติ (Nat) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน			สมการทดสอบ				RPD
		$R^2$	SEC	$R^2_{Cv}$	SECv	Slope	Bias		
จำนวนตัวอย่าง									
		66			66				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	9	0.94	1.95	0.88	2.79	0.92	-0.21	2.81	
SG-Sm 9 pts+SNV	9	0.94	1.90	0.91	2.43	0.92	-0.11	3.23	
SG-Sm 11 pts+SNV	9	0.95	1.81	0.91	2.44	0.93	-0.12	3.21	
SG-Sm 13 pts+SNV	9	0.95	1.78	0.90	2.53	0.92	-0.16	3.10	
SNV	7	0.93	2.02	0.90	2.56	0.91	-0.08	3.06	
SNV+SG-1D 21 pts	7	0.95	1.70	0.92	2.30	0.93	-0.07	3.41	
SNV+SG-1D 23 pts	7	0.95	1.72	0.92	2.28	0.93	-0.08	3.43	
SNV+SG-1D 25 pts	7	0.95	1.75	0.92	2.29	0.93	-0.08	3.42	
MSC	6	0.93	2.05	0.90	2.48	0.92	-0.01	3.16	
MSC+SG-1D 21 pts	7	0.95	1.71	0.92	2.30	0.93	-0.05	3.41	
<b>MSC+SG-1D 23 pts</b>	<b>7</b>	<b>0.95</b>	<b>1.72</b>	<b>0.92</b>	<b>2.28</b>	<b>0.93</b>	<b>-0.06</b>	<b>3.43</b>	
MSC+SG-1D 25 pts	7	0.95	1.76	0.92	2.29	0.93	-0.07	3.42	
SG-1D 11 pts	8	0.97	1.45	0.90	2.53	0.94	-0.13	3.10	

ตารางที่ 42 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทดสอบของกลุ่มไม่อิงแบบธรรมชาติ (Nat) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน			สมการทดสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_{Cv}$	SECV	Slope	Bias		
จำนวนตัวอย่าง		66			66				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	7	0.92	2.21	0.89	2.63	0.90	-0.08	2.98	
SG-Sm 7 pts	7	0.92	2.21	0.89	2.62	0.90	-0.08	2.99	
SG-Sm 9 pts	7	0.92	2.21	0.89	2.62	0.90	-0.08	3.00	
SG-Sm 15 pts	7	0.92	2.22	0.89	2.61	0.90	-0.07	3.01	
SG-Sm 7 pts+SNV	7	0.91	2.37	0.87	2.83	0.89	-0.06	2.77	
SG-Sm 11 pts+SNV	7	0.91	2.37	0.87	2.82	0.89	-0.06	2.78	
SG-Sm 15 pts+SNV	7	0.91	2.39	0.87	2.83	0.89	-0.06	2.77	
SNV	6	0.90	2.45	0.87	2.86	0.88	-0.07	2.74	
SNV+SG-1D 11 pts	7	0.92	2.27	0.86	2.92	0.88	-0.06	2.68	
SNV+SG-1D 15 pts	7	0.92	2.28	0.88	2.80	0.90	-0.07	2.80	
SG-1D 15 pts	5	0.92	2.26	0.88	2.72	0.90	-0.03	2.88	
SG-1D 17 pts	5	0.92	2.24	0.89	2.66	0.90	-0.03	2.95	
<b>SG-1D 21 pts</b>	<b>5</b>	<b>0.92</b>	<b>2.25</b>	<b>0.89</b>	<b>2.64</b>	<b>0.91</b>	<b>-0.02</b>	<b>2.97</b>	

ตารางที่ 43 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มแผ่นเชื่อมออบแห้ง (OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน			สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias		
จำนวนตัวอย่าง		91			44				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	9	0.87	2.25	0.77	2.67	1.02	-0.54	2.11	
SG-Sm 7 pts	10	0.89	2.08	0.78	2.61	1.02	-0.46	2.16	
SG-Sm 11 pts	10	0.88	2.14	0.77	2.65	1.02	-0.45	2.12	
SG-Sm 15 pts	10	0.88	2.16	0.77	2.69	1.02	-0.41	2.09	
SG-Sm 15 pts+SNV	4	0.79	2.83	0.79	2.55	0.87	-0.52	2.20	
SG-Sm 17 pts+SNV	4	0.80	2.82	0.79	2.55	0.87	-0.52	2.21	
<b>SG-Sm 27 pts+SNV</b>	<b>4</b>	<b>0.80</b>	<b>2.78</b>	<b>0.79</b>	<b>2.53</b>	<b>0.87</b>	<b>-0.48</b>	<b>2.22</b>	
SNV	4	0.78	2.96	0.78	2.60	0.85	-0.47	2.16	
MSC	3	0.67	3.60	0.75	2.81	0.74	0.02	2.00	
MSC+SG-1D 15 pts	5	0.80	2.75	0.73	2.88	0.94	-0.41	1.95	
SG-1D 7 pts	3	0.77	2.98	0.75	2.76	0.88	-0.59	2.04	
SG-1D 11 pts	3	0.77	2.98	0.76	2.72	0.89	-0.41	2.07	
SG-1D 15 pts	3	0.76	3.03	0.75	2.79	0.89	-0.38	2.01	

ตารางที่ 44 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม่เชื่อมโยงแห่ง (OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง										
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง		91			44					
SG-Sm 7 pts	8	0.82	2.61	0.78	2.63	0.86	0.22	2.14		
SG-Sm 9 pts	8	0.82	2.62	0.79	2.60	0.85	0.23	2.16		
SG-Sm 11 pts	8	0.82	2.64	0.78	2.61	0.85	0.22	2.15		
SG-Sm 3 pts+SNV	8	0.82	2.68	0.78	2.64	0.85	0.21	2.13		
SG-Sm 5 pts+SNV	7	0.83	2.56	0.81	2.40	0.84	0.33	2.34		
SG-Sm 7 pts+SNV	8	0.86	2.34	0.81	2.46	0.86	0.31	2.29		
SNV	8	0.86	2.30	0.80	2.52	0.87	0.30	2.23		
SNV+SG-1D 7 pts	7	0.80	2.77	0.85	2.20	0.82	0.20	2.56		
<b>SNV+SG-1D 9 pts</b>	4	0.78	2.89	0.86	2.07	0.82	0.43	2.71		
SNV+SG-1D 11 pts	4	0.77	2.97	0.86	2.05	0.83	0.44	2.74		
MSC	4	0.76	3.05	0.86	2.09	0.84	0.41	2.69		
SG-1D 15 pts	8	0.77	2.99	0.78	2.61	0.90	-0.01	2.15		
	10	0.87	2.26	0.81	2.40	0.80	0.39	2.34		



ตารางที่ 45 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า  $a_w$  ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทดสอบของกลุ่มผลไม้แช่เยลลี่ (OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน			สมการทดสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias		
จำนวนตัวอย่าง		91			45				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	5	0.46	0.06	0.68	0.04	0.75	0.00	1.77	
SG-Sm 7 pts	5	0.46	0.06	0.68	0.04	0.74	0.00	1.74	
SG-Sm 11 pts	5	0.45	0.06	0.67	0.04	0.74	0.00	1.73	
SG-Sm 15 pts	5	0.45	0.06	0.66	0.04	0.74	0.00	1.71	
SG-Sm 15 pts+SNV	8	0.75	0.04	0.73	0.04	0.80	0.01	1.93	
SG-Sm 17 pts+SNV	8	0.75	0.04	0.73	0.04	0.80	0.01	1.95	
SG-Sm 21 pts+SNV	8	0.75	0.04	0.74	0.04	0.79	0.01	1.98	
SNV	10	0.85	0.03	0.79	0.03	0.89	0.00	2.15	
SNV+SG-1D 11 pts	6	0.77	0.04	0.73	0.04	0.92	0.00	1.92	
SNV+SG-1D 15 pts	10	0.87	0.03	0.77	0.03	0.88	0.00	2.07	
SG-1D 7 pts	3	0.47	0.06	0.72	0.04	0.72	-0.01	1.88	
SG-1D 11 pts	5	0.66	0.05	0.73	0.04	0.89	0.00	1.91	
<b>SG-1D 15 pts</b>	<b>4</b>	<b>0.55</b>	<b>0.06</b>	<b>0.75</b>	<b>0.04</b>	<b>0.82</b>	<b>0.00</b>	<b>1.98</b>	

ตารางที่ 46 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า  $a_w$  ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้แช่เยลลี่แบบแห้ง (OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน			สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias		
จำนวนตัวอย่าง									
					45				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	9	0.86	0.03	0.84	0.03	1.08	0.00	2.44	
SG-Sm 7 pts	9	0.86	0.03	0.84	0.03	1.09	0.00	2.48	
SG-Sm 11 pts	9	0.86	0.03	0.84	0.03	1.09	0.00	2.45	
SG-Sm 15 pts	8	0.84	0.03	0.82	0.03	1.08	0.00	2.33	
SG-Sm 7 pts+SNV	9	0.91	0.03	0.85	0.03	1.17	0.00	2.57	
SG-Sm 11 pts+SNV	9	0.90	0.03	0.85	0.03	1.17	0.00	2.54	
SG-Sm 15 pts+SNV	9	0.89	0.03	0.84	0.03	1.17	0.00	2.50	
SNV	7	0.87	0.03	0.88	0.02	0.92	0.00	2.92	
SNV+SG-1D 17 pts	8	0.90	0.03	0.91	0.02	1.00	0.00	3.27	
<b>SNV+SG-1D 19 pts</b>	<b>8</b>	<b>0.89</b>	<b>0.03</b>	<b>0.92</b>	<b>0.02</b>	<b>0.97</b>	<b>0.00</b>	<b>3.42</b>	
SNV+SG-1D 21 pts	8	0.89	0.03	0.91	0.02	0.96	0.00	3.38	
SG-1D 11 pts	9	0.92	0.02	0.84	0.03	1.12	0.00	2.48	
SG-1D 15 pts	9	0.90	0.03	0.83	0.03	1.12	0.00	2.41	

ตารางที่ 47 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มไม่เชื่อมต่อแห้ง (OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน			สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias		
จำนวนตัวอย่าง		91			44				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	8	0.90	3.42	0.81	4.08	0.84	-0.38	2.31	
SG-Sm 7 pts	8	0.90	3.42	0.81	4.12	0.84	-0.34	2.29	
SG-Sm 11 pts	8	0.90	3.42	0.81	4.10	0.84	-0.34	2.30	
SG-Sm 15 pts	8	0.90	3.41	0.81	4.06	0.84	-0.36	2.32	
SG-Sm 23 pts+SNV	5	0.85	4.17	0.81	4.10	0.92	-0.75	2.30	
SG-Sm 27 pts+SNV	5	0.85	4.12	0.81	4.08	0.94	-0.78	2.31	
SG-Sm 29 pts+SNV	5	0.85	4.10	0.81	4.07	0.94	-0.79	2.32	
SNV	5	0.83	4.44	0.79	4.26	0.88	-0.77	2.21	
MSC	6	0.84	4.24	0.77	4.46	0.86	-0.91	2.11	
MSC+SG-1D 15 pts	5	0.84	4.21	0.75	4.66	0.80	-0.61	2.02	
<b>SG-2D 17 pts</b>	<b>6</b>	<b>0.88</b>	<b>3.73</b>	<b>0.86</b>	<b>3.51</b>	<b>0.78</b>	<b>-0.22</b>	<b>2.69</b>	
SG-2D 19 pts	6	0.88	3.64	0.88	3.32	0.80	-0.02	2.84	
SG-2D 21 pts	5	0.88	3.77	0.86	3.56	0.78	0.20	2.65	

ตารางที่ 48 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มไม้แช่อบแห้ง (OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน			สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias		
จำนวนตัวอย่าง		91			44				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	10	0.95	2.35	0.92	2.69	0.93	-0.23	3.51	
SG-Sm 7 pts	9	0.95	2.45	0.92	2.71	0.91	-0.21	3.48	
SG-Sm 11 pts	9	0.95	2.50	0.92	2.73	0.92	-0.30	3.45	
SG-Sm 15 pts	9	0.94	2.54	0.91	2.75	0.92	-0.33	3.43	
SG-Sm 13 pts+SNV	9	0.95	2.36	0.95	2.11	0.93	0.08	4.47	
<b>SG-Sm 17 pts+SNV</b>	<b>9</b>	<b>0.95</b>	<b>2.41</b>	<b>0.95</b>	<b>2.09</b>	<b>0.94</b>	<b>0.01</b>	<b>4.52</b>	
SG-Sm 19 pts+SNV	8	0.95	2.43	0.95	2.10	0.95	-0.01	4.50	
SNV+SG-1D 7 pts	6	0.93	2.80	0.84	3.81	0.83	0.22	2.47	
SNV+SG-1D 11 pts	6	0.93	2.87	0.85	3.66	0.84	0.47	2.57	
SNV+SG-1D 15 pts	6	0.93	2.91	0.85	3.60	0.83	0.66	2.62	
SG-1D 7 pts	5	0.93	2.86	0.89	3.18	0.86	-0.24	2.97	
SG-1D 9 pts	5	0.91	3.13	0.88	3.26	0.84	-0.19	2.89	
SG-1D 11 pts	5	0.91	3.22	0.87	3.34	0.83	-0.20	2.82	

ตารางที่ 49 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม่อิงแบบธรรมชาติ ร่วมกับกลุ่มผลไม่อิงอิมบเซท์ (Nat+OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	SEP	Slope	Bias		
จำนวนตัวอย่าง										
		135				67				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	8	0.77	2.80	0.67	3.03	0.90	-0.21	1.75		
SG-Sm 11 pts	10	0.83	2.41	0.70	2.91	0.95	-0.13	1.82		
SG-Sm 13 pts	10	0.82	2.43	0.70	2.91	0.95	-0.14	1.83		
SG-Sm 23 pts+SNV	10	0.82	2.45	0.74	2.71	0.83	0.16	1.96		
SG-Sm 25 pts+SNV	10	0.82	2.45	0.74	2.70	0.83	0.17	1.97		
SG-Sm 9 pts+MSC	9	0.81	2.54	0.67	3.03	0.83	0.01	1.75		
SNV+SG-1D 15 pts	9	0.87	2.05	0.69	2.96	0.93	0.40	1.79		
MSC	5	0.47	4.22	0.46	3.88	0.51	-0.46	1.37		
SG-1D 7 pts	4	0.76	2.82	0.70	2.89	0.82	0.04	1.83		
<b>SG-1D 11 pts</b>	<b>5</b>	<b>0.80</b>	<b>2.59</b>	<b>0.71</b>	<b>2.86</b>	<b>0.89</b>	<b>0.01</b>	<b>1.86</b>		
SG-1D 17 pts	5	0.78	2.70	0.71	2.86	0.90	-0.17	1.85		
SG-2D 11 pts	6	0.74	2.93	0.50	3.75	0.74	0.37	1.41		
SG-2D 15 pts	4	0.66	3.35	0.48	3.82	0.64	0.37	1.39		

ตารางที่ 50 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม่อิงแบบธรรมชาติ ร่วมกับกลุ่มผลไม่อิงอิมบแพทซ์ (Nat+OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		135				67				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	8	0.82	2.45	0.79	2.43	0.81	0.13	2.18		
<b>SG-Sm 3 pts</b>	<b>8</b>	<b>0.82</b>	<b>2.45</b>	<b>0.79</b>	<b>2.43</b>	<b>0.81</b>	<b>0.13</b>	<b>2.19</b>		
SG-Sm 7 pts	8	0.82	2.45	0.79	2.43	0.81	0.13	2.18		
SG-Sm 11 pts	8	0.82	2.48	0.79	2.45	0.81	0.12	2.17		
SG-Sm 7 pts+SNV	7	0.83	2.38	0.78	2.48	0.78	0.19	2.14		
SG-Sm 11 pts+SNV	7	0.83	2.36	0.78	2.51	0.79	0.16	2.11		
SG-Sm 15 pts+SNV	7	0.83	2.36	0.77	2.54	0.79	0.14	2.09		
SG-Sm 7 pts+MSC	6	0.78	2.71	0.75	2.64	0.75	0.16	2.01		
SNV	6	0.78	2.71	0.77	2.56	0.75	0.23	2.07		
MSC	5	0.54	3.91	0.59	3.36	0.56	-0.47	1.58		
SG-1D 5 pts	5	0.85	2.20	0.77	2.55	0.79	0.18	2.08		
SG-1D 7 pts	6	0.86	2.16	0.78	2.47	0.84	0.01	2.15		
SG-1D 9 pts	6	0.85	2.27	0.79	2.46	0.84	0.00	2.16		

ตารางที่ 51 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า  $a_w$  ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทางสอยของกลุ่มผลไม้แห้งแบบธรรมชาติ ร่วมกับกลุ่มผลไม้แช่อบแห้ง (Nat+OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทางสอย				RPD
		$R^2$	SEC	$R^2_v$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		136		67						
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	10	0.72	0.04	0.58	0.04	0.82	-0.01	1.56		
SG-Sm 15 pts	10	0.70	0.04	0.61	0.04	0.82	0.00	1.60		
SG-Sm 17 pts	10	0.69	0.04	0.62	0.04	0.82	0.00	1.63		
SG-Sm 15 pts+SNV	10	0.80	0.04	0.76	0.03	0.75	0.00	2.05		
SG-Sm 17 pts+SNV	10	0.80	0.04	0.76	0.03	0.76	0.00	2.05		
SG-Sm 21 pts+SNV	10	0.81	0.04	0.77	0.03	0.78	0.00	2.09		
<b>SNV</b>	<b>10</b>	<b>0.81</b>	<b>0.04</b>	<b>0.77</b>	<b>0.03</b>	<b>0.77</b>	<b>0.00</b>	<b>2.10</b>		
SNV+SG-1D 7 pts	10	0.89	0.03	0.66	0.04	0.83	0.00	1.73		
SNV+SG-1D 15 pts	10	0.87	0.03	0.71	0.04	0.88	0.00	1.86		
SNV+SG-2D 15 pts	8	0.82	0.03	0.43	0.05	0.70	-0.01	1.34		
SG-1D 7 pts	4	0.50	0.06	0.31	0.06	0.56	-0.01	1.20		
SG-1D 11 pts	8	0.77	0.04	0.43	0.05	0.86	-0.01	1.37		
SG-1D 15 pts	10	0.85	0.03	0.57	0.04	0.96	-0.01	1.58		

ตารางที่ 52 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า  $a_w$  ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มแม่แบบแห่งชาติ ร่วมกับกลุ่มแม่แบบแห่งชาติ (Nat+OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		136				67				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	7	0.81	0.04	0.74	0.03	1.10	0.00	1.97		
SG-Sm 7 pts	7	0.81	0.03	0.74	0.03	1.11	-0.01	1.99		
SG-Sm 11 pts	10	0.86	0.03	0.78	0.03	1.12	0.00	2.14		
SG-Sm 15 pts	7	0.81	0.04	0.75	0.03	1.10	-0.01	2.04		
SG-Sm 7 pts+SNV	9	0.89	0.03	0.81	0.03	1.20	0.00	2.30		
SG-Sm 11 pts+SNV	7	0.84	0.03	0.80	0.03	1.15	0.00	2.24		
SG-Sm 15 pts+SNV	7	0.84	0.03	0.81	0.03	1.15	0.00	2.28		
SNV	8	0.88	0.03	0.86	0.03	0.99	0.00	2.73		
SNV+SG-1D 7 pts	8	0.90	0.03	0.84	0.03	1.00	0.00	2.52		
SNV+SG-1D 11 pts	7	0.87	0.03	0.87	0.02	0.98	0.00	2.76		
<b>SNV+SG-1D 15 pts</b>	<b>7</b>	<b>0.88</b>	<b>0.03</b>	<b>0.89</b>	<b>0.02</b>	<b>0.98</b>	<b>0.00</b>	<b>2.96</b>		
SNV+SG-1D 19 pts	7	0.88	0.03	0.88	0.02	0.97	0.00	2.93		
MSC	6	0.34	0.07	0.30	0.06	0.35	0.00	1.20		



ตารางที่ 53 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทดสอบของกลุ่มผลไม่แย้งแบบธรรมชาติ ร่วมกับกลุ่มผลไม่แย้ง (Nat+OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทดสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		135				66				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	8	0.82	4.17	0.80	4.01	0.79	0.63	2.23		
SG-Sm 7 pts	9	0.83	4.04	0.80	3.97	0.81	0.65	2.26		
SG-Sm 11 pts	9	0.83	4.04	0.80	3.93	0.81	0.63	2.28		
SG-Sm 15 pts	9	0.83	4.05	0.81	3.88	0.81	0.61	2.31		
SNV+SG-1D 11 pts	5	0.82	4.18	0.77	4.31	0.92	0.29	2.08		
SNV+SG-1D 15 pts	5	0.81	4.32	0.77	4.25	0.90	0.35	2.11		
MSC	8	0.81	4.25	0.79	4.08	0.85	0.53	2.20		
SG-1D 19 pts	7	0.87	3.60	0.81	3.90	0.86	0.30	2.30		
SG-1D 21 pts	6	0.85	3.83	0.84	3.58	0.85	0.35	2.51		
SG-1D 25 pts	7	0.85	3.81	0.82	3.80	0.84	0.41	2.36		
SG-2D 15 pts	9	0.88	3.45	0.80	3.97	0.80	-0.29	2.25		
<b>SG-2D 17 pts</b>	<b>8</b>	<b>0.86</b>	<b>3.64</b>	<b>0.83</b>	<b>3.72</b>	<b>0.81</b>	<b>-0.43</b>	<b>2.41</b>		
SG-2D 21 pts	6	0.84	3.97	0.79	4.12	0.77	-0.02	2.17		

ตารางที่ 54 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มเอนไซม์แบบธรรมชาติ ร่วมกับกลุ่มเอนไซม์แช่เย็น (Nat+OD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		135				66				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	9	0.90	3.12	0.88	3.15	0.88	-0.10	2.84		
SG-Sm 7 pts	9	0.90	3.12	0.88	3.16	0.88	-0.18	2.83		
SG-Sm 11 pts	9	0.90	3.11	0.87	3.20	0.88	-0.24	2.80		
SG-Sm 15 pts	9	0.90	3.10	0.87	3.19	0.89	-0.25	2.81		
SG-Sm 7 pts+SNV	10	0.91	2.91	0.90	2.77	0.90	0.33	3.23		
<b>SG-Sm 9 pts+SNV</b>	<b>10</b>	<b>0.91</b>	<b>2.93</b>	<b>0.90</b>	<b>2.76</b>	<b>0.92</b>	<b>0.32</b>	<b>3.25</b>		
SG-Sm 11 pts+SNV	9	0.90	3.09	0.89	2.98	0.90	0.06	3.01		
SNV	8	0.88	3.42	0.83	3.71	0.85	0.26	2.41		
SNV+SG-1D 7 pts	9	0.90	3.09	0.83	3.64	0.82	0.79	2.46		
SNV+SG-1D 11 pts	10	0.92	2.85	0.83	3.63	0.90	0.50	2.47		
SG-1D 17 pts	8	0.91	2.99	0.89	2.96	0.87	0.15	3.03		
SG-1D 19 pts	8	0.90	3.08	0.89	2.92	0.86	0.12	3.07		
SG-1D 21 pts	8	0.90	3.14	0.89	2.97	0.85	0.12	3.01		

ตารางที่ 55 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทดสอบของกลุ่มผลไม้แบบธรรมชาติ ร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้แบบพีชทราย (Nat+FD) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทดสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_{Cv}$	SECV	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		91			91					
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	10	0.95	1.53	0.91	2.19	0.94	0.01	3.23		
SG-Sm 11 pts	10	0.96	1.45	0.91	2.14	0.95	-0.03	3.30		
SG-Sm 15 pts	10	0.96	1.47	0.92	2.01	0.94	0.01	3.51		
SNV	10	0.97	1.22	0.92	1.97	0.93	0.07	3.59		
SNV+SG-1D 7 pts	7	0.96	1.38	0.92	2.02	0.89	0.14	3.50		
<b>SNV+SG-1D 9 pts</b>	<b>8</b>	<b>0.97</b>	<b>1.23</b>	<b>0.94</b>	<b>1.81</b>	<b>0.94</b>	<b>-0.01</b>	<b>3.92</b>		
SNV+SG-1D 11 pts	9	0.98	1.03	0.93	1.84	0.95	0.01	3.84		
MSC	10	0.97	1.20	0.93	1.88	0.93	0.09	3.75		
MSC+SG-1D 7 pts	8	0.96	1.41	0.91	2.12	0.90	0.10	3.34		
MSC+SG-1D 11 pts	8	0.97	1.30	0.92	2.04	0.90	0.19	3.47		
MSC+SG-1D 15 pts	10	0.98	1.06	0.92	2.00	0.93	0.14	3.53		
SG-1D 11 pts	8	0.96	1.44	0.91	2.20	0.95	0.02	3.22		
SG-1D 15 pts	10	0.97	1.13	0.95	1.59	0.95	0.08	4.45		

ตารางที่ 56 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทดสอบของกลุ่มผลไม้แบบธรรมชาติ ร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้แบบพีชทราย (Nat+FD) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทดสอบ				RPD
		$R^2$	SEC	$R^2_{Cv}$	SECv	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		91		91						
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	7	0.96	1.36	0.95	1.56	0.95	0.02	4.53		
SG-Sm 7 pts	7	0.96	1.38	0.95	1.59	0.95	0.01	4.44		
SG-Sm 11 pts	7	0.96	1.40	0.95	1.62	0.95	0.01	4.36		
SG-Sm 15 pts	7	0.96	1.43	0.95	1.66	0.95	0.01	4.27		
SG-Sm 11 pts+SNV	7	0.95	1.59	0.94	1.79	0.94	0.01	3.95		
SG-Sm 15 pts+SNV	7	0.95	1.58	0.94	1.78	0.94	0.01	3.98		
SNV	6	0.94	1.76	0.93	1.96	0.93	0.03	3.61		
SNV+SG-1D 7 pts	5	0.94	1.75	0.92	2.06	0.91	0.06	3.44		
SNV+SG-1D 11 pts	4	0.93	1.87	0.92	2.06	0.91	0.04	3.43		
SNV+SG-1D 15 pts	4	0.93	1.82	0.92	1.99	0.92	0.03	3.56		
SG-1D 13 pts	6	0.97	1.31	0.95	1.54	0.95	0.01	4.59		
SG-1D 15 pts	6	0.97	1.31	0.95	1.52	0.96	0.02	4.66		
<b>SG-1D 19 pts</b>	<b>6</b>	<b>0.97</b>	<b>1.31</b>	<b>0.96</b>	<b>1.49</b>	<b>0.96</b>	<b>0.02</b>	<b>4.73</b>		

ตารางที่ 57 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า  $a_w$  ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้อบแห้งแบบธรรมชาติ ร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้อบแห้งแบบพรีซราย (Nat+FD) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2$	SEC	$R_{Cv}^2$	SECV	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง										
		91				91				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	10	0.97	0.03	0.92	0.05	0.96	0.00	3.56		
SG-Sm 7 pts	10	0.97	0.03	0.92	0.05	0.96	0.00	3.50		
SNV	10	0.98	0.03	0.94	0.04	0.95	0.00	4.08		
<b>SNV+SG-1D 7 pts</b>	<b>7</b>	<b>0.98</b>	<b>0.03</b>	<b>0.93</b>	<b>0.05</b>	<b>0.91</b>	<b>0.00</b>	<b>3.71</b>		
SNV+SG-1D 9 pts	8	0.98	0.03	0.94	0.05	0.92	0.00	3.98		
SNV+SG-1D 11 pts	9	0.99	0.02	0.94	0.04	0.94	0.00	4.05		
SNV+SG-2D 15 pts	6	0.95	0.04	0.91	0.06	0.90	0.00	3.27		
MSC	9	0.98	0.03	0.93	0.05	0.95	0.00	3.73		
MSC+SG-1D 7 pts	9	0.98	0.03	0.93	0.05	0.92	0.00	3.81		
MSC+SG-1D 11 pts	9	0.98	0.02	0.94	0.05	0.93	0.00	3.97		
SG-1D 9 pts	7	0.97	0.03	0.92	0.05	0.94	0.00	3.61		
SG-1D 11 pts	8	0.97	0.03	0.93	0.05	0.96	0.00	3.73		
SG-1D 15 pts	10	0.98	0.03	0.94	0.04	0.94	0.00	4.17		

ตารางที่ 58 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า  $a_w$  ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้แบบธรรมชาติ ร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้แบบแห้ง (Nat+FD) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_{Cv}$	SECV	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		91		91						
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	8	0.96	0.03	0.95	0.04	0.96	0.00	4.55		
SG-Sm 11 pts	8	0.97	0.03	0.96	0.04	0.96	0.00	4.67		
SG-Sm 13 pts	8	0.97	0.03	0.96	0.04	0.96	0.00	4.69		
SG-Sm 15 pts	8	0.97	0.03	0.96	0.04	0.96	0.00	4.71		
SG-Sm 7 pts+SNV	5	0.89	0.06	0.87	0.07	0.88	0.00	2.77		
SG-Sm 11 pts+SNV	6	0.91	0.05	0.89	0.06	0.91	0.00	2.94		
SG-Sm 15 pts+SNV	6	0.91	0.05	0.89	0.06	0.91	0.00	2.98		
SNV	5	0.89	0.06	0.88	0.06	0.88	0.00	2.81		
SNV+SG-1D 11 pts	5	0.88	0.06	0.86	0.07	0.86	0.00	2.64		
SNV+SG-1D 15 pts	5	0.88	0.06	0.86	0.07	0.87	0.00	2.67		
SG-1D 15 pts	7	0.97	0.03	0.95	0.04	0.97	0.00	4.57		
<b>SG-1D 17 pts</b>	<b>8</b>	<b>0.97</b>	<b>0.03</b>	<b>0.96</b>	<b>0.04</b>	<b>0.96</b>	<b>0.00</b>	<b>4.75</b>		
SG-1D 19 pts	6	0.96	0.04	0.95	0.04	0.95	0.00	4.26		

ตารางที่ 59 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มไม่อิงแบบธรรมชาติ ร่วมกับกลุ่มฝักและผลไม้อื่นๆแบบพีชชราย (Nat+FD) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2$	SEC	$R^2_{Cv}$	SECv	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง			90		90					
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	10	0.92	2.76	0.88	3.52	0.90	-0.05	2.81		
SG-Sm 15 pts	9	0.91	2.99	0.87	3.63	0.89	-0.04	2.73		
SNV	10	0.94	2.44	0.87	3.61	0.89	-0.12	2.74		
SNV+SG-1D 11 pts	9	0.95	2.14	0.90	3.21	0.92	0.02	3.08		
<b>SNV+SG-1D 13 pts</b>	<b>9</b>	<b>0.95</b>	<b>2.16</b>	<b>0.90</b>	<b>3.19</b>	<b>0.92</b>	<b>-0.06</b>	<b>3.11</b>		
SNV+SG-1D 15 pts	9	0.95	2.29	0.89	3.33	0.90	-0.13	2.97		
MSC	10	0.95	2.30	0.88	3.46	0.91	-0.09	2.86		
MSC+SG-1D 11 pts	8	0.93	2.56	0.88	3.51	0.89	-0.10	2.82		
MSC+SG-1D 13 pts	9	0.95	2.24	0.89	3.27	0.91	-0.07	3.03		
MSC+SG-1D 15 pts	10	0.95	2.17	0.89	3.30	0.91	-0.09	3.00		
SG-1D 13 pts	7	0.92	2.81	0.87	3.65	0.88	-0.11	2.71		
SG-1D 15 pts	8	0.93	2.60	0.88	3.51	0.89	-0.16	2.82		
SG-1D 17 pts	7	0.92	2.72	0.87	3.62	0.89	-0.23	2.73		

ตารางที่ 60 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มไม่อิงแบบธรรมชาติ ร่วมกับกลุ่มฝักและผลไม้แห้งแบบพรีชดราย (Nat+FD) ด้วยวิธี Full cross validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2$	SEC	$R^2_{Cv}$	SECv	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		90		90						
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	7	0.86	3.76	0.79	4.55	0.82	0.04	2.18		
SG-Sm 7 pts	7	0.85	3.77	0.79	4.54	0.83	0.04	2.18		
SG-Sm 11 pts	7	0.85	3.79	0.79	4.54	0.82	0.04	2.18		
SG-Sm 15 pts	10	0.90	3.17	0.83	4.08	0.89	0.10	2.43		
SNV	7	0.82	4.23	0.74	5.11	0.80	0.13	1.94		
SNV+SG-1D 7 pts	3	0.71	5.36	0.69	5.61	0.72	-0.01	1.77		
SNV+SG-1D 11 pts	10	0.90	3.21	0.77	4.81	0.85	0.20	2.06		
SNV+SG-1D 15 pts	10	0.90	3.12	0.81	4.42	0.86	0.11	2.24		
MSC	6	0.60	6.26	0.33	8.20	0.58	-0.01	1.21		
MSC+SG-1D 15 pts	4	0.57	6.50	0.47	7.32	0.53	-0.04	1.35		
SG-1D 15 pts	10	0.94	2.41	0.87	3.55	0.91	0.15	2.79		
SG-1D 17 pts	10	0.94	2.34	0.89	3.32	0.92	0.08	2.98		
<b>SG-1D 19 pts</b>	<b>10</b>	<b>0.94</b>	<b>2.38</b>	<b>0.89</b>	<b>3.26</b>	<b>0.91</b>	<b>0.01</b>	<b>3.04</b>		



ตารางที่ 61 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้มืออิมอบแห้งร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้อบแห้งแบบฟรีซดราย (OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		107		52						
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	8	0.85	2.72	0.87	2.40	0.87	-0.41	2.76		
SG-Sm 7 pts	8	0.85	2.73	0.87	2.39	0.87	-0.40	2.78		
SG-Sm 11 pts	8	0.85	2.75	0.87	2.39	0.87	-0.38	2.78		
SG-Sm 15 pts	8	0.84	2.78	0.87	2.40	0.86	-0.38	2.77		
SG-Sm 11 pts+SNV	6	0.81	3.01	0.84	2.67	0.79	-0.02	2.49		
SG-Sm 13 pts+SNV	6	0.81	3.04	0.84	2.68	0.78	0.01	2.48		
SG-Sm 15 pts+SNV	6	0.81	3.05	0.84	2.69	0.78	0.02	2.47		
SNV	8	0.86	2.60	0.86	2.51	0.87	-0.31	2.65		
MSC	8	0.86	2.58	0.78	3.05	0.90	-0.54	2.18		
MSC+SG-1D 15 pts	5	0.83	2.84	0.74	3.40	0.76	-0.06	1.95		
SG-1D 19 pts	5	0.82	2.95	0.83	2.69	0.79	-0.37	2.47		
<b>SG-1D 21 pts</b>	<b>5</b>	<b>0.82</b>	<b>2.97</b>	<b>0.83</b>	<b>2.68</b>	<b>0.79</b>	<b>-0.39</b>	<b>2.48</b>		
SG-1D 23 pts	5	0.82	2.99	0.83	2.68	0.79	-0.41	2.48		

ตารางที่ 62 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้เชื่อมอบแห้งร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้อบแห้งแบบฟรีซดราย (OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง			107		52					
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	8	0.86	2.66	0.85	2.55	0.89	0.41	2.60		
SG-Sm 3 pts	8	0.86	2.66	0.85	2.56	0.89	0.40	2.60		
SG-Sm 7 pts	8	0.85	2.67	0.85	2.56	0.90	0.39	2.59		
SG-Sm 7 pts+SNV	10	0.87	2.50	0.85	2.57	0.83	-0.16	2.59		
SG-Sm 11 pts+SNV	7	0.83	2.88	0.83	2.76	0.82	-0.02	2.41		
SNV	9	0.82	2.97	0.85	2.57	0.80	-0.49	2.59		
SNV+SG-1D 7 pts	7	0.81	3.04	0.81	2.85	0.82	-0.25	2.33		
SNV+SG-1D 15 pts	7	0.79	3.17	0.81	2.83	0.87	-0.47	2.35		
SG-1D 7 pts	6	0.87	2.47	0.85	2.59	0.89	0.34	2.56		
<b>SG-1D 9 pts</b>	<b>6</b>	<b>0.87</b>	<b>2.56</b>	<b>0.85</b>	<b>2.56</b>	<b>0.89</b>	<b>0.30</b>	<b>2.59</b>		
SG-1D 11 pts	5	0.85	2.72	0.85	2.59	0.88	0.32	2.56		
SG-2D 11 pts	9	0.90	2.25	0.80	2.94	0.84	0.64	2.26		
SG-2D 15 pts	10	0.92	2.00	0.83	2.74	0.91	0.26	2.42		

ตารางที่ 63 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า  $a_w$  ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้แช่เยลลี่ร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้แช่เยลลี่แบบพีริชตราย (OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		107		53						
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	10	0.89	0.05	0.88	0.05	0.85	0.01	2.87		
SG-Sm 7 pts	9	0.87	0.05	0.87	0.05	0.84	0.01	2.82		
SG-Sm 11 pts	8	0.88	0.05	0.86	0.05	0.86	0.01	2.76		
<b>SG-Sm 15 pts</b>	<b>9</b>	<b>0.87</b>	<b>0.05</b>	<b>0.87</b>	<b>0.05</b>	<b>0.83</b>	<b>0.01</b>	<b>2.87</b>		
SG-Sm 7 pts+SNV	9	0.86	0.06	0.84	0.06	0.74	0.01	2.51		
SG-Sm 11 pts+SNV	5	0.83	0.06	0.88	0.05	0.81	0.01	2.96		
SNV	10	0.91	0.04	0.87	0.05	0.82	0.01	2.80		
SNV+SG-1D 7 pts	6	0.89	0.05	0.85	0.06	0.81	0.01	2.60		
SNV+SG-1D 11 pts	8	0.90	0.05	0.85	0.05	0.87	0.01	2.63		
SNV+SG-1D 15 pts	8	0.90	0.05	0.86	0.05	0.85	0.01	2.68		
SG-1D 11 pts	8	0.88	0.05	0.86	0.05	0.86	0.01	2.76		
SG-1D 15 pts	8	0.89	0.05	0.87	0.05	0.83	0.01	2.88		
SG-1D 17 pts	9	0.91	0.05	0.88	0.05	0.89	0.01	2.95		

ตารางที่ 64 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า  $a_w$  ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม้แช่เยลลี่ร่วมกับกลุ่มผักและผลไม้แช่เยลลี่แบบพีริชตราย (OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง			107		53					
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	8	0.94	0.04	0.96	0.03	1.01	0.00	4.92		
SG-Sm 7 pts	8	0.95	0.03	0.96	0.03	1.00	0.00	4.88		
SG-Sm 11 pts	8	0.95	0.03	0.96	0.03	1.00	0.00	4.85		
SG-Sm 15 pts	7	0.94	0.04	0.95	0.03	1.02	0.00	4.44		
SNV	8	0.86	0.06	0.84	0.06	0.92	0.00	2.49		
SNV+SG-1D 11 pts	7	0.85	0.06	0.82	0.06	0.84	0.00	2.34		
SNV+SG-1D 15 pts	6	0.84	0.06	0.83	0.06	0.85	0.00	2.45		
MSC	6	0.43	0.11	0.38	0.11	0.41	-0.01	1.27		
SG-1D 17 pts	7	0.95	0.03	0.96	0.03	0.98	0.00	5.21		
<b>SG-1D 19 pts</b>	<b>7</b>	<b>0.95</b>	<b>0.03</b>	<b>0.96</b>	<b>0.03</b>	<b>0.98</b>	<b>0.00</b>	<b>5.33</b>		
SG-1D 21 pts	7	0.95	0.03	0.96	0.03	0.98	0.01	5.28		
SG-2D 11 pts	9	0.90	0.05	0.82	0.06	0.83	-0.01	2.33		
SG-2D 15 pts	10	0.95	0.03	0.91	0.04	0.96	0.00	3.42		

ตารางที่ 65 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มไม่เข้าอ้อมแต่ร่วมกับกลุ่มฝึกและผลไม่เข้าอ้อมแต่ร่วมวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		107		52						
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	10	0.89	3.69	0.68	5.42	0.89	-1.98	1.88		
SG-Sm 7 pts+SNV	10	0.89	3.71	0.80	4.13	1.01	-1.90	2.47		
SG-Sm 11 pts+SNV	9	0.88	3.96	0.80	4.17	1.00	-1.89	2.45		
SG-Sm 13 pts+SNV	9	0.87	4.01	0.80	4.18	1.00	-1.82	2.44		
SNV	9	0.88	3.94	0.80	4.18	1.00	-1.86	2.44		
<b>SNV+SG-1D 7 pts</b>	<b>6</b>	<b>0.90</b>	<b>3.58</b>	<b>0.77</b>	<b>4.46</b>	<b>0.95</b>	<b>-1.97</b>	<b>2.29</b>		
SNV+SG-1D 11 pts	7	0.90	3.48	0.76	4.65	0.97	-1.93	2.20		
SNV+SG-1D 15 pts	7	0.90	3.53	0.75	4.73	0.98	-2.04	2.16		
MSC	5	0.68	6.32	0.66	5.91	0.68	-0.18	1.73		
SG-1D 7 pts	4	0.84	4.53	0.52	6.79	0.82	-2.05	1.50		
SG-1D 11 pts	9	0.92	3.19	0.57	6.27	0.88	-2.33	1.63		
SG-1D 15 pts	9	0.92	3.25	0.62	5.89	0.89	-2.24	1.73		
SG-2D 11 pts	9	0.86	4.17	0.57	6.33	0.81	-2.18	1.61		

ตารางที่ 66 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มไม่เข้าอ้อมแต่ร่วมกับกลุ่มฝึกและผลไม่เข้าอ้อมแต่แบบพีชตราย (OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง			107		52					
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	10	0.88	3.87	0.85	3.75	0.82	-1.16	2.72		
SG-Sm 17 pts	10	0.89	3.69	0.90	3.16	0.87	-0.84	3.23		
<b>SG-Sm 19 pts</b>	<b>10</b>	<b>0.89</b>	<b>3.72</b>	<b>0.90</b>	<b>3.11</b>	<b>0.88</b>	<b>-0.81</b>	<b>3.28</b>		
SG-Sm 21 pts	10	0.89	3.74	0.90	3.13	0.88	-0.80	3.26		
SNV	9	0.88	3.93	0.78	4.69	0.81	-1.01	2.18		
SNV+SG-1D 15 pts	10	0.90	3.62	0.79	4.66	0.78	-0.38	2.19		
SNV+SG-2D 15 pts	7	0.84	4.52	0.76	5.02	0.84	-0.59	2.03		
MSC	6	0.39	8.76	0.20	9.14	0.44	-0.52	1.12		
SG-1D 11 pts	9	0.91	3.28	0.88	3.47	0.84	-0.46	2.94		
SG-1D 13 pts	10	0.92	3.10	0.89	3.33	0.88	-0.40	3.06		
SG-1D 15 pts	10	0.92	3.20	0.89	3.35	0.87	-0.50	3.04		
SG-2D 15 pts	8	0.92	3.18	0.85	3.89	0.86	-0.75	2.63		
SG-2D 17 pts	9	0.93	2.92	0.87	3.64	0.86	-0.59	2.81		

ตารางที่ 67 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม่ย่อยทั้งสามกลุ่ม (Nat+OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		151				75				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	8	0.77	3.13	0.79	2.89	0.81	-0.37	2.18		
SG-Sm 11 pts	8	0.76	3.19	0.79	2.86	0.81	-0.36	2.20		
SG-Sm 13 pts	8	0.76	3.20	0.79	2.85	0.81	-0.36	2.20		
SG-Sm 15 pts	8	0.76	3.21	0.79	2.85	0.80	-0.36	2.20		
SNV	10	0.86	2.48	0.78	2.91	0.81	0.39	2.16		
SNV+SG-1D 7 pts	4	0.72	3.48	0.63	3.82	0.61	-0.08	1.65		
SNV+SG-1D 11 pts	4	0.64	3.92	0.62	3.88	0.55	0.06	1.62		
SNV+SG-1D 15 pts	9	0.88	2.28	0.68	3.47	0.78	0.66	1.81		
SNV+SG-2D 11 pts	3	0.61	4.13	0.50	4.45	0.51	-0.20	1.41		
SNV+SG-2D 15 pts	3	0.61	4.11	0.51	4.39	0.50	0.05	1.43		
SG-1D 15 pts	5	0.81	2.88	0.75	3.07	0.77	0.63	2.05		
<b>SG-1D 17 pts</b>	<b>5</b>	<b>0.81</b>	<b>2.89</b>	<b>0.76</b>	<b>3.02</b>	<b>0.78</b>	<b>0.55</b>	<b>2.08</b>		
SG-1D 19 pts	10	0.90	2.04	0.84	2.43	0.89	0.77	2.58		

ตารางที่ 68 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า MC ที่ได้จากกรสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มเป้าหมายทั้งสามกลุ่ม (Nat+OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		151				75				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	8	0.86	2.44	0.86	2.38	0.86	0.12	2.64		
SG-Sm 7 pts	8	0.86	2.44	0.85	2.40	0.86	0.13	2.62		
SG-Sm 11 pts	7	0.85	2.53	0.84	2.51	0.85	0.00	2.51		
SG-Sm 15 pts	7	0.85	2.54	0.84	2.52	0.85	0.01	2.49		
SG-Sm 7 pts+SNV	7	0.82	2.76	0.80	2.78	0.81	0.24	2.26		
SG-Sm 11 pts+SNV	7	0.83	2.75	0.80	2.79	0.81	0.23	2.26		
SNV	7	0.79	3.02	0.79	2.89	0.82	0.29	2.17		
SNV+SG-1D 11 pts	7	0.79	2.99	0.79	2.87	0.81	0.36	2.19		
MSC+SG-1D 11 pts	5	0.42	5.02	0.37	5.00	0.32	-0.14	1.26		
MSC+SG-1D 15 pts	5	0.41	5.04	0.38	4.94	0.34	-0.10	1.27		
SG-1D 5 pts	7	0.89	2.19	0.87	2.27	0.86	0.17	2.77		
<b>SG-1D 7 pts</b>	<b>7</b>	<b>0.89</b>	<b>2.21</b>	<b>0.87</b>	<b>2.24</b>	<b>0.86</b>	<b>0.19</b>	<b>2.80</b>		
SG-1D 11 pts	6	0.86	2.43	0.86	2.35	0.84	0.25	2.67		



ตารางที่ 69 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า  $a_w$  ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทดสอบของกลุ่มไม่ยอบแห้งทั้งสามกลุ่ม (Nat+OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

จำนวนตัวอย่าง	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน			สมการทดสอบ				RPD
			$R_C^2$	SEC	$R_V^2$	SEP	Slope	Bias		
			152			75				
Raw spectra		10	0.84	0.05	0.83	0.05	0.85	0.00	2.44	
SG-Sm 11 pts		10	0.84	0.05	0.84	0.05	0.85	0.00	2.47	
SG-Sm 15 pts		10	0.84	0.05	0.84	0.05	0.86	0.00	2.50	
SG-Sm 17 pts		10	0.85	0.05	0.84	0.05	0.86	0.00	2.52	
SNV		10	0.86	0.05	0.78	0.06	0.70	0.01	2.18	
SNV+SG-1D 15 pts		9	0.89	0.05	0.85	0.05	0.79	0.01	2.60	
SNV+SG-1D 17 pts		10	0.91	0.04	0.87	0.05	0.81	0.01	2.85	
SNV+SG-1D 19 pts		10	0.90	0.04	0.88	0.05	0.82	0.01	2.89	
SNV+SG-2D 7 pts		6	0.80	0.06	0.51	0.09	0.69	-0.01	1.44	
MSC+SG-2D 7 pts		8	0.72	0.07	0.49	0.09	0.57	0.00	1.40	
SG-1D 25 pts		10	0.90	0.04	0.87	0.05	0.98	0.00	2.80	
<b>SG-1D 27 pts</b>		<b>10</b>	<b>0.91</b>	<b>0.04</b>	<b>0.88</b>	<b>0.04</b>	<b>0.99</b>	<b>0.00</b>	<b>2.93</b>	
SG-2D 15 pts		2	0.54	0.09	0.47	0.09	0.44	-0.01	1.38	

ตารางที่ 70 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า  $a_w$  ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มไม้อบแห้งทั้งสามกลุ่ม (Nat+OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R_C^2$	SEC	$R_V^2$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		152				75				
<b>สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง</b>	<b>8</b>	<b>0.93</b>	<b>0.04</b>	<b>0.92</b>	<b>0.04</b>	<b>0.98</b>	<b>0.00</b>	<b>3.50</b>		
SG-Sm 19 pts	7	0.92	0.04	0.91	0.04	1.00	0.00	3.36		
SG-Sm 23 pts	7	0.92	0.04	0.91	0.04	1.00	0.00	3.37		
SG-Sm 25 pts	7	0.92	0.04	0.91	0.04	1.00	0.00	3.38		
SG-Sm 11 pts+SNV	9	0.86	0.05	0.81	0.06	0.92	0.01	2.29		
SG-Sm 15 pts+SNV	9	0.86	0.05	0.81	0.06	0.92	0.01	2.31		
SNV	9	0.84	0.06	0.80	0.06	0.89	0.00	2.25		
SNV+SG-1D 7 pts	9	0.83	0.06	0.78	0.06	0.89	0.00	2.14		
SNV+SG-1D 11 pts	7	0.79	0.06	0.78	0.06	0.80	0.00	2.12		
SNV+SG-1D 15 pts	7	0.79	0.06	0.79	0.06	0.83	0.00	2.20		
SG-1D 9 pts	8	0.94	0.03	0.91	0.04	1.00	0.00	3.31		
SG-1D 21 pts	6	0.89	0.04	0.90	0.04	0.92	0.00	3.16		
SG-1D 23 pts	6	0.90	0.04	0.90	0.04	0.93	0.00	3.17		

ตารางที่ 71 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มเป้าหมายทั้งสามกลุ่ม (Nat+OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	Slope	Bias			
จำนวนตัวอย่าง		151		74						
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	6	0.55	6.94	0.60	5.96	0.66	-1.00	1.61		
SG-Sm 7 pts	6	0.54	7.03	0.61	5.93	0.66	-1.01	1.61		
SG-Sm 11 pts	6	0.53	7.12	0.61	5.92	0.65	-1.00	1.62		
SG-Sm 15 pts	6	0.52	7.18	0.61	5.92	0.65	-1.00	1.62		
SNV	9	0.76	5.03	0.67	5.46	0.90	-0.69	1.75		
<b>SNV+SG-1D 7 pts</b>	<b>8</b>	<b>0.88</b>	<b>3.62</b>	<b>0.74</b>	<b>4.75</b>	<b>0.93</b>	<b>-1.07</b>	<b>2.01</b>		
SNV+SG-1D 9 pts	8	0.88	3.59	0.74	4.71	0.96	-1.10	2.03		
SNV+SG-1D 11 pts	8	0.88	3.65	0.71	4.94	0.94	-1.33	1.94		
SNV+SG-2D 11 pts	10	0.87	3.67	0.65	5.55	0.71	-0.95	1.72		
SNV+SG-2D 15 pts	9	0.87	3.70	0.65	5.55	0.76	-0.97	1.73		
SG-1D 7 pts	9	0.87	3.75	0.53	6.40	0.82	-1.61	1.50		
SG-1D 11 pts	10	0.89	3.46	0.56	6.11	0.87	-1.76	1.57		
SG-1D 15 pts	10	0.88	3.53	0.57	5.99	0.85	-1.78	1.60		

ตารางที่ 72 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบของกลุ่มผลไม่เบี่ยงทั้งสามกลุ่ม (Nat+OD+FD) ด้วยวิธี External test set validation ที่ช่วงความยาวคลื่น 700-1140 นาโนเมตร

วิธีปรับแต่งสเปกตรัม	LVs	สมการเทียบมาตรฐาน				สมการทวนสอบ				RPD
		$R^2_C$	SEC	$R^2_V$	SEP	SEP	Slope	Bias		
จำนวนตัวอย่าง		151				74				
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	10	0.88	3.61	0.82	3.82	0.89	-1.33	2.51		
SG-Sm 7 pts	10	0.88	3.60	0.82	3.80	0.89	-1.28	2.52		
SG-Sm 9 pts	10	0.88	3.57	0.83	3.73	0.89	-1.27	2.57		
SG-Sm 11 pts	10	0.88	3.59	0.83	3.70	0.88	-1.21	2.59		
SG-Sm 15 pts+SNV	10	0.82	4.38	0.80	4.29	0.84	-0.26	2.23		
<b>SG-Sm 17 pts+SNV</b>	<b>10</b>	<b>0.82</b>	<b>4.40</b>	<b>0.80</b>	<b>4.26</b>	<b>0.83</b>	<b>-0.27</b>	<b>2.24</b>		
SG-Sm 21 pts+SNV	10	0.82	4.37	0.79	4.35	0.83	-0.21	2.20		
SNV	10	0.83	4.24	0.76	4.69	0.83	-0.47	2.04		
MSC	6	0.39	8.10	0.28	8.13	0.28	-0.01	1.18		
SG-1D 11 pts	9	0.89	3.51	0.80	4.10	0.80	-1.06	2.34		
SG-1D 13 pts	10	0.90	3.26	0.84	3.72	0.87	-0.93	2.57		
SG-1D 15 pts	10	0.90	3.32	0.85	3.64	0.88	-0.86	2.63		
SG-1D 17 pts	10	0.89	3.39	0.83	3.82	0.86	-0.89	2.51		

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชัชมนต์ ศรีศิริรัตน์
วัน เดือน ปี เกิด	18 พฤษภาคม 2540
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	45/1679 ซอยหมู่บ้านพงษ์ศิริชัย 4 ถนนมาเจริญ แขวงหนองค้างพลู เขต หนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160
ผลงานตีพิมพ์	ชัชมนต์ ศรีศิริรัตน์, ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ และบุศรากรณ์ มหาโยธี. 2563. การประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการสร้างสมการทำนายค่าวอเตอร์แอกติวิตีและปริมาณความชื้นในผลไม้อบแห้ง. การประชุมวิชาการระดับชาติครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563. 4051-4059. Chatchamon Srisirirat, Pramote Khuwijitjaru, Sarawut Phupaichitkun, and Busarakorn Mahayothee. 2021. Rapid Assessment of Water Activity, Moisture Content, and Total Soluble Solids in Dried Fruits and Vegetables using Near-Infrared Spectroscopy. Silpakorn International Conference on Total Art and Science 2021 (SICTAS 2021) in conjunction with the 2nd International Conference on Engineering and Industrial Technology 2021 (ICEIT 2021) The International Virtual Conference on Art, Science & Technology, and Social Science, 3-5 November, 2021.Proceedings