

การประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีตรวจวัดปริมาณ
วิตามินซีและการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP

APPLICATION OF NEAR INFRARED SPECTROSCOPY
FOR EVALUATION OF VITAMIN C AND CONTAMINATION OF
GENERAL TOMATOES IN GAP TOMATOES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2561
KMITL-2018-EN -M-100-97

การประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีตรวจวัดปริมาณ
วิตามินซีและการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP

APPLICATION OF NEAR INFRARED SPECTROSCOPY
FOR EVALUATION OF VITAMIN C AND CONTAMINATION OF
GENERAL TOMATOES IN GAP TOMATOES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2561
KMITL-2018-EN -M-100-97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION OF NEAR INFRARED SPECTROSCOPY
FOR EVALUATION OF VITAMIN C AND CONTAMINATION OF
GENERAL TOMATOES IN GAP TOMATOES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

KMITL-2018-EN -M-100-97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีตรวจวัดปริมาณวิตามินซีและการ
ปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP

Thesis Title Application of Near Infrared Spectroscopy for Evaluation of Vitamin C and
Contamination of General Tomatoes in GAP Tomatoes

นักศึกษานางสาวคันทรีรัตน์ กล่อมเกลี้ยง


รหัสประจำตัว 59601287

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุญ

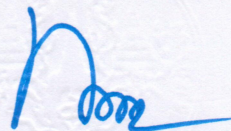
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-100-97

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อนุพันธ์	เทอดวงศ์วรกุล	
ผศ.ดร.ประสันท	ชุ่มใจหาญ	
ดร.นารัถระพี	นาคะวัจนะ	
ดร.วันพุทธ	แช่ฉั่ว	
รศ.ดร.ปานมนัส	ศิริสมบุญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 10 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง AE-302 อาคาร CCA

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยไม่ได้รับอนุญาตจากคณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 10 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีตรวจวัดปริมาณวิตามินซีและการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP
นักศึกษา	นางสาวคณิศจิรัตน์ กล่อมเกลี้ยง
รหัสประจำตัว	59601287
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุญ

บทคัดย่อ

มะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP มีสภาพแวดล้อมในการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจจะส่งผลให้ปริมาณวิตามินซีแตกต่างกันได้ การศึกษานี้เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมาตรวจวัดปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP และตรวจสอบการปลอมปนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP โดยใช้ FT-NIR spectrometer และ Micro – NIR Pro ตรวจสอบมะเขือเทศพันธุ์ราชินี โทนี จากผลการทดลองพบว่า การตรวจสอบด้วย FT-NIR spectrometer แบบจำลองปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปมีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (R^2) และค่าอัตราส่วนการเบี่ยงเบนการทำนาย (RPD) เท่ากับ 0.308 และ 1.25 ตามลำดับ ระบุว่าไม่แนะนำให้ใช้ในการทำนาย และแบบจำลองปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP มีค่า R^2 และ RPD เท่ากับ 0.698, 1.82 ตามลำดับ ระบุว่าเหมาะสำหรับการคัดเลือกแบ่งกลุ่มและการประมาณค่าหยาบๆ สำหรับการตรวจสอบด้วย Micro-NIR Pro แบบจำลองทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP มีค่า R^2 และ RPD เท่ากับ 0.348 และ 1.269 ตามลำดับ ระบุว่าไม่แนะนำให้ใช้ แบบจำลองทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer มีค่า R^2 และ RPD เท่ากับ 0.74 และ 1.98 ตามลำดับ ระบุว่าเหมาะสำหรับการคัดเลือกแบ่งกลุ่มและการประมาณค่าหยาบๆ ส่วนแบบจำลองการจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศที่มีการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ พบว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี SIMCA ของสเปกตรัมจาก FT-NIR spectrometer และ Micro – NIR Pro มีค่าเปอร์เซ็นต์ที่ทำนายตัวเองถูกเท่ากับ 95.08 และ 96.72 ค่าเปอร์เซ็นต์ที่ทำนายกลุ่มอื่นถูกเท่ากับ 87.74 และ 84.52 ตามลำดับ และค่าเปอร์เซ็นต์ที่สามารถทำนายถูกโดยรวมเท่ากับ 88.95, 86.52 ตามลำดับ ซึ่งแนะนำให้ใช้ในการจำแนกกลุ่มได้ ส่วนวิธี PLS-DA จากทั้งสองสเปกโตรมิเตอร์มีเปอร์เซ็นต์การทำนายตัวเองถูกต่ำ คือ 50.81, 44.26 ตามลำดับ จึงไม่แนะนำให้ใช้ในการจำแนกกลุ่ม ดังนั้นการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีตรวจวัดปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศและเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ใช้ประมาณค่าอย่างหยาบๆ แต่อย่างไรก็ตามการจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศที่มีการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP แนะนำให้ใช้ในการแบ่งกลุ่มได้

คำสำคัญ : เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี มะเขือเทศทั่วไป มะเขือเทศ GAP วิตามินซี การปลอมปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และไม่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Application of near infrared spectroscopy for evaluation of vitamin C and contamination of general tomatoes in GAP tomatoes
Student	Miss Kantharat Klomkeang
Student ID.	59601287
Degree	Master of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Panmanas Sirisomboon

ABSTRACT

General tomatoes and good agricultural practice (GAP) tomatoes are cultivated at different environments, which can cause different content of vitamin C. This study was to evaluate the possibility of near infrared spectroscopy technique, that measured the Vitamin C content in general tomatoes and GAP tomatoes and measured the contamination of general tomatoes in GAP tomatoes. FT-NIR spectrometer and Micro-NIR were used to measured Tony Cherry tomatoes. The results showed that for the FT-NIR spectrometer, the model of Vitamin C content of General tomatoes of provided the coefficient of determination (R^2), residual prediction deviation (RPD) of 0.308 and 1.25, respectively, and the model of Vitamin C content of GAP tomatoes of 0.698 and 1.82, respectively. For Micro-NIR Pro spectrometer, the model of Vitamin C content of General and GAP tomatoes provided 0.348 and 1.269, respectively. The model of percentage of contamination of general tomatoes in GAP tomatoes using FT-NIR spectrometer provided 0.74 and 1.98, respectively. Models of classification of contamination of general tomatoes in GAP tomatoes at various percentages was by SIMCA and PLS-DA. Results showed that the SIMCA method with the spectrum from FT-NIR spectrometer and Micro – NIR Pro provided the percentages of correct self-prediction of 95.08 and 96.72, respectively, correct other group prediction of 87.74 and 84.52, respectively, and overall correct predictions of 88.95 and 86.52, respectively. The PLS-DA of both spectrometers provided the percentages of correct self-prediction of 50.81, 44.26 respectively. It is not recommended for classification.

In conclusion, near infrared spectroscopy was estimated for measuring the amount of vitamin C in tomatoes and percentage of contamination. However, it was recommended for the classification of contamination of general tomatoes in GAP tomatoes.

Keywords : near infrared spectroscopy, general tomatoes, GAP tomatoes, Vitamin C, contamination

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุญรณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการณที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณฟาร์มแกะขอบฟ้า จังหวัดสุพรรณบุรี และฟาร์มศาลายา ออร์คิต จังหวัดนครปฐม ที่ให้ทำการเก็บตัวอย่างมะเขือเทศ GAP และมะเขือเทศทั่วไปสำหรับทำการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทสโกปี สำหรับผลทางการเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคนที่ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

คันธรัตน์ กล่อมเกลี้ยง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 แผนการดำเนินการ.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 มะเขือเทศ.....	5
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของมะเขือเทศ.....	5
2.1.2 มะเขือเทศ GAP และมะเขือเทศทั่วไป.....	6
2.1.3 องค์ประกอบและคุณค่าทางอาหารของมะเขือเทศ.....	7
2.1.4 อายุการเก็บเกี่ยวของมะเขือเทศ.....	8
2.2 วิตามินซีและการวิเคราะห์.....	10
2.2.1 คุณสมบัติทางเคมีของวิตามินซี.....	10
2.2.2 ประโยชน์ของวิตามินซี.....	11
2.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซี.....	13
2.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	13
2.3.1 คลื่นเนียร์อินฟราเรด.....	13
2.3.2 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	14
2.3.3 การจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น.....	19
2.3.3.1 Constant Offset Elimination.....	19
2.3.3.2 Straight Line Subtraction.....	19
2.3.3.3 Vector Normalization.....	19
2.3.3.4 Max-Min Normalization.....	19
2.3.3.5 Multiplicative Scattering Correction.....	19
2.3.3.6 อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3.7 อนุพันธ์อันดับที่สอง.....	21
2.3.4 การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน.....	21
2.3.5 ค่าแสดงสมรรถนะของแบบจำลอง.....	21
2.3.5.1 ค่าเฉลี่ย.....	21
2.3.5.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	21
2.3.5.3 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ทำนายโดย NIRS และข้อมูลที่อ้างอิง.....	22
2.3.5.4 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ.....	22
2.3.5.5 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ยของ การประมาณ.....	23
2.3.5.6 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ยของ การทำนาย.....	23
2.3.5.7 ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสอง ของการพิสูจน์แบบไขว้.....	23
2.3.5.8 ค่าอัตราส่วนการเบี่ยงเบนการทำนาย.....	23
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 ตัวอย่างและอุปกรณ์.....	26
3.1.1 ตัวอย่าง.....	26
3.1.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีต่างๆ.....	26
3.1.2.1 เครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์.....	26
3.1.2.2 เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ.....	27
3.1.2.3 เครื่องชั่งไฟฟ้า.....	27
3.1.2.4 อ่างอัลตราโซนิก.....	28
3.1.2.5 เครื่องปั่น.....	28
3.1.2.6 ปีเปตติจิตอล.....	28
3.1.2.7 สารเคมี.....	29
3.1.2.8 อุปกรณ์อื่นๆ.....	29
3.2 การสแกนด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด.....	29
3.2.1 สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer.....	29
3.2.2 สแกนด้วยเครื่อง Micro – NIR Pro.....	29
3.2.3 การทดสอบความแม่นยำของการสแกน.....	31
3.3 การวิเคราะห์วิตามินซีด้วยวิธีอ้างอิง.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ v ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างและสารเคมี.....	31
3.3.1.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	31
3.3.1.2 สารละลาย DCPI.....	31
3.3.1.3 สารละลาย L-ascorbic acid.....	32
3.3.1.4 สารละลาย Oxalic acid.....	32
3.3.2 วิธีวัดวิตามินซี.....	33
3.3.3 การทดสอบความแม่นยำของการวัดด้วยวิธีอ้างอิง.....	35
3.4 การสร้างแบบจำลอง.....	35
3.4.1 การสร้างแบบจำลองของวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไป มะเขือเทศ GAP และมะเขือเทศ GAP กับมะเขือเทศทั่วไป.....	35
3.4.2 การสร้างแบบจำลองของเปอร์เซ็นต์การปลอมปนของมะเขือเทศทั่วไปใน มะเขือเทศ GAP	37
3.4.2.1 แบบจำลองที่สร้างด้วยวิธี PLS จากซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	37
3.4.2.2 แบบจำลองที่สร้างด้วยวิธี PLS จากซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	37
3.4.3 การสร้างแบบจำลองจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศที่มีการปลอมปน มะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP.....	38
3.4.3.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA)	38
3.4.3.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS – DA).....	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	40
4.1 การวิเคราะห์สเปกตรัม.....	40
4.1.1 สเปกตรัมวิตามินซี	40
4.1.1.1 สเปกตรัมวิตามินซีจาก FT-NIR spectrometer.....	40
4.1.1.2 สเปกตรัมวิตามินซีจาก Micro-NIR Pro.....	41
4.1.2 สเปกตรัมมะเขือเทศ.....	42
4.1.2.1 สเปกตรัมมะเขือเทศทั่วไปจาก FT-NIR spectrometer.....	42
4.1.2.2 สเปกตรัมมะเขือเทศทั่วไปจาก Micro-NIR Pro.....	43
4.1.2.3 สเปกตรัมมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer.....	44
4.1.2.4 สเปกตรัมมะเขือเทศ GAP จาก Micro-NIR Pro.....	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การทดสอบความแม่นยำ.....	46
4.2.1 ความแม่นยำของการสแกน.....	46
4.2.2 ความแม่นยำของการวัดวิตามินซีด้วยวิธีอ้างอิง.....	47
4.3 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ.....	48
4.3.1 การกระจายความถี่ปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไป.....	48
4.3.1.1 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้ จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer.....	48
4.3.1.2 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro.....	49
4.3.2 การกระจายความถี่ปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP.....	51
4.3.2.1 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ ทำนายจาก FT-NIR spectrometer.....	51
4.3.2.2 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ ทำนายจาก Micro-NIR Pro.....	52
4.3.3 การกระจายความถี่ปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP.....	54
4.3.3.1 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ ทำนายจาก FT-NIR spectrometer.....	54
4.3.3.2 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ ทำนายจาก Micro-NIR Pro.....	55
4.3.4 การกระจายความถี่ของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปใน มะเขือเทศ GAP.....	57
4.4 แบบจำลองในการทำนายวิตามินซีในมะเขือเทศ.....	59
4.4.1 แบบจำลองของวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไป.....	59
4.4.1.1 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	59
4.4.1.2 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก Micro-NIR Pro ด้วย ซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	61
4.4.2 แบบจำลองของวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP.....	62
4.4.2.1 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	62
4.4.2.2 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก Micro-NIR Pro ด้วย ซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	67
4.4.3 แบบจำลองของวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP.....	68

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.3.1 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	68
4.4.3.2 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	70
4.4.4 แบบจำลองของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP.....	71
4.4.4.1 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	71
4.4.4.2 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	76
4.4.4.3 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก Micro NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	81
4.4.5 แบบจำลองจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศที่มีการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP.....	82
4.4.5.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA).....	82
4.4.5.1.1 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	82
4.4.5.1.2 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	83
4.4.5.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS – DA).....	83
4.4.5.2.1 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	83
4.4.5.2.2 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	84
4.4.6 ผลต่างของผลคูณของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมหลังจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นกับ regression coefficient ระหว่างมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP.....	85
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	87
5.1 การวิเคราะห์สเปกตรัม.....	87
5.1.1 สเปกตรัมวิตามินซี.....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **viii** อย่างอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.2 สเปกตรัมมะเขือเทศ.....	87
5.2 การทดสอบความแม่นยำ.....	87
5.2.1 ความแม่นยำของการสแกน.....	87
5.2.2 ความแม่นยำของการวัดวิตามินซีด้วยวิธีอ้างอิง.....	88
5.3 การสร้างแบบจำลอง.....	88
5.4 ผลต่างของผลคูณของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมหลังจัดการสเปกตรัม เบื้องต้นกับ regression coefficient ระหว่างมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP.....	88
5.5 ข้อเสนอแนะ.....	91
5.4.1 เหตุผลที่ไม่สามารถวัดปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศได้.....	91
5.4.2 เหตุผลที่ไม่สามารถจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศที่มีการปลอมปน มะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP.....	91
5.4.3 การใช้งาน.....	91
เอกสารอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก ก.....	98
ภาคผนวก ข.....	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และixต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณค่าทางอาหารในมะเขือเทศสุก..... 9
2.2	ปริมาณวิตามินซีที่ผู้ใหญ่ควรจะได้รับในแต่ละวันของประเทศต่างๆ 12
2.3	การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานที่ความยาวคลื่นต่างๆ 14
2.4	การแปลความหมายของค่า R^2 22
2.5	ค่าทางสถิติ RPD 24
2.6	ค่าทางสถิติ RPD สำหรับวัสดุที่มีความชื้นสูง..... 24
4.1	ค่าความสามารถของการทวนซ้ำและความสามารถในการทำซ้ำของมะเขือเทศจากการสแกนด้วย FT-NIR spectrometer..... 46
4.2	ค่าความสามารถของการทวนซ้ำและความสามารถในการทำซ้ำของมะเขือเทศจากการสแกนด้วย Micro-NIR Pro..... 47
4.3	ค่าความสามารถของการทวนซ้ำ (Repeatability, Rep) และค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณาสูงสุด (Maximum coefficient of determination, R^2_{Max})..... 47
4.4	ค่าทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129..... 59
4.5	ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129..... 59
4.6	ค่าทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3..... 61
4.7	ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายปริมาณของวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปจาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3..... 62
4.8	ค่าทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129..... 62
4.9	ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129 63
4.10	ความยาวคลื่นที่มีค่า Regression coefficient หรือ X-loading ของแบบจำลองทำนายปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศ GAP สูงและแถบการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางเคมีที่สอดคล้องกัน..... 66
4.11	ค่าทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3..... 67
4.12	ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายปริมาณของวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP จาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3..... 67
4.13	ค่าทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129..... 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แลxต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.14 ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	68
4.15 ค่าทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	70
4.16 ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายปริมาณของวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP จาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3	70
4.17 ค่าทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	71
4.18 ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	71
4.19 ความยาวคลื่นที่มีค่า Regression coefficient หรือ X-loading ของแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP สูงและแถบการสั่นสะท้อนของโครงสร้างทางเคมีที่สอดคล้องกัน.....	75
4.20 ค่าทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	76
4.21 ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	76
4.22 ความยาวคลื่นที่มีค่า Regression coefficient หรือ X-loading ของแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP สูงและแถบการสั่นสะท้อนของโครงสร้างทางเคมีที่สอดคล้องกัน.....	80
4.23 ค่าทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	81
4.24 ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองจาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	81
4.25 ผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ด้วย Unscrambler X 10.3 โดยการวิเคราะห์วิธี SIMCA.....	82
4.26 ผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก Micro-NIR Pro ด้วย Unscrambler X 10.3 โดยการวิเคราะห์วิธี SIMCA.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ Xi ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.27 ผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ด้วย Unscrambler X 10.3 โดยการวิเคราะห์วิธี PLS-DA.....	84
4.28 ผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ด้วย Micro-NIR Pro โดยการวิเคราะห์วิธี PLS-DA.....	84
5.1 ผลสรุปการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศชนิดต่างๆ และแบบจำลองทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP.....	89
5.2 ผลสรุปแบบจำลองจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศที่มีการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP.....	90



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการทำการทดลอง.....	4
2.1 สูตรโครงสร้างวิตามินซี.....	10
2.2 ออกซิเดชันและรีดักชันของกรดแอสคอร์บิก.....	11
2.3 รูปแบบที่สารเกิดอันตรกิริยากับรังสีเนียร์อินฟราเรด (a) transmittance (b) reflectance (c) transflactance (d) interactance.....	16
2.4 ขั้นตอนการสร้างสมการคาลิเบรชัน.....	18
2.5 NIR สเปกตรัมของมือคน: วัตถุประสงค์ของแบบแปร.....	20
3.1 มะเขือเทศสีแดง	26
3.2 มะเขือเทศสีส้ม	26
3.3 เครื่อง FT-NIR spectrometer.....	26
3.4 เครื่อง Micro – NIR Pro	27
3.5 เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ	27
3.6 เครื่องชั่งไฟฟ้า	27
3.7 อ่างอัลตราโซนิก	28
3.8 เครื่องปั่น	28
3.9 ปีเปตดิจิตอล.....	28
3.10 การสแกนด้วย FT-NIR spectrometer	29
3.11 การสแกนด้วย Micro – NIR Pro.....	29
3.12 ขั้นตอนการสแกนด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด.....	30
3.13 ตัวอย่างมะเขือเทศปั่นละเอียด	31
3.14 สารละลาย 2, 6- dichlorophenolindophenol.....	32
3.15 สารละลาย L-ascorbic acid	32
3.16 สารละลาย Oxalic acid.....	32
3.17 การคาลิเบรท pH ของเครื่องด้วยสารละลายบัฟเฟอร์.....	32
3.18 การวิเคราะห์วิตามินซีด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ.....	32
3.19 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศ	34
3.20 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองของวิตามินซีในมะเขือเทศ.....	36
3.21 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ เปอร์เซ็นต์ต่างๆ.....	39
4.1 สเปกตรัมของวิตามินซีที่ได้จากการสแกนด้วย FT-NIR spectrometer.....	40
4.2 สเปกตรัมของวิตามินซีที่ได้จากการสแกนด้วย Micro-NIR Pro	41
4.3 สเปกตรัมของมะเขือเทศทั่วไปที่ได้จากการสแกนด้วย FT-NIR spectrometer.....	42
4.4 สเปกตรัมของมะเขือเทศทั่วไปที่ได้จากการสแกนด้วย Micro-NIR Pro.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XIII อ่างอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.5 สเปกตรัมของมะเขือเทศ GAP ที่ได้จากการสแกนด้วย FT-NIR spectrometer.....	44
4.6 สเปกตรัมของมะเขือเทศ GAP ที่ได้จากการสแกนด้วย Micro-NIR Pro.....	45
4.7 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดคาลิเบรชัน.....	48
4.8 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดทดสอบ.....	49
4.9 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดคาลิเบรชัน.....	50
4.10 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดทดสอบ.....	50
4.11 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดคาลิเบรชัน.....	51
4.12 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดทดสอบ.....	52
4.13 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดคาลิเบรชัน.....	53
4.15 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดทดสอบ.....	54
4.16 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้ สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดคาลิเบรชัน.....	55
4.17 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้ สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดทดสอบ.....	56
4.18 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้ สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดคาลิเบรชัน.....	56
4.19 การกระจายความถี่ของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ของชุดคาลิเบรชัน.....	57
4.20 การกระจายความถี่ของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ของชุดทดสอบ.....	58
4.21 การเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับค่าปริมาณวิตามินซีของชุด คาลิเบรชัน จาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	60
4.22 การเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับค่าปริมาณวิตามินซีของชุด ทดสอบจาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **xiv** อย่างอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.23 การเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP กับค่าปริมาณวิตามินซีของชุด คาลิเบรชันจาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	64
4.24 การเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP กับค่าปริมาณวิตามินซีของชุด ทดสอบจาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	64
4.25 Regression coefficient plot ของแบบจำลองปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ที่สร้างด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	65
4.26 X-loading plot ของแบบจำลองปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ที่สร้างด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	65
4.27 การเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP กับค่าปริมาณ วิตามินซีของชุดคาลิเบรชันจาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	65
4.28 การเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP กับค่าปริมาณ วิตามินซีของชุดทดสอบจาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS Version 7.0.129.....	69
4.29 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP กับ เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของชุดคาลิเบรชัน จาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วย ซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	69
4.30 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP กับ เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของชุดทดสอบ จาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วย ซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	72
4.31 Regression coefficient plot ของแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศ ทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ที่สร้างด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	74
4.32 X-loading plot ของแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือ เทศ GAP จาก FT-NIR Spectrometer ที่สร้างด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129.....	74
4.33 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP กับ เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของชุดคาลิเบรชัน จาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วย ซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	77
4.34 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP กับ เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของชุดทดสอบ จาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วย ซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.35 Regression coefficient plot ของแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศ ทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ที่สร้างด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3.....	79
4.36 X-loading plot ของแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือ เทศ GAP จาก FT-NIR Spectrometer ที่สร้างด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3....	79
4.37 เปอร์เซ็นต์ของผลต่างของการคูณของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมหลังจัดการ สเปกตรัมเบื้องต้นกับ regression coefficient ระหว่างมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP.....	86



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสนใจในการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพ โดยผู้บริโภคหันมารับประทานผักผลไม้กันมากขึ้น เนื่องจากผักมีคุณค่าทางอาหารมากมาย ไม่ว่าจะเป็นแคลเซียม ธาตุเหล็ก สารต้านอนุมูลอิสระและวิตามินหลายชนิด และการบริโภคผักผลไม้เป็นประจำจะช่วยเรื่องการขับถ่ายและลดความเสี่ยงต่อโรคอ้วนและโรคไม่ติดต่อเรื้อรังต่างๆที่มีผลกระทบต่อภาวะสุขภาพ ได้แก่ โรคไขมันในเส้นเลือด โรคหัวใจและหลอดเลือด ซึ่งโรคต่างๆ เกิดจากอนุมูลอิสระเข้าไปทำลายเซลล์ การรับประทานผักผลไม้ก็จะช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคไม่ติดต่อเรื้อรังต่างๆ ดังกล่าวมา [1] ซึ่งมะเขือเทศก็เป็นผักผลไม้ชนิดหนึ่งที่นิยมบริโภคมากที่สุดในโลก เพราะอุดมไปด้วยเส้นใย เบต้าแคโรทีน วิตามินอี วิตามินเอ วิตามินซี และสารต้านอนุมูลอิสระต่างๆ ทำให้ช่วยลดความเสี่ยงของโรคมะเร็ง โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคกระดูกพรุนและอีกมากมาย [2], [3], [4], [5] นอกจากนี้มะเขือเทศยังปราศจากคอเลสเตอรอล ทำให้เป็นผักผลไม้ที่มักใช้เป็นตัวช่วยในการลดความอ้วนอีกด้วย [6]

ทั่วไปการผลิตมะเขือเทศของเกษตรกรไทยยังมีการใช้สารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูในการดูแลรักษาพืชในทุกกระบวนการผลิต แม้กระทั่งช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว ทำให้มีการตรวจพบการปนเปื้อนของสารป้องกันศัตรูพืชและยังมีการตกค้างของสารเคมีบางชนิดปริมาณที่เกินมาตรฐาน ก่อให้เกิดอันตรายและปัญหาต่อสุขภาพของผู้บริโภค [7] ซึ่งความต้องการของตลาดผักผลไม้โลกในปัจจุบันมุ่งเน้นการติดตามตรวจสอบแหล่งผลิตสินค้าเกษตรกรว่ามีกระบวนการผลิตเป็นไปตามมาตรฐาน มีความปลอดภัย ที่สำคัญต้องเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม รวมทั้งความห่วงใยในเรื่องสวัสดิภาพของผู้ปฏิบัติงาน สวัสดิภาพสัตว์และสิ่งแวดล้อม ทำให้เริ่มมีการใช้มาตรฐานการปฏิบัติที่ดีทางการเกษตร (Good Agricultural Practices: GAP) ในหลายประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เพื่อเพิ่มปริมาณการผลิตอาหารที่ปลอดภัยและมีคุณภาพสูง ครอบคลุมกระบวนการผลิตทั้งพืชผัก ไม้ผล พืชไร่ พืชสมุนไพรและเครื่องเทศ [8] ซึ่งประเทศไทยใช้มาตรฐาน GAP ในควบคุมกระบวนการผลิตผักผลไม้หลายชนิด ผักผลไม้ที่นิยมรับรองมาตรฐานนี้คือมะเขือเทศ ซึ่งจะเรียกว่ามะเขือเทศที่มีการควบคุมด้วยมาตรฐานการปฏิบัติที่ดีทางการเกษตรหรือมะเขือเทศ GAP (Tomato Good Agricultural Practices: T - GAP) เป็นไปตามระบบมาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีความปลอดภัยจากสารเคมี (กล่าวคือมีการใช้สารเคมีบางส่วนในกระบวนการผลิต แต่จะถูกกำหนดชนิด ปริมาณและระยะเวลาการใช้เพื่อไม่ให้ตกค้างบนผลผลิตเกินเกณฑ์มาตรฐานโดยกรมวิชาการเกษตร) จุลินทรีย์ และศัตรูพืช มีคุณภาพเหมาะสมต่อการบริโภคหรือตรงตามความต้องการของผู้บริโภค [9] ซึ่งจะมีสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.) กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ตั้งหลักเกณฑ์ในการรับรองมาตรฐาน

มะเขือเทศอุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระหลายชนิด ซึ่งวิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิก (Vitamin C, Ascorbic Acid) เป็นหนึ่งในสารต้านอนุมูลอิสระหลักในมะเขือเทศ [10] และมีบทบาทเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำคัญในการสังเคราะห์คอลลาเจน การดูดซึมธาตุเหล็ก การกระตุ้นภูมิคุ้มกัน มีส่วนช่วยในการรักษาแผลและบำรุงกระดูกอีกด้วย ซึ่งปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระต่างๆในมะเขือเทศจะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ที่แตกต่างกัน [11] ส่วนใหญ่ความสามารถของสารต้านทานอนุมูลอิสระในมะเขือเทศจะแตกต่างกันไปตามความหลากหลายทางพันธุกรรม ระยะเวลาในการสุกแก่ และสภาพแวดล้อมในการเจริญเติบโต [12], [13], [14] จะเห็นได้ว่ามะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP มีสภาพแวดล้อมในการผลิตและการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจจะส่งผลให้ปริมาณวิตามินซีแตกต่างกันได้ ซึ่งวิธีการตรวจสอบวิตามินซีด้วยสารเคมีต่างๆ มีมากมายหลายวิธี เช่น Burge และคณะรายงานว่า การทดลองวัดความเข้มข้นของวิตามินซีโดยใช้วิธีการปรับสีด้วย 2,6-dichlorophenolindophenol [15] ส่วน Balan ได้ใช้โพแทสเซียมไอโอเดต [16] หรือ Matei และคณะใช้สารละลายโบรมเมท [17] ด้านวิธีการวัดปริมาณจะพบว่าไม่มีแนวทางทดลองที่เฉพาะเจาะจง [18] ซึ่งมีข้อจำกัดในการใช้ตัวอย่างวิธีไปโอเซนเซอร์แบบโพเทนซิโอเมตริกซ์ [19] ทำโดยการตรึงแอสคอร์บิกออกซิเดสในเมทริกซ์พอลิเมอร์ Greenway และ Ongomo ทำการวิเคราะห์วิตามินซีด้วยอิเล็กโทรดกลาสสคาร์บอนเป็นตัวแปลงสัญญาณในระบบ [20] และวิธีที่นิยมเลือกใช้ที่สุดสำหรับหาวิตามินซี [21] คือวิธีโครมาโทกราฟีของเหลว (liquid Chromatography: HPLC) ซึ่ง Spinola และคณะได้ศึกษาการพัฒนาและการตรวจสอบวิธีโครมาโทกราฟีของเหลวที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการวิเคราะห์วิตามินซีในอาหาร ซึ่งเป็นรูปแบบของคอลัมน์โครมาโทกราฟีที่ดูดซับผลตัวอย่างหรือการวิเคราะห์ในตัวทำละลายที่ความดันสูงผ่านคอลัมน์ที่มีการบรรจุโครมาโทกราฟีวัสดุ [22] จากวิธีที่กล่าวมาทั้งหมดจะพบว่าเป็นวิธีการที่ยุ่งยาก การทดสอบใช้เวลานาน ใช้สารเคมีในการวิเคราะห์ทำให้ต้นทุนสูง และอาจเป็นอันตรายต่อนักวิจัยและสิ่งแวดล้อม

อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการตรวจสอบวิตามินซี โดยใช้เทคนิคที่ใช้เวลารวดเร็วในการตรวจวัด (2-3 นาที/ตัวอย่าง) ไม่เป็นอันตรายเพราะปราศจากการใช้สารเคมี ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการควบคุมและคัดแยกผลผลิตทางการเกษตร อีกทั้งยังสะดวกในการทดสอบ ไม่ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญ ไม่ต้องเตรียมตัวอย่างทำให้ตัวอย่างไม่ถูกทำลาย สามารถที่จะนำวัสดุที่ใช้ในการตรวจสอบแล้วนำมาบริโภคได้โดยที่ยังคงมีคุณค่าของสารอาหารและสภาพของวัสดุเหมือนเดิม สุดท้ายยังสามารถศึกษาตัวแปรของวัสดุได้หลายตัวแปรพร้อมๆกัน เรียกว่า เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี [23] ซึ่งมีการใช้เทคนิคนี้ในหลายงานวิจัย Xudong และคณะ ได้ศึกษาการหาของแข็งที่ละลายน้ำ ความเป็นกรดต่าง และวิตามินซี และค่าสีในส้มแมนดาริน เทคนิคนี้สามารถตรวจสอบคุณภาพภายในจากการวัดปริมาณการดูดกลืนแสงเนียร์อินฟราเรดได้ดีถึงดีมาก [24] Pissard และคณะใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซีในแอปเปิ้ลมากถึง 37 สายพันธุ์ พบว่ามีประสิทธิภาพในการทำนายได้ดีถึงดีมาก [25]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมาประยุกต์ใช้ตรวจวัดวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP และตรวจสอบการปลอมปนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ในอุตสาหกรรมได้ ทำให้ลดระยะเวลา ลดค่าใช้จ่ายในการวัดต่อตัวอย่าง ไม่ต้องใช้สารเคมีและตัวอย่างสามารถถูกนำกลับเข้ามาบริโภคได้ ทำให้ลดต้นทุนการผลิตและสามารถควบคุมการผลิตได้แน่นอนขึ้น และยังทำให้ผู้บริโภคได้รับผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอและตรงตามความต้องการมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อนำเทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมาประยุกต์ใช้ตรวจวัดวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP และตรวจสอบการปลอมปนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ทำให้ลดระยะเวลา ลดค่าใช้จ่ายในการวัดต่อตัวอย่าง ไม่ต้องใช้สารเคมีและตัวอย่างสามารถถูกนำกลับเข้ามาบริโภคได้ ทำให้ลดต้นทุนการผลิตและสามารถควบคุมการผลิตในอุตสาหกรรมได้แน่นอนขึ้น และทำให้ผู้บริโภคได้รับผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่สม่ำเสมอและตรงตามความต้องการมากขึ้น

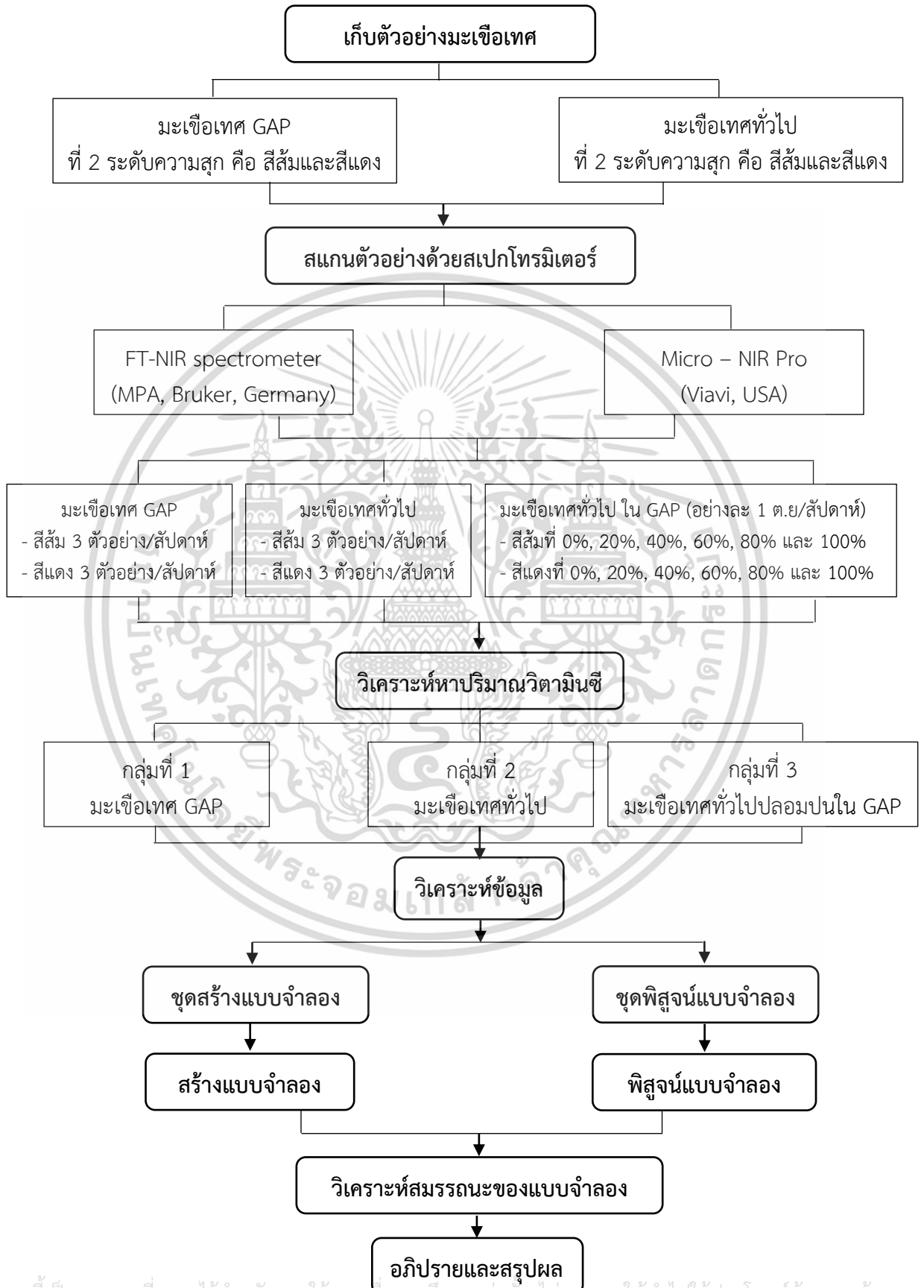
1.3 ขอบเขตการวิจัย

ใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายในการตรวจสอบมะเขือเทศด้วย FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ที่ช่วงเลขคลื่น $12500 - 3600 \text{ cm}^{-1}$ (800 – 2780 nm) กับ Micro – NIR Pro (Viavi, USA) ที่ช่วงความยาวคลื่น 950 – 1650 nm โดยใช้ตัวอย่างมะเขือเทศพันธุ์ราชินี โทนี่ ซึ่งเป็นมะเขือเทศ GAP จากฟาร์มตะขอบฟ้า จังหวัดสุพรรณบุรี และมะเขือเทศทั่วไปจากฟาร์มศาลายา ออร์คิด จังหวัดนครปฐม เพื่อทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP ที่ 2 ระดับความสุกแก่ คือ สีส้มและสีแดง และเพื่อตรวจสอบการปลอมปนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP โดยเปอร์เซ็นต์ปลอมปน คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ที่ 2 ระดับความสุกแก่ คือ สีส้มและสีแดง

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีตรวจวัดวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP และตรวจสอบการปลอมปนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ทำให้ลดระยะเวลา ลดค่าใช้จ่ายในการวัดต่อตัวอย่าง ไม่ต้องใช้สารเคมีและตัวอย่างสามารถถูกนำกลับเข้ามาบริโภคได้ ทำให้ลดต้นทุนการผลิตและสามารถควบคุมการผลิตในอุตสาหกรรมได้แน่นอนขึ้น และทำให้ผู้บริโภคได้รับผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่สม่ำเสมอและตรงตามความต้องการมากขึ้น
2. สามารถสร้างองค์ความรู้ใหม่ ซึ่งไม่เคยมีนักวิจัยใดทำมาก่อนในการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการตรวจวัดวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP และตรวจสอบการปลอมปนกันของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ได้

1.5 แผนการดำเนินการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ปรึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดภาพที่ 1.1 ขั้นตอนการทำการทดลอง เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มะเขือเทศ

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของมะเขือเทศ

เป็นพืชล้มลุกที่มีอายุเพียง 1 ปี ลำต้นตั้งตรง มีลักษณะเป็นพุ่ม ใบเป็นใบประกอบออกสลับกัน ใบย่อยมีขนาดไม่เท่ากันบางใบเล็กเรียวยาว บางใบกลมใหญ่ ปลายใบแหลม ขอบใบเป็นหยักลึกคล้ายฟันเลื่อย มีขนอ่อนๆ ปกคลุม ออกดอกเป็นช่อหรือดอกเดี่ยวบริเวณซอกใบ ดอกมีสีเหลืองมีกลีบเลี้ยงสีเขียวประมาณ 5-6 กลีบ ผลเป็นผลเดี่ยว มีขนาดรูปร่างและสีแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ [26]

พืชตระกูลนี้จัดอยู่ในกลุ่ม (order) polemoniales ลักษณะประจำตระกูล [27] มีดังนี้

ลักษณะทางใบ	alternate มีทั้งใบธรรมดาและใบหยัก ใบกว้าง เส้นใบไม่ขนาน
ดอก	ออกดอกเป็นช่อ แต่ละดอกเป็นดอกสมบูรณ์เพศ
ผล	เป็น capsule และ berry
การผสมเกสร	ผสมตัวเองเป็นส่วนใหญ่ แมลงอาจช่วยผสมให้เกิดการผสมข้ามได้
สารมีพิษ	มักจะมี alkaloid พวก solanine เช่น ในหัวมันฝรั่งที่ผิวเปลือกมีสีเขียว

ในปัจจุบันมะเขือเทศมีมากกว่า 1,000 ชนิด ซึ่งมีตั้งแต่ผลขนาดใหญ่ประมาณ 10 เซนติเมตร ไปจนถึงผลเล็กขนาดประมาณ 3 เซนติเมตร รูปร่างมีทั้งกลมแบนและกลมรี ผิวนอกเป็นมัน ผลดิบมีสีเขียวหรือเขียวอมเทา เมื่อสุกจะมีตั้งแต่สีเหลือง สีส้ม ไปจนถึงสีแดงเข้มจัด เนื้อภายในฉ่ำไปด้วยน้ำ มีรสเปรี้ยวและมีเมล็ดเป็นจำนวนมาก

ชื่ออื่น : มะเขือ (ทั่วไป), มะเขือส้ม (ภาคเหนือ), ครอบ (สุรินทร์), น้ำเนอ (เชียงใหม่)

นักวิทยาศาสตร์สันนิษฐานว่ามะเขือเทศมีถิ่นกำเนิดเดิมอยู่ในทวีปอเมริกา ค.ศ. 1595 มีการบันทึกเกี่ยวกับมะเขือเทศเป็นครั้งแรก โดยเชื่อกันว่ามะเขือเทศมีพิษ ไม่สามารถนำมากินได้ แต่ชาวยุโรปได้บรรยายถึงรูปลักษณ์ผิวใสวามัน มะเขือเทศพันธุ์แรกๆ มีขนาดเล็กเหมือนกับมะเขือเทศเซอร์รี แต่มีสีค่อนข้างเหลืองมากกว่าแดงและไม่นิยมนำมากินเป็นอาหาร หลังจากที่โคลัมบัสค้นพบโลกใหม่ เขาได้นำเมล็ดมะเขือเทศมายังประเทศสเปน นับจากนั้นมะเขือเทศก็เริ่มเป็นที่รู้จักของชาวยุโรปมากขึ้นและได้มีการแพร่ขยายทั่วยุโรป โดยเฉพาะประเทศอิตาลี ซึ่งเป็นประเทศที่ได้ชื่อว่าเป็นเจ้าแห่งผู้ผลิตมะเขือเทศรายใหญ่ในยุโรป นับตั้งแต่ศตวรรษที่ 16 เป็นต้นมา มะเขือเทศยังไม่เป็นที่นิยมเท่าไรนัก เนื่องจากชาวยุโรปยังเชื่อว่ามะเขือเทศมีพิษ ความจริงแล้วความเป็นพิษอยู่ที่ใบ คนยุโรปส่วนใหญ่นิยมปลูกมะเขือเทศเพื่อตกแต่งสวนมากกว่าจะนำมาเป็นอาหาร หลังจากที่มะเขือเทศแพร่ขยายไปยังทวีปอเมริกาเหนือ มีการพัฒนามะเขือเทศออกเป็นหลายสายพันธุ์จนกระทั่งศตวรรษที่ 19 มะเขือเทศสายพันธุ์ใหม่ได้ถูกพัฒนาและมีการให้ความรู้ว่ามีพิษน้อยลงสามารถนำมากินได้ จึงทำให้มะเขือเทศเป็นที่นิยมในการเพาะปลูกและบริโภคมากยิ่งขึ้น จนมียอดขายสูงเป็นอันดับต้นๆ ในปัจจุบันประเทศสหรัฐอเมริกา รัสเซีย อิตาลี สเปน จีน เป็นประเทศที่ผลิตมะเขือเทศเพื่อส่งออกมากขึ้น สำหรับประเทศไทยเอง ไม่ปรากฏหลักฐานแน่ชัดว่าเข้ามาในประเทศตั้งแต่เมื่อไร [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มะเขือเทศที่ปลูกอยู่ในปัจจุบันนี้มีต้นตอมาจากพันธุ์มะเขือเทศป่าลูกเล็ก (cherry tomato) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม *Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme* มะเขือเทศชนิดนี้ขึ้นอยู่ทั่วไปในแถบอบอุ่นและแถบร้อนของโลก แต่ถิ่นกำเนิดแรกเริ่มนั้นอยู่ในตอนกลางของทวีปอเมริกาและแถบ Andean หรือภูเขาแอนดิสในอเมริกาใต้ [28] จากเหตุผลหลายประการเชื่อว่าประเทศเม็กซิโกเป็นถิ่นกำเนิดของมะเขือเทศที่ปลูกเพื่อบริโภค ทั้งนี้จากการศึกษาโดยแยกเอนไซม์โดยใช้ electrophoresis พันธุ์มะเขือเทศที่ปลูกกันปัจจุบันนี้ จากยุโรปและพันธุ์ป่าของยุโรปมีกลุ่มเอนไซม์ที่คล้ายกับพันธุ์ป่าที่มาจากประเทศเม็กซิโกและอเมริกากลาง แต่ไม่คล้ายกับพันธุ์ป่านำมาจากแถบภูเขาแอนดิส เหตุผลอีกหนึ่งประการได้แก่ชื่อพื้นเมืองที่เรียกมะเขือเทศในเม็กซิโกมีชื่อว่า tomatl ซึ่งอาจเป็นต้นตอของชื่อ tomato ที่ใช้กัน แต่ภาษาพื้นเมืองแถบ andean เช่น ภาษา Quechua Aymara หรือภาษาอื่นๆ ไม่มีชื่อเรียกมะเขือเทศเลยและประกอบทั้งไม่เคยมีผู้ใดรายงานว่าพบชิ้นส่วนของมะเขือเทศในการศึกษาโบราณคดีแถบ andean

เส้นทางการกระจายของมะเขือเทศจากทวีปอเมริกาไปยังสหรัฐอเมริกา สเปน ฟิลิปปินส์ ยุโรป แอฟริกาและเอเชีย [29], [30] มีการกระจายจากประเทศเม็กซิโกไปยังสหรัฐอเมริกา สเปนและฟิลิปปินส์ตั้งแต่ศตวรรษที่ พันธุ์มะเขือเทศที่เป็นพันธุ์ที่ปลูกในปัจจุบันนี้ เป็นพันธุ์ที่พัฒนามาจากมะเขือเทศป่า

2.1.2 มะเขือเทศ GAP และมะเขือเทศทั่วไป

มะเขือเทศ GAP (good agricultural practice tomato) คือมะเขือเทศที่ผ่านกระบวนการเพาะปลูกที่ได้ผลิตผลปลอดภัย ปลอดภัยจากศัตรูพืชและคุณภาพเป็นที่พึงพอใจของผู้บริโภค โดยคำนึงการใช้ปัจจัยการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดต้นทุนการผลิต คำนึงถึงสุขภาพ ความปลอดภัยและสวัสดิภาพของผู้ปฏิบัติงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อความยั่งยืนในการผลิต [9] โดยมีข้อกำหนดวิธีปฏิบัติ 8 หมวด (มกษ.9001-2556) ดังนี้

1. แหล่งน้ำ น้ำที่ใช้ต้องมาจากแหล่งที่ไม่มีสภาพแวดล้อมซึ่งก่อให้เกิดการปนเปื้อนวัตถุหรือสิ่งที่เป็นอันตราย
2. พื้นที่ปลูก ต้องเป็นพื้นที่ซึ่งไม่มีวัตถุหรือสิ่งที่เป็นอันตรายที่จะทำให้เกิดการตกค้างหรือปนเปื้อนในผลิตผล
3. การใช้วัตถุอันตรายทางการเกษตร ผู้ปฏิบัติงานต้องมีความรู้ในการใช้วัตถุอันตรายทางการเกษตรที่ถูกต้อง กรณีมีการใช้ให้ใช้ตามคำแนะนำหรืออ้างอิงคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์หรือตามคำแนะนำในฉลากที่ขึ้นทะเบียนอย่างถูกต้องกับกรมวิชาการเกษตร
4. การจัดการคุณภาพในกระบวนการผลิตก่อนการเก็บเกี่ยว มีการปฏิบัติตามขั้นตอนการเพาะปลูกและการปฏิบัติก่อนการเก็บเกี่ยวที่จะทำให้มั่นใจได้ว่าผลิตผลมีคุณภาพตามข้อกำหนดในมาตรฐานสินค้าเกษตรที่กำหนดสำหรับผลิตผลแต่ละชนิดหรือตามข้อกำหนดของคู่ค้า
5. การเก็บเกี่ยวและการปฏิบัติหลังเก็บเกี่ยว เก็บเกี่ยวผลิตผลที่มีคุณภาพตามข้อกำหนดในมาตรฐานสินค้าเกษตรที่กำหนดสำหรับผลิตผลแต่ละชนิดหรือตามข้อกำหนดคุณภาพของคู่ค้า วิธีการเก็บเกี่ยวและการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวต้องไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตผลและก่อให้เกิดการปนเปื้อนที่มีผลต่อความปลอดภัยในการบริโภค ต้องคัดแยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ โทร. 02-262-4000 หรือเว็บไซต์ www.dft.go.th ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตผลที่ไม่ได้คุณภาพออก หากเกษตรกรมีการคัดแยกชั้นคุณภาพและขนาดก่อนจำหน่ายให้คัดแยกชั้นคุณภาพและขนาดของผลิตผลตามข้อกำหนดในมาตรฐาน สินค้าเกษตรที่กำหนดสำหรับผลิตผลแต่ละชนิดหรือตามข้อกำหนดของคู่ค้า

6. การพักผลผลิต การขนย้ายในบริเวณแปลงเพาะปลูก การเก็บรักษา มีการจัดการด้านสุขลักษณะของสถานที่และวิธีการขนย้าย พักผลผลิต และ/หรือ เก็บรักษาผลิตผล เพื่อป้องกันผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตผลและการปนเปื้อนจากอันตรายและสิ่งแปลกปลอมที่มีผลต่อความปลอดภัยในการบริโภค
7. สุขลักษณะส่วนบุคคล ผู้ปฏิบัติงานมีความรู้ที่เหมาะสมหรือผ่านการอบรมการปฏิบัติที่ถูกต้องและถูกสุขลักษณะ มีการดูแลสุขลักษณะส่วนบุคคลเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลผลิตเกิดการปนเปื้อนจากผู้สัมผัสกับผลิตผลโดยตรง โดยเฉพาะในขั้นการเก็บเกี่ยวและหลังการเก็บเกี่ยวสำหรับพืชที่ใช้บริโภคสด
8. การบันทึกข้อมูลและตามสอบ มีบันทึกข้อมูล เพื่อให้สามารถตรวจประเมินและตามสอบได้เกี่ยวกับที่มาของปัจจัยการผลิต การใช้วัตถุอันตรายทางการเกษตร การปฏิบัติในการเพาะปลูก การปฏิบัติการก่อนและหลังเก็บเกี่ยวในขั้นตอนที่สำคัญที่จะมีผลกระทบต่อคุณภาพและความปลอดภัยในผลิตผลข้อมูลผู้รับซื้อผลิตผลหรือแหล่งที่มาผลิตผลในแต่ละรุ่นไปจำหน่าย

มะเขือเทศทั่วไป (general tomato) คือมะเขือเทศที่ปลูกในสภาพแวดล้อมทั่วไป ไม่มีการควบคุมการผลิต เป็นการผลิตที่หวังปริมาณผลผลิตมากกว่าคุณภาพและความปลอดภัยของผู้บริโภค มีการใช้สารเคมีตั้งแต่เริ่มเพาะปลูกจนกระทั่งช่วงการเก็บเกี่ยว โดยไม่คำนึงถึงสุขภาพ ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม

2.1.3 องค์ประกอบและคุณค่าทางอาหารของมะเขือเทศ

มะเขือเทศเป็นผลไม้ที่กำลังเป็นที่นิยม ส่วนหนึ่งมาจากผู้หญิงต้องการดูแลสุขภาพผิวพรรณ เพราะเชื่อกันว่ามะเขือเทศมีส่วนช่วยให้ผิวพรรณสดใสเปล่งปลั่งสดใส แลดูอ่อนวัย ผิวดูมีเลือดฝาดและอมชมพู ส่วนผู้ที่รักษาสุขภาพก็เริ่มหันมาใส่ใจในการบริโภคมะเขือเทศ เนื่องจากช่วยเสริมภูมิคุ้มกันของร่างกายและที่สำคัญช่วยป้องกันโรคร้ายหลายๆ โรค สารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกายหลายอย่างสามารถพบได้ในมะเขือเทศ ซึ่งสารอาหารต่างๆ เหล่านี้มีส่วนช่วยในกระบวนการทางเคมีของร่างกาย มีกากใยที่ช่วยในการขับถ่าย ช่วยลดคอเลสเตอรอล มีสารป้องกันมะเร็ง มีไขมันต่ำ ไม่ทำให้อ้วน [26]

น้ำตาลในมะเขือเทศคือน้ำตาลกลูโคส ฟรักโทส ซูโครส ซึ่งให้พลังงานเช่นเดียวกับน้ำตาลทรายคือใน 1 กรัม จะให้พลังงาน 4 กิโลแคลอรี แม้ว่ามะเขือเทศจะมีรสหวานจากน้ำตาล แต่ก็มีน้ำอยู่มาก จึงมีผลทำให้น้ำตาลที่มีอยู่เจือจางลง น้ำตาลในมะเขือเทศเป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน ดังนั้นการย่อยสลายให้เป็นกลูโคสจึงใช้เวลาานาน อีกทั้งกากใยที่มีอยู่ยังช่วยชะลอการดูดซึมของน้ำตาลและรักษาระดับน้ำตาลในเลือดให้สมดุล ก่อให้เกิดพลังงานได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้มะเขือเทศยังอุดมไปด้วยคุณค่าทางอาหาร ได้แก่ วิตามินซี วิตามินเค วิตามินเอ โปแทสเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และแร่ธาตุอื่นๆ มะเขือเทศมีสารที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา ดังนั้นจึงใช้เป็นยารักษาโรคในช่องปากอันเกิดจากเชื้อราได้ วิตามินในมะเขือเทศเป็นตัวช่วยสำคัญในกระบวนการเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำตาลเป็นพลังงาน หากขาดวิตามิน ร่างกายจะขาดพลังงานทั้งที่มีน้ำตาลอยู่ในเซลล์ ร่างกายจะเกิดอาการเช่นเดียวกับการเกิดภาวะน้ำตาลในเลือดต่ำ ร่างกายจะเรียกร้องให้กินอาหารเพิ่มทั้งๆ ที่สารอาหารในเซลล์ยังใช้ไม่หมด [26]

ในมะเขือเทศมีสารแอนติออกซิแดนต์ที่น่าสนใจตัวหนึ่งนั่นคือ ไลโคปีน (lycopene) ซึ่งเป็นสารกลุ่มแคโรทีนอยด์ (carotenoid) เป็นสารสีแดงที่คุณสมบัติเด่นในการต้านอนุมูลอิสระได้ดี ช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของเซลล์และยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็งลำไส้และมะเร็งต่อมลูกหมากได้ ในผลมะเขือเทศมีสารจำพวกวิตามินอยู่หลายชนิด เช่น วิตามินบี วิตามินเค โดยเฉพาะวิตามินเอและวิตามินซีที่มีในปริมาณสูง มีกรดมาลิก กรดซิตริก ซึ่งให้รสเปรี้ยวและมีกลูตามิก ซึ่งเป็นกรดอะมิโนชนิดเดียวกันกับที่มีอยู่ในผงชูรส ช่วยเพิ่มรสชาติให้อาหาร ดังนั้นจะพบว่าอาหารที่มีมะเขือเทศเป็นส่วนประกอบจะมีรสกลมกล่อม นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารเบต้าแคโรทีนและแร่ธาตุอีกหลายชนิด เช่น แคลเซียม ฟอสฟอรัส เหล็ก เป็นต้น [26]

มะเขือเทศมีสรรพคุณทางยาค่อนข้างสูงเพราะมีวิตามินพี (citrin) หรือไบโอฟลาโวนอยด์ (Bioflavonoids) ซึ่งช่วยป้องกันการแข็งตัวของหลอดเลือด มะเขือเทศยังมีฤทธิ์ขับปัสสาวะ จึงบรรเทาโรคความดันโลหิตสูง มีวิตามินเอช่วยบำรุงสายตา วิตามินที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในมะเขือเทศคือวิตามินซี ซึ่งช่วยป้องกันและรักษาโรคหลอดเลือดหัวใจหรือโรคเลือดออกตามไรฟัน รักษาแผลในช่องปาก เสริมสร้างการทำงานของระบบย่อยอาหารและระบบขับถ่าย ลดการแข็งตัวของผนังหลอดเลือด ลดความดัน แก้พิษต่างๆ ในร่างกาย บรรเทาอาการตับอักเสบ ช่วยให้มีพัฒนาการทางสมองและความจำที่ดีในเด็ก ช่วยลดคอเลสเตอรอล ป้องกันมะเร็งและช่วยให้ไม่เป็นหวัดง่าย ยิ่งไปกว่านั้น มะเขือเทศยังช่วยบำรุงผิวพรรณ ลดริ้วรอย ช่วยให้ผิวพรรณชุ่มชื้นและช่วยให้ระบบการหมุนเวียนเลือดทำงานดีขึ้น คุณค่าทางอาหารในมะเขือเทศสุกขนาดกลาง 1 ผล จากการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์พบว่า ในเนื้อของมะเขือเทศประกอบด้วยสารและแร่ธาตุดังต่อไปนี้ มะเขือเทศสุกปริมาณ 180 กรัม ให้พลังงาน 37.8 แคลอรี และมีน้ำเป็นองค์ประกอบที่สูงมาก [26] ดังตารางที่ 2.1

2.1.4 อายุการเก็บเกี่ยวของมะเขือเทศ

อายุของมะเขือเทศนับตั้งแต่เริ่มปลูกกระทั่งเก็บเกี่ยว จะใช้เวลาประมาณ 4 – 5 เดือน สำหรับการเจริญเติบโตของผลจะแบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือระยะที่ผลเจริญเติบโตเต็มที่ซึ่งใช้เวลาประมาณครึ่งหนึ่งของอายุผล เป็นระยะที่น้ำตาลของผลถูกเปลี่ยนเป็นแป้ง ผิวของผลยังมีสีเขียว และระยะที่สองคือระยะที่ผิวเริ่มเปลี่ยนสี ปริมาณคลอโรฟิลล์ในผลนั้นเริ่มลดลงเกิดกระบวนการสุกของผล ผลที่สุกแดงค่านั้นจะมีปริมาณวิตามินซีและน้ำตาลสูงสุด โดยระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวจะขึ้นอยู่กับพันธุ์มะเขือเทศ บางพันธุ์มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้นเพียง 2 เดือน แต่บางพันธุ์อาจจะนานถึง 3 เดือน นับตั้งแต่วันเพาะเมล็ด [31] แต่โดยทั่วไป มะเขือเทศเกือบทุกพันธุ์จะออกดอกหลังจากปลูกประมาณ 30 – 45 วัน และเริ่มเก็บเกี่ยวได้เมื่ออายุ 70 – 90 วัน และเก็บต่อไปจนหมด ประมาณ 4-5 เดือน [7]

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางอาหารในมะเขือเทศสุกขนาดกลาง 1 ผลใหญ่ หรือปริมาณ 180 กรัม

คุณค่าทางอาหาร	ปริมาณ	หน่วย
วิตามินซี	34.38	มิลลิกรัม
วิตามินเอ	1121.40	ไอยู
วิตามินเค	14.22	ไมโครกรัม
โมลีสตินัม	9.00	ไมโครกรัม
โพแทสเซียม	399.60	มิลลิกรัม
แมงกานีส	0.19	มิลลิกรัม
เส้นใยอาหาร	1.98	กรัม
โครเมียม	9.00	ไมโครกรัม
วิตามินบี 1	0.11	มิลลิกรัม
วิตามินบี 6	0.14	มิลลิกรัม
โฟเลต	27.00	ไมโครกรัม
ทองแดง	0.13	มิลลิกรัม
วิตามินบี 2	0.09	มิลลิกรัม
วิตามินบี 3	1.13	มิลลิกรัม
แมกนีเซียม	19.80	มิลลิกรัม
ธาตุเหล็ก	0.81	มิลลิกรัม
วิตามินบี 5	0.44	มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	43.20	มิลลิกรัม
วิตามินอี	0.68	มิลลิกรัม
ทริปโตฟาน	0.01	กรัม
โปรตีน	1.53	กรัม

ดัดแปลงมาจาก : ESHA Research in Salem, Oregon, USA. [26]

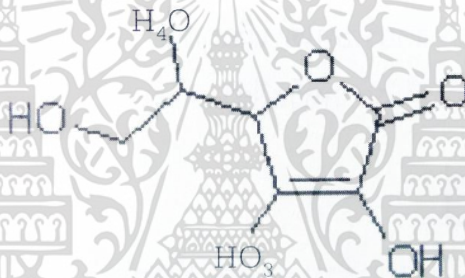
หมายเหตุ หน่วยไอยู (International Unit ; I.U.) เป็นหน่วยวัดมาตรฐานสากลซึ่งเป็นหน่วยที่ใช้อ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพสารออกฤทธิ์แต่ละชนิด กำหนดโดย World Health Organization (WHO) ซึ่งวิตามินเอในผักผลไม้ 1 ไอยู มีค่าเท่ากับ 0.6 ไมโครกรัม

2.2 วิตามินซีและการวิเคราะห์

2.2.1 คุณสมบัติทางเคมีของวิตามินซี

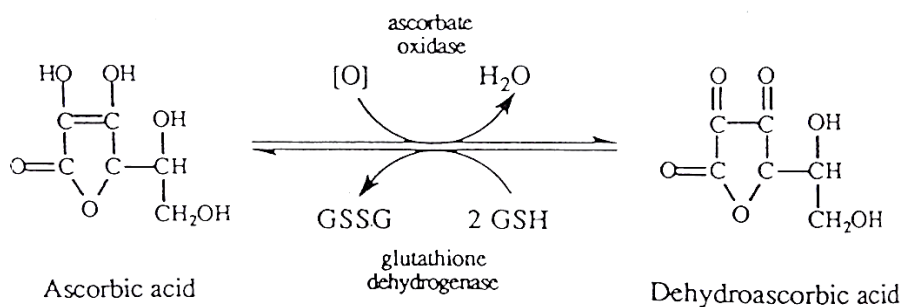
เป็นผงสีขาว ผลึกรูปเข็มและเกล็ดเล็กๆ ละลายน้ำได้ดี (กรัมต่อมิลลิลิตร) ละลายเล็กน้อยในอะซีโตนและแอลกอฮอล์ มีรสเป็นกรดอย่างแรง ดูดความชื้นในอากาศได้ สลายตัวได้ง่ายโดยแสงสว่าง ความร้อน ด่างและตัวออกซิไดส์ แต่คงทนต่อกรด วิตามินซีในลักษณะรีดิวซ์สามารถรวมกับสารโลหะ เช่น Ca, Na, Cu, Fe, Pb, Hg เป็นเกลือแอสคอร์เบตได้ เมื่อถูกแสงสว่างจัด วิตามินซีจะเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีน้ำตาลหรือสีชา [32]

วิตามินซีหรือกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) สูตรโมเลกุล $C_6H_8O_6$ มีลักษณะโมเลกุลขนาดเล็กคล้ายกับน้ำตาลกลูโคส มีน้ำหนักอนุภาค 176.12 จุดหลอมเหลว 192 องศาเซลเซียส ธรรมชาติของวิตามินซีเป็น L-ascorbic acid ชื่อทางเคมีคือ L - xyloascorbic acid หรือ L-threo - hex 2-uronic acid γ -lactone มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 สูตรโครงสร้างวิตามินซี [32]

โมเลกุลของวิตามินซีค่อนข้างไม่อยู่ตัว ดังนั้นในแหล่งธรรมชาติจึงพบวิตามินซีอยู่ทั้งใน reduced form คือ L-xylo-ascorbic acid และ oxidised form คือ dehydroascorbic acid ทั้งสองรูปแบบนี้มีฤทธิ์ของวิตามินซีเท่ากัน ปฏิกิริยาออกซิเดชันของวิตามินซีเกิดขึ้นได้ง่าย โดยการเร่งของออกซิไดส์ ซึ่งมักเป็นสารประกอบออกซิเจนที่ว่องไว เช่น สารไขมันเปอร์ออกไซด์ รวมทั้งอิออนเหล็กและอิออนทองแดง วิตามินซีจะเปลี่ยนจาก ascorbic acid ให้เป็น dehydroascorbic acid นั่นคือเมื่อถูกออกซิไดส์หมู่ -OH ทั้งสองในวงแหวนของวิตามินซีจะเปลี่ยนเป็นหมู่ =O 2, 3 diketo-L-gulonic acid เนื่องจากวิตามินซีมีคุณสมบัติเป็นสารที่มีฤทธิ์รีดิวซ์อย่างแรง เมื่อถูกออกซิไดส์จะเปลี่ยนเป็น L-dehydroascorbic acid วิตามินซีในร่างกายอยู่ในสภาพรีดิวซ์ ทั้ง ascorbic และ dehydroascorbic acids มีฤทธิ์เป็นวิตามินซีเหมือนกันและสามารถเปลี่ยนกลับไปมาระหว่างสารประกอบทั้ง 2 ชนิดได้ โดยอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน (รูปที่ 2.2) ที่ใช้เอนไซม์แอสคอร์บิคออกซิเดสและกลูตาไธโอนดีไฮโดรจีเนส [33]



ภาพที่ 2.2 ออกซิเดชันและรีดักชันของกรดแอสคอร์บิก [33]

สารอนุพันธ์ของ ascorbic acid หลายชนิดมีฤทธิ์วิตามินซี ได้แก่ rhamnoascorbic acid, D-arabino ascorbic acid, ascorbic acid-2-phosphate แต่สารสังเคราะห์ เช่น D-xylo-ascorbic acid และ L-arabino-ascorbic acid ไม่มีฤทธิ์ของวิตามินซีเลย [33]

2.2.2 ประโยชน์ของวิตามินซี

เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่าการขาดวิตามินซีทำให้เกิดโรคเลือดออกตามไรฟัน ซึ่งเป็นโรคที่รู้จักกันมานาน ในศตวรรษที่ 15 ที่ยุโรปมีคนเป็นโรคนี้นับว่าจำนวนมาก พบบ่อยในพวกกลาสีเรือที่เดินทางไปกับเรือไกลๆ และไม่ได้ขึ้นบกเป็นเวลานานๆ ทำให้ขาดอาหารประเภทผักผลไม้สด ซึ่งเป็นต้นตอสำคัญของวิตามินซีได้มีผู้ทำการศึกษาค้นคว้ามาตั้งแต่ปี ค. ศ. 1932 Szent - Gyorgyi เป็นผู้แยกวิตามินซีได้เป็นครั้งแรกจากต่อมแอดรีนัลและส้ม ตั้งชื่อว่า hexuronic acid ในปี ค. ศ. 1932 Glenn King C แยกได้จากมะนาวและพบว่ากรด hexuronic นี้เหมือนวิตามินซีคือมีฤทธิ์ป้องกันและรักษาหนูตะเภาที่เป็นโรคเลือดออกตามไรฟันได้ จึงตั้งชื่อว่าวิตามินซี ต่อมา Howarth และ Reichstein รัฐสุตรโครงสร้างและสังเคราะห์ได้ในปี ค. ศ. 1933 ต่อจากนั้นมาอีกประมาณ 50 ปี ก็มีการสังเคราะห์วิตามินซีในรูปแบบอุตสาหกรรมโดยที่วิตามินซีที่สังเคราะห์ขึ้นมามีคุณสมบัติเหมือนกับที่สกัดได้จากธรรมชาติทุกประการ [34]

แหล่งกำเนิดวิตามินซีส่วนใหญ่มีต้นตอมาจากอาหารจำพวกพืช ในสัตว์มีน้อยมากยกเว้นในไตอาหารที่มีมาก ได้แก่ ส้ม มะนาว มะขามป้อม ลำไย มะเขือเทศ พริกหยวกและผักใบเขียว ในน้ำนมคนมีน้อยแต่มากกว่าน้ำนมวัว 3-4 เท่า อาหารที่มีวิตามินซีน้อยมากหรือไม่มีเลย ได้แก่ เนื้อสัตว์ ไช้ ข้าว เป็นต้น ปัจจุบันนี้จะเห็นว่าการเติมวิตามินซีลงในเครื่องดื่มเป็นสารต้านอนุมูลอิสระเพื่อคงสภาพของรสชาติเดิมไว้ หรือเติมเนื้อสัตว์ ขนมอบหรืออาหารอื่นๆ เพื่อช่วยในการเก็บรักษาไม่ให้เสื่อมคุณภาพ ดังนั้นในอาหารที่เสริมวิตามินซีจึงเป็นอาหารที่ดีสำหรับผู้บริโภค ความต้องการวิตามินซีของร่างกายจะแตกต่างกันไปตามภูมิภาคต่างๆ ของโลก [35] ดังแสดงในตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ปริมาณวิตามินซีที่ผู้ใหญ่ควรจะได้รับในแต่ละวันของประเทศต่างๆ

ประเทศ	ข้อกำหนดที่ควรได้รับ มก. / วัน
อังกฤษ	30
แคนาดา	40
เนเธอร์แลนด์	50
สวีเดน	60
สหรัฐอเมริกา	60
ไทย	60
เยอรมัน	75

ที่มา ดัดแปลงจาก Basu and Dickerson, 1996 [35]

ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการกำหนดค่าความต้องการของวิตามินซีไว้ตาม recommended dietary allowance (RDA) ว่าในผู้ใหญ่ปกติควรจะได้รับวันละ 60 มก. การกำหนดค่าความต้องการวิตามินซีดังกล่าวนี้ อาจเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพความเป็นอยู่ของประชากรในแต่ละประเทศและค่าดังกล่าวนี้ก็ได้คงที่อาจเปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลาดังเช่น เมื่อปี ค. ศ. 1943 RDA ของประเทศสหรัฐอเมริกามีข้อกำหนดสำหรับวิตามินซีนี้นี้เท่ากับ 75 มก. ต่อวันและเปลี่ยนไปเป็น 45 มก. ต่อวันในปี ค. ศ. 1974 เปลี่ยนเป็นวันละ 60 มก. [32]

บทบาทของวิตามินซีในร่างกายขึ้นอยู่กับสภาวะโภชนาการ ขบวนการเมตาบอลิซึมที่ต้องใช้วิตามินซี การขับถ่ายออกจากร่างกาย ตลอดจนความแปรผันในแต่ละคนสภาพการเผาผลาญอาหารของร่างกายก็ทำให้ความต้องการวิตามินซีแตกต่างกันไป เช่น ในหญิงตั้งครรภ์ การติดเชื้อ คนที่ดื่มสุราจัดมาก การสูบบุหรี่และภาวะเครียดต่างๆ ปัจจุบันเราจะไม่ค่อยพบคนเป็นโรคโลหิตจางหรือโรคเลือดออกในผิวหนังกันดารมากๆ หรือผู้ที่อาศัยในทะเลทรายในหมู่ผู้สูงอายุจะพบว่าปริมาณวิตามินซีในร่างกายค่อนข้างต่ำและขาดวิตามินซีได้ [32]

จากการวิจัยเกี่ยวกับภาวะโภชนาการของผู้สูงอายุ [36] อายุตั้งแต่ 60 ปี ถึง 80 ปีขึ้นไป ที่อาศัยอยู่ในชนบทภาคกลางของประเทศไทย 200 ราย พบว่ามีผู้สูงอายุขาดวิตามินซีถึง 53% สาเหตุส่วนใหญ่มาจากผู้สูงอายุเหล่านั้น ขาดการเอาใจใส่ดูแลในเรื่องโภชนาการขาดความรู้ทางด้านโภชนาการ นอกจากนี้การขาดวิตามินซียังพบมากในผู้ที่สูบบุหรี่ ดื่มสุราและคนที่มีความผิดปกติทางด้านจิต เป็นต้น [37]

2.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซี

วิเคราะห์ปริมาณวิตามินซีโดยใช้วิธี 2,6-Dichlorophenolindophenol titration method คำนวณปริมาณ ascorbic acid เทียบกับ L-ascorbic acid ซึ่งใช้เป็นสารละลายมาตรฐาน โดยมี 2,6-Dichlorophenolindophenol (2,6-DCPP) เป็นสารย้อมสี แสดงผลในหน่วยมิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักสด [mg/100 g fresh weight (FW)] [38]

การวิเคราะห์วิตามินซีด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลว (HPLC) โดยวิธีของ Abushita และคณะ [39] ใช้คอลัมน์ขนาด 4.6×150 มิลลิเมตร, 5 ไมโครเมตร ส่วนเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) ประกอบด้วยเมทานอลและโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ความเข้มข้น 0.1 โมล ทำการเปลี่ยนอัตราส่วนของเมทานอลและ KH_2PO_4 (gradient) ตลอดการวิเคราะห์ โดยที่เวลาเริ่มต้นอัตราส่วนเมทานอล: KH_2PO_4 คือ 3:97 เป็นเวลา 5 นาที อัตราการไหลเป็น 0.75 มิลลิลิตร/นาที และเปลี่ยนไปเป็น 1 มิลลิลิตร/นาที ในนาทีที่ 8 โดยฉีดปริมาตร 20 ไมโครลิตร วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร

เทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซีด้วยเคมีไฟฟ้า [40] ใช้คาร์บอนเพสต์ (ผงกราไฟต์: น้ำมันธรรมชาติ; 60%:40% โดยน้ำหนัก) เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน (working electrode) ขั้วไฟฟ้า Pt เป็นขั้วไฟฟ้าช่วย (counter electrode) และขั้วไฟฟ้า Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) ขั้นตอนการตรึงขั้วไฟฟ้าโดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสามลงในสารละลายที่ใช้ตรึงขั้วไฟฟ้าที่มีส่วนผสมของสารต่างๆที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดนี้คือใช้สารละลาย 0.1 M HCl / 0.07 M pyrrole / 0.10 mM hemin ในสารละลาย 90 % CH_3CN และควบคุมศักย์ไฟฟ้า 0.7 V เป็นเวลา 60 วินาที แขนใน 0.1 M ของ KCl ณ อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นศึกษาคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่ตรึงเรียบร้อยแล้วในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ในช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.6 ถึง 0.1 V เมื่อเทียบกับ Ag/AgCl โดยใช้โหมดไซคลิกโวลแทมเมตรี (cyclic voltammetry) ในการวิเคราะห์ปริมาณกรดแอสคอบิก โดยจะวิเคราะห์ปริมาณในโหมดไซคลิกโวลแทมเมตรี scan rate 100 mV/s ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.2 M เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.5 ถึง 0.65 V โดยจะปรับสภาวะต่างๆให้เหมาะสม เพื่อติดตามสัญญาณทางไฟฟ้าที่ต้องการ

2.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

2.3.1 คลื่นเนียร์อินฟราเรด

คลื่นเนียร์อินฟราเรดหมายถึงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จัดอยู่ในรังสีอินฟราเรด (IR radiation) โดยช่วงคลื่นอินฟราเรดสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ คลื่นเนียร์อินฟราเรดหรืออินฟราเรดย่านใกล้ (Near IR, NIR) ช่วงความยาวคลื่น 800-2500 nm (เลขคลื่น 12500-4000 cm^{-1}) คลื่นอินฟราเรดย่านกลาง (Mid IR) ช่วงความยาวคลื่น 2500-50000 nm (เลขคลื่น 4000-200 cm^{-1}) และคลื่นอินฟราเรดย่านไกล (Far IR) ช่วงความยาวคลื่น 50000-100000 nm (เลขคลื่น 200-10 cm^{-1}) ตามลำดับ [41] ตำแหน่งของรังสีเนียร์อินฟราเรดในสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ระหว่างรังสีวิสิเบิล (visible radiation) และรังสีอินฟราเรดย่านกลาง (mid infrared radiation) รังสีเนียร์อินฟราเรดมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 800-2500 nm เป็นย่านโอเวอร์โทน (overtone region) รังสีเนียร์อินฟราเรดสามารถแบ่งตามระดับพลังงานเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงคลื่นสั้นเริ่มตั้งแต่ความยาวคลื่น 800-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1100 nm เป็นช่วงที่มีพลังงานสูงสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อในตัวอย่างได้ดีโดยทั่วไปสามารถทะลุเข้าไปได้ถึง 1-2 เซนติเมตร จึงมักนิยมใช้ช่วงคลื่นสั้นในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ข้อมูลที่ต้องการอยู่ภายใน ได้แก่ ตัวอย่างประเภทผลไม้มีเปลือกโดยเฉพาผลไม้เปลือกหนา เช่น มังคุด ส้มเปลือกหนา เป็นต้น รังสีจะผ่านเข้าไปยังเนื้อในทำให้ได้ข้อมูลสเปกตรัมเนื้อในของตัวอย่างสูงสำหรับช่วงคลื่นยาวเริ่มตั้งแต่ความยาวคลื่น 1100-2500 nm มีพลังงานต่ำกว่าช่วงคลื่นสั้น โดยทั่วไปสามารถทะลุผ่านได้ไม่เกิน 5 มิลลิเมตรถึง 1 เซนติเมตรเหมาะกับตัวอย่างทั่วไปทั้งของเหลวและของแข็ง ซึ่งตัวอย่างจะถูกบรรจุอยู่ใน cell ที่มีผิวหน้าเรียบ เป็นช่วงที่ให้ข้อมูลทางเคมีมากกว่าช่วงคลื่นสั้น เนื่องจากเป็นช่วงที่แถบโอเวอร์โทนอันดับหนึ่งและคอมบิเนชัน [42], [43]

ตาราง 2.3 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานที่ความยาวคลื่นต่างๆ [41]

ความยาวคลื่น (nm)	การเปลี่ยนระดับพลังงาน
800 - 1300	โอเวอร์โทนอันดับสองและสาม, คอมบิเนชัน
1300 - 1800	โอเวอร์โทนอันดับหนึ่ง, คอมบิเนชัน
1800 - 2500	คอมบิเนชัน

การเปลี่ยนแปลงพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด สสารที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับรังสีอินฟราเรดคือสสารที่มีโมเลกุลประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจน (X-H) อะตอม X ได้แก่ C, O, N, S ฯลฯ อันตรกิริยาดังกล่าวคือการที่โมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้เข้าไปซึ่งจะมีผลต่อการสั่นของพันธะต่างๆในโมเลกุลระดับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสสารที่ความยาวคลื่นต่างๆจะปรากฏในสเปกตรัมอินฟราเรด [41]

2.3.2 เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (near infrared spectroscopy) [44] เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการอันตรกิริยา (interaction) เมื่อคลื่นอินฟราเรด (ความยาวคลื่นระหว่าง 700-2500 nm) ที่ส่องไปยังวัสดุ เช่น ผลผลิตทางเกษตรและอาหาร ทำให้พันธะทางเคมีภายในวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพันธะ O-H, C-H และ N-H ของวัสดุดูดซับคลื่นและทำให้เกิดอาการสั่นสะเทือนของพันธะ โดยการเปลี่ยนระดับพลังงานข้ามขั้นมากกว่า 1 ขั้น (Overtone) หรือเกิดจากการสั่นสะเทือนข้าม 1 ขั้น (fundamental vibration) พร้อมกันของพันธะตั้งแต่ 2 พันธะขึ้นไป ทำให้ได้ผลรวมของการสั่น (combination vibration) เครื่องมือที่ใช้เรียกว่า สเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer) ซึ่งอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์สามารถแยกค่าแสงออกเป็นทีละความยาวคลื่นได้ เพื่อใช้ความยาวคลื่นนั้นส่องไปยังตัวอย่างและวัดค่าความเข้มแสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงที่ส่องเข้าไปในตัวอย่างหรือวัดค่าความเข้มแสงที่ส่องเข้าไปในตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงที่ทะลุผ่านออกมาจากตัวอย่าง [45] องค์ประกอบของเครื่อง มีดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสง (light source) ที่ให้ช่วงคลื่นอินฟราเรดส่วนใหญ่จะใช้หลอดทังสเตนฮาโลเจน (tungsten halogen) เพราะราคาถูก อายุการใช้งานนาน ให้แสงคงที่สม่ำเสมอ [46] นอกจากนี้ยังใช้ light emitting diodes (LED) เป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยค่าความยาวคลื่นที่ได้จะขึ้นกับสารที่ใช้ทำตัว LED อย่างไรก็ตาม LED ไม่สามารถให้ความยาวคลื่นในช่วง 1,700-2,500 nm ได้ ซึ่งเป็นช่วงที่

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยมนำไปใช้งาน แต่ก็ไม่เหมาะสำหรับเครื่องมือแบบพกพาเพราะต้องการกำลังไฟฟ้าน้อย มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและพลังงานของผลึกที่ได้อีกไม่เพิ่มสูงขึ้นแม้จะมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของแหล่งกำเนิดแสง [47]

2. โมโนโครมาเตอร์ (monochromator) เป็นอุปกรณ์แยกแสงออกเป็นแต่ละความยาวคลื่น อุปกรณ์ที่ใช้ต้องไม่ดูดกลืนแสงในช่วง NIR ที่นิยมใช้คือปริซึม (prisms) ซึ่งทำจากโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หรือโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) และเกรตติง (gratings) ทำจากแผ่นแก้วหรือวัสดุโปร่งใสที่ขีดผิวหน้าให้เป็นร่องหรือแผ่นแก้วที่เคลือบด้วยโลหะหรือฟิล์มโลหะที่ขีดเงาให้เป็นร่อง ปัจจุบันนิยมใช้เกรตติงมากกว่าปริซึมเพราะเกรตติงสามารถแยกสเปกตรัมออกจากกันได้มากกว่าและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลต่อการทำงานของเกรตติงน้อยกว่าปริซึมโดยแสงที่ผ่านเกรตติงและความยาวคลื่นที่ต้องการแล้วจะถูกส่งผ่านมายังตัวอย่างเมื่อแสงผ่านตัวอย่างแล้วก็จะถูกส่งผ่านไปยังอุปกรณ์สำหรับตรวจวัด

3. อุปกรณ์สำหรับตรวจวัดหรือตัวรับแสง (detector or sensor) ทำหน้าที่บันทึกปริมาณแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนและแปลงผลเป็นสัญญาณส่งเข้าสู่ส่วนประมวลผลสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ทำตัวตรวจวัดมี 3 ชนิด ชนิดแรกคือซิลิกอน (silicon, Si) ซึ่งมักจะใช้กับเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีที่มีความยาวคลื่นในช่วงวิสิเบิลหรือช่วงแสงที่มองเห็นได้และช่วงความยาวคลื่น 700-1100 nm ซึ่งถือว่ามีความเร็วสูงและเกิดคลื่นรบกวน (noise) ต่ำ ชนิดที่สองคือเลดซัลไฟด์ (lead sulfide, PbS) ซึ่งจะใช้กับช่วงความยาวคลื่น 1100-2600 nm [48] แต่มีความช้าในการวัดและให้สัญญาณรบกวนต่อค่าการดูดกลืนแสงสูงและชนิดที่สามคืออินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (indium gallium arsenide, InGaAs) ซึ่งถือว่ามีความแพงที่สุดโดยจะรวมทั้งความเร็วและขนาดที่เล็กของซิลิกอนกับช่วงความยาวคลื่นที่กว้างของเลดซัลไฟด์ไว้ด้วยกัน [49]

4. การอ่านสัญญาณ (read out) โปรแกรมจะประมวลผลให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ได้ เช่น สเปกตรัมคือปริมาณแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนไว้ที่ความยาวคลื่นต่างๆ แล้วบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์ [50]

5. ช่องใส่ตัวอย่าง (sample cell)

เมื่อเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีให้รังสีเนียร์อินฟราเรดส่องผ่านไปยังตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยากับตัวอย่างได้หลายแบบดังนี้

1. แบบส่องผ่าน (transmittance) โดยแหล่งกำเนิดรังสีเนียร์อินฟราเรดให้รังสีเนียร์อินฟราเรดตกกระทบที่ผิวตัวอย่างด้านหนึ่งและส่องผ่านตัวอย่างไปยังอีกด้านหนึ่งโดยที่ detector จะวัดปริมาณแสงที่ส่องผ่านออกมาจากตัวอย่างในด้านตรงกันข้ามดังรูปที่ 2.3 (a1) และรูปที่ 2.3 (a2) เป็นลักษณะของแสงที่ส่องกระทบผิวของตัวอย่างที่เป็นของแข็งแข็งเกลวและของแข็ง [49]

2. แบบสะท้อนกลับ (reflectance) โดยแหล่งกำเนิดรังสีเนียร์อินฟราเรดให้รังสีเนียร์อินฟราเรดตกกระทบที่ผิวของตัวอย่างและอาจแพร่กระจายในปริมาณหนึ่งก่อนโดยที่ detector จะวัดปริมาณรังสีที่สะท้อนกลับออกมาจากผิวของตัวอย่างในด้านเดียวกันดังรูปที่ 2.3 (b) และนิยมใช้การวัดแบบ reflectance กับเมล็ดพืชหรือเมล็ดพันธุ์

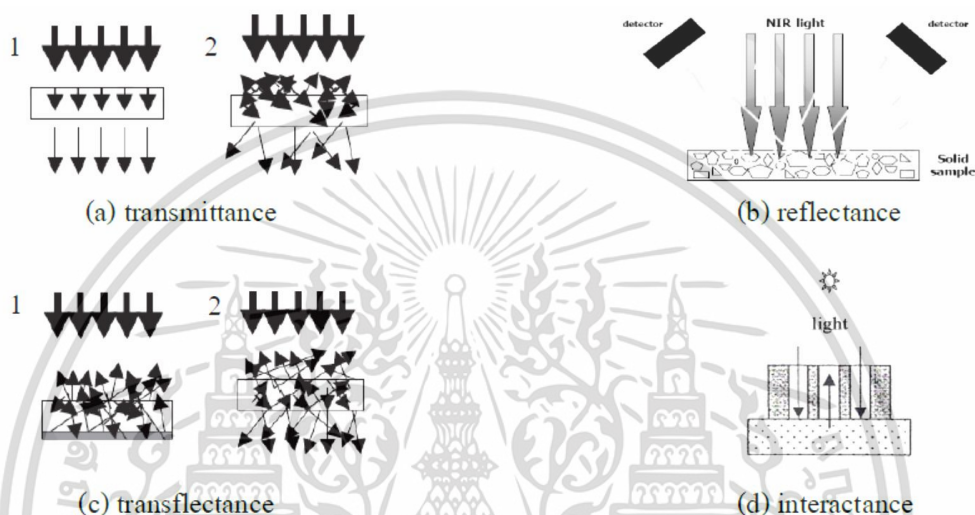
3. แบบส่องผ่านและสะท้อนกลับ (transreflectance) โดยแหล่งกำเนิดรังสีเนียร์อินฟราเรดให้รังสีเนียร์อินฟราเรดตกกระทบที่ผิวของตัวอย่างและส่องผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบวัตถุที่ไม่ดูดกลืนรังสี (เช่น แผ่นเซรามิกทองหรืออลูมิเนียม) ที่อยู่ด้านล่างตัวอย่างแล้วเกิดการสะท้อนกลับผ่านตัวอย่างมายัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

detector โดยที่ detector จะทำการบันทึกการดูดกลืนรังสีทั้งในขณะที่รังสีส่องลงไปด้านล่างและขณะที่รังสีสะท้อนกลับมายัง detector ดังรูปที่ 2.3 (c)

4. แบบสะท้อนกลับจากด้านใน (interactance) กระบวนการนี้เกิดในกรณีที่ใช้หัววัดแบบใยแก้วนำแสง (fiber optics probe) รังสีจะออกมาจากส่วนวงแหวนด้านนอกของหัววัดมากระทบตัวอย่าง และรังสีที่สะท้อนออกมาจากเนื้อตัวอย่างจะถูกส่งไปยัง detector บริเวณส่วนกลางของใยแก้วนำแสงดังภาพที่ 2.3 (d) [51]



รูปที่ 2.3 รูปแบบที่สสารเกิดอันตรกิริยากับรังสีเนียร์อินฟราเรด (a) transmittance (b) reflectance (c) transreflectance (d) interactance [49], [52]

เนื่องจากเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ เป็นวิธีการตรวจสอบวัสดุเกษตรและอาหารแบบไม่ทำลาย ใช้เวลารวดเร็ว ไม่ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญ ไม่ต้องใช้สารเคมีและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถที่จะนำวัสดุที่ใช้ในการตรวจสอบแล้วนำมาบริโภคหรือมาตรวจสอบด้วยวิธีอื่นได้โดยที่ยังคงมีคุณค่าของสารอาหารและสภาพของวัสดุเหมือนเดิม นอกจากนี้แล้วยังสามารถตรวจสอบตัวอย่างได้จำนวนมากในการเก็บข้อมูลเก็บข้อมูลสเปกตรัม ตัวอย่างมะเขือเทศจะถูกนำมาสแกนด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ที่มีช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน 2 เครื่อง ได้แก่ เครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ช่วงความยาวคลื่น 700-2,500 nm และเครื่อง Micro - NIR Pro (Viavi, USA) ช่วงความยาวคลื่น 950 - 1650 nm จะได้ข้อมูลเชิงแสง (optical data) ในรูปของสเปกตรัมของแต่ละตัวอย่างแล้วจึงนำข้อมูลไปวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซีในตัวอย่าง

ข้อจำกัดอย่างหนึ่งของเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีคือไม่สามารถนำมาประยุกต์ได้ทันที ต้องใช้วิธีการคำนวณหรือสร้างสมการที่เหมาะสมเพื่อทำนายค่าองค์ประกอบที่ต้องการวิเคราะห์ในผลิตภัณฑ์ การสร้างสมการคือการหาสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง NIR และปริมาณองค์ประกอบที่ต้องการทำนาย ซึ่งวิเคราะห์ได้จากวิธีอ้างอิง (reference or standard method) ทั้งนี้ ข้อมูลที่ได้จากเครื่อง NIR จะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการดูดกลืนแสงหรือที่เรียกว่าสเปกตรัม ดังนั้นในการประยุกต์ใช้เทคนิค NIR นี้ จึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นต้องใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม NIR ที่ได้ รวมทั้งหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปกตรัมที่ได้กับค่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีอ้างอิง [53]

ในการสร้างสมการสำหรับทำนายค่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิค NIR นั้นจะต้องใช้กลุ่มตัวอย่างที่ทราบปริมาณองค์ประกอบที่ต้องการทำนายและข้อมูลสเปกตรัม NIR ของตัวอย่างเหล่านั้นโดยในการดำเนินการสร้างสมการจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักได้แก่ 1) ขั้นตอนการสร้างสมการที่ใช้ทำนาย เป็นขั้นตอนในการสร้างสมการมาตรฐานที่ใช้ในการทำนายค่าองค์ประกอบที่ต้องการทราบ เรียกขั้นตอนนี้ว่า การทำแคลิเบรชัน (calibration) โดยสมการที่ได้เรียกว่า สมการแคลิเบรชันหรือแบบจำลองแคลิเบรชัน 2) ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้นมาเป็นขั้นตอนในการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำของสมการมาตรฐานที่สร้างขึ้นได้จากขั้นตอนการทำแคลิเบรชัน เรียกขั้นตอนนี้ว่าการทำแวลิดชัน (validation) เมื่อได้ผลการตรวจสอบที่น่าเชื่อถือแล้วจึงจะนำสมการที่ได้ไปประยุกต์ใช้ทำนายค่าองค์ประกอบที่ต้องการศึกษาจากสเปกตรัม NIR ที่ทำการวัดมาได้ [53]

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง [53]

ในการวิเคราะห์ทั้งเชิงปริมาณ (quantitative) และเชิงคุณภาพ (qualitative analyses) โดยใช้เทคนิค NIR นั้นจำเป็นต้องอาศัยการสร้างสมการแคลิเบรชัน โดยขั้นตอนในการสร้างสมการนี้มีความเกี่ยวข้องกับการสุ่มเก็บตัวอย่างซึ่งจะต้องทราบทั้งปริมาณองค์ประกอบ (reference data) ที่วิเคราะห์ได้จากวิธีอ้างอิง (standard method of laboratory analysis) และข้อมูลสเปกตรัม NIR ของตัวอย่าง (NIR data) และการสร้างสมการโดยใช้ข้อมูลดังกล่าวด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ซึ่งสมการที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายองค์ประกอบของตัวอย่างในอนาคต โดยในภาพที่ 2.4 แสดงแผนผังการสร้างสมการแคลิเบรชัน

การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและการวัดค่าทางด้านกายภาพโดยวิธีอ้างอิงนั้นมีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับมาตรฐานของแต่ละประเทศและองค์กรนั้นๆ ในการเลือกวิธีอ้างอิงเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ค่าอ้างอิงหรือค่าองค์ประกอบที่ต้องการทราบนั้น นอกจากจะต้องคำนึงถึงความถูกต้องและความแม่นยำแล้วยังต้องคำนึงถึงมาตรฐานของหน่วยงานที่เราจะนำเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีไปประยุกต์ใช้ด้วย เพราะสุดท้ายแล้วจะต้องนำค่าที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีไปเปรียบเทียบกับค่าที่วิเคราะห์ด้วยวิธีอ้างอิงเพื่อพิสูจน์ความน่าเชื่อถือของสมการแคลิเบรชันที่สร้างขึ้น

ขั้นตอนการทำแคลิเบรชัน เมื่อทำการเก็บรวบรวมข้อมูลแล้วแบ่งขั้นตอนได้ดังนี้ 1) กำหนดตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม 2) การสร้างสมการแคลิเบรชันแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

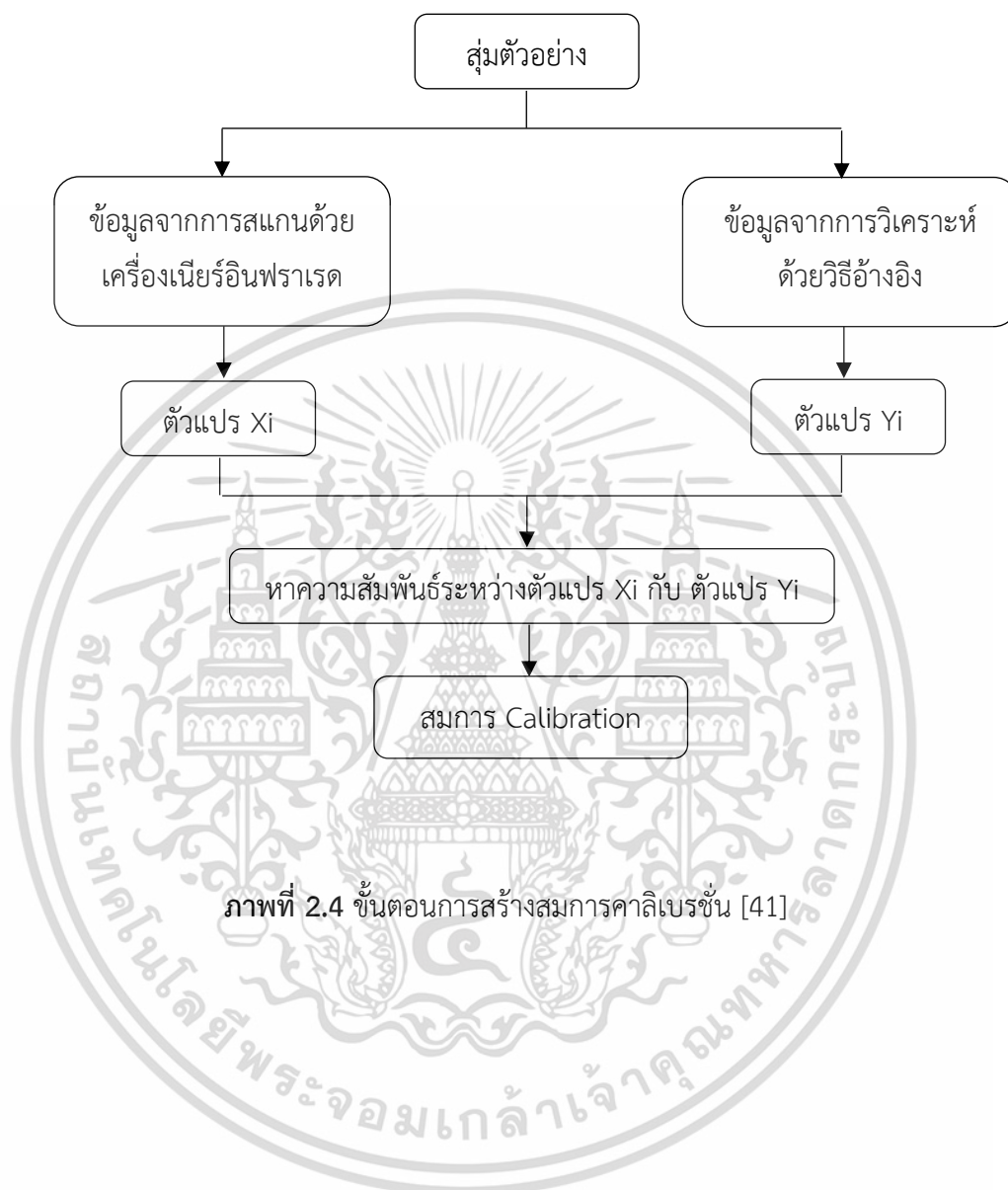
การกำหนดตัวแปร [53]

กำหนดตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่จะนำมาใช้ในการสร้างสมการ Calibration ดังนี้

1. ตัวแปรอิสระ (independent variables) หรือ ตัวแปร Xi คือค่าที่อ่านได้จากสเปกตรัม NIR (NIR data) ซึ่งค่าที่นำมาอาจจะเป็นค่าที่อ่านมาจากความยาวคลื่นใดคลื่นหนึ่ง (fixed wavelength) หรือบางความยาวคลื่นที่เกี่ยวข้องกับสารที่จะทำการวิเคราะห์ (selected wavelength) หรือมาจากทุกๆ ค่าของความยาวคลื่นที่ทำการศึกษา (full spectrum)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัวแปรตาม (dependent variables) หรือ ตัวแปร Y_i คือค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีอ้างอิง (reference data)



ภาพที่ 2.4 ขั้นตอนการสร้างสมการคาลิเบรชัน [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น

วิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้นเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่สำคัญ มีจุดประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองของสเปกตรัมในทางที่อัลกอริธึม PLS สามารถให้ความสัมพันธ์ที่กระหว่างสเปกตรัมกับข้อมูลความเข้มข้น

2.3.3.1 constant offset elimination [54]

การลบโดยค่าคงที่ (subtraction of a constant offset) : สเปกตรัมจะถูกปรับแบบเชิงเส้น เพื่อให้ค่า Y ที่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับศูนย์
การใช้งาน : เป็นการกำจัดปัญหาการขยับขึ้นของเบสไลน์ (Baseline Shift) เชิงเส้น สิ่งเหล่านี้เกิดจากค่าที่แตกต่างกันของการขยายสัญญาณของดีเทคเตอร์ (Detector Amplification)

2.3.3.2 straight line subtraction [54]

การลบโดยเส้นตรง (subtraction of a straight line) ในแต่ละช่วงความถี่ที่เลือกไว้ เส้นตรงเส้นหนึ่งจะถูกฟิตเส้นสเปกตรัมโดยใช้วิธี Partial Least Squares (PLS) เส้นตรงเส้นนี้จะถูกลบออกจากสเปกตรัมดังกล่าว
การใช้งาน : กำจัดปัญหาความเอียงเชิงเส้นของการขยับขึ้นของเบสไลน์

2.3.3.3 vector normalization (SNV) [54]

ขั้นแรกสเปกตรัมจะถูกหาค่ากลาง จากนั้นผลรวมของค่ากำลังสองของค่า Y ทั้งหมดจะถูกคำนวณและสเปกตรัมใดๆ จะถูกหารด้วยค่ารากที่สองของผลรวมนี้ สิ่งนี้เรียกว่า vector norm ของสเปกตรัมที่ได้จะเท่ากับ 1 เสมอ ในหลักการสเปกตรัมจะประกอบด้วยสองส่วนของข้อมูล คือความสูงของแถบการดูดซับและโครงสร้าง หลังจากการนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ข้อมูลความสูงจะหายไป มีเพียงโครงสร้างข้อมูลยังคงอยู่ การนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ถูกใช้เพื่อ เช่น การกำจัดผลกระทบของเส้นทางผ่านเชิงแสง (optical path length) ที่แตกต่างกัน ในกรณีของการวัดแบบส่องผ่านความยาวของเส้นทางผ่านเชิงแสงทำให้ความสูงของสัญญาณเปลี่ยนแปลงแต่โครงสร้างยังเหมือนเดิม ในทำนองเดียวกันการวัดแบบสะท้อนแบบแพร่จะมีผลกระทบของการรบกวนเนื่องจากความหนาแน่นของวัสดุแตกต่างกันหรือขนาดอนุภาคแตกต่างกัน สิ่งเหล่านี้ก็จะลดลง

2.3.3.4 max-min normalization [54]

สเปกตรัมจะถูกขยับเชิงเส้นเพื่อให้ค่า Y ที่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับศูนย์ แล้วสเปกตรัมจะถูกขยายเพื่อให้ค่า Y สูงสุดเท่ากับสองหน่วยของการดูดซับคลื่น

2.3.3.5 multiplicative scattering correction (MSC) [54]

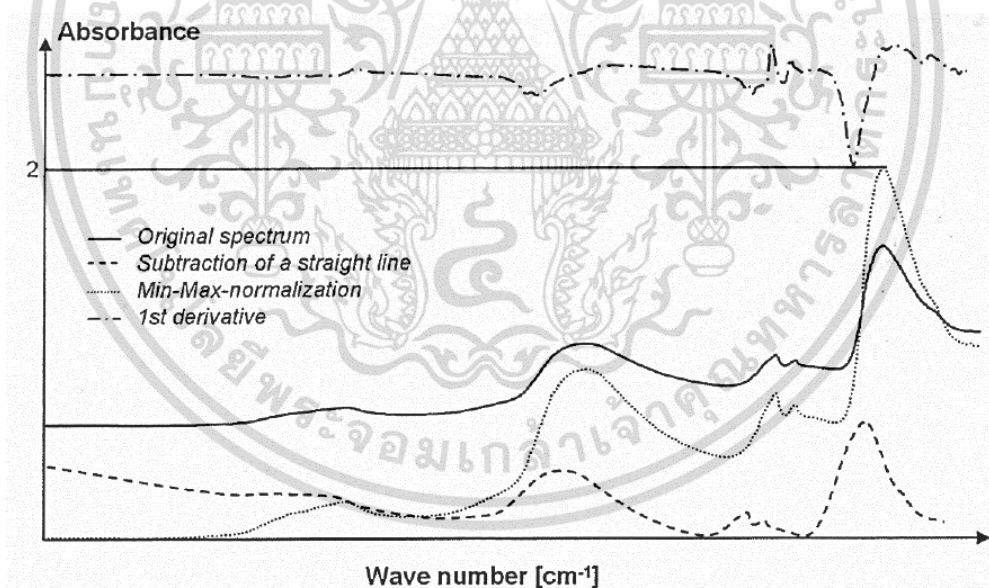
ขั้นตอนแรกสเปกตรัมเฉลี่ยคำนวณจากทุกๆ สเปกตรัมของชุดข้อมูลคาลิเบรชัน แล้วแต่ละสเปกตรัม $X(i)$ จะถูกแปรเปลี่ยนไปตาม

$$(i)' = u + v \cdot (i) \quad (2.1)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ u และ v จะถูกเลือก เพื่อให้มีความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงแล้ว $X(i)$ กับสเปกตรัมเฉลี่ยน้อยที่สุด วิธีการนี้มักจะใช้สำหรับการวัดแบบการสะท้อนแบบแพร่ (diffuse reflection)

2.3.3.6 อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (first derivative)

คำนวณอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของสเปกตรัม สัญญาณที่มีความชันจะถูกเน้นมากกว่า สัญญาณที่ค่อนข้างแบนราบ วิธีนี้จะถูกใช้เน้นลักษณะที่ชัดเจนแต่มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับโครงสร้างที่มีแถบการดูดซับคลื่นที่กว้าง การประยุกต์ใช้ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการประเมินแถบการดูดซับคลื่นที่กว้างนี้มักจะทำในเทคโนโลยี NIR โดยการคำนวณอนุพันธ์ โครงสร้างเหล่านี้จะมีรูปร่างที่สูงชันขึ้น ซึ่งสามารถได้รับการประเมินได้ง่ายขึ้น เมื่อใช้อนุพันธ์เป็นการจัดการข้อมูลเบื้องต้น จะต้องคำนึงถึงว่า สัญญาณรบกวนจะถูกจัดการเช่นกัน สิ่งนี้จะซ้อนทับบนสเปกตรัมเป็นสิ่งรบกวนเพิ่มเติม และสามารถทำให้สัญญาณของตัวอย่างแย่งเมื่อเทียบกับอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง แม้โครงสร้างที่ราบเรียบมากๆ สามารถประเมินได้ผลการรบกวนของสัญญาณรบกวน ซึ่งโดยทั่วไปมีมากจนทำให้สเปกตรัมถูกวิเคราะห์ในช่วงสเปกตรัมที่จำกัดมากๆ ภาพที่ 2.5 แสดงให้เห็นอิทธิพลของวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้นแบบต่างๆต่อลักษณะของ NIR สเปกตรัม (การวัดมือคนด้วยหัววัด fiber optic) สเปกตรัมเดิมแสดงให้เห็นการขจัด (offset) เล็กน้อยของเบสไลน์ เช่นเดียวกับการขยับขึ้น (shift) การขยับขึ้นนี้สามารถถูกกำจัดโดยการลบออกจากเส้นตรง (subtraction of a straight line) (เส้นประ) และการขจัดถูกกำจัดโดยการ min-max normalization (เส้นจุด) อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของเส้นสเปกตรัมเดิม (เส้นประจุด) ถูกขยายเพื่อแสดงให้ดูง่ายและขยับขึ้นสู่ตำแหน่งที่ค่าการดูดซับคลื่นสูง สามารถสังเกตเห็นโครงสร้างที่แหลมขึ้นมาได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมเดิม [54]



ภาพที่ 2.5 NIR สเปกตรัมของมือคน : วัดแบบการสะท้อนแบบแพร่ [54]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.7 อนุพันธ์อันดับที่สอง (second derivative)

อนุพันธ์อันดับที่สอง สามารถลดผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแกน Y ที่ชัดเจนกว่าวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 และแยกพีคสเปกตรัมที่มีการซ้อนทับกันออกจากกันได้อย่างชัดเจน ทำให้ทราบตำแหน่งความยาวคลื่น แต่สเปกตรัมมีลักษณะหัวกลับลงมาด้านล่าง ดังนั้นการคำนวณการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 จึงเป็นที่นิยมมากกว่าวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 โดยการเพิ่มอันดับของอนุพันธ์สูงขึ้น ก็จะได้สเปกตรัมที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นข้อมูลที่ตีในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ แต่การทำอนุพันธ์ที่สูงเกินไปทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณวัดกับสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ลดลง เนื่องจากแถบสัญญาณรบกวนมักมีรูปร่างแคบชัน ดังนั้นเมื่อแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์สเปกตรัมที่ได้ของสัญญาณรบกวน จึงมีแอมพลิจูด (amplitude) เด่นชัดมากยิ่งขึ้นจนสามารถรบกวนการวิเคราะห์ได้ [55]

2.3.4 การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (partial least square; PLS)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หลายตัวแปร (multivariate analysis) เทคนิคหนึ่งที่ยิยมใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัม NIR โดย PLS ถือเป็นเทคนิคในการลดจำนวนตัวแปร กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมจะเป็นอิสระจากกระบวนการทำสมการถดถอยของสมการทำนาย ซึ่งใน PLS ทั้งสองกระบวนการจะถูกเชื่อมโยงเข้าไว้ด้วยกัน โดยมีการนำค่าองค์ประกอบทางเคมีมาคิดในกระบวนการหาปัจจัยด้วย ซึ่ง Kasemsamran [56] ได้อธิบายถึง PLS ว่าเป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบตัวแปรหลายตัวแปร โดยการสร้างปัจจัยแบบสมการเชิงเส้นตรงจากข้อมูลของสเปกตรัมเริ่มต้นและนำปัจจัยที่ได้ไปใช้ในการสร้างสมการถดถอย [57] โดยปัจจัยที่ได้จากการสร้างสมการด้วยวิธีสถิติ PLS ต้องสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลและเกี่ยวข้องกับการประเมินค่าทางเคมีในเวลาเดียวกัน วัตถุประสงค์ของ PLS เพื่อต้องการลดจำนวนข้อมูลสเปกตรัม ให้ได้เฉพาะข้อมูลสเปกตรัมที่มีความสำคัญกับการทำนายค่าทางเคมีที่สนใจเท่านั้นเพื่อให้สามารถประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น [58]

2.3.5 ค่าแสดงสมรรถนะของแบบจำลอง

2.3.5.1 ค่าเฉลี่ย (mean) [58]

ค่าเฉลี่ยเป็นค่าทางคณิตศาสตร์ของข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องวัดสเปกตรัม (X) หรือข้อมูลที่ใช้อ้างอิง (Y) ค่าเฉลี่ยนั้นจะถูกคำนวณจากผลรวมของค่า X หรือ Y และถูกหารโดยจำนวนของข้อมูล (N) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} \quad (2.2)$$

2.3.5.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) [58]

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงหรือความแปรปรวนในข้อมูล นั่นคือรากที่สอง ของความแปรปรวน สูตรในการหาค่า SD_x (หรือ SD_y) คือ (สมการ 2.3)

$$SD_x = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5.3 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ทำนายโดย NIRS และข้อมูลที่อ้างอิง (bias)

เมื่อทำนายค่าตัวแปรที่ต้องการของข้อมูลในเซตตัวอย่าง validation ค่า bias หมายถึงความแตกต่างระหว่างค่าอ้างอิงและค่าที่ทำนายโดย NIRS และเป็นการวัดความแม่นยำโดยรวมของ calibration ในโลกความเป็นจริงของทางการค้าและอุตสาหกรรม bias เป็นหนึ่งในสิ่งที่สำคัญมากในทางสถิติ bias สามารถเกิดขึ้นได้ตั้งแต่เมื่อค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และ SEP แสดงว่าค่า calibration นั้นดีเยี่ยม [58] สูตรสำหรับการคำนวณ Bias คือ

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i,\text{meas}} - Y_{i,\text{pred}})}{N} \quad (2.4)$$

เมื่อ $Y_{i,\text{meas}}$ คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี

$Y_{i,\text{pred}}$ คือ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIRS

2.3.5.4 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2)

แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดยความแปรปรวนใน ข้อมูล Y ค่าของ R^2 จะเป็นบวกเสมอ เช่น ถ้า $R = 0.97$ แล้ว $R^2 = 0.941$ หมายความว่า 94.1 เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนในข้อมูล X และ 5.9 เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนในข้อมูล X เกิดขึ้นจากตัวแปรอื่น เช่น การเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดลองอ้างอิงและอื่นๆ ค่า R^2 เป็นบวกเสมอ โดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของ R ในทางปฏิบัติ R^2 ให้ข้อมูลมากกว่า R และใช้กันมากกว่า R [58] การแปลความหมาย ของค่า R^2 แสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งค่า R^2 คำนวณได้จาก (สมการ 2.5) [59]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i,\text{meas}} - Y_{i,\text{pred}})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_{i,\text{meas}} - \bar{Y})^2} \quad (2.5)$$

เมื่อ $Y_{i,\text{meas}}$ คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี

$Y_{i,\text{pred}}$ คือ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIRS

N คือ จำนวนตัวอย่าง

i คือ เลขที่ตัวอย่าง

ตารางที่ 2.4 การแปลความหมายของค่า R^2 [58]

R^2	ความหมาย
ถึง 0.25	ไม่สามารถใช้ใน NIR calibration
0.26-0.49	เป็นความสัมพันธ์ที่ไม่ดี ควรหาเหตุผล
0.50-0.64	OK สำหรับการคัดเลือกอย่างหยาบๆ
0.66-0.81	OK สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบๆ
0.83-0.90	ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย
0.92-0.96	ใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
0.98+	ดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5.5 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ยของการประมาณ
(root mean square error of estimation, RMSEE)

เป็นค่าที่ใช้วิเคราะห์ข้อผิดพลาดของชุดคาลิเบรชัน (calibration) ไม่เหมาะในการ
ใช้กับชุดทำนาย (validation) [58] สูตรการคำนวณ RMSEE คือ

$$RMSEE = \sqrt{\frac{\sum_1^N (Y_{i,meas} - Y_{i,pred})^2}{N-R-1}} \quad (2.6)$$

เมื่อ N คือ จำนวนตัวอย่าง

i คือ เลขที่ตัวอย่าง

R คือ จำนวนแพคเตอร์

2.3.5.6 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย
(root mean square of the prediction, RMSEP)

เป็นค่าในการวัดความแม่นยำเชิงปริมาณของชุดทดสอบ [58]

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum_1^N (Y_{i,meas} - Y_{i,pred})^2}{N}} \quad (2.7)$$

2.3.5.7 ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์

แบบไขว้ (root mean squared error of cross validation, RMSECV)

เป็นค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้
cross-validation สามารถใช้ตัวอย่างชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการสร้าง calibration แบบจำลองเพื่อทำ
validation สิ่งนี้ ทำโดยชักตัวอย่างออกหนึ่งตัวอย่างหรือกลุ่มของหลายตัวอย่างจากชุด calibration
และทำการปรับปรุงแบบจำลอง calibration ด้วยตัวอย่างที่เหลืออยู่ ตัวอย่างที่ถูกกำจัดเป็นตัวถูก
ทำนายและบันทึกค่าความผิดพลาด แล้วนำตัวอย่างนั้นกลับมาแล้วชักตัวอย่างอื่นออกไปและทำซ้ำ
กระบวนการจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองและทำนาย ซึ่งบันทึกค่าความ
ผิดพลาด จะไม่มีตัวอย่างที่ถูกทำนายถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองซึ่งเราได้ใช้ทำนาย ถ้าเอาออก
เพียงทีละ 1 ตัวอย่างวิธีนี้ เรียกว่า “full” หรือ “one-out” cross-validation ถ้านำชุดตัวอย่างออก
จะเรียกว่า “segmented” cross-validation ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าที่
ถูกทำนาย โดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุดสร้าง
แบบจำลองคือ RMSECV วิธีพิสูจน์นี้เหมาะที่จะใช้กับข้อมูลที่มีจำนวนตัวอย่างน้อยๆ เช่น น้อยกว่า
100 ตัวอย่าง [60] ค่า RMSECV คำนวณได้จากสมการ

$$RMSECV = \sqrt{\frac{\sum_1^N (Y_{i,meas} - Y_{i,pred})^2}{N}} \quad (2.8)$$

2.3.5.8 ค่าอัตราส่วนการเบี่ยงเบนการทำนาย (ratio of prediction to
standard deviation, RPD)

ย่อมาจาก ratio of standard error of prediction (validation) to (standard)
deviation คืออัตราส่วนของค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการทำนาย (validation) กับส่วน
เบี่ยงเบนมาตรฐาน [59] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$RPD = \frac{SD_y}{SEP_{bias}} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกวิธีหนึ่งคือใช้สูตร

$$RPD = 1 / (1 - r^2)^{1/2} \quad (2.10)$$

ส่วนมากพบว่าการใช้สูตรแรกง่ายกว่า โดย SEP_{bias} หาได้จากสูตร

$$SEP_{bias} = \sqrt{\frac{\sum_1^N (Y_{i,meas} - Y_{i,pred} - bias)^2}{N-1}} \quad (2.11)$$

ค่า SEP ควรต่ำกว่า SD มากๆ ซึ่งอัตราส่วนควรเท่ากับ 5 หรือมากกว่า บางกรณีตัวอย่างมีความสม่ำเสมอมาก ค่า SD จึงไม่สูง ซึ่ง RPD อาจจะไม่สูง แต่ถ้า SEP ต่ำกว่า SD มาก ดังนั้น RPD เท่ากับ 2.5-3.0 ก็อาจแสดงถึงการวิเคราะห์ที่แม่นยำถ้า SD มีค่าเพียง 0.4-0.5 โดยทั่วไปสามารถดูค่าทางสถิติได้จากตารางที่ 2.5 แต่กรณีที่เป็นการวิเคราะห์อาหารสัตว์ ดิน ปุ๋ยอินทรีย์ วัสดุที่มีความชื้นสูง เช่น ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์และปลา [61] สามารถดูค่าทางสถิติได้จากตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ค่าทางสถิติ RPD [58]

ค่า RPD	การแบ่งกลุ่ม	การประยุกต์ใช้
0.0 - 2.3	ไม่ดีเลย	ไม่แนะนำ
2.4 - 3.0	ไม่ดี	การประมาณค่าแบบหยาบๆ
3.1 - 4.9	พอใช้	การประมาณค่า
5.0 - 6.4	ดี	ควบคุมคุณภาพ
6.5 - 8.0	ดีมาก	ควบคุมขั้นตอน
8.1+	ดีเยี่ยม	ได้ทุกการประยุกต์ใช้

ตารางที่ 2.6 ค่าทางสถิติ RPD สำหรับวัสดุที่มีความชื้นสูง [61]

ค่า RPD	การแบ่งกลุ่ม	การประยุกต์ใช้
0.0 - 1.9	ไม่ดีเลย	ไม่แนะนำ
2.0 - 2.4	ไม่ดี	การประมาณค่าแบบหยาบๆ
2.5 - 3.0	พอใช้	การประมาณค่า
3.0 - 3.4	ดี	ควบคุมคุณภาพ
3.5 - 4.0	ดีมาก	ควบคุมขั้นตอน
4.1+	ดีเยี่ยม	ได้ทุกการประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้วัดสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างที่รวดเร็วในระดับวินาทีที่มีความแม่นยำ และมีความสามารถในการทำซ้ำสูง เนื่องจากวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีทำให้เป็นวิธีที่ปลอดภัยต่อผู้ทำการทดลองและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Xudong และคณะ [24] ได้ทำนายปริมาณวิตามินซีในส้มแมนดารินโดยใช้ CCD spectrometer ในช่วงความยาวคลื่น 400-1040 nm ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler Version 8.0 และ Matlab 7.0 แบบจำลองที่ได้มาจากทั้งไม่มีการพัฒนาสเปกตรัมและการพัฒนาสเปกตรัมด้วยวิธี SVM (Support vector machines) พบว่าแบบจำลองมีการทำนายที่ดี โดยมี r_{predict} เท่ากับ 0.81 และ RMSEP 2.7 mg/100g แสดงว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการทำนาย ต่อมา Pissard และคณะ [62] ใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการตรวจวัดปริมาณวิตามินซีตัวอย่างแอปเปิ้ลมากกว่า 150 จีโนไทป์ จำนวน 37 สายพันธุ์ (พันธุ์ละ 6-33 ผล) โดยใช้เครื่อง monochromator scanning (รุ่น 6500, FOSS NIRSystems, Inc., Laurel, MD, USA) ในช่วงความยาวคลื่น 400-2500 nm พร้อมกับ DCA module (การวิเคราะห์การสัมผัสโดยตรง) ในแบบสะท้อนแสง จากผลการทดลองพบว่าข้อมูลสเปกตรัมมีการดูดซับการสั่นสะเทือนเกี่ยวกับพันธะ O-H, N-H และ C-H ซึ่งเกี่ยวข้องกับกรดแอสคอร์บิก และมีความแม่นยำในการทำนายดีเพราะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.8 ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการทำนาย (SEP) เท่ากับ 4.9 mg 100 g⁻¹ ต่อมาได้มีการพัฒนาตรวจสอบความแปรปรวนภายในผลของแอปเปิ้ลของตัวแปรคุณภาพที่สำคัญ คือ น้ำตาล โพลีฟีนอล และวิตามินซีในตัวอย่างแอปเปิ้ลพันธุ์ Hidala และพันธุ์ Pilot โดยใช้เครื่อง XDS spectrometer (FOSS NIRSystems, Inc., USA) แบ่งการสแกนบนผลแอปเปิ้ลเป็น 3 ส่วน คือ บน (A) กลาง (B) ล่าง (C) จากการทดลองเป็นการตรวจวัดวิตามินซีด้วยวิธี Multiple Linear Regression (MLR) ในช่วงความยาวคลื่น 408 - 2498 nm มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแอปเปิ้ล Hidala เท่ากับ 0.71 และแอปเปิ้ล Pilot เท่ากับ 0.81 [25] และในปี ค.ศ. 2016 ได้มีการตรวจวัดคุณภาพภายในผลไม้ตระกูลส้มแบบไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีซึ่งใช้ตัวอย่างผลไม้ตระกูลส้มทั้งหมด 90 ผล ทำการเก็บไว้ในตู้แช่ 1 วันก่อนนำมาตรวจวัดซึ่งใช้ FT-NIR spectrometer (Bruker Optics, MATRIX-I, Germany) เป็นการสะท้อนแบบแพร่สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของแต่ละตัวอย่างได้มาโดยใช้ค่าเฉลี่ยของสแกน 64 ครั้ง ที่ช่วงเลขคลื่น 12500 - 3600 cm⁻¹ ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.2 ซึ่งแบ่งเป็นชุดคาลิเบรชัน 60 ตัวอย่าง และชุดทดสอบ 30 ตัวอย่าง โดยเทคนิคการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณน้อยที่สุด (PLS) ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการทำนาย (R^2) เท่ากับ 0.746 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย (RMSEP) 3.57 mg 100ml⁻¹ ได้มาจากการพัฒนาสเปกตรัมด้วยวิธีอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งที่ช่วงเลขคลื่น 6102 - 5446.3 cm⁻¹ แสดงให้เห็นว่าสามารถเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีประเมินคุณภาพของผลไม้ตระกูลส้มได้ [63] จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการนำเทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมาประยุกต์ใช้ตรวจวัดวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP และตรวจสอบการปลอมปนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ในอุตสาหกรรมมีความเป็นไปได้เพื่อลดระยะเวลา ลดค่าใช้จ่ายในการวัดต่อตัวอย่าง ไม่ต้องใช้สารเคมีและตัวอย่างสามารถถูกนำกลับเข้ามาบริโภคได้ ทำให้ลดต้นทุนการผลิตและสามารถควบคุมการผลิตได้แน่นอนขึ้น และยังทำให้ผู้บริโภคได้รับผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอและตรงตามความต้องการมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิสัยทัศน์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 ตัวอย่างและอุปกรณ์

3.1.1 ตัวอย่าง

ตัวอย่างมะเขือเทศพันธุ์ราชินี โทนี โดยตัวอย่างมะเขือเทศ GAP (good agriculture practices) จากฟาร์มตะขอบฟ้า จังหวัดสุพรรณบุรี และมะเขือเทศทั่วไปจากฟาร์มศาลายา ออร์คิด จังหวัดนครปฐม ตัวอย่างมะเขือเทศแต่ละประเภทจะถูกเก็บสองสี คือ สีแดง (ภาพที่ 3.1) และ สีส้ม (ภาพที่ 3.2) ส่วนตัวอย่างมะเขือเทศที่มีการปลอมปน (มะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์การปลอมปนคือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100%) มาจากการชั่งโดยน้ำหนัก จากนั้นนำมะเขือเทศทั้งสองชนิดมาผสมกันโดยการคลุกเคล้าด้วยมือประมาณ 30 วินาที ก่อนนำไปทดสอบ



ภาพที่ 3.1 มะเขือเทศสีแดง

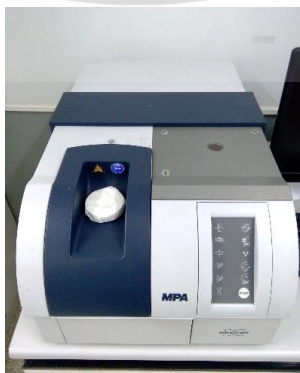


ภาพที่ 3.2 มะเขือเทศสีส้ม

3.1.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีต่างๆ

3.1.2.1 เครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

- เครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ช่วงเลขคลื่น 12500 - 4000 cm^{-1} (800 - 2500 nm)



ภาพที่ 3.3 เครื่อง FT-NIR spectrometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่อง Micro – NIR Pro (Viavi, USA) ช่วงความยาวคลื่น 950 – 1650 nm



ภาพที่ 3.4 เครื่อง Micro – NIR Pro

3.1.2.2 เครื่องไตเตรตอัตโนมัติ (T50, Metler Toledo, USA)



ภาพที่ 3.5 เครื่องไตเตรตอัตโนมัติ

3.1.2.3 เครื่องชั่งไฟฟ้า ความละเอียด 0.0001 กรัม (Adventure AR2140, OHAUS, China)



ภาพที่ 3.6 เครื่องชั่งไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.4 อ่างอัลตราโซนิก (DT510H, BENDELIN electronic, German)



ภาพที่ 3.7 อ่างอัลตราโซนิก

3.1.2.5 เครื่องปั่น (OKU SAN NO, Malaysia)



ภาพที่ 3.8 เครื่องปั่น

3.1.2.6 ปีเปตติจิตอล (L5000, Witeg Labortechnik GmbH, Germany)



ภาพที่ 3.9 ปีเปตติจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะที่ระบุไว้เท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.7 สารเคมี คือ L-ascorbic acid, oxalic acid และ 2, 6-dichlorophenolindophenol (DCPI)

3.1.2.8 อุปกรณ์อื่นๆ ได้แก่ น้ำกลั่น ปีกเกอร์ ขวดวัดปริมาตร กระจกบอทวง ขวดรูปชมพู หลอดหยด แท่งแก้วคนสาร

3.2 การสแกนด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด

3.2.1 สแกนวิตามินซี

ใช้ 2 สเปกโตรมิเตอร์สำหรับสแกนวิตามินซี 99.7% (CARLO ERBA Reagents, France) ได้แก่ เครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) มีช่วงเลขคลื่น $12500 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ ($800 - 2500 \text{ nm}$) สแกนจำนวน 64 ซ้ำเพื่อเฉลี่ยเป็น 1 สเปกตรัม ทุกๆ 16 cm^{-1} ใช้แผ่นทองเป็นวัสดุอ้างอิง และเครื่อง Micro – NIR Pro (Viavi, USA) ช่วงความยาวคลื่น $950 - 1650 \text{ nm}$ ใช้ Spectralon หน้า 1 cm เป็นวัสดุอ้างอิง มี intergration time เท่ากับ 8.5 ms ทั้งสองสเปกโตรมิเตอร์สแกนที่อุณหภูมิห้อง $25 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และการดูคลื่นแสงถูกบันทึกด้วยหน่วย \log_1/R

3.2.2 สแกนมะเขือเทศ

ใช้ 2 สเปกโตรมิเตอร์สำหรับสแกนตัวอย่างมะเขือเทศ ได้แก่ เครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) มีช่วงเลขคลื่น $12500 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ ($800 - 2500 \text{ nm}$) สแกนจำนวน 64 ซ้ำเพื่อเฉลี่ยเป็น 1 สเปกตรัม สแกนทุกๆ 16 cm^{-1} ใช้แผ่นทองเป็นวัสดุอ้างอิง ดังภาพที่ 3.10 และเครื่อง Micro – NIR Pro (Viavi, USA) ช่วงความยาวคลื่น $950 - 1650 \text{ nm}$ สแกน 5 ตำแหน่ง บริเวณก้นถ้วย ใช้ Spectralon หน้า 1 cm เป็นวัสดุอ้างอิง มี intergration time เท่ากับ 8.5 ms ดังภาพที่ 3.11 ทั้งสองสเปกโตรมิเตอร์สแกนที่อุณหภูมิห้อง $25 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และการดูคลื่นแสงถูกบันทึกด้วยหน่วย \log_1/R ตามขั้นตอนการสแกนด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด (ภาพที่ 3.12)

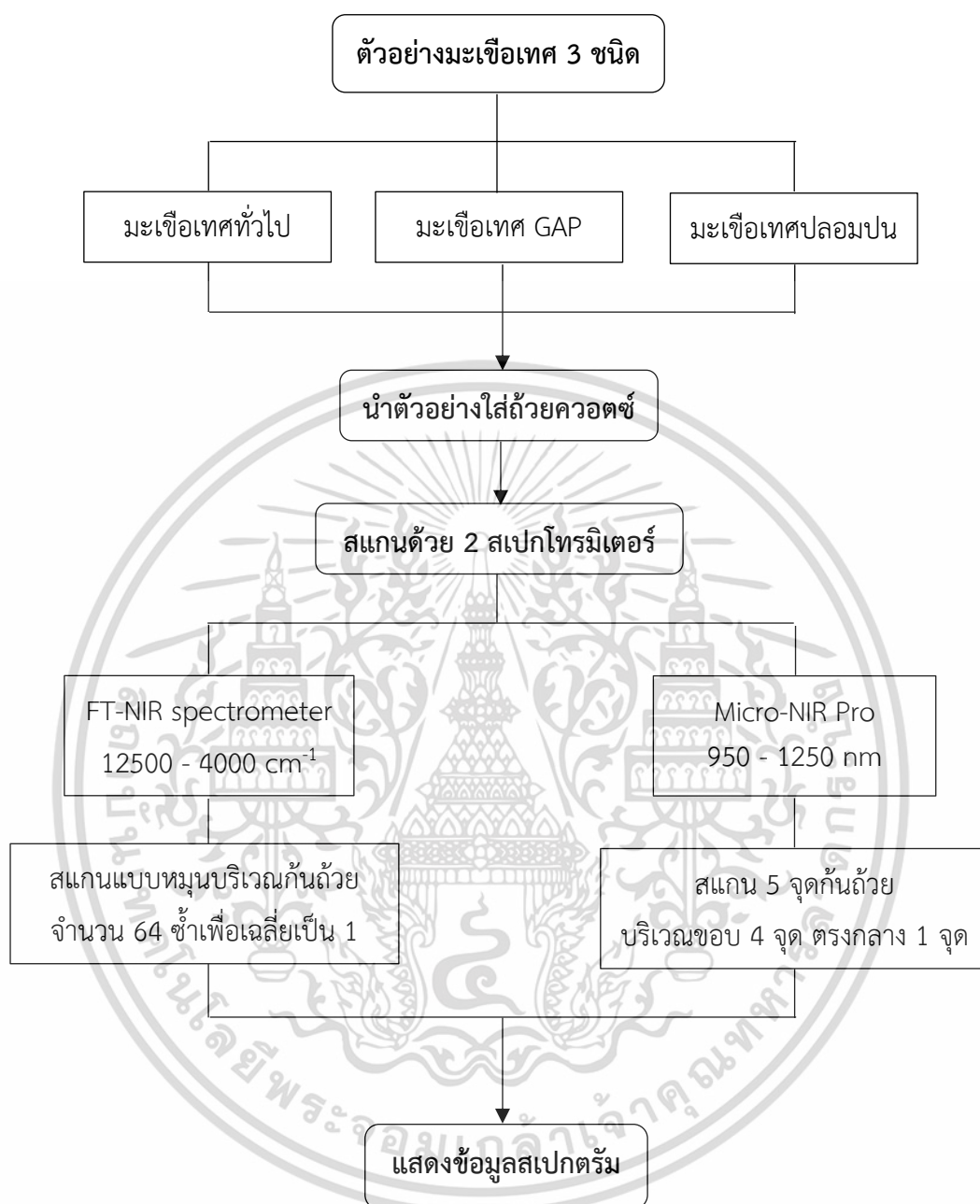


ภาพที่ 3.10 การสแกนด้วย FT-NIR spectrometer



ภาพที่ 3.11 การสแกนด้วย Micro – NIR Pro

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.12 ขั้นตอนการสแกนด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การทดสอบความแม่นยำของการสแกน

การทวนซ้ำ (repeatability) วัดโดยการสแกนตัวอย่างมะเขือเทศเดิมที่ตำแหน่งเดิม 10 ซ้ำ โดยนำค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความยาวคลื่นหรือเลขคลื่นที่เลือกไว้ 3 คลื่น มาหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทั้งหมดของความยาวคลื่นนั้นไปหาค่าเฉลี่ย เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแม่นยำของเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ โดยความยาวคลื่นจาก FT-NIR spectrometer คือ 10309.3, 6711.4, 5154.6 cm^{-1} เป็นความยาวคลื่นของน้ำ เซลลูโลส และน้ำ ตามลำดับ ส่วนเลขคลื่นจาก Micro-NIR spectrometer คือ 970, 1450, 1490 nm เป็นเลขคลื่นของน้ำ น้ำ และเซลลูโลส ตามลำดับ

การทำซ้ำ (reproducibility) วัดโดยการสแกนตัวอย่างมะเขือเทศเดิม 10 ครั้ง แต่มีการรีโหลตทุกครั้ง แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงของแต่ละความยาวคลื่นหรือเลขคลื่นมาหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทั้งหมดของความยาวคลื่นนั้นไปหาค่าเฉลี่ย เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสม่ำเสมอของตัวอย่าง

3.3 การวิเคราะห์วิตามินซีด้วยวิธีอ้างอิง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างและสารเคมี

3.3.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำตัวอย่างมะเขือเทศที่สแกนแล้วไปปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่น จากนั้นนำตัวอย่างไปชั่งด้วยเครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง ให้น้ำหนักประมาณ 5 g ลงในแก้วที่ใช้กับเครื่องไตเตรตอัตโนมัติและเติมน้ำกลั่นลงไป 50 ml ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 ตัวอย่างมะเขือเทศปั่นละเอียด

3.3.1.2 สารละลาย DCPI

นำ 2, 6-dichlorophenolindophenol 0.72 g มาเจือจางด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 500 ml จากนั้นนำสารละลายไปแช่ในอ่างอัลตราโซนิก (DT 510 H, BENDELIN electronic, German) เป็นเวลา 15 นาที จะได้สารละลายดังภาพที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.14 สารละลาย 2, 6- dichlorophenolindophenol

3.3.1.3 สารละลาย L-ascorbic acid

นำ L-ascorbic acid 0.1 g มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 100 ml
จะได้สารละลายดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 สารละลาย L-ascorbic acid

3.3.1.4 สารละลาย Oxalic acid

นำ oxalic acid 2.0000 g มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 100 ml
จะได้สารละลายดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 สารละลาย Oxalic acid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 วิธีวัดวิตามินซี

ใช้เครื่องไตเตรทอัตโนมัติ (TITRATOR T5, Mettler Toledo, Switzerland) ในการหาวิตามินซี โดยมีการติดตั้ง 2 เซนเซอร์ คือ เซนเซอร์วัด pH (DM143-SC, Mettler Toledo, Switzerland) และเซนเซอร์วัดวิตามินซี (DGi115-SC, Mettler Toledo, Switzerland) ซึ่งก่อนทำการทดลองต้องล้างระบบด้วยสารละลาย DCPI จำนวน 4 ครั้ง และมีการคาลิเบรต pH ของเครื่องด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ 4.01, 7.00 และ 9.21 สารมาตรฐานที่ใช้เปรียบเทียบคือสารละลาย L-ascorbic 5ml กับน้ำกลั่น 50 ml และปรับ pH ให้มีค่าประมาณ 3.5 ด้วยสารละลาย Oxalic acid แล้วจึงไทเทรตสารละลายมาตรฐานเพื่อดูความเข้มข้น ดังภาพที่ 3.17



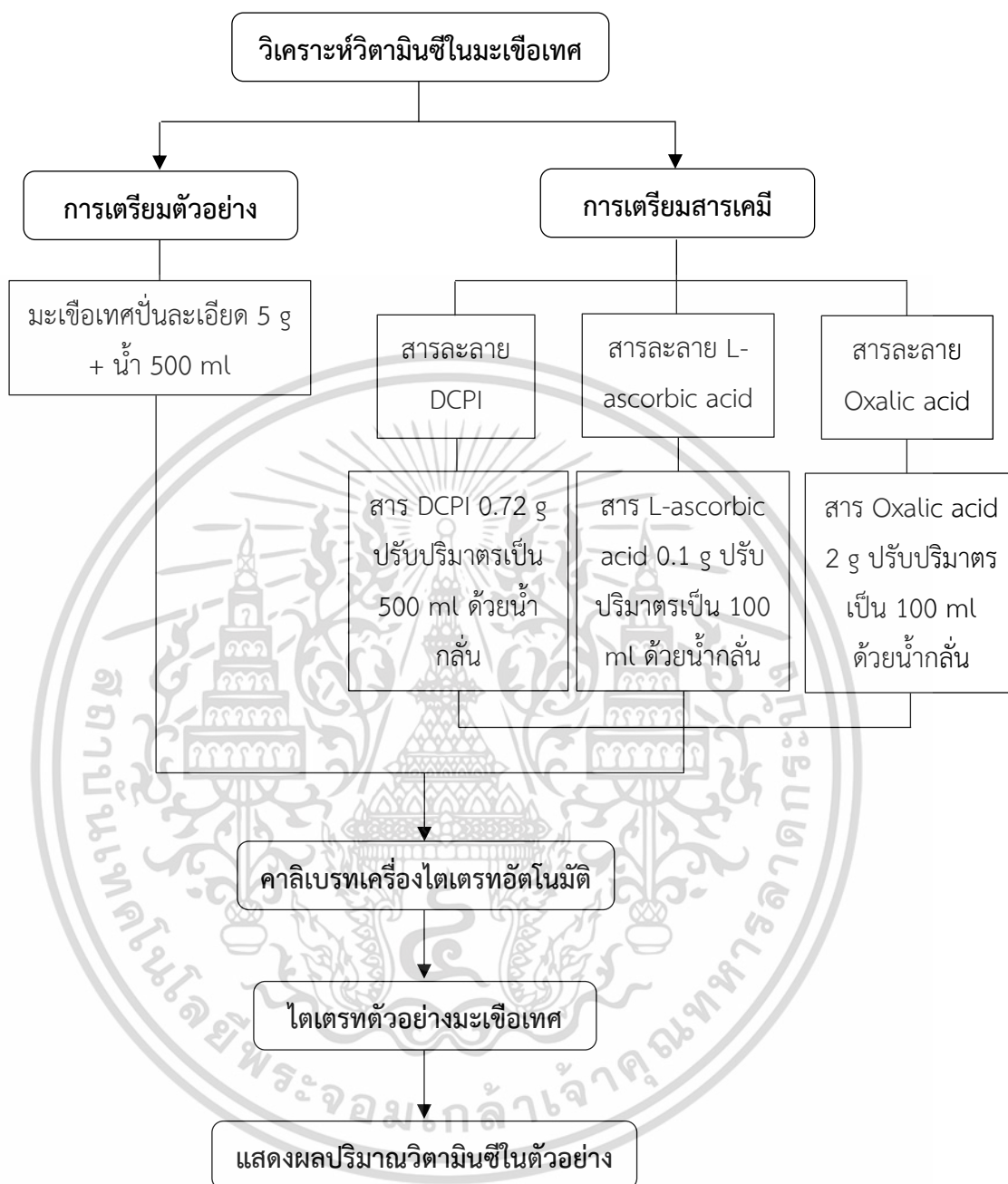
ภาพที่ 3.17 การคาลิเบรต pH ของเครื่องด้วยสารละลายบัฟเฟอร์

จากนั้นจึงวิเคราะห์วิตามินซีในตัวอย่างที่เตรียมไว้ และปรับ pH ให้มีค่าประมาณ 3.5 แล้วหาค่าปริมาณวิตามินซีต่อไป ดังภาพที่ 3.18 สามารถดูขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศได้จากภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.18 การวิเคราะห์วิตามินซีด้วยเครื่องไตเตรทอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.19 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทดสอบความแม่นยำของการวัดด้วยวิธีอ้างอิง

การทดสอบความแม่นยำของการวัดด้วยวิธีอ้างอิง ทำโดยการวัดค่าความสามารถในการทวนซ้ำ (Repeatability, Rep) และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณาสูงสุด (Maximum coefficient of determination, R^2_{Max}) โดยค่าความสามารถในการทวนซ้ำของวิธีอ้างอิงคือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดตัวอย่างซ้ำ โดยผู้วัดทราบว่าเป็นตัวอย่างอะไร (Duplicate sample) ซึ่งในการทดลองนี้ แต่ละตัวอย่างทำการวัด 3 ซ้ำ โดย Dardenne [64] ได้อธิบายว่า R^2 จะสูงสุด R^2_{Max} เมื่อไม่มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสเปกตรัมหรือแบบจำลอง มีเพียงความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิง และชี้ให้เห็นว่าค่า SD_y และ Rep ก็เพียงพอที่จะใช้ตัดสินใจว่าควรสร้างแบบจำลอง NIR ต่อไปหรือไม่ โดยค่า (R^2_{Max}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$R^2_{Max} = \frac{SD_y^2 - Rep^2}{SD_y^2} \quad (3.1)$$

สามารถศึกษาวิธีการคำนวณความแม่นยำของการวัดด้วยวิธีอ้างอิงอย่างละเอียดได้จากภาคผนวก ข

3.4 การสร้างแบบจำลอง

3.4.1 การสร้างแบบจำลองของวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไป มะเขือเทศ GAP และ มะเขือเทศ GAP กับมะเขือเทศทั่วไป

ข้อมูลเชิงสเปกตรัมจาก FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) มาแบ่งเป็นชุดสร้างแบบจำลองและชุดพิสูจน์แบบจำลองด้วยอัตราส่วน 80 ต่อ 20 ซึ่งมีการเรียงลำดับค่าน้อยที่สุดถึงค่ามากที่สุดและจัดตัวอย่างเข้าสู่ชุดคาลิเบรชันและชุดทดสอบในอัตราส่วน 80 : 20 ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129 โดยค่าค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดอยู่ในชุดคาลิเบรชัน โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสง (Optical data) กับปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่วัดด้วยวิธีอ้างอิง โดยวิธี Partial least square (PLS) โดยนำไปวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129 (Bruker, Germany) ทั้งนี้ใช้ข้อมูลเชิงแสง (สเปกตรัม) ที่ไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นหรือที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นโดยวิธี constant offset elimination, straight line subtraction, vector normalization (SNV), min-max normalization, multiplicative scattering correction, first derivative, second derivative, first derivative + straight line subtraction, first derivative + SNV และ first derivative + MSC เมื่อได้แบบจำลองมาแล้ว จะพิสูจน์แบบจำลองโดยใช้วิธี Test Set และคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากราคที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์ (root mean squared error of prediction; RMSEP) ที่ต่ำที่สุด, ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูง (coefficient of Determination; R^2), อัตราส่วนระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพิสูจน์กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ratio of standard error of validation to standard deviation; RPD) และ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ต่ำ (bias) จากนั้นบันทึกค่าที่ได้และบันทึกค่า Regression Coefficient และ X-Loading Weight ที่เลขคลื่นต่างๆ

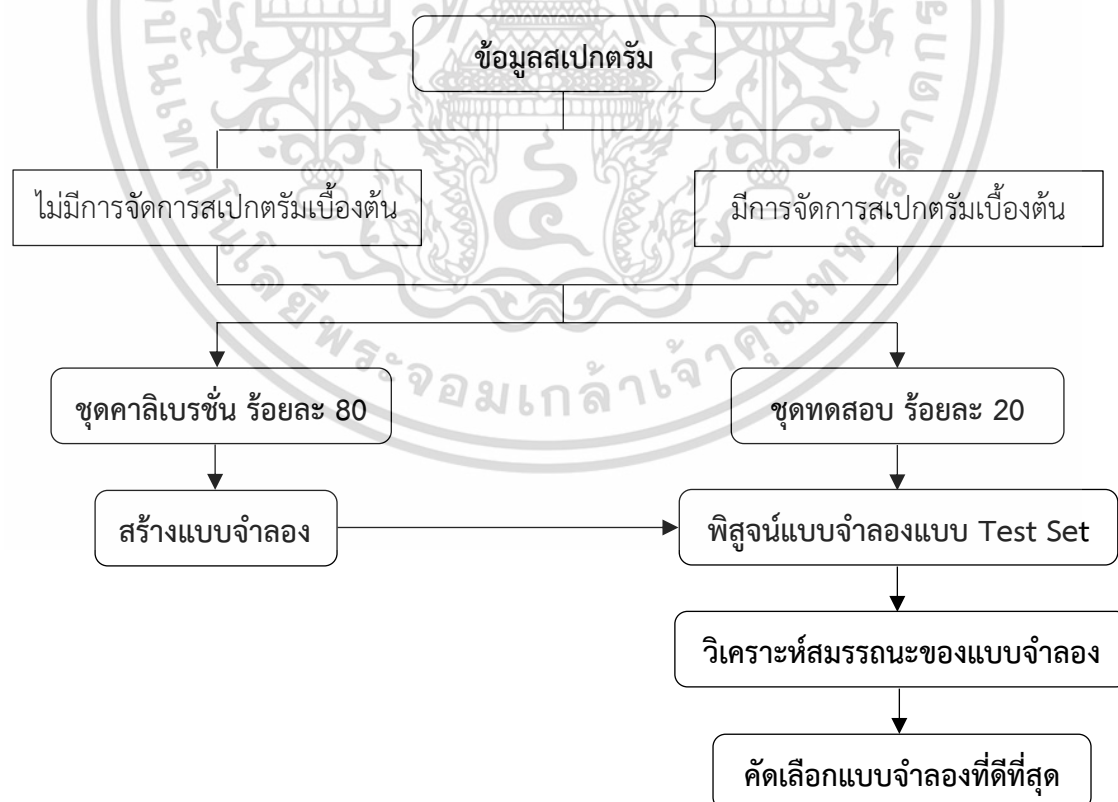
นำข้อมูลเชิงสเปกตรัมจาก Micro – NIR Pro (Viavi, USA) มาแบ่งเป็นชุดสร้างแบบจำลองและชุดพิสูจน์แบบจำลองด้วยอัตราส่วน อัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดย ซึ่งมีการเรียงลำดับค่าน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงค่ามากที่สุดด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.) โดย 8 ตัวอย่างแรกเข้าสู่ชุดพิสูจน์แบบจำลอง และ 2 ตัวอย่างถัดมาเข้าสู่ชุดทดสอบ (ค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดอยู่ในชุดชุดพิสูจน์แบบจำลอง) ทำเช่นนี้จนครบจำนวนตัวอย่าง ทำโดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสง (Optical data) กับ ปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่วัดด้วยวิธีอ้างอิง โดยวิธี Partial least square (PLS) โดยใช้ โปรแกรม Unscramble X ทั้งนี้ใช้ข้อมูลเชิงแสง (สเปกตรัม) ที่ไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นหรือที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นโดยวิธี min-max-range normalization, first derivative (11 และ 21 points), second derivative (11 และ 21 points), Baseline-offset, vector normalization (SNV), SNV + Detrending, Detrending, multiplicative scattering correction (MSC) พิสูจน์แบบจำลองโดยใช้วิธี Test set validation เมื่อได้แบบจำลองจะคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่า RMSEP ที่ต่ำที่สุด จากนั้นบันทึกค่า R^2 , RMSEP, RPD, bias และค่า regression coefficient และ X-loading weight ที่จำนวนคลื่นต่างๆ หรือความยาวคลื่นต่างๆ ตามขั้นตอนการสร้างแบบจำลองของวิตามินซีในมะเขือเทศ (ภาพที่ 3.20)

การสร้างแบบจำลองของวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปและแบบจำลองของวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP กับมะเขือเทศทั่วไป ใช้ FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ในการวัดค่าการดูดซับคลื่นของมะเขือเทศในช่วงเลขคลื่น $12,500 - 3,600 \text{ cm}^{-1}$ และ Micro - NIR Pro (Viavi, USA) ในการวัดค่าการดูดซับคลื่นของมะเขือเทศในช่วงยาวคลื่น $950 - 1650 \text{ nm}$ มีการสร้างแบบจำลองเช่นเดียวกับข้างต้นที่กล่าวมา



ภาพที่ 3.20 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองของวิตามินซีในมะเขือเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การสร้างแบบจำลองของเปอร์เซ็นต์การปลอมปนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ

GAP

3.4.2.1 แบบจำลองที่สร้างด้วยวิธี PLS จากซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

ใช้ FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ในการวัดค่าการดูดซับคลื่นของมะเขือเทศผสม (มะเขือเทศทั่วไปผสมมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100%) ในช่วงเลขคลื่น $12,500 - 3,600 \text{ cm}^{-1}$ ทั้งนี้ใช้ข้อมูลเชิงแสง (สเปกตรัม) ที่ไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นหรือที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นโดยวิธี constant offset elimination, straight line subtraction, vector normalization (SNV), min-max normalization, multiplicative scattering correction, first derivative, second derivative, first derivative + straight line subtraction, first derivative + SNV และ first derivative + MSC ใช้เป็นชุดสร้างแบบจำลองและชุดพิสูจน์แบบจำลองด้วยอัตราส่วน อัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยวิธี Partial least square regression (PLSR) โดยตัวแปรต้นคือสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง NIR และตัวแปรตามคือเปอร์เซ็นต์การผสมต่างๆ ของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP เมื่อได้แบบจำลองมาแล้ว จะพิสูจน์แบบจำลองโดยใช้วิธี Test Set และคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์ (root mean squared error of prediction; RMSEP) ที่ต่ำที่สุด, ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่สูง (coefficient of Determination; R^2), อัตราส่วนระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพิสูจน์กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ratio of standard error of validation to standard deviation; RPD) และ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ต่ำ (bias) จากนั้นจะบันทึกค่าที่ได้และบันทึกค่า Regression Coefficient และ X-Loading Weight ที่เลขคลื่นต่างๆ ตามขั้นตอนเช่นเดียวกันกับการสร้างแบบจำลองของวิตามินซีในมะเขือเทศ (ภาพที่ 3.20)

3.4.2.2 แบบจำลองที่สร้างด้วยวิธี PLS จากซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

ใช้ FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ในการวัดค่าการดูดซับคลื่นของมะเขือเทศผสมในช่วงเลขคลื่น $12,500 - 3,600 \text{ cm}^{-1}$ หรือ Micro - NIR Pro (Viavi, USA) ช่วงความยาวคลื่น 950 - 1650 nm ซึ่งข้อมูลที่ได้ทั้งหมด (ข้อมูลเชิงสเปกตรัม) ของแต่ละสเปกโตรมิเตอร์ ใช้เป็นชุดสร้างแบบจำลองและชุดพิสูจน์แบบจำลองด้วยอัตราส่วน อัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยวิธี Partial least square regression (PLSR) โดยจะใช้มะเขือเทศทั่วไปผสมมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% โดยตัวแปรต้นคือสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง NIR และตัวแปรตามคือเปอร์เซ็นต์การผสมต่างๆ ของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP เพื่อสร้างแบบจำลองของการแบ่งกลุ่มของมะเขือเทศผสมที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ พิสูจน์แบบจำลองโดยใช้วิธี Test set validation เมื่อได้แบบจำลองจะคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่า RMSEP ที่ต่ำที่สุด จากนั้นบันทึกค่า R^2 , RMSEP, RPD, bias และบันทึกค่า regression coefficient และ X-loading weight ที่จำนวนคลื่นต่างๆ หรือความยาวคลื่นต่างๆ ตามขั้นตอนเช่นเดียวกันกับการสร้างแบบจำลองของวิตามินซีในมะเขือเทศ (ภาพที่ 3.20)

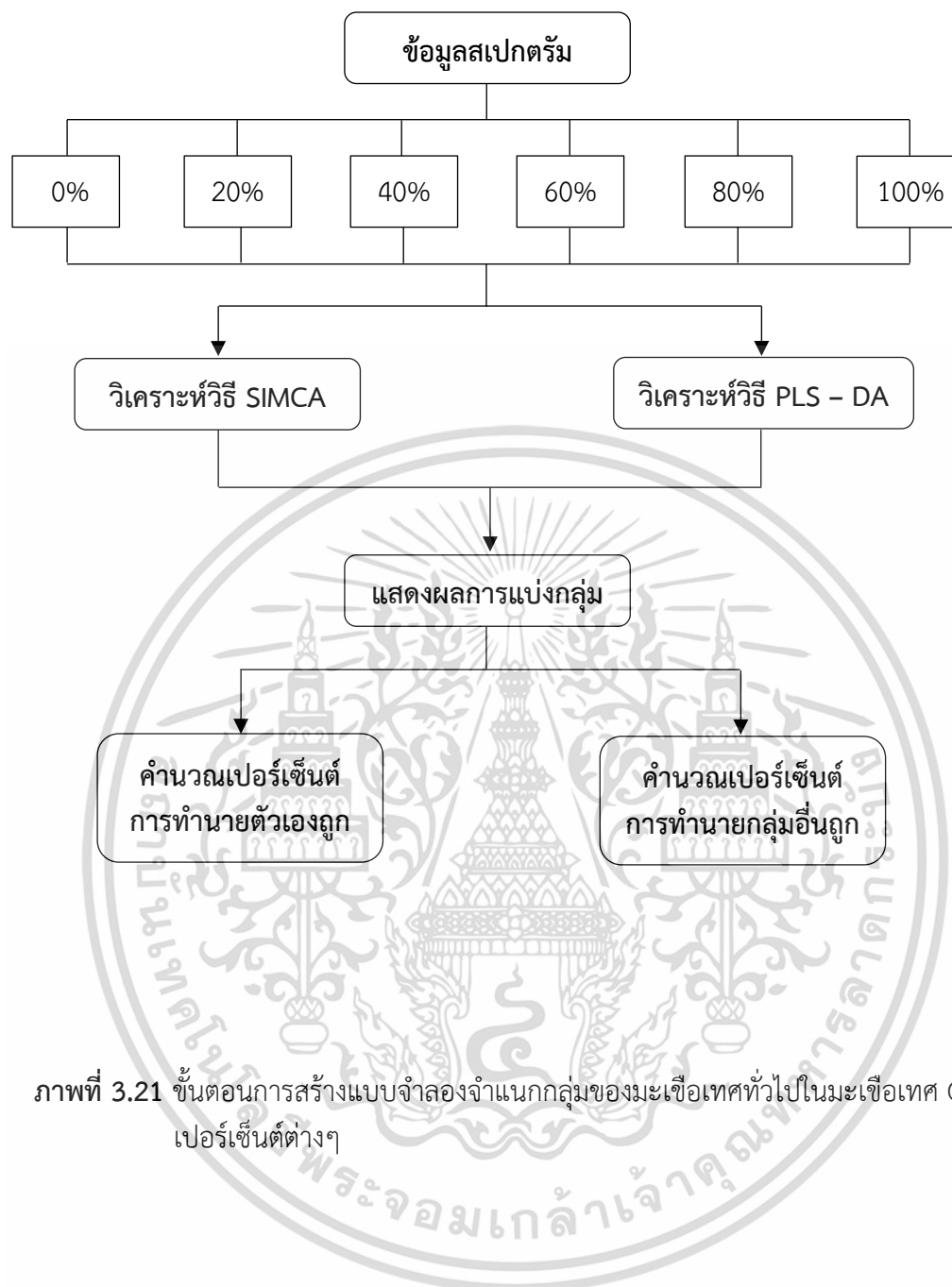
3.4.3 การสร้างแบบจำลองจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศที่มีการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไป ในมะเขือเทศ GAP

3.4.3.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA)

การวิเคราะห์แบบ Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) ใช้ FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ในการวัดค่าการดูดซับคลื่นของมะเขือเทศทั่วไปผสมมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ในช่วงเลขคลื่น $12,500 - 3,600 \text{ cm}^{-1}$ หรือ Micro - NIR Pro (Viavi, USA) ช่วงความยาวคลื่น 950 - 1650 nm ซึ่งข้อมูลที่ได้ทั้งหมดของแต่ละสเปกโตรมิเตอร์ (ข้อมูลเชิงสเปกตรัม) จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ Unscramble X 10.3 โดยใช้วิธี Principal Component Analysis (PCA) ซึ่งจะวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มของการปลอมปนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ โดยตัวแปรต้นคือสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง NIR และตัวแปรตามคือเปอร์เซ็นต์ของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP แล้วจึงนำแบบจำลอง PCA มาวิเคราะห์การทำนายผลของเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของการผสมของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP และหาเปอร์เซ็นต์การทำนายตัวเองถูกและเปอร์เซ็นต์การทำนายกลุ่มอื่นถูกต้องไป ตามภาพที่ 3.21 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ

3.4.3.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS - DA)

ใช้ FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ในการวัดค่าการดูดซับคลื่นของมะเขือเทศทั่วไปผสมมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% ในช่วงเลขคลื่น $12,500 - 3,600 \text{ cm}^{-1}$ หรือ Micro - NIR Pro (Viavi, USA) ช่วงความยาวคลื่น 950 - 1650 nm ซึ่งข้อมูลที่ได้ทั้งหมดของแต่ละสเปกโตรมิเตอร์ (ข้อมูลเชิงสเปกตรัม) จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ Unscramble X 10.3 โดยใช้วิธี Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) ซึ่งจะวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มของการปลอมปนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ โดยตัวแปรต้นคือสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง NIR และตัวแปรตามคือเปอร์เซ็นต์ของการผสมของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP แล้วจึงนำแบบจำลอง PLSR มาวิเคราะห์การทำนายผลของเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของการผสมของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP และหาเปอร์เซ็นต์การทำนายตัวเองถูกและเปอร์เซ็นต์การทำนายกลุ่มอื่นถูกต้องไป ตามภาพที่ 3.21 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศทั่วไปผสมมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ



ภาพที่ 3.21 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ

บทที่ 4

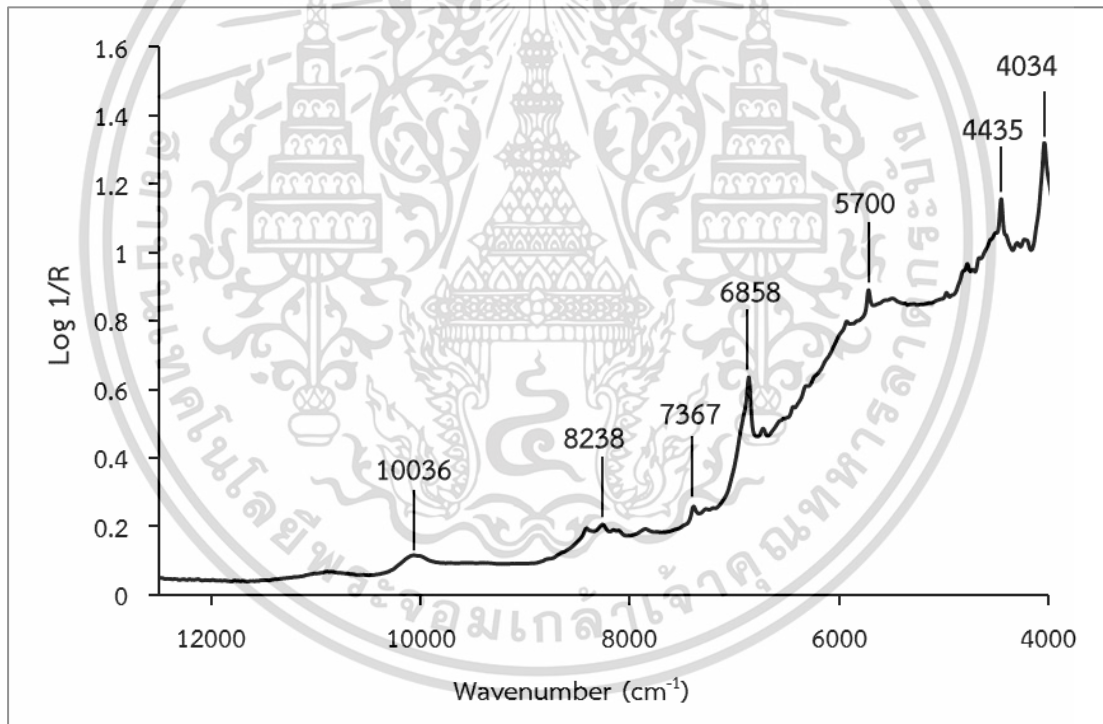
ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์สเปกตรัม

4.1.1 สเปกตรัมวิตามินซี

4.1.1.1 สเปกตรัมวิตามินซีจาก FT-NIR spectrometer

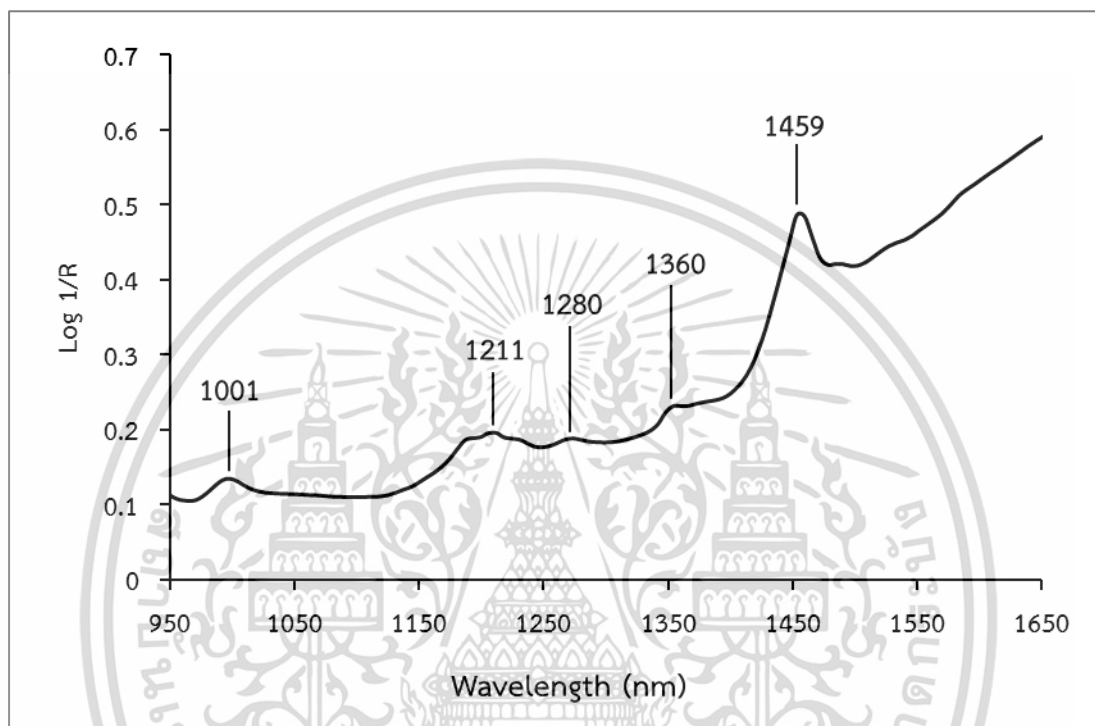
ในการวิเคราะห์สเปกตรัมวิตามินซีที่ได้จาก FT-NIR spectroscopy ที่ช่วงเลขคลื่น 12500-4000 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 800-2500 nm) ดังภาพที่ 4.1 พบว่าวิตามินซีมีการดูดซับที่เลขคลื่น ดังนี้ 10036, 8238, 7367, 6858, 5700, 4435 และ 4034 cm^{-1} (996, 1214, 1357, 1458, 1754, 2255 และ 2479 nm ตามลำดับ)



ภาพที่ 4.1 สเปกตรัมของวิตามินซีที่ได้จากการสแกนด้วย FT-NIR spectrometer

4.1.1.2 สเปกตรัมวิตามินซีจาก Micro-NIR Pro

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมวิตามินซีที่ได้จาก Micro-NIR Pro ที่ช่วงความยาวคลื่น 950-1650 nm (เลขคลื่น 10526-6060 cm^{-1}) ดังภาพที่ 4.2 พบว่าวิตามินซีมีการดูดซับที่เลขคลื่น ดังนี้ 1001, 1211, 1280, 1360 และ 1459 nm (9990, 8258, 7813, 7353 และ 6854 cm^{-1} ตามลำดับ)



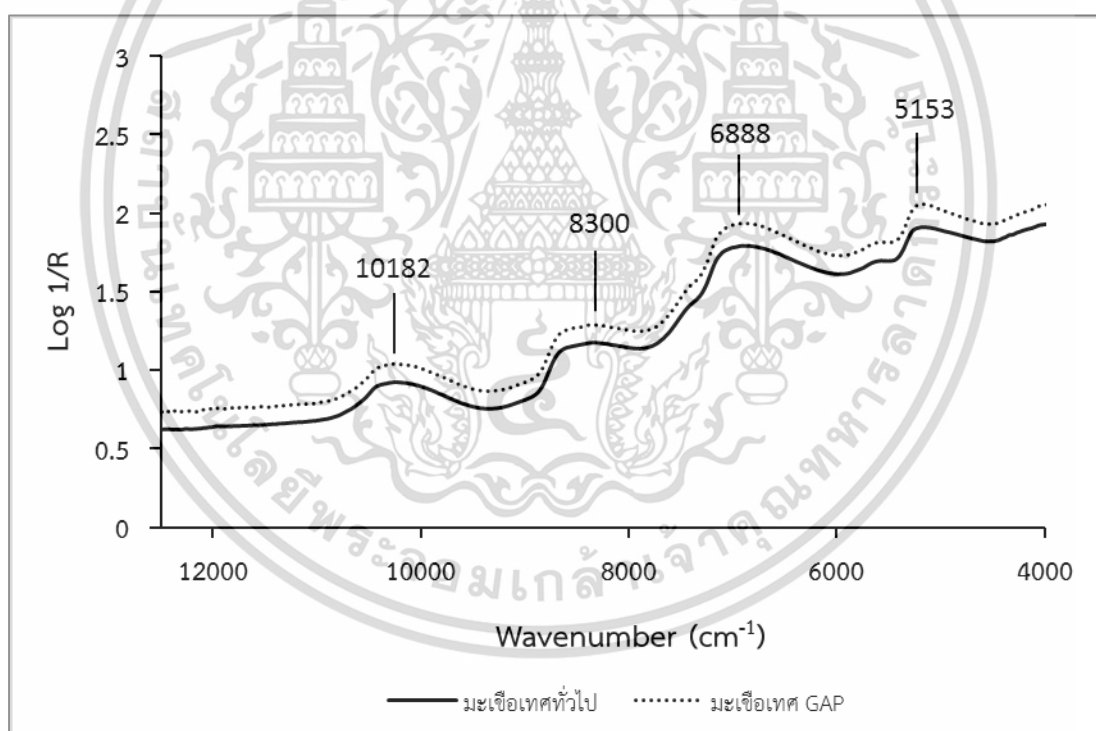
ภาพที่ 4.2 สเปกตรัมของวิตามินซีที่ได้จากการสแกนด้วย Micro-NIR Pro

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 สเปกตรัมมะเขือเทศ

4.1.2.1 สเปกตรัมมะเขือเทศจาก FT-NIR spectrometer

การวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP ที่ได้จาก FT-NIR spectroscopy ที่ช่วงเลขคลื่น $12500-4000\text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่น $800-2500\text{ nm}$) ดังภาพที่ 4.3 พบว่ามะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP มีการดูดซับที่เลขคลื่นดังนี้ $10186, 8300, 6888, 5680$ และ 5153 cm^{-1} ($981, 1205, 1451, 1761$ และ 1940 nm ตามลำดับ) ซึ่งที่เลขคลื่น 10186 cm^{-1} (981 nm) ใกล้เคียงกับพีคของการดูดซับคลื่นของน้ำที่เลขคลื่น 10309 (970 nm) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching เลขคลื่น 8300 cm^{-1} (1205 nm) ใกล้เคียงกับพีคของการดูดซับคลื่นของ CH_3 ที่เลขคลื่น 8368 cm^{-1} (1195 nm) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C-H stretching เลขคลื่น 6888 cm^{-1} (1452 nm) ใกล้เคียงกับพีคที่ 6896 cm^{-1} (1450 nm) เป็นการดูดซับคลื่นของสตาร์ทหรือ น้ำ ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching ส่วนพีคที่ 5153 cm^{-1} (1940 nm) ใกล้เคียงกับพีคของการดูดซับที่เลขคลื่น 5155 cm^{-1} (1940 nm) เกิดการสั่นสะเทือนของ O-H stretching ซึ่งเป็นโครงสร้างของน้ำ [65]

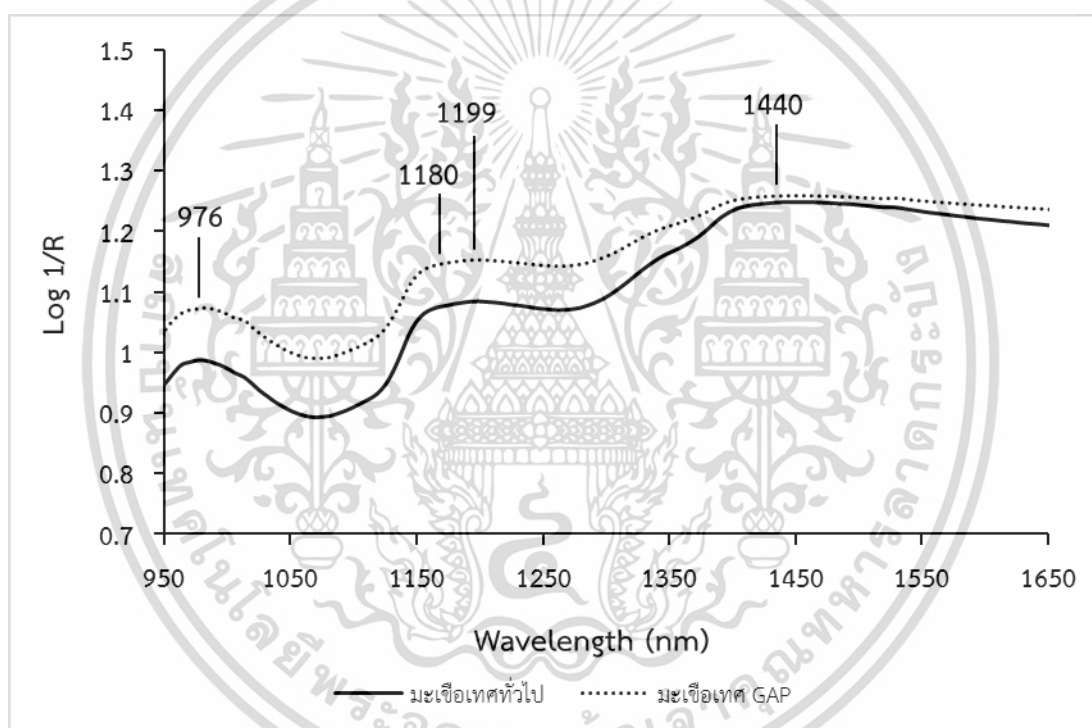


ภาพที่ 4.3 สเปกตรัมของมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP ที่ได้จากการสแกนด้วย FT-NIR spectrometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 สเปกตรัมมะเขือเทศ GAP จาก Micro-NIR Pro

การวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP ที่ได้จาก Micro-NIR Pro ที่ช่วงความยาวคลื่น 950-1650 nm (เลขคลื่น 10526-6060 cm^{-1}) ดังภาพที่ 4.4 พบว่ามะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP มีการดูดซับที่เลขคลื่นดังนี้ 976, 1180, 1199 และ 1440 nm (10245, 8475, 8340 และ 6944 cm^{-1} ตามลำดับ) ซึ่งที่ความยาวคลื่น 976 nm (10245 cm^{-1}) ตรงกับพีคของการดูดซับคลื่นของน้ำ ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching ความยาวคลื่น 1180, 1440 nm (8475, 6944 cm^{-1}) ใกล้เคียงกับพีคของการดูดซับคลื่นของน้ำที่ความยาวคลื่น 1190, 1450 nm (8403, 6896 cm^{-1}) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching และความยาวคลื่น 1199 nm (8340 cm^{-1}) ใกล้เคียงกับพีคของการดูดซับคลื่นของ CH_3 ที่ความยาวคลื่น 1195 nm (8368 cm^{-1}) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C-H [65]



ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมของมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP ที่ได้จากการสแกนด้วย Micro-NIR Pro

4.2 การทดสอบความแม่นยำ

4.2.1 ความแม่นยำของการสแกน

ตารางที่ 4.1 แสดงความสามารถในการทวนซ้ำและการทำซ้ำของสเปกโตรมิเตอร์มะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP ที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ของ 3 เลขคลื่น ได้แก่ 10309.3, 6711.4 และ 5154.6 cm^{-1} ความสามารถในการทวนซ้ำและการทำซ้ำของมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP ของทั้ง 3 เลขคลื่นลดลงตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น และพบว่าค่าความสามารถในการทำซ้ำของมะเขือเทศทั่วไปต่ำกว่ามะเขือเทศ GAP แสดงว่ามะเขือเทศทั่วไปมีความสม่ำเสมอของตัวอย่างมากกว่ามะเขือเทศ GAP กล่าวคือมะเขือเทศทั่วไปไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่ามะเขือเทศ GAP

ตารางที่ 4.1 ค่าความสามารถของการทวนซ้ำและความสามารถในการทำซ้ำของมะเขือเทศจากการสแกนด้วย FT-NIR spectrometer

Wavenumber	Tomato samples	Scanned time	Repeatability		Reproducibility	
			General	GAP	General	GAP
At 10309.3 cm^{-1}	Orange	10 time	0.00352	0.00336	0.03971	0.03720
	Red	10 time	0.00148	0.00341	0.02762	0.05123
At 6711.4 cm^{-1}	Orange	10 time	0.00579	0.00347	0.04539	0.07635
	Red	10 time	0.00298	0.00483	0.03632	0.06274
At 5154.6 cm^{-1}	Orange	10 time	0.00673	0.00309	0.05316	0.08920
	Red	10 time	0.00469	0.00587	0.04264	0.06673
Average	Orange	10 time	0.00535	0.00331	0.04609	0.06758
	Red	10 time	0.00305	0.00470	0.03552	0.06023

ตารางที่ 4.2 แสดงความสามารถในการทวนซ้ำและการทำซ้ำของสเปกโตรมิเตอร์มะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP ที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่ได้จาก Micro-NIR Pro ของ 3 ความยาวคลื่น ได้แก่ 970, 1450 และ 1490 nm ความสามารถในการทวนซ้ำและการทำซ้ำของมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP ของทั้ง 3 ความยาวคลื่นมีความแปรปรวนตามระดับความสูงที่แตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบความแม่นยำในการสแกนของทั้งสองสเปกโตรมิเตอร์พบว่า FT-NIR spectrometer มีความแม่นยำมากกว่า Micro-NIR Pro เนื่องจากความแปรปรวนของข้อมูลน้อยกว่าและค่าเฉลี่ยของการทวนซ้ำและการทำซ้ำส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า

ตารางที่ 4.2 ค่าความสามารถของการทวนซ้ำและความสามารถในการทำซ้ำของมะเขือเทศจากการสแกนด้วย Micro-NIR Pro

Wavelength	Tomato samples	Scanned time	Repeatability		Reproducibility	
			General	GAP	General	GAP
At 970 nm	Orange	10 time	0.02196	0.00489	0.03666	0.05418
	Red	10 time	0.00699	0.00744	0.08620	0.05109
At 1450 nm	Orange	10 time	0.00824	0.00246	0.01563	0.01743
	Red	10 time	0.00217	0.00369	0.03311	0.02193
At 1490 nm	Orange	10 time	0.00876	0.00264	0.01631	0.01866
	Red	10 time	0.00224	0.00382	0.03417	0.02253
Average	Orange	10 time	0.01299	0.00333	0.02287	0.03009
	Red	10 time	0.00380	0.00499	0.05116	0.03185

4.2.2 ความแม่นยำของการวัดวิตามินซีด้วยวิธีอ้างอิง

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความสามารถของการทวนซ้ำ (Repeatability) และค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณาสูงสุด (Maximum coefficient of determination, R_{Max}^2) ซึ่ง R_{Max}^2 และ Repeatability สามารถใช้เพื่อตัดสินใจในการสร้างแบบจำลอง NIR พบว่าค่า R_{Max}^2 ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศแต่ละกลุ่มตัวอย่างมีค่าสูงอยู่ระหว่าง 0.868 - 0.928 ดังนั้นจึงสมควรนำข้อมูลไปสร้างแบบจำลอง

ตารางที่ 4.3 ค่าความสามารถของการทวนซ้ำ (Repeatability, Rep) และค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณาสูงสุด (Maximum coefficient of determination, R_{Max}^2)

กลุ่มตัวอย่าง	SD	Rep	R_{Max}^2
มะเขือเทศทั่วไป	5.236	1.408	0.928
มะเขือเทศ GAP	1.073	0.389	0.868
มะเขือเทศทั่วไป + GAP	4.078	1.259	0.905

4.3 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ

4.3.1 การกระจายความถี่ปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไป

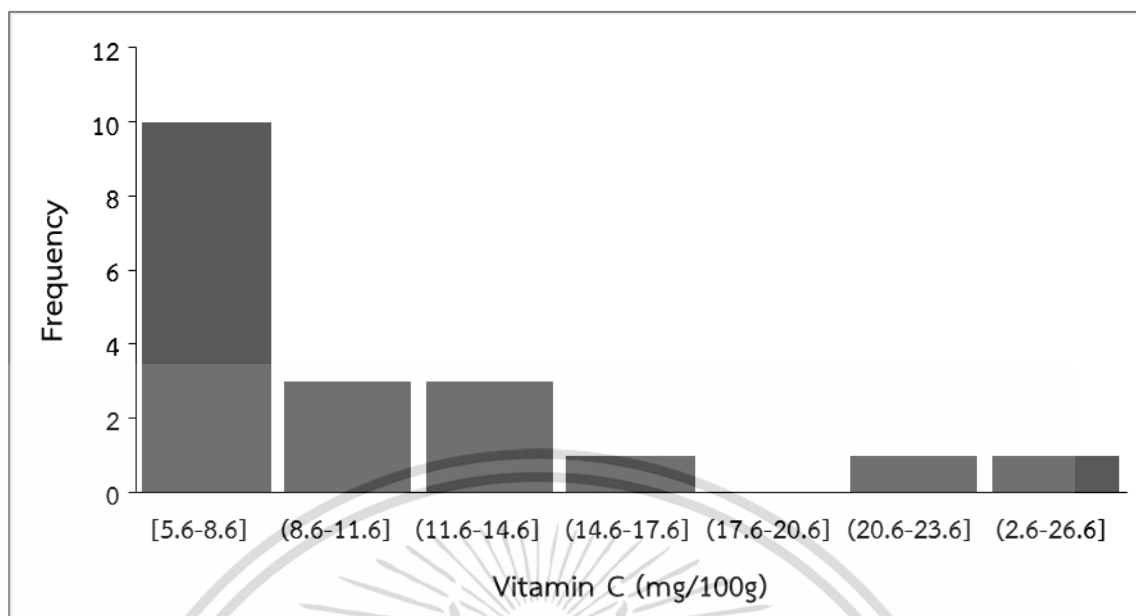
4.3.1.1 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer

ภาพที่ 4.5 แสดงกราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดคาลิเบรชัน ซึ่งค่าปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไปเท่ากับ 5.374 – 24.140 mg/100g จากภาพที่ 4.5 ค่าปริมาณวิตามินซีถูกแบ่งให้มีความกว้างของแต่ละช่วงคือ 3 mg/100g และพบว่าค่าวิตามินซีที่มีความถี่สูงสุดเท่ากับ 53 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง 5.3 – 8.3 mg/100g และสำหรับปริมาณวิตามินซีของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงมากกว่า 8.3 mg/100g ขึ้นไป มีการกระจายความถี่ดังภาพ



ภาพที่ 4.5 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดคาลิเบรชัน

ภาพที่ 4.6 แสดงกราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดทดสอบ ซึ่งค่าปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไปเท่ากับ 5.607 – 23.996 mg/100g จากภาพที่ 4.6 ค่าปริมาณวิตามินซีถูกแบ่งให้มีความกว้างของแต่ละช่วงคือ 3 mg/100g และพบว่าค่าวิตามินซีที่มีความถี่สูงสุดเท่ากับ 10 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง 5.6 – 8.6 mg/100g และสำหรับปริมาณวิตามินซีของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงมากกว่า 8.6 mg/100g ขึ้นไป มีการกระจายความถี่ดังภาพ

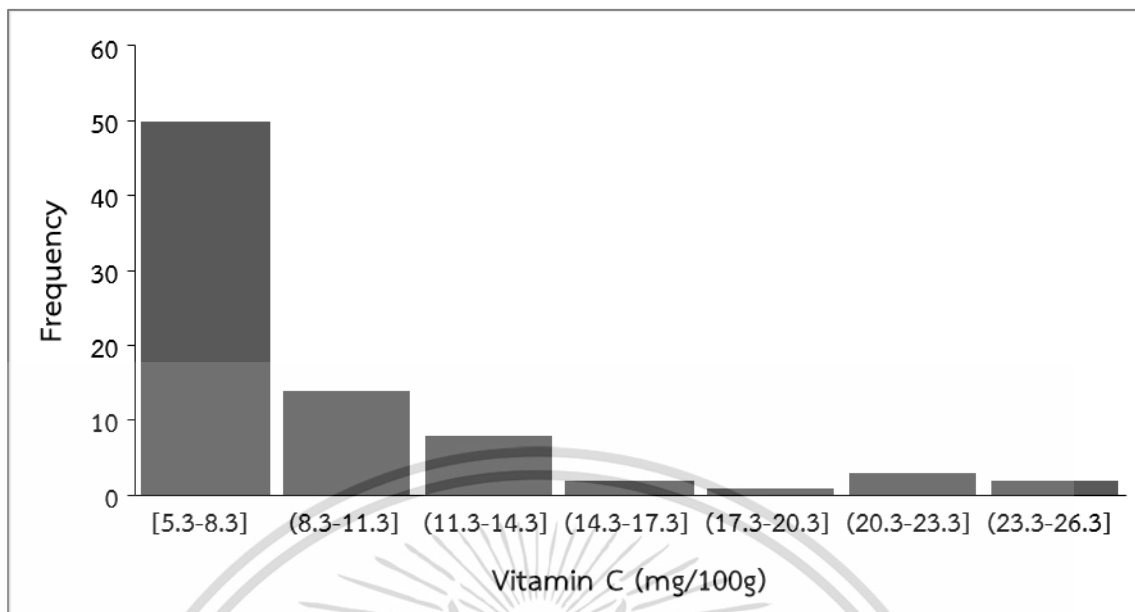


ภาพที่ 4.6 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดทดสอบ

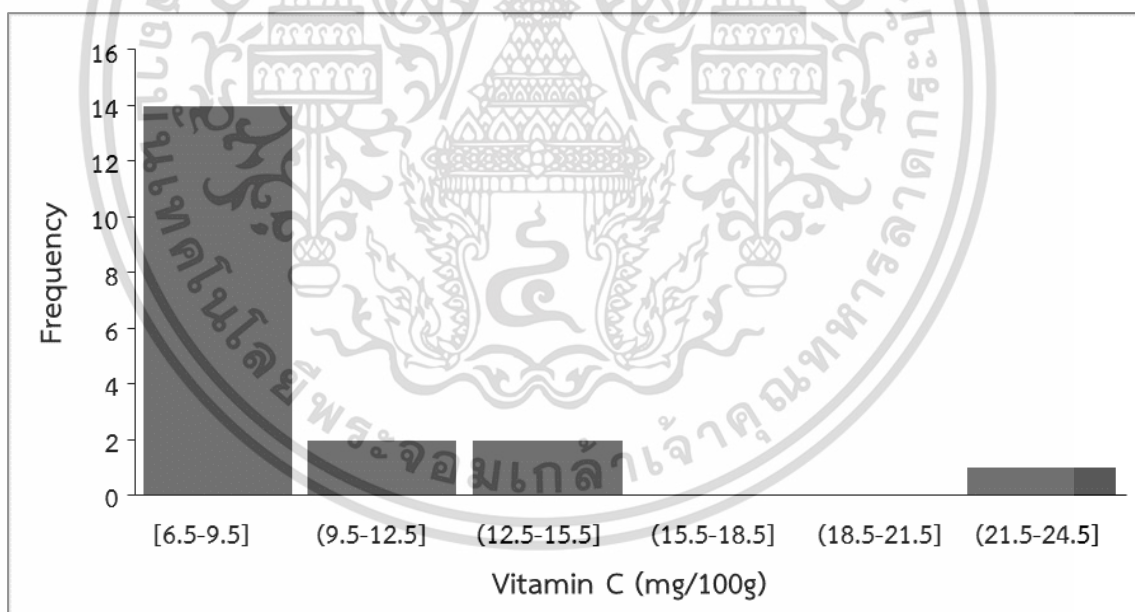
4.3.1.2 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro

ภาพที่ 4.7 แสดงกราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดคาลิเบรชัน ซึ่งค่าปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไปเท่ากับ 5.374 – 24.140 mg/100g จากภาพที่ 4.7 ค่าปริมาณวิตามินซีถูกแบ่งให้มีความกว้างของแต่ละช่วงคือ 3 mg/100g และพบว่าค่าวิตามินซีที่มีความถี่สูงสุดเท่ากับ 50 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง 5.3 – 8.3 mg/100g และสำหรับปริมาณวิตามินซีของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงมากกว่า 8.3 mg/100g ขึ้นไป มีการกระจายความถี่ดังภาพ

ภาพที่ 4.8 แสดงกราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดทดสอบ ซึ่งค่าปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไปเท่ากับ 6.511 – 24.140 mg/100g จากภาพที่ 4.8 ค่าปริมาณวิตามินซีถูกแบ่งให้มีความกว้างของแต่ละช่วงคือ 3 mg/100g และพบว่าค่าวิตามินซีที่มีความถี่สูงสุดเท่ากับ 14 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง 6.5 – 9.5 mg/100g และสำหรับปริมาณวิตามินซีของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงมากกว่า 9.5 mg/100g ขึ้นไป มีการกระจายความถี่ดังภาพ



ภาพที่ 4.7 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดคาลิเบรชัน



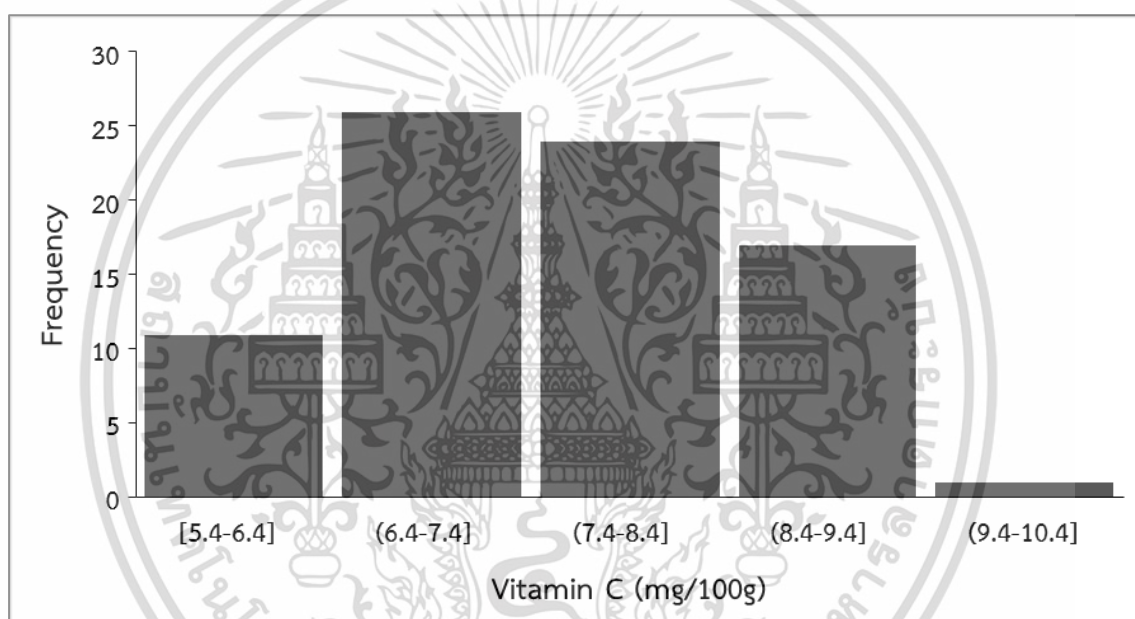
ภาพที่ 4.8 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การกระจายความถี่ปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP

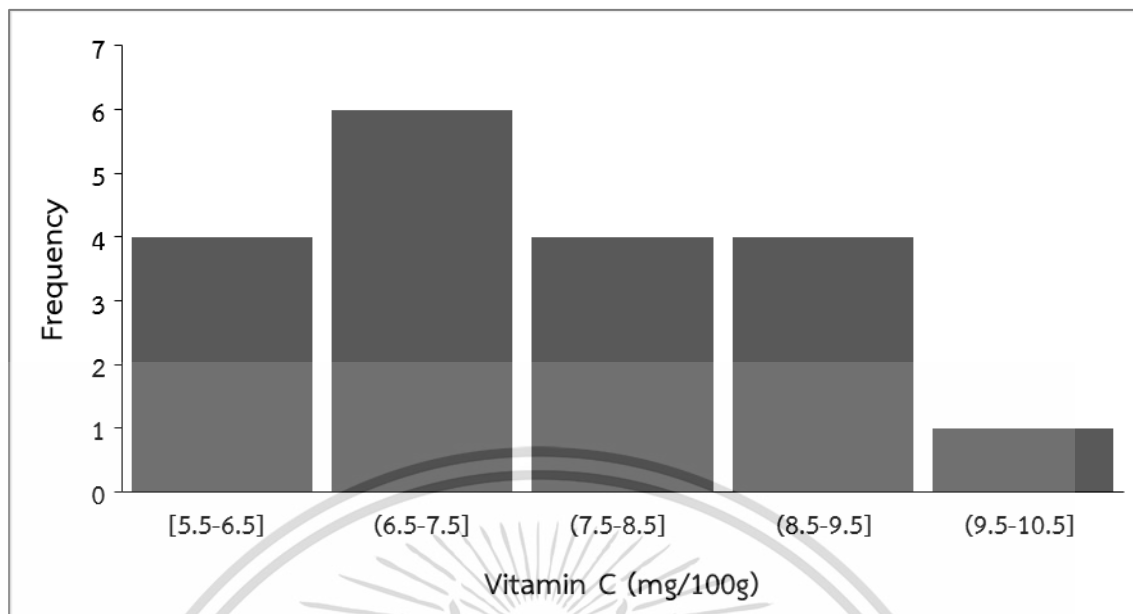
4.3.2.1 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer

ภาพที่ 4.9 แสดงกราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดคาลิเบรชัน ซึ่งค่าปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศ GAP เท่ากับ 5.737 – 10.159 mg/100g จากภาพที่ 4.9 ค่าปริมาณวิตามินซีถูกแบ่งให้มีความกว้างของแต่ละช่วงคือ 1 mg/100g และพบว่าค่าวิตามินซีที่มีความถี่สูงสุดเท่ากับ 26 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง 6.4 – 7.4 mg/100g และสำหรับปริมาณวิตามินซีของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงอื่นๆ มีการกระจายความถี่ดังภาพ



ภาพที่ 4.9 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดคาลิเบรชัน

ภาพที่ 4.10 แสดงกราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดทดสอบ ซึ่งค่าปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศ GAP เท่ากับ 5.527 – 9.815 mg/100g จากภาพที่ 4.10 ค่าปริมาณวิตามินซีถูกแบ่งให้มีความกว้างของแต่ละช่วงคือ 1 mg/100g และพบว่าค่าวิตามินซีที่มีความถี่สูงสุดเท่ากับ 6 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง 6.5 – 7.5 mg/100g และสำหรับปริมาณวิตามินซีของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงอื่นๆ มีการกระจายความถี่ดังภาพ

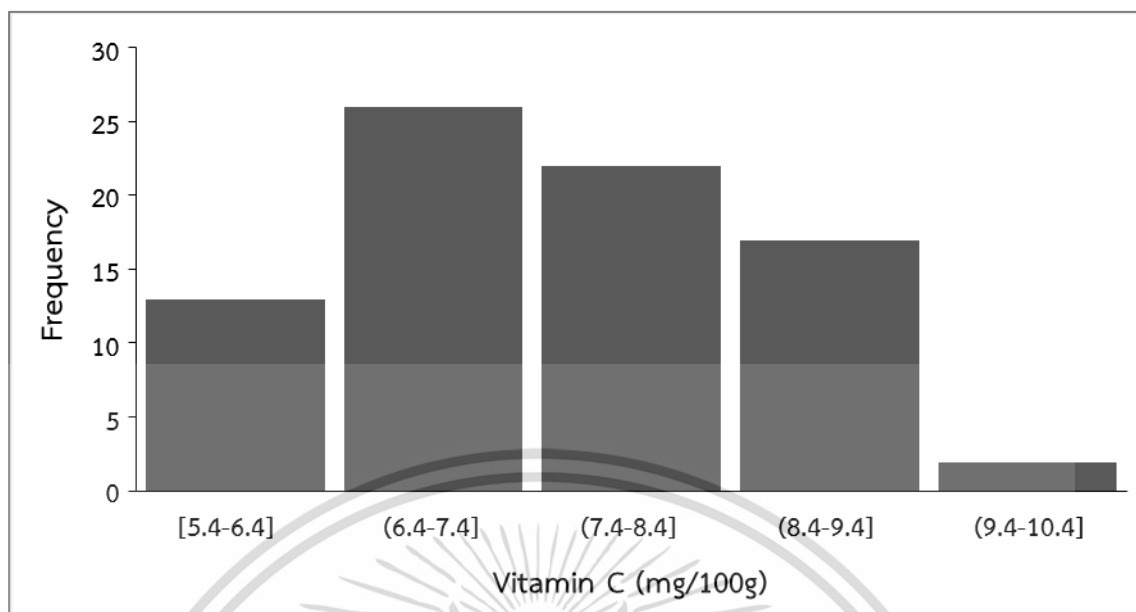


ภาพที่ 4.10 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดทดสอบ

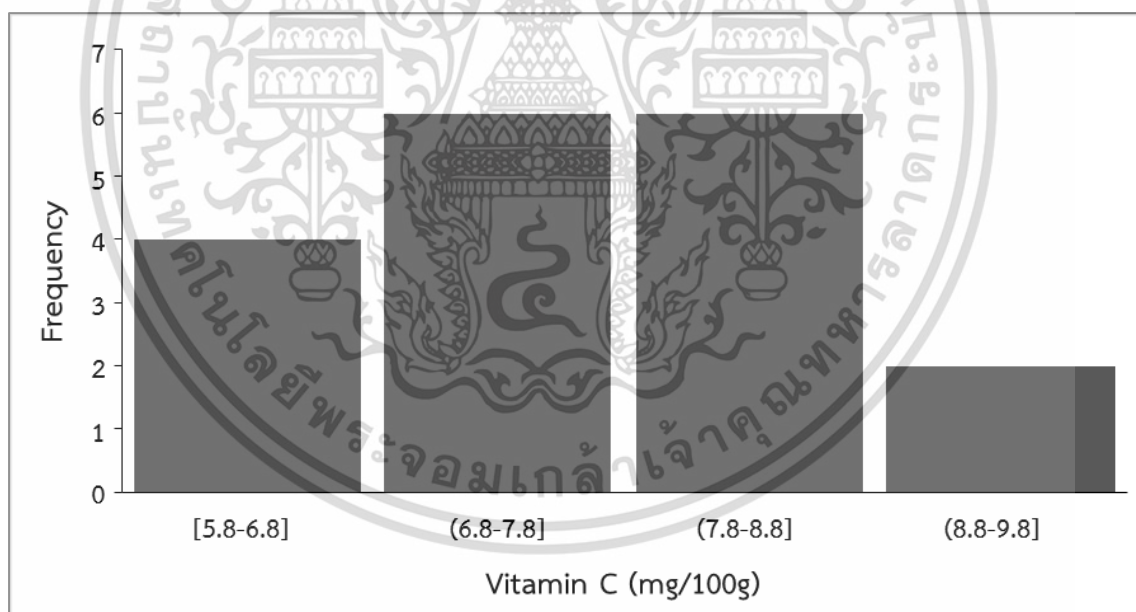
4.3.2.2 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro

ภาพที่ 4.11 แสดงกราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดคาลิเบรชัน ซึ่งค่าปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศ GAP เท่ากับ 5.478 – 10.159 mg/100g จากภาพที่ 4.11 ค่าปริมาณวิตามินซีถูกแบ่งให้มีความกว้างของแต่ละช่วงคือ 1 mg/100g และพบว่าค่าวิตามินซีที่มีความถี่สูงสุดเท่ากับ 26 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง 6.4 – 7.4 mg/100g และสำหรับปริมาณวิตามินซีของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงอื่นๆ มีการกระจายความถี่ดังภาพ

ภาพที่ 4.12 แสดงกราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดทดสอบ ซึ่งค่าปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศ GAP เท่ากับ 5.879 – 8.929 mg/100g จากภาพที่ 4.12 ค่าปริมาณวิตามินซีถูกแบ่งให้มีความกว้างของแต่ละช่วงคือ 1 mg/100g และพบว่าค่าวิตามินซีที่มีความถี่สูงสุดเท่ากับ 6 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง 6.8 – 7.8 mg/100g และช่วง 6.8 – 7.8 mg/100g และสำหรับปริมาณวิตามินซีของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงอื่นๆ มีการกระจายความถี่ดังภาพ



ภาพที่ 4.11 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดคาลิเบรชัน



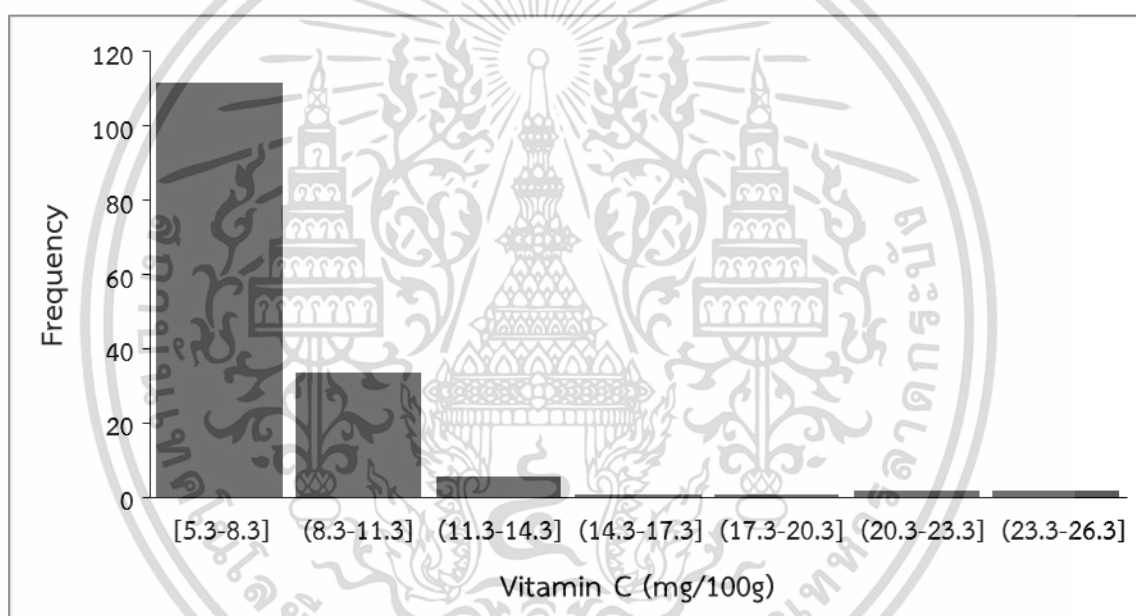
ภาพที่ 4.12 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การกระจายความถี่ปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP

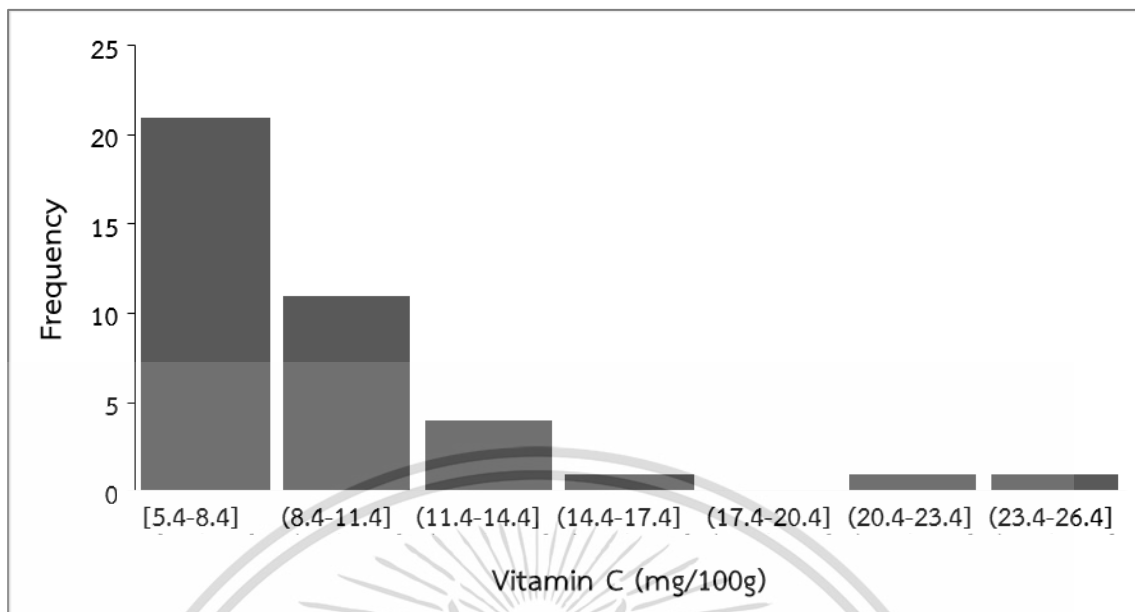
4.3.3.1 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer

ภาพที่ 4.13 แสดงกราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดคาลิเบรชัน ซึ่งค่าปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP เท่ากับ 5.374 – 24.140 mg/100g จากภาพที่ 4.13 ค่าปริมาณวิตามินซีถูกแบ่งให้มีความกว้างของแต่ละช่วงคือ 3 mg/100g และพบว่าค่าวิตามินซีที่มีความถี่สูงสุดเท่ากับ 110 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง 5.3 – 8.3 mg/100g และสำหรับปริมาณวิตามินซีของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงอื่นๆ มีการกระจายความถี่ดังภาพ



ภาพที่ 4.13 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดคาลิเบรชัน

ภาพที่ 4.14 แสดงกราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดทดสอบ ซึ่งค่าปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP เท่ากับ 5.478 – 23.996 mg/100g จากภาพที่ 4.14 ค่าปริมาณวิตามินซีถูกแบ่งให้มีความกว้างของแต่ละช่วงคือ 3 mg/100g และพบว่าค่าวิตามินซีที่มีความถี่สูงสุดเท่ากับ 21 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง 5.4 – 8.4 mg/100g และสำหรับปริมาณวิตามินซีของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงอื่นๆ มีการกระจายความถี่ดังภาพ

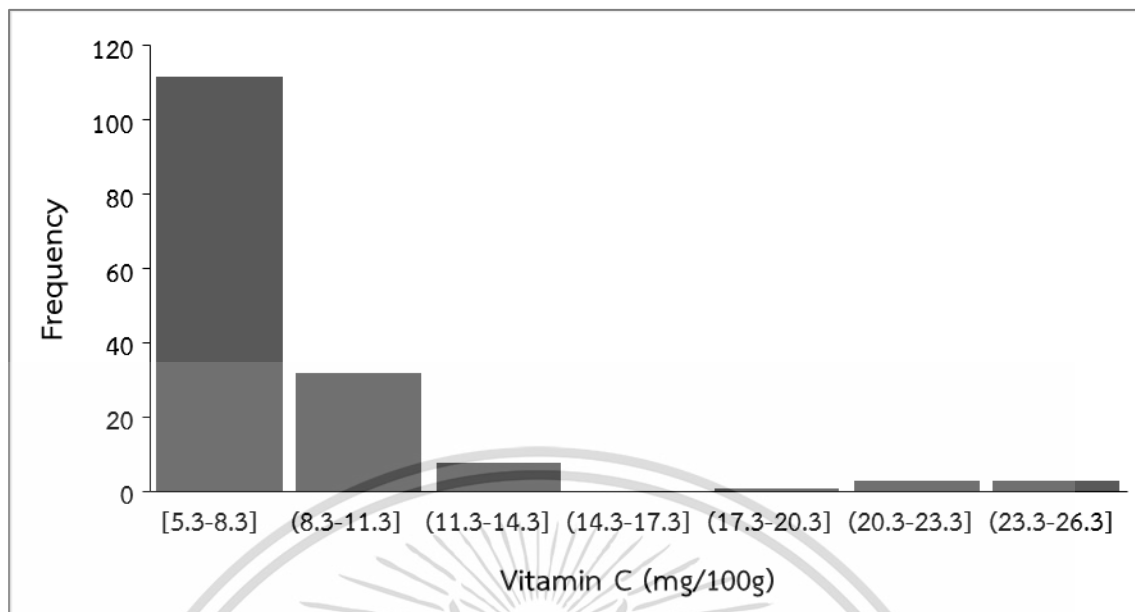


ภาพที่ 4.14 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ FT-NIR spectrometer ของชุดทดสอบ

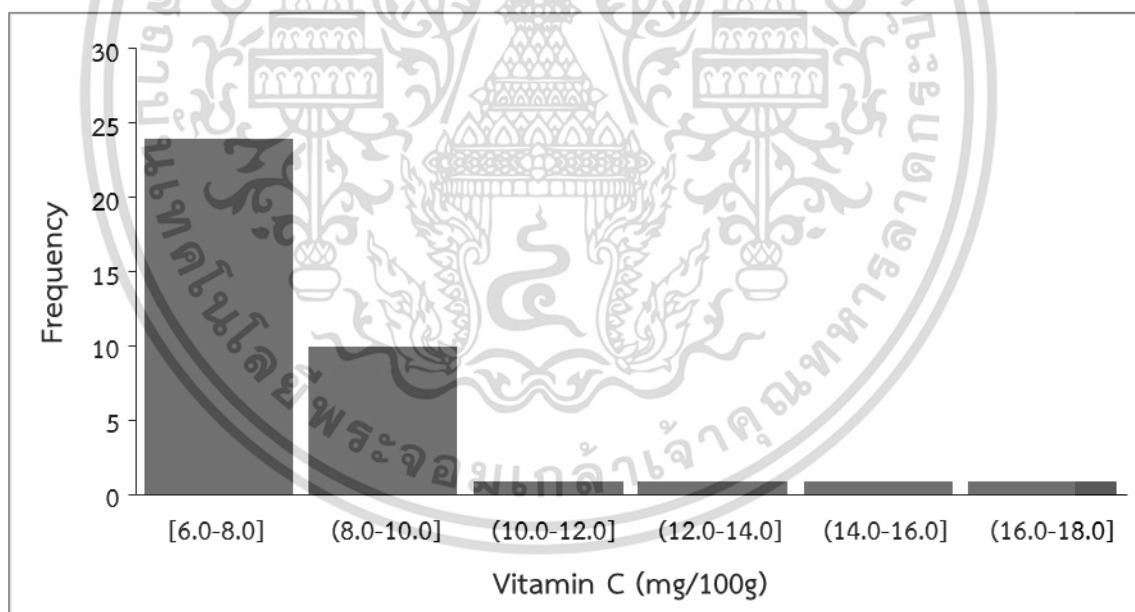
4.3.3.2 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro

ภาพที่ 4.15 แสดงกราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดคาลิเบรชัน ซึ่งค่าปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP เท่ากับ 5.374 – 24.140 mg/100g จากภาพที่ 4.15 ค่าปริมาณวิตามินซีถูกแบ่งให้มีความกว้างของแต่ละช่วงคือ 3 mg/100g และพบว่าค่าวิตามินซีที่มีความถี่สูงสุดเท่ากับ 110 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง 5.3 – 8.3 mg/100g และสำหรับปริมาณวิตามินซีของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงอื่นๆ มีการกระจายความถี่ดังภาพ

ภาพที่ 4.16 แสดงกราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดทดสอบ ซึ่งค่าปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP เท่ากับ 6.091 – 16.465 mg/100g จากภาพที่ 4.16 ค่าปริมาณวิตามินซีถูกแบ่งให้มีความกว้างของแต่ละช่วงคือ 3 mg/100g และพบว่าค่าวิตามินซีที่มีความถี่สูงสุดเท่ากับ 24 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง 6.0 – 8.0 mg/100g และสำหรับปริมาณวิตามินซีของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงอื่นๆ มีการกระจายความถี่ดังภาพ



ภาพที่ 4.15 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดคาลิเบรชัน

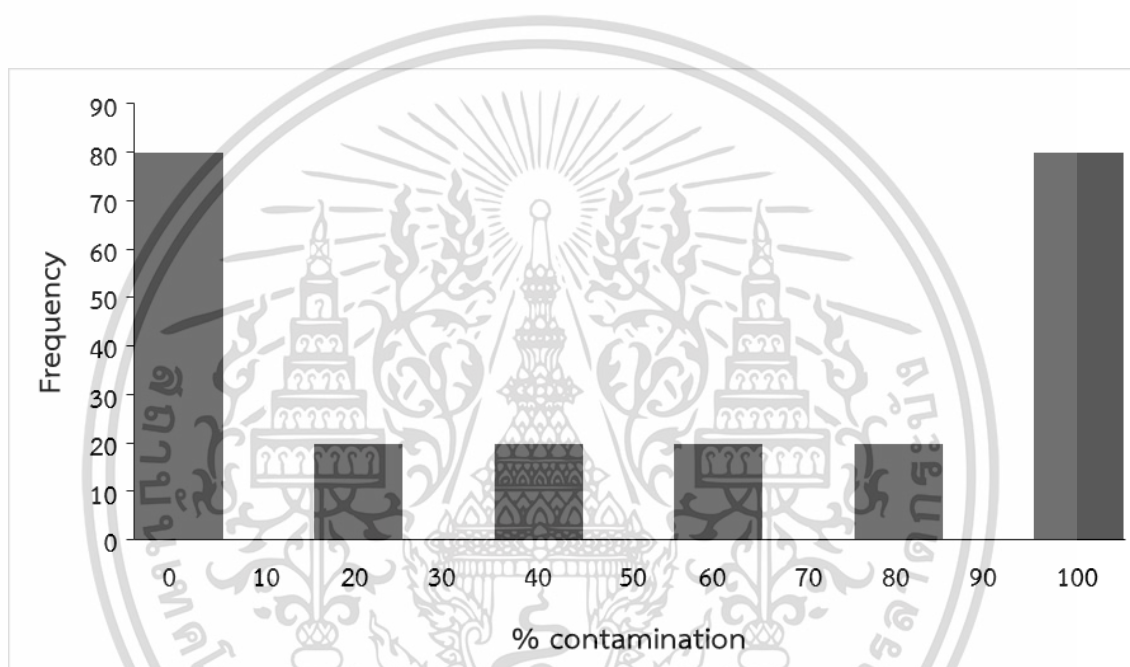


ภาพที่ 4.16 การกระจายความถี่ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ได้จากสเปกตรัมของ Micro-NIR Pro ของชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

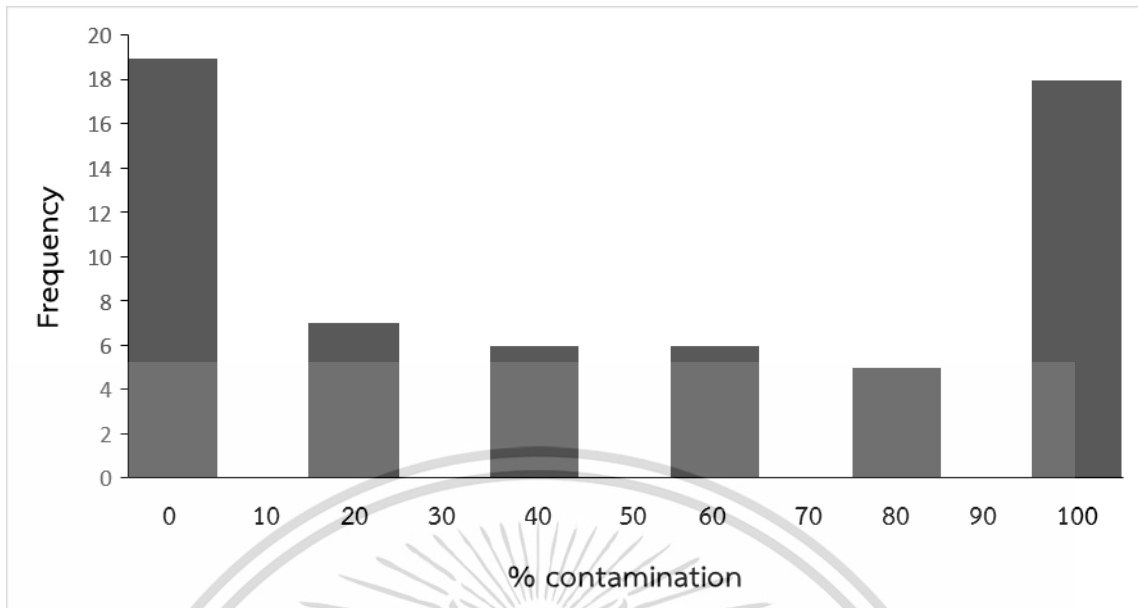
4.3.4 การกระจายความถี่ของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP

ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายความถี่ของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจากทั้ง FT-NIR spectrometer และ Micro-NIR Pro ของชุดคาลิเบรชัน จะเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ของตัวอย่างในช่วง 0 – 100 mg/100g คือเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP มีความถี่สูงที่ 0% และ 100% และสำหรับเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์อื่นๆ มีการกระจายความถี่ดังภาพ



ภาพที่ 4.17 การกระจายความถี่ของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ของชุดคาลิเบรชัน

ภาพที่ 4.18 แสดงกราฟฮิสโตแกรมแสดงการกระจายความถี่ของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจากทั้ง FT-NIR spectrometer และ Micro-NIR Pro ของชุดทดสอบ จะเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ของตัวอย่างในช่วง 0 – 100 mg/100g คือเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP มีความถี่สูงที่ 0% และ 100% และสำหรับเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์อื่นๆ มีการกระจายความถี่ดังภาพ



ภาพที่ 4.18 การกระจายความถี่ของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ของชุดทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 แบบจำลองในการทำนายวิตามินซีในมะเขือเทศ

4.4.1 แบบจำลองของวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไป

4.4.1.1 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

จากตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองทำนาย ซึ่งมีการเรียงลำดับค่าน้อยที่สุดถึงค่ามากที่สุดและจัดตัวอย่างเข้าสู่ชุดคาลิเบรชันและชุดทดสอบในอัตราส่วน 80 : 20 ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129 โดยค่าค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดอยู่ในชุดคาลิเบรชัน ตารางที่ 4.5 แสดงผลของการทำ Partial Least Squares (PLS) สำหรับปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไป พบว่าแบบจำลองในการทำนายที่ดีที่สุดได้มาจากช่วงเลขคลื่น 12489.5-11594.6, 10715.2-9820.3, 8933.2-8038.3, 5376.9-3594.9 cm^{-1} (800.7-862.5, 933.3-1018.3, 1119.4-1244, 1859.8-2781.7 nm) ได้มาจากการพัฒนาสเปกตรัมด้วยวิธีแบบ 1st Derivative + Vector Normalization โดยมีค่า R^2 , RMSEP, RPD และ Bias คือ 0.308, 4.25 mg/100g, 1.25 และ 1.13 mg/100g ตามลำดับ เมื่อนำผลค่า R^2 ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางที่ 2.4 ระบุว่าแบบจำลองปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ดีและมีความสัมพันธ์ที่ไม่ดี เมื่อนำผล RPD ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางอธิบายค่า RPD (ตารางที่ 2.6) ระบุว่าแบบจำลองปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ดี ไม่แนะนำให้ใช้ในการทำนาย

ตารางที่ 4.4 ค่าทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

Calibration set					Prediction set				
N	Max	Min	Average	SD	N	Max	Min	Average	SD
80	24.140	5.374	9.150	3.972	19	23.996	5.607	10.493	5.125

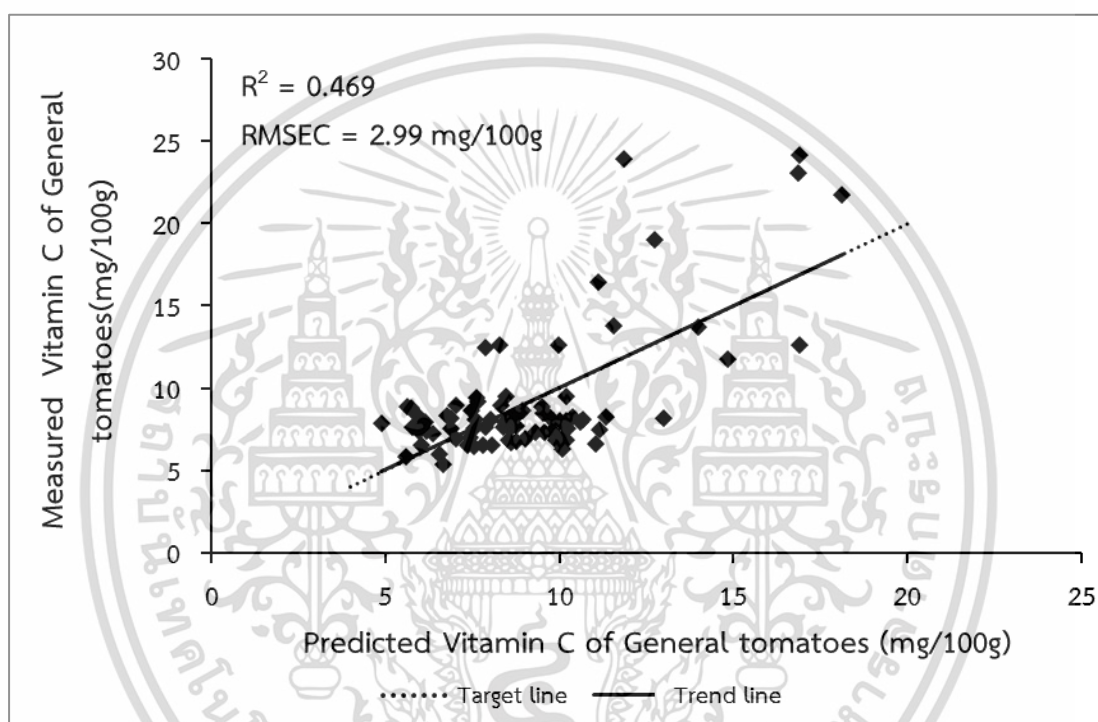
ตารางที่ 4.5 ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

Number of factors	Wavenumber (cm^{-1})	Processing	Calibration		Prediction			Bias (mg/100g)
			R^2	RMSEC (mg/100g)	r^2	RMSEP (mg/100g)	RPD	
5	12489.5-11594.6 10715.2-9820.3 8933.2-8038.3 5376.9-3594.9	1 st Derivative + Vector Normalization	0.469	2.99	0.308	4.15	1.25	1.13

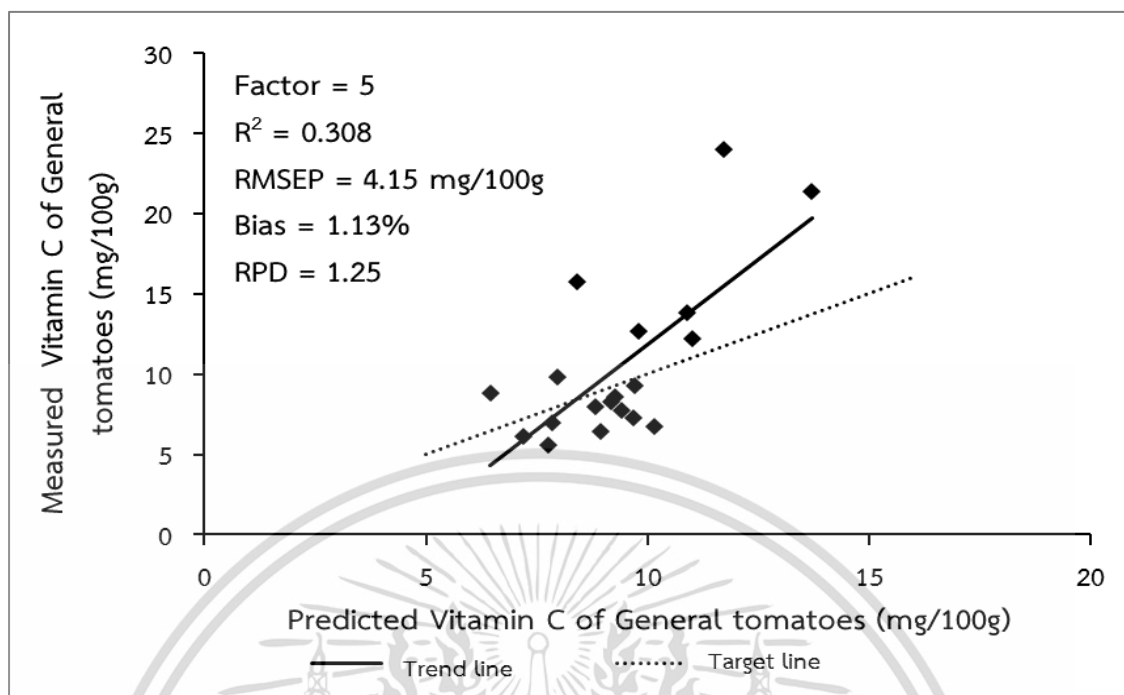
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.19 และภาพที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าอ้างอิงของชุดคาลิเบรชันและชุดทดสอบ พฤติกรรมดังภาพจะแสดงให้เห็นว่า NIR ทำนายคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง ยกตัวอย่างเช่นภาพที่ 4.19 มีตัวอย่างที่ได้จากการวัดค่าอ้างอิงปริมาณวิตามินซีมีค่าประมาณ 18 mg/100g และค่าการทำนายจากเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีค่าประมาณ 13 mg/100g ซึ่งการวัดค่าอ้างอิงและค่าการทำนายจากเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีค่าไม่เท่ากันเกิดความคลาดเคลื่อนไปมาก เห็นได้ว่าทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมคล้ายกัน ตัวอย่างจำนวนมากมีการเกาะกลุ่มกันและมีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น



ภาพที่ 4.19 การเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับค่าปริมาณวิตามินซีของชุดคาลิเบรชัน จาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129



ภาพที่ 4.20 การเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับค่าปริมาณวิตามินซีของชุดทดสอบจาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

4.4.1.2 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

จากตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลทางสถิติของปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองทำนาย โดยใช้ Test set validation ซึ่งมีการเรียงลำดับค่าน้อยที่สุดถึงค่ามากที่สุด ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3 และจัดตัวอย่างเข้าสู่ชุดคาลิเบรชันและชุดทดสอบในอัตราส่วน 80 : 20 โดย 8 ตัวอย่างแรกเข้าสู่ชุดคาลิเบรชัน และ 2 ตัวอย่างถัดมาเข้าสู่ชุดทดสอบ (ค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดอยู่ในชุดคาลิเบรชัน) ทำเช่นนี้จนครบจำนวนตัวอย่าง ตารางที่ 4.7 แสดงผลของการทำ PLS โดยใช้การจัดการสเปกตรัมแบบ De-trending พบว่าแบบจำลองในการทำนายที่ดีที่สุดมีค่า R^2 , RMSEP, RPD และ Bias คือ NA, 2.451 mg/100g, 0.856 และ 0.368 mg/100g ตามลำดับ พบว่าค่า R^2 ที่ได้คือ NA (Not Available) หมายถึงไม่มีคำตอบหรือหาค่าไม่ได้ แสดงว่าเป็นแบบจำลองของมะเขือเทศทั่วไปเป็นแบบจำลองที่ไม่ดีและไม่ควรนำมาใช้และเมื่อนำผลค่า RPD ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางอธิบายความหมายค่า RPD (ตารางที่ 2.6) ระบุว่าไม่แนะนำให้ใช้แบบจำลองทำนาย

ตารางที่ 4.6 ค่าทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

Calibration set					Prediction set				
N	Max	Min	Average	SD	N	Max	Min	Average	SD
81	24.140	5.374	9.599	4.546	18	13.820	6.511	8.546	2.133

ตารางที่ 4.7 ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายปริมาณของวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปจาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

Number of factors	Wavelength (nm)	Processing	Calibration		Prediction			
			R ²	RMSEC (mg/100g)	r ²	RMSEP (mg/100g)	RPD	Bias (mg/100g)
4	950 – 1650	De-trending	0.349	3.643	NA	2.451	0.856	0.368

4.4.2 แบบจำลองของวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP

4.4.2.1 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

จากตารางที่ 4.8 แสดงข้อมูลทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองทำนาย ซึ่งมีการเรียงลำดับค่าน้อยที่สุดถึงค่ามากที่สุดและจัดตัวอย่างเข้าสู่ชุดคาลิเบรชันและชุดทดสอบในอัตราส่วน 80 : 20 ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129 โดยค่าค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดอยู่ในชุดคาลิเบรชัน ตารางที่ 4.9 แสดงผลของการทำ PLS สำหรับปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP พบว่าแบบจำลองในการทำนายที่ดีที่สุดได้มาจาก ช่วงเลขที่คลื่น 10715.2-9820.3, 8046-7151.2, 6264-5369.2 cm⁻¹ (933.2-1018, 1242-1398.4, 1596.4-1862.5 nm) ได้มาจากการพัฒนาสเปกตรัมด้วยวิธีแบบ Constant offset elimination โดยมีค่า R² RMSEP RPD และ Bias คือ 0.698, 0.688 mg/100g, 1.82 และ -0.050 mg/100g ตามลำดับ เมื่อนำผลค่า R² ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางแปลค่า R² (ตารางที่ 2.4) ระบุว่าแบบจำลองปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการคัดเลือกแบ่งกลุ่มและการประมาณค่าอย่างหยาบๆ เมื่อนำผล RPD ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางอธิบายค่า RPD (ตารางที่ 2.6) ระบุว่าแบบจำลองปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP เป็นแบบจำลองที่ไม่ดีและไม่แนะนำให้ใช้ในการทำนาย

ตารางที่ 4.8 ค่าทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

Calibration set					Prediction set				
N	Max	Min	Average	SD	N	Max	Min	Average	SD
79	10.159	5.478	7.624	0.996	19	9.815	5.527	7.537	1.286

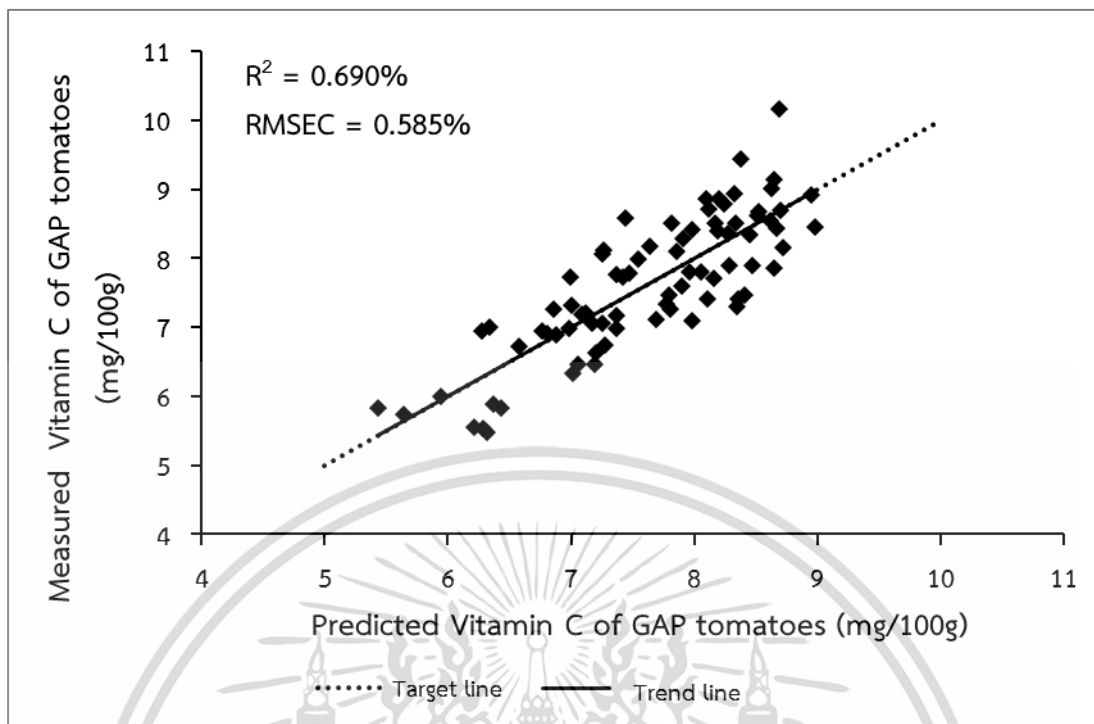
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

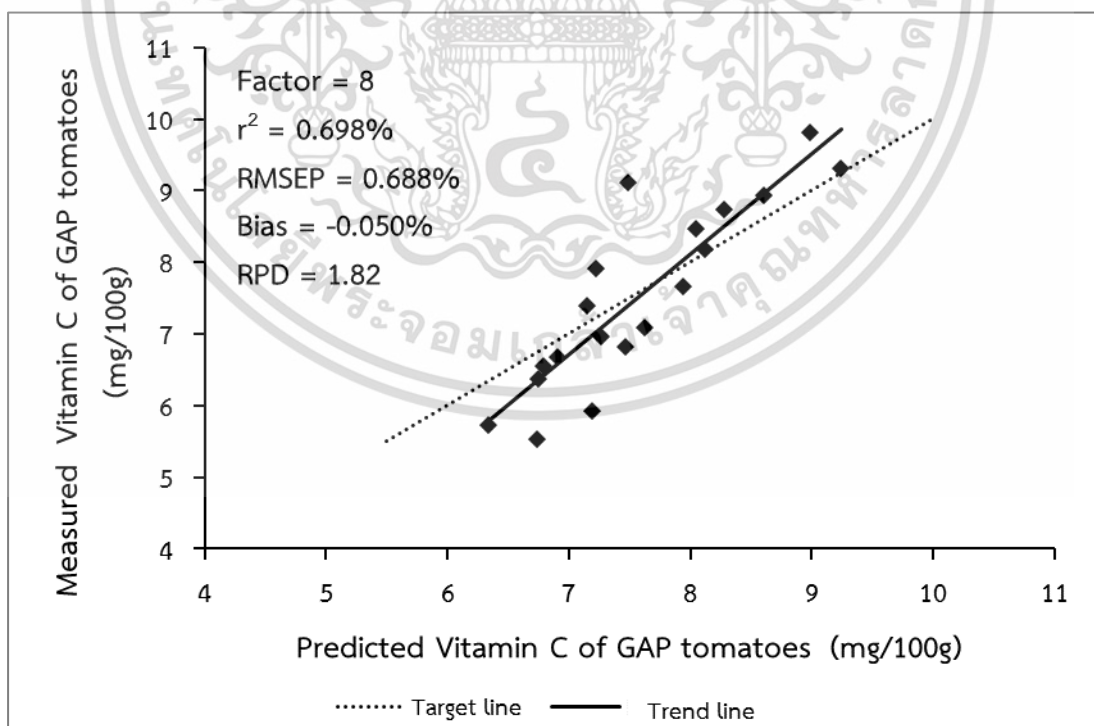
Number of factors	Wavenumber (cm ⁻¹)	Processing	Calibration			Prediction		
			R ²	RMSEC (mg/100g)	r ²	RMSEP (mg/100g)	RPD	Bias (mg/100g)
8	10715.2-9820.3 8046-7151.2 6264-5369.2	Constant offset elimination	0.690	0.585	0.698	0.688	1.82	-0.050

จากภาพที่ 4.21 และภาพที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าอ้างอิงของชุดคาลิเบรชันและชุดทดสอบ พฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่า NIR ทำนายคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง ยกตัวอย่างเช่น ภาพที่ 4.21 มีตัวอย่างที่ได้จากการวัดค่าอ้างอิงของปริมาณวิตามินซีมีค่าประมาณ 9.4 mg/100g และค่าการทำนายจากเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีค่าประมาณ 8.4 mg/100g ภาพที่ 4.22 ตัวอย่างที่ได้จากการวัดค่าอ้างอิงปริมาณวิตามินซีมีค่าประมาณ 5.8 mg/100g และค่าการทำนายจากเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีค่าประมาณ 7.3 mg/100g ซึ่งการวัดค่าอ้างอิงและค่าการทำนายจากเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีค่าไม่เท่ากัน เกิดความคลาดเคลื่อนไปมาก จะเห็นได้ว่าทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมคล้ายกันและเป็นมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น

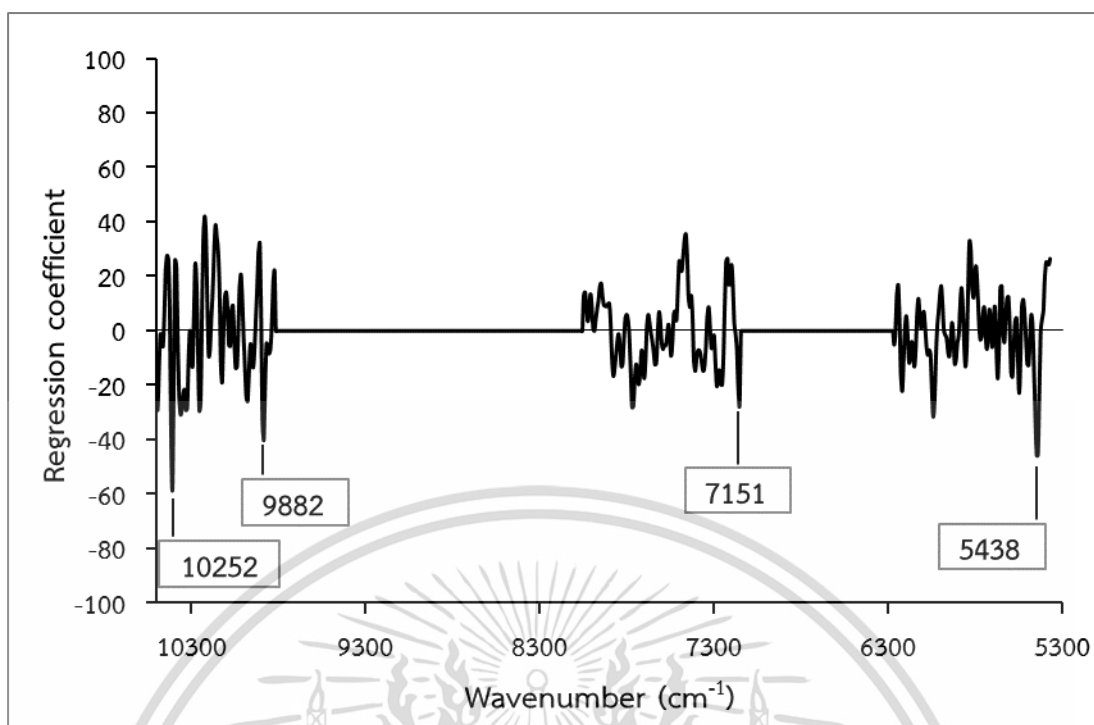
ภาพที่ 4.23 แสดงกราฟ Regression coefficient ของแบบจำลองปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ซึ่งช่วงคลื่นที่มีค่า Regression coefficient สูง สรุปลไว้ในตารางที่ 4.10 เป็นตารางแสดงค่า Regression coefficient ซึ่งแสดงการสั่นสะเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP จะเห็นได้ว่าแถบการดูดซับคลื่นที่ 10252 cm⁻¹ (975 nm) ซึ่งใกล้เคียงกับการสั่นสะเทือนของ O-H ที่ 9882 และ 7151 cm⁻¹ (1011 และ 1398 nm) ซึ่งใกล้เคียงกับการสั่นสะเทือนของ C-H และที่ 5438 cm⁻¹ (1839 nm) ใกล้เคียงกับการสั่นสะเทือนของ C-H และ O-H ภาพที่ 4.24 แสดงกราฟ X-loading weight ของแบบจำลอง ซึ่งผลที่ได้มีค่า X-loading weight สูง ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งแสดงการสั่นสะเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่น 7151 cm⁻¹ (1398 nm) แสดงค่า X-loading weight สูงสุดของ PLS Vector 1 และ PLS Vector 3 ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ C-H และที่ 7174 cm⁻¹ (1389 nm) ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ C-H แสดงค่า X-loading weight สูงสุดของ PLS Vector 2 จะเห็นได้ว่าการสั่นสะเทือนของพันธะที่สำคัญเกี่ยวข้องกับ O-H และ C-H มีอิทธิพลต่อการทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP [65]



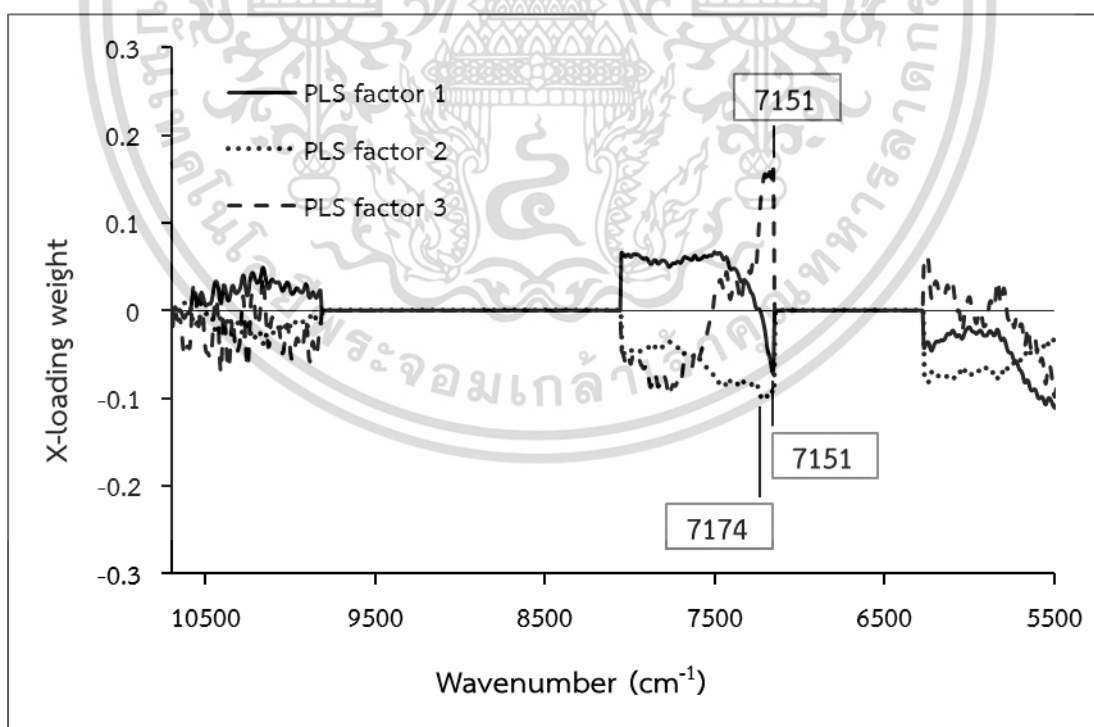
ภาพที่ 4.21 การเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP กับค่าปริมาณวิตามินซีของชุดคาลิเบรชันจาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129



ภาพที่ 4.22 การเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP กับค่าปริมาณวิตามินซีของชุดทดสอบจาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.23 Regression coefficient plot ของแบบจำลองปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ที่สร้างด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129



ภาพที่ 4.24 X-loading plot ของแบบจำลองปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ที่สร้างด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ความยาวคลื่นที่มีค่า Regression coefficient หรือ X-loading ของแบบจำลองทำนายปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศ GAP สูงและแถบการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางเคมีที่สอดคล้องกัน [65]

Appeared		Cited		Functional Group	Spectra-Structure	Source			
(cm ⁻¹)	(nm)	(cm ⁻¹)	(nm)			R	F1	F2	F3
10252	975	10309	970	O-H str. second overtone	ROH, H ₂ O	*			
9882	1011	9852	1015	2 × C-H str. + 3 × C-H def.	CH ₃	*			
7151	1398	7168	1395	2 × C-H str. + C-H def.	CH ₂	*	*		*
7174	1389	7168	1395	2 × C-H str. + C-H def.	CH ₂			*	
5438	1839	5464	1830	O-H str. + 2 × C - O str.	Hemicellulose	*			

4.4.2.2 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

จากตารางที่ 4.11 แสดงข้อมูลทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ใช้สร้างแบบจำลองทำนาย โดยใช้ Test set validation ซึ่งมีการเรียงลำดับค่าน้อยที่สุดถึงค่ามากที่สุด ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3 และจัดตัวอย่างเข้าสู่ชุดคาลิเบรชันและชุดทดสอบในอัตราส่วน 80 : 20 โดย 8 ตัวอย่างแรกเข้าสู่ชุดคาลิเบรชัน และ 2 ตัวอย่างถัดมาเข้าสู่ชุดทดสอบ (ค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดอยู่ในชุดคาลิเบรชัน) ทำเช่นนี้จนครบจำนวนตัวอย่าง ตารางที่ 4.12 แสดงผลของการทำ PLS โดยใช้การจัดการสเปกตรัมแบบ Peak Normalization พบว่าแบบจำลองในการทำนายที่ดีที่สุด มีค่า R^2 , RMSEP, RPD และ Bias คือ NA, 0.977 mg/100g, 0.906 และ 0.083 mg/100g ตามลำดับ จะพบว่าค่า R^2 ที่ได้คือ NA (Not Available) หมายถึงไม่มีคำตอบหรือหาค่าไม่ได้ แสดงว่าเป็นแบบจำลองของมะเขือเทศ GAP เป็นแบบจำลองที่ไม่ดีและไม่ควรนำมาใช้ และเมื่อนำผลค่า RPD ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางอธิบายความหมายค่า RPD (ตารางที่ 2.6) ระบุว่าไม่แนะนำให้ใช้แบบจำลองทำนาย

ตารางที่ 4.11 ค่าทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

Calibration set					Prediction set				
N	Max	Min	Average	SD	N	Max	Min	Average	SD
80	10.159	5.478	7.610	1.082	18	8.929	5.879	7.597	0.908

ตารางที่ 4.12 ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายปริมาณของวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP จาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

Number of factors	Wavelength (nm)	Processing	Calibration			Prediction		
			R^2	RMSEC (mg/100g)	r^2	RMSEP (mg/100g)	RPD	Bias (mg/100g)
6	950 – 1650	Peak Normalization	0.472	0.781	NA	0.977	0.906	0.083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 แบบจำลองของวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP

4.4.3.1 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

จากตารางที่ 4.13 แสดงข้อมูลทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองทำนาย ซึ่งมีการเรียงลำดับค่าน้อยที่สุดถึงค่ามากที่สุดและจัดตัวอย่างเข้าสู่ชุดคาลิเบรชันและชุดทดสอบในอัตราส่วน 80 : 20 ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129 โดยค่าค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดอยู่ในชุดคาลิเบรชัน ตารางที่ 4.14 แสดงผลของการทำ PLS สำหรับปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับ GAP พบว่าแบบจำลองในการทำนายที่ดีที่สุดได้มาจาก ช่วงเลขคลื่น 9828-8038.3, 7158.9-6256.3, 5376.9-3594.9 cm^{-1} (1017-1244, 1397-1598, 1860-2782 nm) ได้มาจากการพัฒนาสเปกตรัมด้วยวิธีแบบ 1st Derivative + Vector Normalization โดยมีค่า R^2 RMSEP RPD และ Bias คือ 0.330 , 3.2 mg/100g, 1.25 และ 0.728 mg/100g ตามลำดับ เมื่อนำผลค่า R^2 ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางแปลค่า R^2 (ตารางที่ 2.4) ระบุว่าแบบจำลองปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับ GAP เป็นแบบจำลองที่ไม่ดีและความสัมพันธ์ที่ไม่ดี เมื่อนำผล RPD ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางอธิบายค่า RPD (ตารางที่ 2.6) ระบุว่ายังเป็นแบบจำลองที่ไม่ดีและไม่แนะนำให้ใช้ในการทำนาย

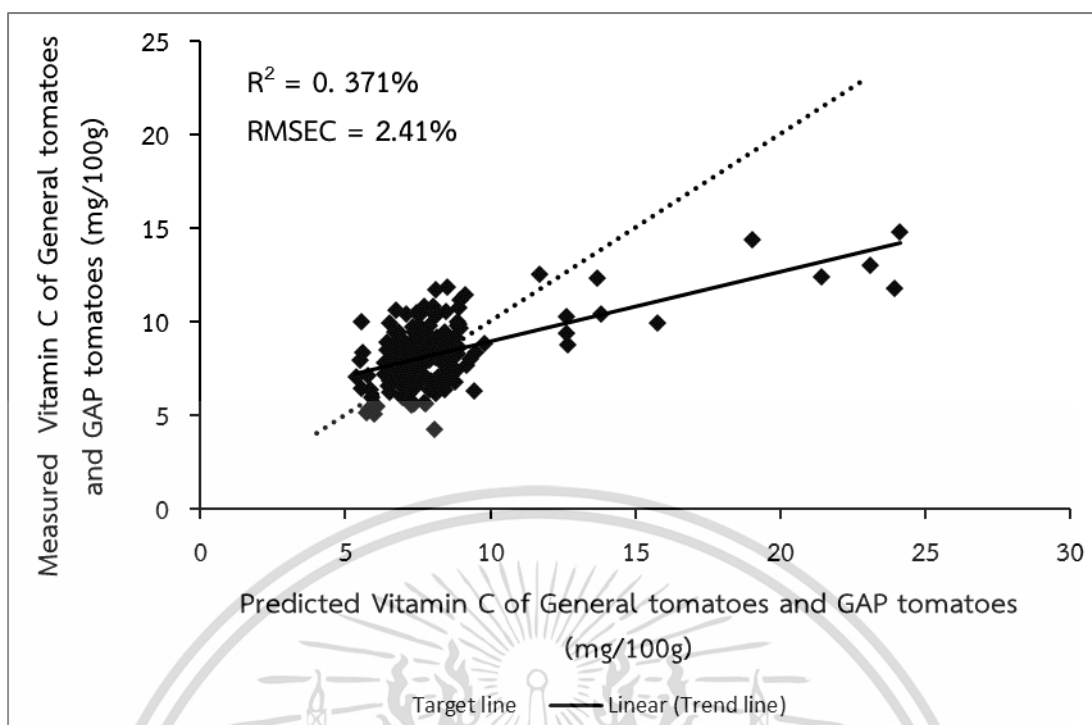
ตารางที่ 4.13 ค่าทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

Calibration set					Prediction set				
N	Max	Min	Average	SD	N	Max	Min	Average	SD
158	24.140	5.374	8.319	2.972	39	23.996	5.478	9.294	3.966

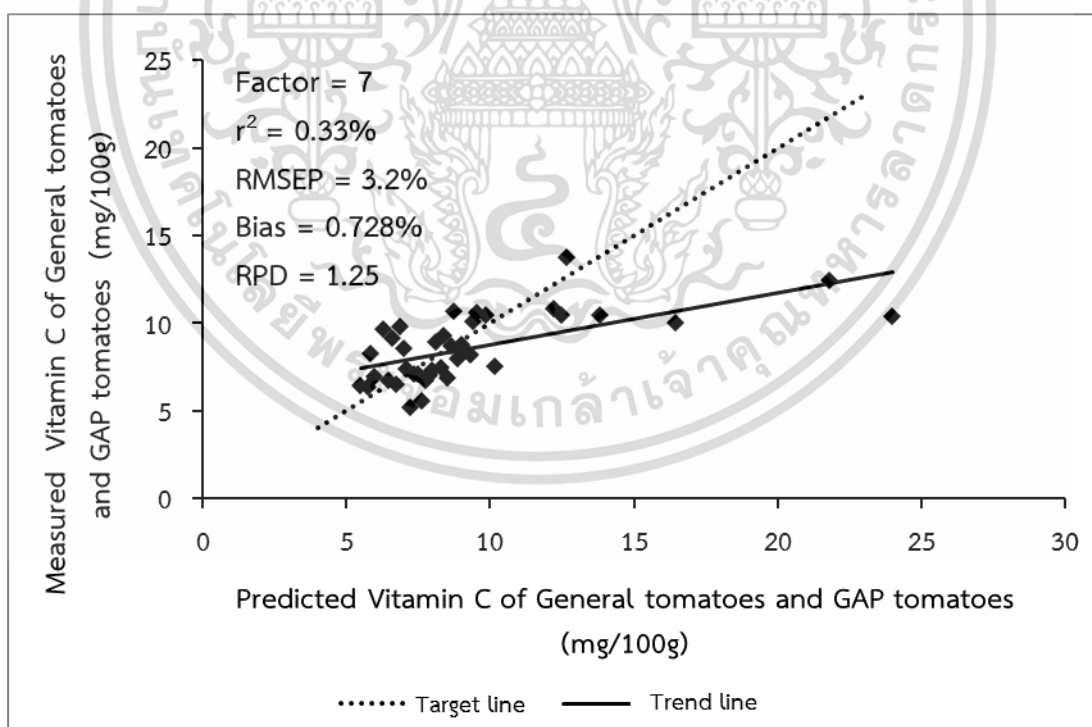
ตารางที่ 4.14 ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

Number of factors	Wavenumber (cm^{-1})	Processing	Calibration			Prediction		
			R^2	RMSEC (mg/100g)	r^2	RMSEP (mg/100g)	RPD	Bias (mg/100g)
		1 st						
	9828-8038.3	Derivative						
7	7158.9-6256.3	+ Vector	0.371	2.41	0.33	3.2	1.25	0.728
	5376.9-3594.9	Normaliza-tion						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.25 การเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP กับค่าปริมาณวิตามินซีของชุดคาลิเบรชันจาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129



ภาพที่ 4.26 การเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP กับค่าปริมาณวิตามินซีของชุดทดสอบจาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.25 และภาพที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าอ้างอิงของชุดคาลิเบรชันและชุดทดสอบ พฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่า NIR ทำนายคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง ยกตัวอย่างเช่น ภาพที่ 4.25 มีตัวอย่างที่ได้จากการวัดค่าอ้างอิงของปริมาณวิตามินซีมีค่าประมาณ 15 mg/100g และค่าการทำนายจากเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีค่าประมาณ 20 mg/100g ภาพที่ 4.26 ตัวอย่างที่ได้จากการวัดค่าอ้างอิงปริมาณวิตามินซีมีค่าประมาณ 10 mg/100g และค่าการทำนายจากเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีค่าประมาณ 25 mg/100g ซึ่งการวัดค่าอ้างอิงและค่าการทำนายจากเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีค่าแตกต่างกันมาก เกิดความคลาดเคลื่อนไปมาก จะเห็นได้ว่าทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมคล้ายกันและมีการเกาะกลุ่มกันและมีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น

4.4.3.2 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

จากตารางที่ 4.15 แสดงข้อมูลทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ใช้สร้างแบบจำลองทำนาย โดยใช้ Test set validation ซึ่งมีการเรียงลำดับค่าน้อยที่สุดถึงค่ามากที่สุดด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3 และจัดตัวอย่างเข้าสู่ชุดคาลิเบรชันและชุดทดสอบในอัตราส่วน 80 : 20 โดย 8 ตัวอย่างแรกเข้าสู่ชุดคาลิเบรชัน และ 2 ตัวอย่างถัดมาเข้าสู่ชุดทดสอบ (ค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดอยู่ในชุดคาลิเบรชัน) ทำเช่นนั้นจนครบจำนวนตัวอย่าง ตารางที่ 4.16 แสดงผลของการทำ PLS โดยใช้การจัดการสเปกตรัมแบบ De-trending พบว่าแบบจำลองในการทำนายที่ดีที่สุด มีค่า R^2 , RMSEP, RPD และ Bias คือ NA, 2.859 mg/100g, 1.262 และ 0.547 mg/100g ตามลำดับ พบว่าค่า R^2 ที่ได้คือ NA (Not Available) หมายถึงไม่มีคำตอบหรือหาค่าไม่ได้ แสดงว่าเป็นแบบจำลองของมะเขือเทศ GAP เป็นแบบจำลองที่ไม่ดีและไม่ควรนำมาใช้ และเมื่อนำผลค่า RPD ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางอธิบายความหมายค่า RPD (ตารางที่ 2.6) ระบุว่าไม่แนะนำให้ใช้แบบจำลองทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP

ตารางที่ 4.15 ค่าทางสถิติของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

Calibration set					Prediction set				
N	Max	Min	Average	SD	N	Max	Min	Average	SD
159	24.139	5.374	8.523	3.377	38	16.465	6.091	8.272	2.254

ตารางที่ 4.16 ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายปริมาณของวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP จาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

Number of factors	Wavelength (nm)	Processing	Calibration		Validation			
			R^2	RMSEC (mg/100g)	r^2	RMSEP (mg/100g)	RPD	Bias (mg/100g)
5	950 – 1650	De-trending	0.449	2.508	NA	2.859	0.793	0.547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 แบบจำลองของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP

4.4.4.1 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

จากตารางที่ 4.17 แสดงข้อมูลทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองทำนาย โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS โดยใช้มะเขือเทศทั่วไปผสมมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% โดยใช้ Test set validation ตารางที่ 4.18 แสดงผลของการทำ PLS พบว่าแบบจำลองในการทำนายที่ดีที่สุด มีค่า R^2 , RMSEP, RPD และ Bias คือ 0.74, 21.1%, 1.98 และ -2.56% ตามลำดับ พบว่าเมื่อนำผลค่า R^2 ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางแปลค่า R^2 (ตารางที่ 2.4) ระบุว่าแบบจำลองเปอร์เซ็นต์ของมะเขือเทศผสมเหมาะสำหรับการคัดเลือกแบ่งกลุ่มและการประมาณค่าอย่างหยาบๆ และเมื่อนำผลค่า RPD ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางอธิบายความหมายค่า RPD (ตารางที่ 2.6) ระบุว่าเหมาะสำหรับการประมาณค่าแบบหยาบๆ

ตารางที่ 4.17 ค่าทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

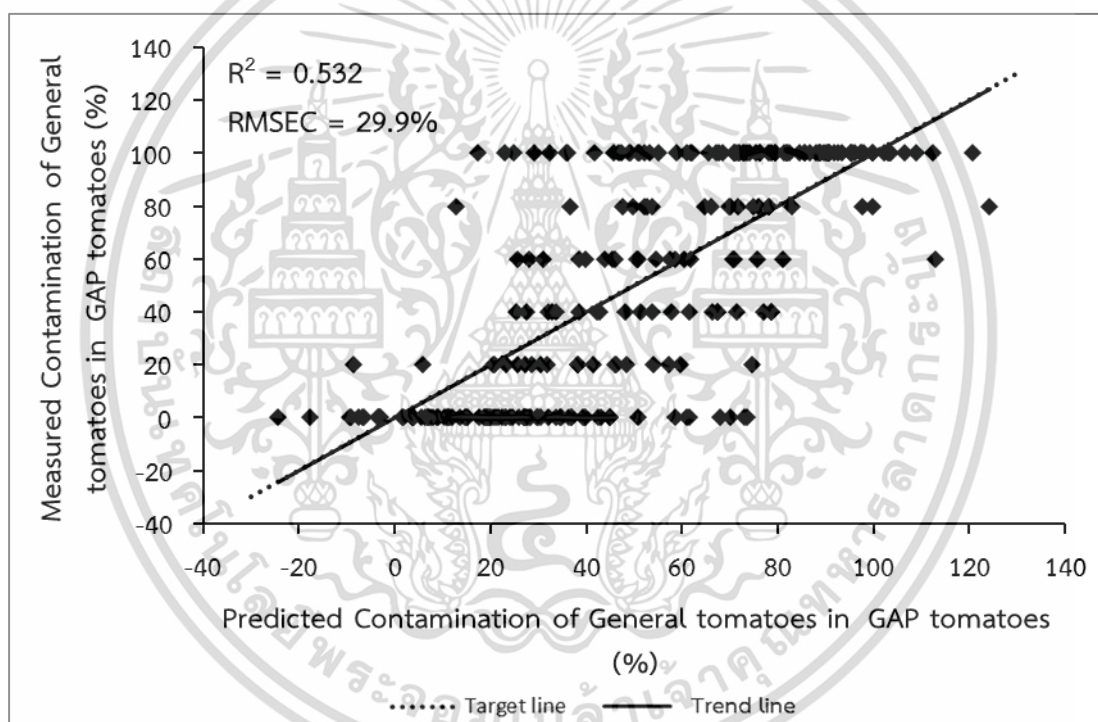
Calibration set					Prediction set				
N	Max	Min	Average	SD	N	Max	Min	Average	SD
240	100	0	50	42.91	61	100	0	50.82	41.73

ตารางที่ 4.18 ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

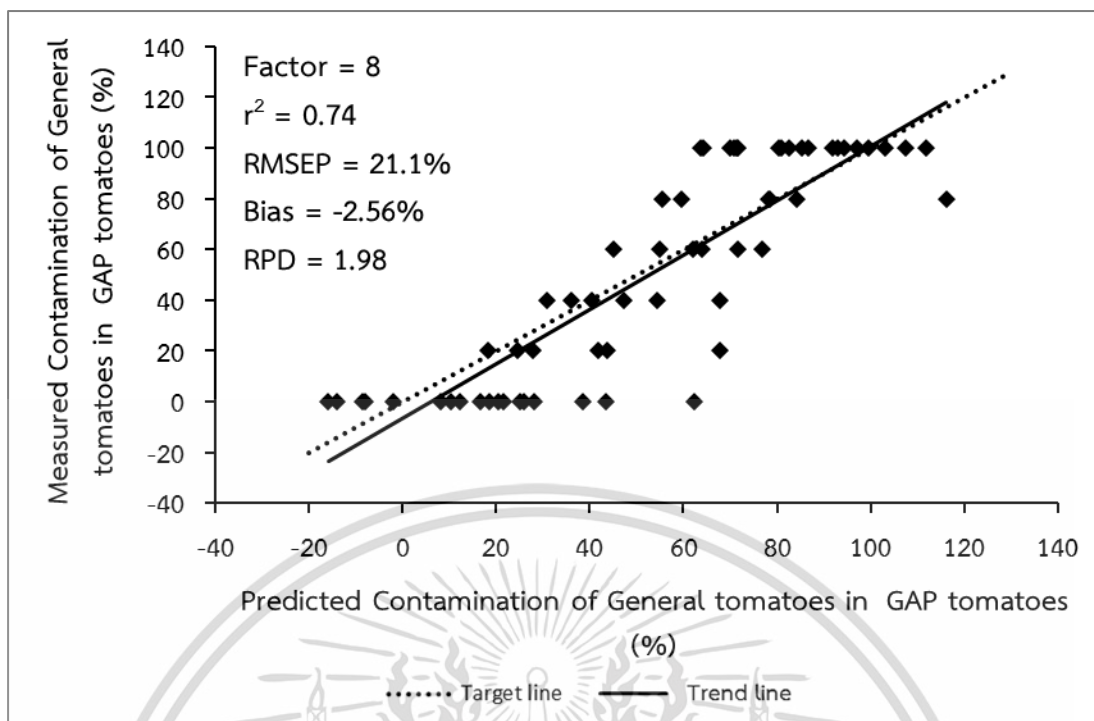
Number of factors	Wavenumber (cm ⁻¹)	Processing	Calibration			Validation		
			R^2	RMSEC (%)	r^2	RMSEP (%)	RPD	Bias (%)
8	8894.6-8370 7860.9-7336.3 6827.2-4752	No spectral data preprocessing	0.532	29.9	0.74	21.1	1.98	-2.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.27 และ 4.28 แสดงแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP (มะเขือเทศทั่วไปผสมมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100%) ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าอ้างอิงของชุดคาลิเบรชันและชุดทดสอบด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129 พฤติกรรมดังภาพจะแสดงให้เห็นว่า NIR ทำนายคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริงเป็นอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น ภาพที่ 4.27 มีตัวอย่างที่ได้จากวิธีอ้างอิงของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP 100% แต่เปอร์เซ็นต์จากการทำนายมีค่าประมาณ 20% ภาพที่ 4.28 ตัวอย่างที่ได้จากวิธีอ้างอิงของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP 40% และเปอร์เซ็นต์จากการทำนายมีค่าประมาณ 70% ซึ่งเปอร์เซ็นต์อ้างอิงและเปอร์เซ็นต์การทำนายมีค่าแตกต่างกันมากและแทบจะไม่ตรงกันเลยเกิดความคลาดเคลื่อนไปมาก จะเห็นได้ว่าทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมคล้ายกันและมีการกระจายตัวเป็นเส้นตรงในแนวราบที่เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ต่างๆ



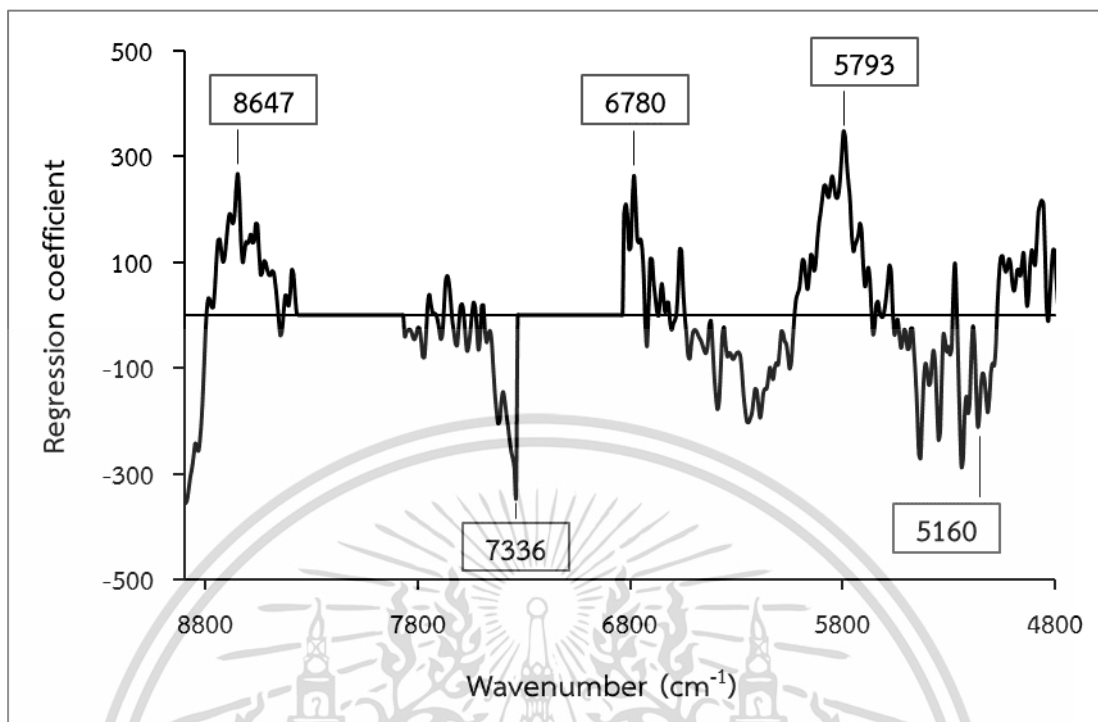
ภาพที่ 4.27 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP กับเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของชุดคาลิเบรชัน จาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129



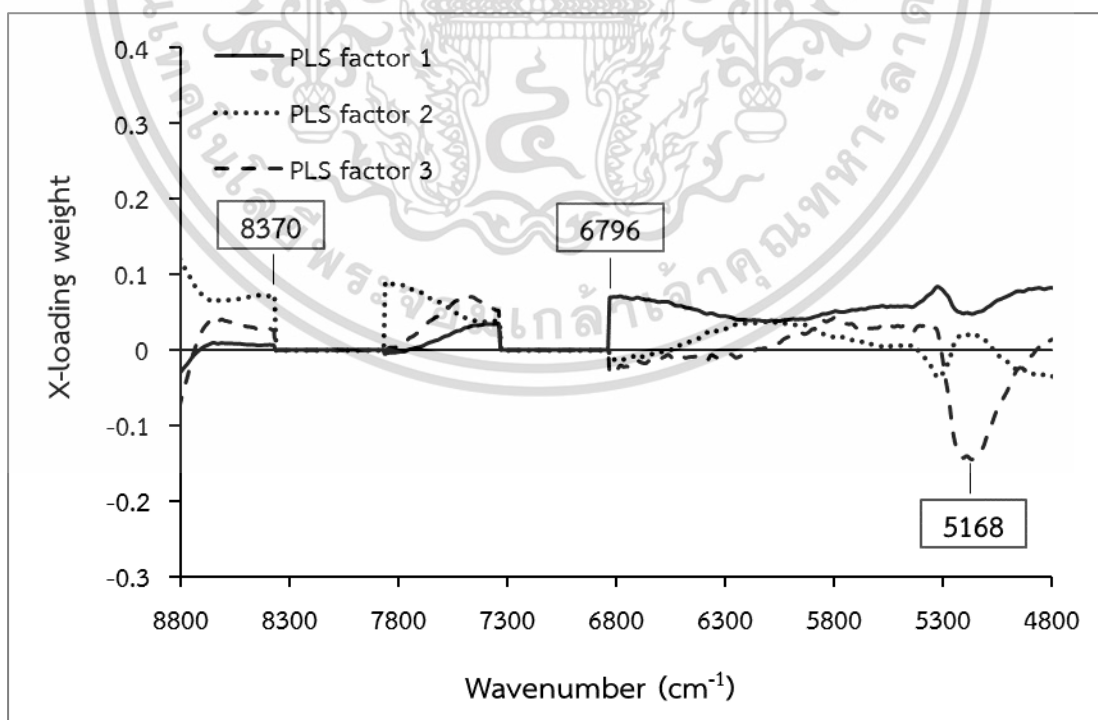
ภาพที่ 4.28 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP กับ เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของชุดทดสอบ จาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129

ภาพที่ 4.29 แสดงกราฟ Regression coefficient ของแบบจำลอง เพื่อทำนาย เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP (มะเขือเทศทั่วไปผสมมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100%) ซึ่งช่วงคลื่นที่มีค่า Regression coefficient สูง สรุปลไว้ในตารางที่ 4.19 เป็นตารางแสดงค่า Regression coefficient ซึ่งแสดงการ สั่นสะเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จะเห็นได้ว่าแถบการดูดซับคลื่นที่ 8647 cm^{-1} (1156 nm) ใกล้เคียงกับพีคของ CH_3 ซึ่งเป็นการ สั่นสะเทือนของ C-H ที่ 7336 cm^{-1} (1363 nm) ใกล้เคียงกับการสั่นสะเทือนของ C-H และ O-H ที่ 6780 cm^{-1} (1474 nm) ใกล้เคียงกับพีคของกลูโคส ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ O-H ที่ 5793 cm^{-1} (1726 nm) ใกล้เคียงกับพีคของ CH_2 ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ C-H และที่ 5160 cm^{-1} (1937 nm) เป็นการสั่นสะเทือนของ O-H ซึ่งใกล้เคียงกับพีคของน้ำ ภาพที่ 4.30 แสดงกราฟ X-loading weight ของแบบจำลอง ซึ่งผลที่ได้มีค่า X-loading weight สูง ดังตารางที่ 4.19 ซึ่งแสดงการสั่นสะเทือนของ พันธะที่มีผลต่อการทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP พบว่าที่ แถบการดูดซับคลื่น 6796 cm^{-1} (1471 nm) แสดงค่า X-loading weight สูงสุดของ PLS Vector 1 ใกล้เคียงกับพีคของกลูโคส ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ O-H ที่ 8370 cm^{-1} (1194 nm) ใกล้เคียง กับพีคของ CH_3 ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ C-H แสดงค่า X-loading weight สูงสุดของ PLS Vector 2 และที่ 5168 cm^{-1} (1934 nm) ใกล้เคียงกับพีคของน้ำ ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ O-H แสดงค่า X-loading weight สูงสุดของ PLS Vector 3 จะเห็นได้ว่าการสั่นสะเทือนของพันธะที่สำคัญเกี่ยวข้อง กับ O-H และ C-H มีอิทธิพลต่อการทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP [65]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.29 Regression coefficient plot ของแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ที่สร้างด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129



ภาพที่ 4.30 X-loading plot ของแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR Spectrometer ที่สร้างด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ความยาวคลื่นที่มีค่า Regression coefficient หรือ X-loading ของแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP สูงและ
 แถบการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางเคมีที่สอดคล้องกัน [65]

Appeared		Cited		Functional Group	Spectra-Structure	Source			
(cm ⁻¹)	(nm)	(cm ⁻¹)	(nm)			R	F1	F2	F3
8647	1156	8650	1152	C-H str. second overtone	CH ₃	*			
8370	1194	8368	1195	C-H str. second overtone	CH ₃			*	
7336	1363	7353	1360	O-H str. + 2 × C - O str.	Hemicellulose	*			
6796	1471	6756	1480	O-H str. first overtone	Glucose		*		
6780	1474	6756	1480	O-H str. first overtone	Glucose	*			
5793	1726	5797	1725	C-H str. first overtone	CH ₂	*			
5168	1934	5154	1940	O-H str. + O-H def.	H ₂ O				*
5160	1937	5154	1940	O-H str. + O-H def.	H ₂ O	*			

4.4.4.2 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

จากตารางที่ 4.20 แสดงข้อมูลทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองทำนาย โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS โดยใช้มะเขือเทศทั่วไปผสมมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% โดยใช้ Test set validation ตารางที่ 4.21 แสดงผลของการทำ PLS พบว่าแบบจำลองในการทำนายที่ดีที่สุด มีค่า R^2 , RMSEP, RPD และ Bias คือ 0.667, 23.85%, 1.799 และ -6.346% ตามลำดับ พบว่าเมื่อนำผลค่า R^2 ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางแปลค่า R^2 (ตารางที่ 2.4) ระบุว่าแบบจำลองเปอร์เซ็นต์ของมะเขือเทศผสมเหมาะสำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบๆ และเมื่อนำผลค่า RPD ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางอธิบายความหมายค่า RPD (ตารางที่ 2.6) ระบุว่าไม่แนะนำให้ใช้แบบจำลองนี้ในการทำนาย

ตารางที่ 4.20 ค่าทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

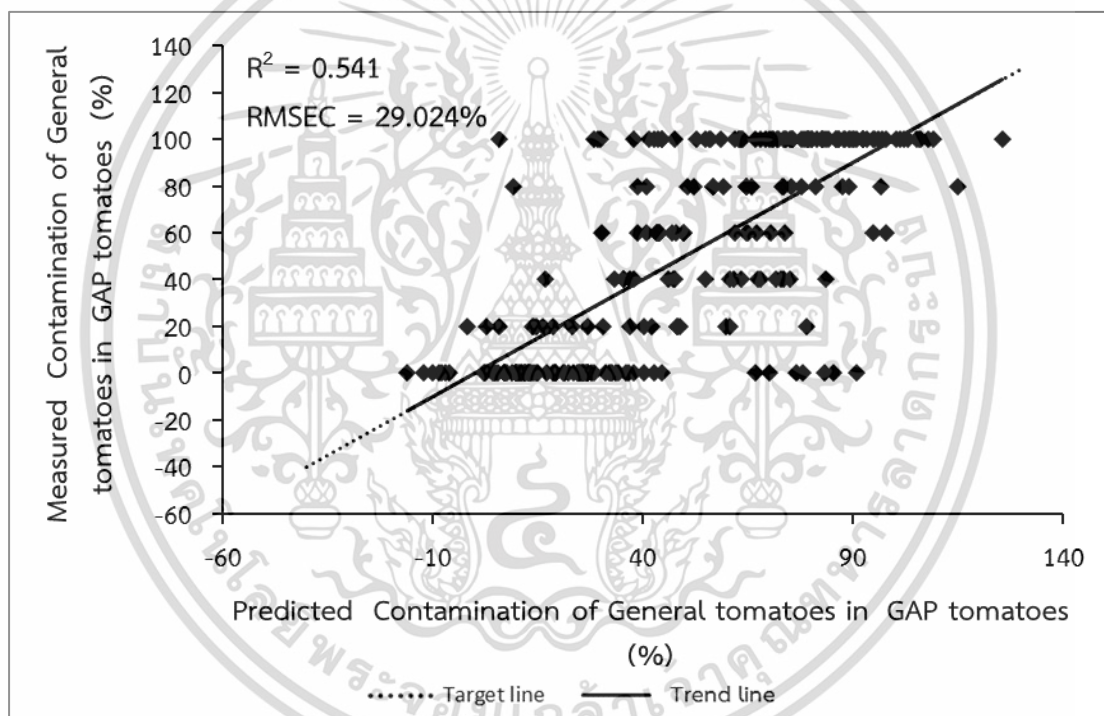
Calibration set					Prediction set				
N	Max	Min	Average	SD	N	Max	Min	Average	SD
240	100	0	50	42.91	61	100	0	51.80	41.69

ตารางที่ 4.21 ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองจาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

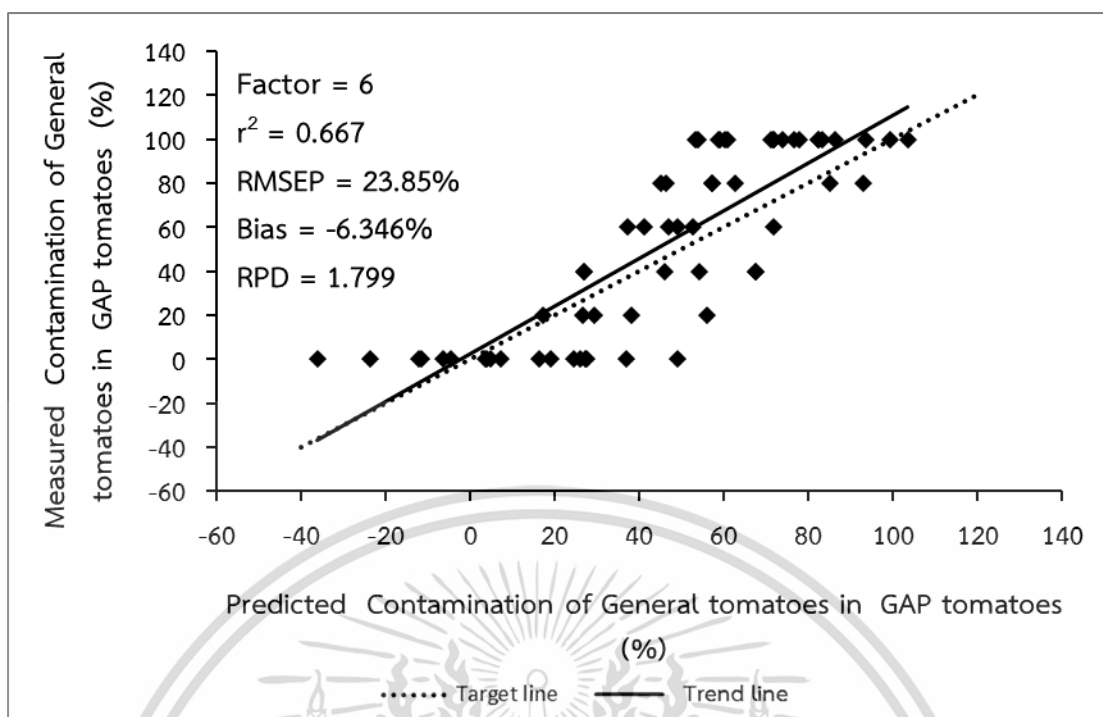
Number of factors	Wavenumber (cm ⁻¹)	Calibration		Validation			
		R^2	RMSEC (%)	r^2	RMSEP (%)	RPD	Bias (%)
8	12500-4000	0.541	29.024	0.667	23.85	1.799	-6.346

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.31 และ 4.32 แสดงแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP (มะเขือเทศทั่วไปผสมมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100%) ที่ทำนายกับค่าอ้างอิงของชุดคาลิเบรชันและชุดทดสอบด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3 พฤติกรรมดังภาพจะแสดงให้เห็นว่า NIR ทำนายคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริงเป็นอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น ภาพที่ 4.31 มีตัวอย่างที่ได้จากวิธีอ้างอิงของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP 80% แต่เปอร์เซ็นต์จากการทำนายมีค่าประมาณ 40% ภาพที่ 4.32 ตัวอย่างที่ได้จากวิธีอ้างอิงของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP 0% และเปอร์เซ็นต์จากการทำนายมีค่าประมาณ -10% ซึ่งเปอร์เซ็นต์อ้างอิงและเปอร์เซ็นต์การทำนายมีค่าแตกต่างกันมากและแทบจะไม่ตรงกันเลย เกิดความคลาดเคลื่อนไปมาก จะเห็นได้ว่าทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมคล้ายกันและมีการกระจายตัวเป็นเส้นตรงในแนวราบที่เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ต่างๆ



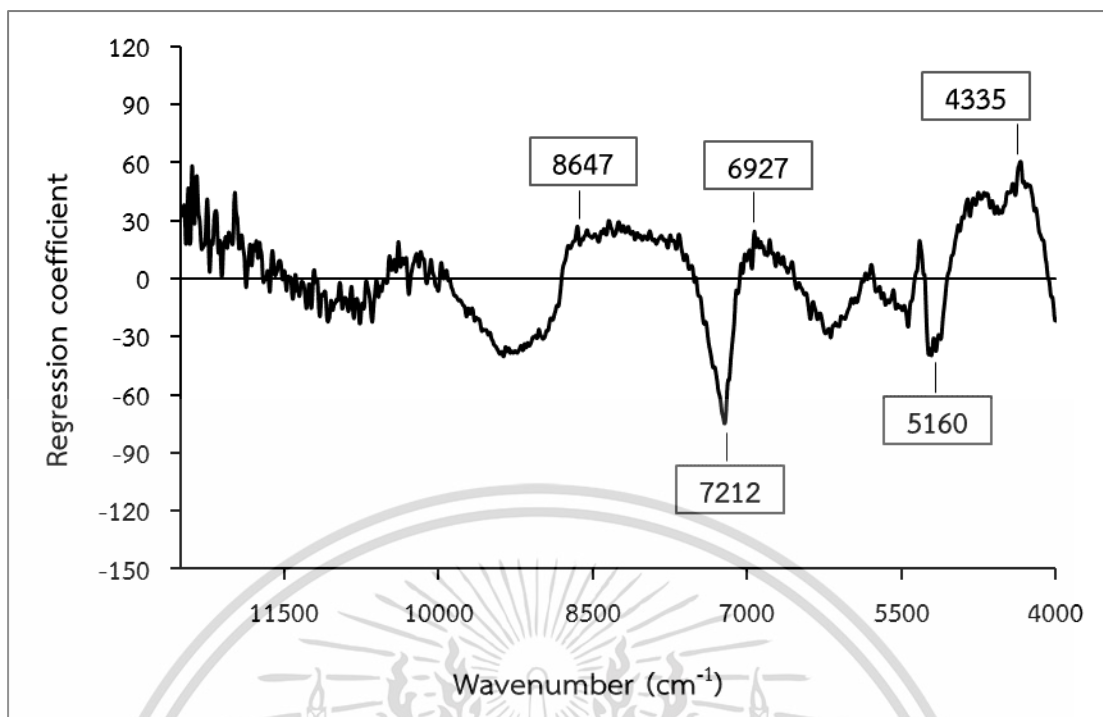
ภาพที่ 4.31 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP กับเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของชุดคาลิเบรชัน จาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3



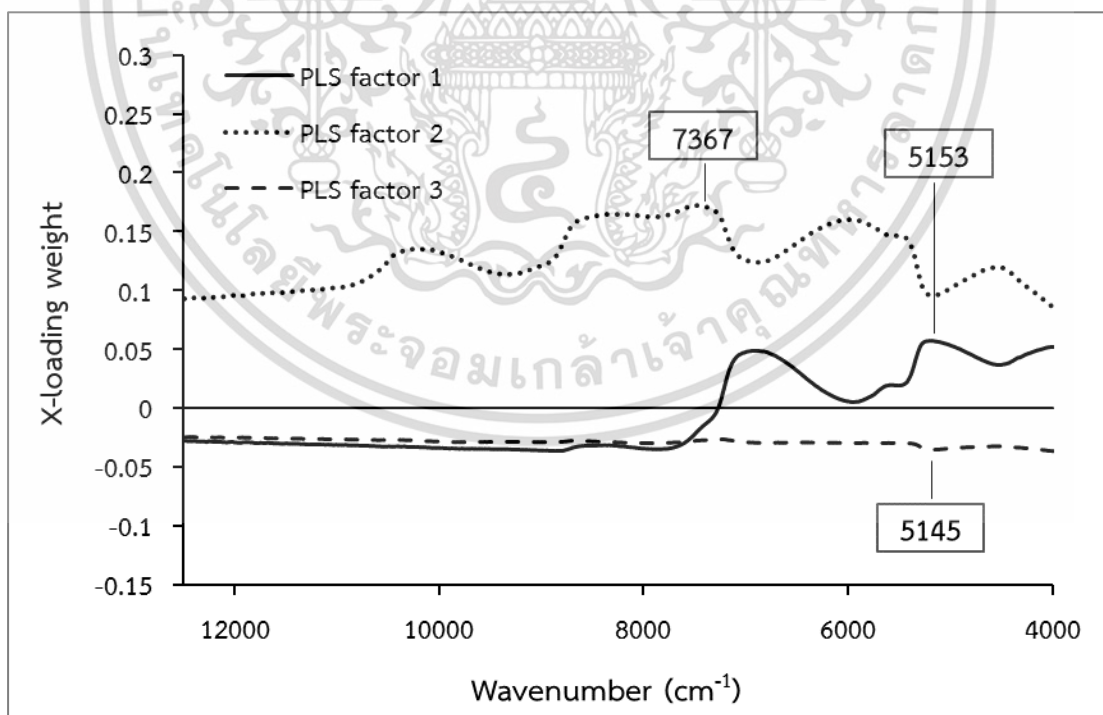
ภาพที่ 4.32 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP กับเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของชุดทดสอบ จาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

ภาพที่ 4.33 แสดงกราฟ Regression coefficient ของแบบจำลอง เพื่อทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP (มะเขือเทศทั่วไปผสมมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100%) ซึ่งช่วงคลื่นที่มีค่า Regression coefficient สูง สรุปไว้ในตารางที่ 4.22 เป็นตารางแสดงค่า Regression coefficient ซึ่งแสดงการสั่นสะเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จะเห็นได้ว่าแถบการดูดซับคลื่นที่ 8647 cm^{-1} (1156 nm) ใกล้เคียงกับพีคของ CH_3 ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ C-H ที่ $7212, 4335\text{ cm}^{-1}$ ($1386, 2306\text{ nm}$) ใกล้เคียงกับพีคของ CH_2 ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ C-H ที่ 6927 cm^{-1} (1443 nm) ใกล้เคียงกับพีคของสตาร์ทและน้ำ ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ O-H และที่ 5160 cm^{-1} (1937 nm) เป็นการสั่นสะเทือนของ O-H ซึ่งใกล้เคียงกับพีคของน้ำ ภาพที่ 4.34 แสดงกราฟ X-loading weight ของแบบจำลอง ซึ่งผลที่ได้มีค่า X-loading weight สูง ดังตารางที่ 4.22 ซึ่งแสดงการสั่นสะเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่น 5153 cm^{-1} (1941 nm) แสดงค่า X-loading weight สูงสุดของ PLS Vector 1 ใกล้เคียงกับพีคของน้ำ ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ O-H ที่ 7367 cm^{-1} (1357 nm) ใกล้เคียงกับพีคของ CH_2 ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ C-H แสดงค่า X-loading weight สูงสุดของ PLS Vector 2 และที่ 5145 cm^{-1} (1943 nm) ใกล้เคียงกับพีคของน้ำ ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ O-H แสดงค่า X-loading weight สูงสุดของ PLS Vector 3 จะเห็นได้ว่าการสั่นสะเทือนของพันธะที่สำคัญเกี่ยวข้องกับ O-H และ C-H มีอิทธิพลต่อการทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP [65]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.33 Regression coefficient plot ของแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ที่สร้างด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3



ภาพที่ 4.34 X-loading plot ของแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR Spectrometer ที่สร้างด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 ความยาวคลื่นที่มีค่า Regression coefficient หรือ X-loading ของแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP สูงและ
 แถบการสั่นสะเทือนของโครงสร้างทางเคมีที่สอดคล้องกัน [65]

Appeared		Cited		Functional Group	Spectra-Structure	Source			
(cm ⁻¹)	(nm)	(cm ⁻¹)	(nm)			R	F1	F2	F3
8647	1156	8650	1152	C-H str. second overtone	CH ₃	*			
7367	1357	7352	1360	2 × C-H str. + C-H def.	CH ₃			*	
7212	1386	7168	1395	2 × C-H str. + C-H def.	CH ₂	*			
6927	1443	6896	1450	O-H str. first overtone	Starch, H ₂ O	*			
5160	1937	5154	1940	O-H str. + O-H def.	H ₂ O	*			
5153	1941	5154	1940	O-H str. + O-H def.	H ₂ O		*		
5145	1943	5154	1940	O-H str. + O-H def.	H ₂ O				*
4335	2306	4329	2310	C-H str. + C-H def.	CH ₂	*			

4.4.4.3 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก Micro NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

จากตารางที่ 4.23 แสดงข้อมูลทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองทำนาย โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS โดยใช้มะเขือเทศทั่วไปผสมมะเขือเทศ GAP ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% โดยใช้ Test set validation ตารางที่ 4.24 แสดงผลของการทำ PLS พบว่าแบบจำลองในการทำนายที่ดีที่สุด มีค่า R^2 , RMSEP, RPD และ Bias คือ 0.282, 35.047%, 1.180 และ 0.928% ตามลำดับ พบว่าเมื่อนำผลค่า R^2 ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางแปลค่า R^2 (ตารางที่ 2.4) ระบุว่าแบบจำลองเปอร์เซ็นต์ของมะเขือเทศผสมเป็นแบบจำลองที่ไม่ดี และเมื่อนำผลค่า RPD ที่ได้มาเปรียบเทียบกับตารางอธิบายความหมายค่า RPD (ตารางที่ 2.6) ระบุว่าไม่แนะนำให้ใช้แบบจำลองนี้ในการทำนาย

ตารางที่ 4.23 ค่าทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองที่ทำนายจาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

Calibration set					Prediction set				
N	Max	Min	Average	SD	N	Max	Min	Average	SD
240	100	0	50	42.91	61	100	0	51.80	41.69

ตารางที่ 4.24 ผลการสร้างแบบจำลองและการทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่ใช้สร้างแบบจำลองจาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

Number of factors	Wavelength (nm)	Calibration		Validation			
		R^2	RMSEC (%)	r^2	RMSEP (%)	RPD	Bias (%)
4	950 – 1650	0.332	34.998	0.282	35.047	1.180	0.928

4.4.5 แบบจำลองจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศที่มีการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP

4.4.5.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA)

4.4.5.1.1 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3 จากตารางที่ 4.25 แสดงผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มของมีการ

ปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer โดยการวิเคราะห์วิธี Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) ด้วย Principal Component Analysis (PCA) ที่เปอร์เซ็นต์การผสมมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% พบว่าสามารถทำนายตัวเองถูกเท่ากับ 100%, 60%, 100%, 100%, 100% และ 94.74% ตามลำดับ สามารถทำนายกลุ่มอื่นถูกเท่ากับ 92.22%, 64%, 93.33%, 100%, 100% และ 84.21% ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การทำนายถูกโดยรวมเท่ากับ 93.52, 63.33, 94.44, 100, 100, 85.96 ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การทำนายถูกโดยรวมเฉลี่ยเท่ากับ 88.95

ตารางที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ด้วย Unscrambler X 10.3 โดยการวิเคราะห์วิธี SIMCA

เปอร์เซ็นต์การผสมมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP	เปอร์เซ็นต์การทำนายตัวเองถูก	เปอร์เซ็นต์การทำนายกลุ่มอื่นถูก	เปอร์เซ็นต์การทำนายถูกโดยรวม
มะเขือเทศทั่วไป 0%	100.00	92.22	93.52
มะเขือเทศทั่วไป 20%	60.00	64.00	63.33
มะเขือเทศทั่วไป 40%	100.00	93.33	94.44
มะเขือเทศทั่วไป 60%	100.00	100.00	100.00
มะเขือเทศทั่วไป 80%	100.00	100.00	100.00
มะเขือเทศทั่วไป 100%	94.74	84.21	85.96
ผลเฉลี่ย (%)	95.08	87.74	88.95

4.4.5.1.2 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

จากตารางที่ 4.26 แสดงผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มของมีการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก Micro-NIR Pro โดยการวิเคราะห์แบบ SIMCA ด้วยวิธี PCA ที่เปอร์เซ็นต์การผสมของมะเขือเทศ GAP ในมะเขือเทศทั่วไป คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% พบว่าสามารถทำนายตัวเองถูกเท่ากับ 94.44%, 66.67%, 100%, 100%, 100% และ 100% ตามลำดับ สามารถทำนายกลุ่มอื่นถูกเท่ากับ 88.89%, 73.33%, 96.67%, 100%, 100% และ 69.47% ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การทำนายถูกโดยรวมเท่ากับ 89.81, 72.22, 97.22, 100, 100, 74.56 ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การทำนายถูกโดยรวมเฉลี่ยเท่ากับ 86.52

ตารางที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก Micro-NIR Pro ด้วย Unscrambler X 10.3 โดยการวิเคราะห์วิธี SIMCA

เปอร์เซ็นต์การผสมมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP	เปอร์เซ็นต์การทำนายตัวเองถูก	เปอร์เซ็นต์การทำนายกลุ่มอื่นถูก	เปอร์เซ็นต์การทำนายถูกโดยรวม
มะเขือเทศทั่วไป 0%	94.44	88.89	89.81
มะเขือเทศทั่วไป 20%	66.67	73.33	72.22
มะเขือเทศทั่วไป 40%	100.00	96.67	97.22
มะเขือเทศทั่วไป 60%	100.00	100.00	100.00
มะเขือเทศทั่วไป 80%	100.00	100.00	100.00
มะเขือเทศทั่วไป 100%	100.00	69.47	74.56
ผลเฉลี่ย (%)	96.72	84.52	86.52

4.4.5.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS – DA)

4.4.5.2.1 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR

spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

จากตารางที่ 4.27 แสดงผลการวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มของมะเขือเทศผสมจาก FT-NIR spectrometer โดยการวิเคราะห์วิธี PLS-DA ด้วย Partial Least Squares Regression (PLSR) ที่เปอร์เซ็นต์การผสมมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% พบว่าสามารถทำนายตัวเองถูกเท่ากับ 83.33%, 0%, 0%, 0%, 0% และ 84.21% ตามลำดับ สามารถทำนายกลุ่มอื่นถูกเท่ากับ 91.61%, 100%, 100%, 100%, 100% และ 61.90% ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การทำนายถูกโดยรวมเท่ากับ 93.02, 91.80, 90.16, 90.16, 88.52, 91.80 ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การทำนายถูกโดยรวมเท่ากับ 89.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ด้วย Unscrambler X 10.3 โดยการวิเคราะห์วิธี PLS-DA

เปอร์เซ็นต์การผสมมะเขือเทศ GAP ในมะเขือเทศทั่วไป	เปอร์เซ็นต์การทำนายตัวเองถูก	เปอร์เซ็นต์การทำนายกลุ่มอื่นถูก	เปอร์เซ็นต์การทำนายถูกโดยรวม
มะเขือเทศทั่วไป 0%	83.33	91.61	93.02
มะเขือเทศทั่วไป 20%	0	100.00	91.80
มะเขือเทศทั่วไป 40%	0	100.00	90.16
มะเขือเทศทั่วไป 60%	0	100.00	90.16
มะเขือเทศทั่วไป 80%	0	100.00	88.52
มะเขือเทศทั่วไป 100%	84.21	61.90	91.80
ผลเฉลี่ย (%)	50.81	96.77	89.22

4.4.5.2.2 แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก Micro-NIR Pro ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3

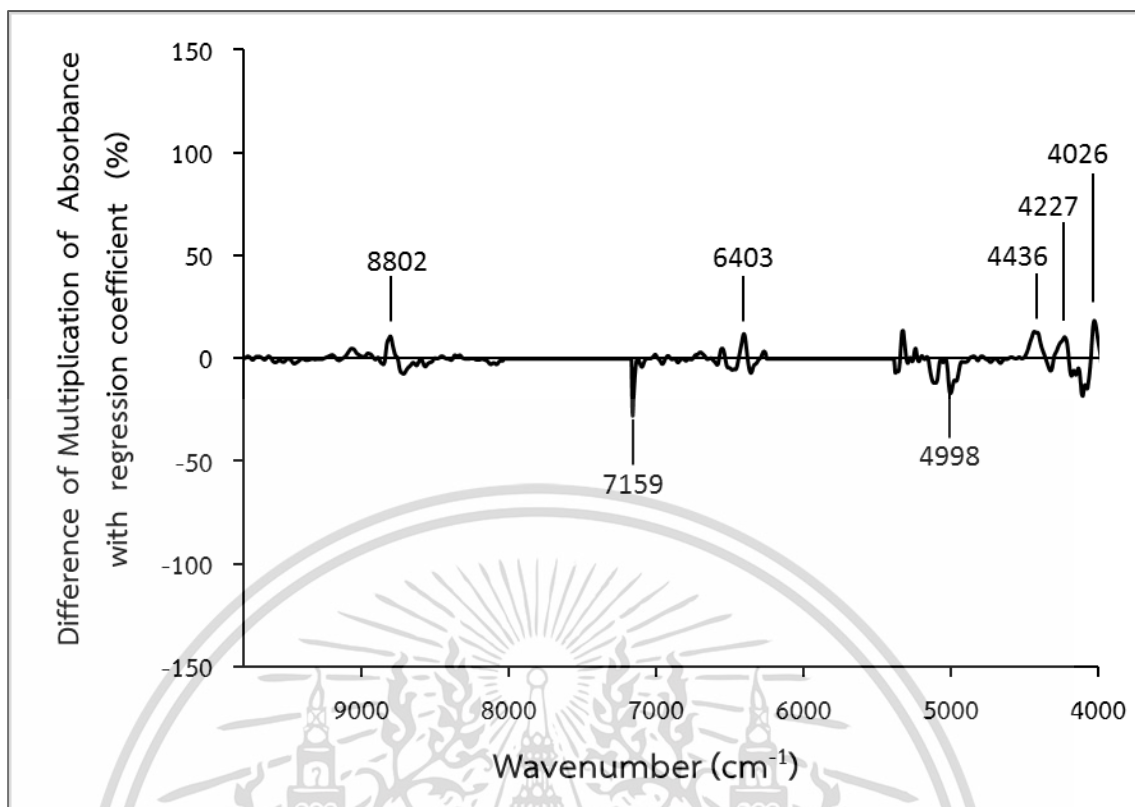
จากตารางที่ 4.28 แสดงผลการวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มของมะเขือเทศผสมจาก Micro-NIR Pro โดยการวิเคราะห์วิธี PLS-DA ด้วย PLSR ที่เปอร์เซ็นต์การผสมของมะเขือเทศ GAP ในมะเขือเทศทั่วไป คือ 0%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 100% พบว่าสามารถทำนายตัวเองถูกเท่ากับ 55.56%, 0%, 0%, 0%, 0% และ 89.47% ตามลำดับ สามารถทำนายกลุ่มอื่นถูกเท่ากับ 89.30%, 100%, 100%, 100%, 100% และ 95.24% ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การทำนายถูกโดยรวมเท่ากับ 73.77, 91.80, 90.16, 90.16, 88.52, 93.44 ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การทำนายถูกโดยรวมเท่ากับ 86.79

ตารางที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์การจำแนกกลุ่มการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP จาก FT-NIR spectrometer ด้วย Micro-NIR Pro โดยการวิเคราะห์วิธี PLS-DA

เปอร์เซ็นต์การผสมมะเขือเทศ GAP ในมะเขือเทศทั่วไป	เปอร์เซ็นต์การทำนายตัวเองถูก	เปอร์เซ็นต์การทำนายกลุ่มอื่นถูก	เปอร์เซ็นต์การทำนายถูกโดยรวม
มะเขือเทศทั่วไป 0%	55.56	89.30	73.77
มะเขือเทศทั่วไป 20%	0	100.00	91.80
มะเขือเทศทั่วไป 40%	0	100.00	90.16
มะเขือเทศทั่วไป 60%	0	100.00	90.16
มะเขือเทศทั่วไป 80%	0	100.00	88.52
มะเขือเทศทั่วไป 100%	89.47	95.24	93.44
ผลเฉลี่ย (%)	44.26	95.16	86.79

4.4.6 ผลต่างของผลคูณของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมหลังจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นกับ regression coefficient ระหว่างมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP

จากรูปที่ 4.35 แสดงเปอร์เซ็นต์ของผลต่างของการคูณของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมหลังจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นกับ regression coefficient ระหว่างมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP จากแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับการทำนายค่าปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไป (แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129) และแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับการทำนายค่าปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP (แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129) พบว่าที่เลขคลื่น 8802, 7159, 6403, 4998, 4436, 4227 และ 4026 cm^{-1} (1136, 1396, 1561, 2000, 2254, 2365 และ 2483 nm ตามลำดับ) มีผลต่อความแตกต่างระหว่างแบบจำลองมะเขือเทศทั่วไปและแบบจำลองมะเขือเทศ GAP มาก เนื่องจากมีผลต่างของผลคูณของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมหลังจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นกับค่า regression coefficient สูง) ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 10.94%, 27.11%, 12.09%, 16.72%, 13.19%, 10.56% และ 18.51% ตามลำดับ โดยที่เลขคลื่น 8802, 7159 cm^{-1} (1136, 7159 nm) ใกล้เคียงกับเลขคลื่น 8746, 7168 cm^{-1} (1143, 1395 nm) ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนพันธะ C-H ที่เลขคลื่น 6403, 4227 cm^{-1} (1561, 2365 nm) ใกล้เคียงกับเลขคลื่น 6329, 4230 cm^{-1} (1580, 2364 nm) ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนพันธะ O-H ที่เลขคลื่น 4998, 4436 cm^{-1} (2000, 2254 nm) ใกล้เคียงกับเลขคลื่น 4498, 4420 cm^{-1} (2000, 2262 nm) ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนพันธะ O-H และ C-H ส่วนที่เลขคลื่น 4026 cm^{-1} (2483 nm) ใกล้เคียงกับเลขคลื่น 4019 cm^{-1} (2488 nm) ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนพันธะ C-C และ C-H



รูปที่ 4.35 เปอร์เซ็นต์ของผลต่างของารคูณของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมหลังจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นกับ regression coefficient ระหว่างมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

5.1 การวิเคราะห์สเปกตรัม

5.1.1 สเปกตรัมวิตามินซี

การวิเคราะห์สเปกตรัมวิตามินซีที่ได้จาก FT-NIR spectroscopy พบว่าวิตามินซีมีการดูดซับที่เลขคลื่น ดังนี้ 7367, 6858, 5700 และ 4435 cm^{-1} (1357, 1458, 1754 และ 2255 nm ตามลำดับ) ส่วนการวิเคราะห์สเปกตรัมวิตามินซีที่ได้จาก Micro-NIR Pro พบว่าวิตามินซีมีการดูดซับที่เลขคลื่น ดังนี้ 1001, 1211, 1360 และ 1459 nm (9990, 8258, 7353 และ 6854 cm^{-1} ตามลำดับ)

5.1.2 สเปกตรัมมะเขือเทศ

การวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของมะเขือเทศทั่วไปที่ได้จาก FT-NIR spectrometer พบว่ามะเขือเทศทั่วไปมีการดูดซับที่เลขคลื่นดังนี้ 10136, 8277, 6881 และ 5153 cm^{-1} (986, 1208, 1453, 1779 และ 1940 nm ตามลำดับ) ส่วนการวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของมะเขือเทศทั่วไปที่ได้จาก Micro-NIR Pro พบว่ามะเขือเทศทั่วไปมีการดูดซับที่เลขคลื่นดังนี้ 976, 1180, 1199 และ 1440 nm (10246, 8475, 8340 และ 6944 cm^{-1} ตามลำดับ)

การวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของมะเขือเทศ GAP ที่ได้จาก FT-NIR spectrometer พบว่ามีพีคเด่นชัดที่เลขคลื่น ดังนี้ 10306, 8362, 6888, 5620 และ 5153 cm^{-1} (970, 1195, 1451, 1779 และ 1940 nm ตามลำดับ) ส่วนการวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของมะเขือเทศ GAP ที่ได้จาก Micro-NIR Pro พบว่ามีพีคเด่นชัดที่ความยาวคลื่น ดังนี้ 990, 1195 และ 1440 cm^{-1} (10101, 8368 และ 6944 cm^{-1} ตามลำดับ)

5.2 การทดสอบความแม่นยำ

5.2.1 ความแม่นยำของการสแกน

ความสามารถในการทวนซ้ำและการทำซ้ำของสเปกตรัมมะเขือเทศทั่วไปที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ของ 3 เลขคลื่น ได้แก่ 10309.3, 6711.4 และ 5154.6 cm^{-1} มีความแม่นยำและมีความสม่ำเสมอ (ความเป็นเนื้อเดียวกัน) ของตัวอย่างได้ดีกว่ามะเขือเทศ GAP ที่ระดับความสูงแตกต่างกัน ความสามารถในการทวนซ้ำและการทำซ้ำของสเปกตรัมมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP ที่ระดับความสูงแตกต่างกันที่ได้จาก Micro-NIR Pro ของ 3 ความยาวคลื่น ได้แก่ 970, 1450 และ 1490 nm มีความแปรปรวนตามระดับความสูงที่ต่างกัน

จากผลการทดลองพบว่าความแม่นยำในการสแกนด้วย FT-NIR spectrometer มีความแม่นยำมากกว่า Micro-NIR Pro เนื่องจากความแปรปรวนของข้อมูลน้อยกว่าและค่าเฉลี่ยของการทวนซ้ำและการทำซ้ำส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่า

5.2.2 ความแม่นยำของการวัดวิตามินซีด้วยวิธีอ้างอิง

ค่าความสามารถของการทวนซ้ำ (Repeatability) และค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณาสูงสุด (Maximum coefficient of determination, R^2_{Max}) ของปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศแต่ละกลุ่มตัวอย่างมีค่าสูงอยู่ระหว่าง 0.868 - 0.928 ดังนั้นจึงสมควรนำข้อมูลไปสร้างแบบจำลอง

5.3 การสร้างแบบจำลอง

จากการทดลองทั้งหมดเมื่อนำผลค่า R^2 และ RPD ที่ได้จากชุดทดสอบแบบจำลองทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศชนิดต่างๆ และแบบจำลองทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP มาเปรียบเทียบกับตารางแปลความหมายค่า R^2 (ตารางที่ 2.4) และ RPD (ตารางที่ 2.6) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 5.1 และผลแบบจำลองจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศที่มีการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP สรุปผลได้ดังตารางที่ 5.2

5.4 ผลต่างของผลคูณของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมหลังจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นกับ regression coefficient ระหว่างมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP

จากแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับการทำนายค่าปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไป (แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129) และแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับการทำนายค่าปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศ GAP (แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129) พบว่าที่ เลขคลื่น 8802, 7159, 6403, 4998, 4436, 4227 และ 4026 cm^{-1} (1136, 1396, 1561, 2000, 2254, 2365 และ 2483 nm ตามลำดับ) มีผลต่อความแตกต่างระหว่างแบบจำลองมะเขือเทศทั่วไปและแบบจำลองมะเขือเทศ GAP มาก เนื่องจากมีผลต่างของผลคูณของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมหลังจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นกับค่า regression coefficient สูง) ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 10.94%, 27.1134%, 12.09%, 16.72%, 13.19%, 10.56% และ 18.51% ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ผลสรุปการสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศชนิดต่างๆ และแบบจำลองทำนายเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP

แบบจำลอง	สเปกโตรมิเตอร์	ซอฟต์แวร์	R ²	RPD	การนำไปใช้และเหตุผล
วิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไป	FT-NIR spectrometer	OPUS	0.308	1.250	ไม่แนะนำให้ใช้ เพราะค่า R ² และ RPD ต่ำ
	Micro-NIR Pro	Unscrambler	NA	1.169	ไม่แนะนำให้ใช้ เพราะค่า R ² หาค่าไม่ได้และ RPD ต่ำ
วิตามินซีของมะเขือเทศ GAP	FT-NIR spectrometer	OPUS	0.698	1.820	ค่า R ² เหมาะสำหรับการคัดเลือกแบ่งกลุ่มและการประมาณค่าอย่างหยาบๆ แต่ RPD ต่ำ
	Micro-NIR Pro	Unscrambler	NA	0.906	ไม่แนะนำให้ใช้ เพราะค่า R ² หาค่าไม่ได้และ RPD ต่ำ
วิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP	FT-NIR spectrometer	OPUS	0.330	1.250	ไม่แนะนำให้ใช้ เพราะค่า R ² และ RPD ต่ำ
	Micro-NIR Pro	Unscrambler	NA	1.262	ไม่แนะนำให้ใช้ เพราะค่า R ² หาค่าไม่ได้และ RPD ต่ำ
เปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP	FT-NIR spectrometer	OPUS	0.740	1.980	ใช้ได้สำหรับการประมาณค่าแบบหยาบๆ เพราะค่า R ² เหมาะสำหรับการคัดเลือกแบ่งกลุ่มและการประมาณค่าอย่างหยาบๆ และ RPD เหมาะสำหรับการคัดเลือกแบ่งกลุ่มและการประมาณค่าอย่างหยาบๆ
	FT-NIR spectrometer	Unscrambler	0.667	1.799	ค่า R ² เหมาะสำหรับการคัดเลือกแบ่งกลุ่มและการประมาณค่าอย่างหยาบๆ แต่ RPD ต่ำ
	Micro NIR Pro	Unscrambler	0.282	1.180	ไม่แนะนำให้ใช้ เพราะค่า R ² และ RPD ต่ำ

ตารางที่ 5.2 ผลสรุปแบบจำลองจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศที่มีการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP

วิธีการวิเคราะห์	สเปกโทรมิเตอร์	ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การทำนาย			การนำไปใช้และเหตุผล
		ตัวเองถูก	กลุ่มอื่นถูก	โดยรวม	
SIMCA	FT-NIR spectrometer	95.08	87.74	88.95	แนะนำให้ใช้ในการจำแนกกลุ่ม
	Micro-NIR Pro	96.72	84.52	86.52	แนะนำให้ใช้ในการจำแนกกลุ่ม
PLS – DA	FT-NIR spectrometer	50.81	96.77	89.22	ไม่แนะนำให้ใช้ เพราะเปอร์เซ็นต์การทำนายตัวเองถูกน้อยกว่ากับเปอร์เซ็นต์การทำนายกลุ่มอื่นถูกอย่างเห็นได้ชัด
	Micro-NIR Pro	44.26	95.16	86.79	ไม่แนะนำให้ใช้ เพราะเปอร์เซ็นต์การทำนายตัวเองถูกน้อยกว่ากับเปอร์เซ็นต์การทำนายกลุ่มอื่นถูกอย่างเห็นได้ชัด

5.5 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองงานวิจัยในหัวข้อเรื่องการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ตรวจวัดปริมาณวิตามินซีและการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP มีข้อเสนอแนะ 3 ข้อ ดังต่อไปนี้

5.5.1 เหตุผลที่ไม่สามารถวัดปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศได้

เนื่องจากขีดจำกัดสำหรับการตรวจวัดองค์ประกอบในวัตถุตัวอย่างที่ดูดซับคลื่นอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared) ต้องอยู่ในระดับที่ไม่ต่ำกว่า 0.1% (m/m) หรือ 0.1% (w/w) [66], [67] แต่จากการวัดค่าวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP ด้วยวิธีอ้างอิง พบว่ามีค่าปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศเท่ากับ 5.374 - 24.140 mg/100g หรือเท่ากับ 0.00537% - 0.02414% (w/w) ซึ่งต่ำกว่า 0.1% (w/w) จึงอาจทำให้ไม่สามารถวัดปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศ ได้อย่างแม่นยำ

จากการวิเคราะห์แบบจำลองปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศทั่วไปพบว่ามีค่าความแม่นยำในการทำนายต่ำ อาจเนื่องมาจากข้อมูลของตัวอย่างมะเขือเทศที่ใช้สร้างแบบจำลองส่วนใหญ่มีค่าปริมาณวิตามินซีที่ต่ำ และมีตัวอย่างมะเขือเทศที่มีค่าปริมาณวิตามินซีสูงจำนวนน้อย แต่อย่างไรก็ตาม หากอนาคตมีการศึกษาเพิ่มเติม โดยมีการควบคุมกลุ่มตัวอย่างมะเขือเทศให้เป็นมะเขือเทศที่มีค่าปริมาณวิตามินซีตามช่วงที่ต้องการ อาจทำให้แบบจำลองถูกพัฒนาให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นได้

5.5.2 เหตุผลที่สามารถจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศที่มีการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP

เนื่องจากการเจริญเติบโตที่ต่างกันของผักผลไม้มีผลต่อคุณภาพและองค์ประกอบภายในของผลผลิต [68] จึงอาจทำให้สามารถจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศที่มีการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP เพราะมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP มีสภาพแวดล้อมในการผลิตและการเจริญเติบโตที่ต่างกันแตกต่างกัน

5.5.3 การใช้งาน

การประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีตรวจวัดปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไป ปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไปและมะเขือเทศ GAP ยังไม่แนะนำให้นำไปใช้ ส่วนแบบจำลองปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศ GAP ที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ด้วยซอฟต์แวร์ Unscrambler X 10.3 และแบบจำลองเปอร์เซ็นต์การปนเปื้อนของมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP ที่สร้างจากสเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR spectrometer ที่ทำนายด้วยซอฟต์แวร์ OPUS version 7.0.129 สามารถวัดค่าและประเมินค่าแบบหยาบๆ ได้เท่านั้น

ส่วนการจำแนกกลุ่มของมะเขือเทศที่มีการปลอมปนมะเขือเทศทั่วไปในมะเขือเทศ GAP วิเคราะห์ด้วยวิธี Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS - DA) ยังไม่แนะนำให้นำไปใช้ แต่แบบจำลองที่วิเคราะห์ด้วยวิธี Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) แนะนำให้ใช้ในการจำแนกกลุ่มได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2557. การเพิ่มการบริโภคพืช ผัก ผลไม้. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึกในพระบรมราชูปถัมภ์.
- [2] Saad, A. M., Ibrahim, A., El-Biale, N. (2016). Internal quality assessment of tomato fruits using image color analysis. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 18, pp. 339–352.
- [3] Bhowmik, D., Sampath Kumar, K. P., Paswan, S., Srivastava. S., (2012). Tomato - a natural Medicine and its health benefits. *Journal of Pharmacognosy Phytochemistry*. 1, pp. 33–43.
- [4] Takeoka, G.R., Dao, L., Flessa, S., Gillespie, D.M., Jewell, W.T., Huebner, B., Bertow, D., Ebeler, S. E. (2001). Processing effects on lycopene content and antioxidant activity of tomatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 49, pp. 3713–3717.
- [5] Aldrich, H. T., Salandanan, K., Kendall, P., Bunning, M., Stonaker, F., Külen, O., Stushnoff, C. (2010). Cultivar choice provides options for local production of organic and conventionally produced tomatoes with higher quality and antioxidant content. *Journal Science Food Agriculture*. 90(15), pp. 46 - 55.
- [6] Perveen, R., Rasul Suleria, H. A., Anjum, F. M., Butt, M. S., Pasha, I., Ahmad, S. (2015). Tomato (*Solanum lycopersicum*) carotenoids and lycopenes chemistry; metabolism, absorption, nutrition, and allied health claims – A comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 55, 919–929.
- [7] กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2545. **เกษตรดีที่เหมาะสมสำหรับพริกและมะเขือเทศ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ชุมชนสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- [8] Premier, R., Ledger, S. (2006). Good agricultural practices in Australia and Southeast Asia. *Hort Technology*. 16, pp. 552–555.
- [9] สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2556. **มาตรฐานสินค้าเกษตร การปฏิบัติทำการเกษตรที่ดีสำหรับพืชอาหาร (มกษ.9001-2556)**.
- [10] Giovanelli, G., Lavelli, V., Peri, C., Nobili, S. (1999). Variation in ripening. *Journal Science Food Agriculture*. 79, pp. 1583–1588.
- [11] Langlois, D., Etievant, P. X., Pierron, P., Jorrot, A. (1996). Sensory and instrumental characterization of commercial tomato varieties. *Z Lebensm Unters Forsch*. 203, pp. 534–540.
- [12] Davies, J.N., Hobson, G.E. 1971. **The Biochemistry of Fruit and Their Products: The Tomato**. In: Hulme A.C ed. Academic Press, New York.
- [13] Davies, J., Hobson, G.E. (1981). The constituents of tomato fruit - the influence of environment, nutrition and genotype. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 15(3), pp. 205–280.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] Leonardi, C., Ambrosino, P., Esposito, F., Fogliano, V. (2000). Antioxidant activity and carotenoid and tomatine contents in different typologies of fresh consumption tomatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 48, pp. 4723–4727.
- [15] Burge, J., Mickelsen, O., Nicklow, C., Marsh, G. L. (1974). Vitamin C in tomatoes: Comparison of tomatoes developed for mechanical or hand harvesting. *Ecology of food and nutrition*. 4, 27-31.
- [16] Balan, D., Pele, M., Artimon, M., Luta, G. (2005). Bioactive compounds in sea Buckthorn fruits and in some products obtained by their processing. *Revue de Cytologie et de Biologie Végétales-Le Botaniste*. 28, pp. 364–368.
- [17] Matei, N., Magearu, V., Birghila, S., Dobrinas, S. (2004). The determination of vitamin C from sweet cherries and cherries, *Revista de Chimie*. 55(5), pp. 294–296.
- [18] O’Connell, P. J., Gormally, C., Pravda, M., Guilbault, G., (2001). Development of an amperometric L-ascorbic acid (vitamin C) sensor based on electropolymerised aniline for pharmaceutical and food analysis. *Analytica Chimica Acta*. 431(2), pp. 239–247.
- [19] Fernandes, J. C. B., Kubota, L. T., de Oliveira Neto, G. (1999). Potentiometric biosensor for L-ascorbic acid based on ascorbate oxidase of natural source immobilized on ethylenevinylacetate membrane. *Analytica Chimica Acta*. 385(1–3), pp. 3–12.
- [20] Greenway, G. M., Ongomo, P. (1990). Determination of L-ascorbic acid in fruit and vegetable juices by flow injection with immobilised ascorbate oxidase. *Analyst*. 115(10), 1297–1299.
- [21] Iwase, H. (2000). Use of nucleic acids in the mobile phase for the determination of ascorbic acid in foods by high-performance liquid chromatography with electrochemical detection. *Journal of Chromatography A*. 881(1-2), pp. 327–330.
- [22] Spínola, V., Llorent-Martínez, J.E., Castilho, C.P. (2014). Determination of vitamin C In foods: Current state of method validation. *Journal of Chromatography A*. 1369, pp. 2-17.
- [23] Lammertyn, J., Nicolai, B. M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K. I. (1998). “Non-destructive measurement of acidity, soluble solids, and firmness of Jonagold apples using NIR spectroscopy.” **Transaction of the ASAE**, 41(4), 1089-1094.
- [24] Xudong, S., Hailiang, Z., and Yande, L. (2009). Nondestructive assessment of quality of Nanfeng mandarin fruit by a portable near infrared spectroscopy. *International Journal Agricultural and Biological Engineering*. 2 (1), 65–71.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [25] Pissard, A., Fernández Pierna, J. A., Baeten, V., Sinnaeve, G., Lognay, G., Mouteau, A., Dupont, P., Rondia, A., Lateur, M., (2012). Non-destructive measurement of vitamin C, total polyphenol and sugar content in apples using near infrared spectroscopy. *Journal science food agriculture*. 93(2), pp. 238-44.
- [26] พรพิมล ศิริกุล. 2553. **มะเขือเทศ บำรุงผิว ลดคอเลสเตอรอล ป้องกันมะเร็ง**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: เก็ทไอเดีย.
- [27] มณีฉัตร นิกรพันธุ์. 2538. **มะเขือเทศ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ไอเดียเนสโตร์.
- [28] IBPGR Secretariat. **Genetic resources of tomatoes and wild relatives**. Food and Agriculture Organization of United Nations, Via delle Terme di Caracalla, Rome 00100, Italy. 1981. pp 65.
- [29] Rick, C.M. 1976. **Tomato**. In **Evolution of Crop Plants**. ed. N. W. Simmonds, Longman, London, pp. 268-73.
- [30] Villareal, R.L. "Tomato production in Tropics problems and progress, Asian Vegetable Research and Development Center, Proceedings of the First International Symposium on Tropical Tomato." October 23-27, 1978. Shanhua, Taiwan, china.
- [31] โครงการสร้างเงินสร้างงาน. 2549. **การปลูกมะเขือเทศปลอดสารพิษและวิธีเพิ่มผลผลิต**. นนทบุรี : สำนักพิมพ์ ยูทีไลซ์.
- [32] ศิริวรรณ สุทธจิตต์. 2550. **คู่มือสุขภาพเกี่ยวกับวิตามิน**. ครั้งที่พิมพ์ 1. กรุงเทพฯ: The Knowledge Center.
- [33] Basu, T. K., Schorah, C. J. 1982. **Vitamin C in Health and Disease**. Croom Helm, London and Canberra.
- [34] Maurice, E., Shils, T., Varnon R. Y. "Modern Nutrition in Health and Disease." 17th edition, 1988. Philadelphia: Lea and Febiger, 355-435.
- [35] Basu, T. K., Dickerson, J. W. T. 1996. **Vitamin in human health and disease**. CAB International editor. Guildford: Biddles, 125-49.
- [36] Assantachai, P., Yamwong, P., Lekhakula, S. 1998. "Nutritional survey of geriatric population in the rural area." WHO Collaborative Programme Research Final Report 9, pp. 68.
- [37] VanderJagt, D. J., Garry, P. J., Bhagavan, H. N. 1987. Ascorbic acid intake and plasma levels in healthy elderly people. *American Journal of Clinical Nutrition*. 46, 290-4.
- [38] A.O.A.C. 1990. **Vitamin C (Ascorbic Acid) in Vitamin Preparations and Juices, Official Methods of Analysis**. 15th ed. Association of Office Analytical Chemists, Arlington, VA, pp. 1058-1059.
- [39] Abushita, A.A., Hebshi, E.A., Daood H.G., and Biacs, P.A. 1997. Determination of antioxidant vitamins in tomatoes. *Food Chemistry*, 60(2), 207–212.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [40] ภัทรานิติรัฐ ทองเทพ, สมพร มุลมั่งมี, ฉัตรชัย พลเชื้อว. 2557. การศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของ เอมีนร่วมพอลิไพโรลบนขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์สำหรับการตรวจวัดกรดแอสคอร์บิกด้วยเทคนิค โวลแทมเมตรี. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี.
- [41] วารุณี ธนะแพสย์. 2552. “บทที่ 1 สถานการณ์การใช้ประโยชน์เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรด ย่านใกล้ในประเทศไทย.” 8 หน้า. ใน: เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้ในอุตสาหกรรมเกษตร. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตร ศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- [42] ศุมาพร เกษมสำราญ. 2552. “บทที่ 2 หลักการพื้นฐานของสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. 23 หน้า. ใน: เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้ในอุตสาหกรรมเกษตร.” สถาบันค้นคว้าและพัฒนา ผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- [43] Franklin, E. B. 2002. Theory and principle near infrared spectroscopy. Spectroscopy Europe, 14. pp. 12-18.
- [44] ปานมนัส ศิริสมบุรณ์. 2558. “เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีสำหรับผลผลิตทาง การเกษตรและอาหาร.” [Online]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.nirsresearch.com>.
- [45] ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ และอนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล. 2552. บทที่ 3 เครื่องมือและอุปกรณ์สเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. 19 หน้า. ใน: เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้ในอุตสาหกรรมเกษตร. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทาง การเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- [46] ปานมนัส ศิริสมบุรณ์. 2556. “เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีสำหรับผลผลิต เกษตรและอาหาร.” [Online]. Available: <http://www.nirsresearch.com>.
- [47] นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์. 2545. หลักการพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้สเปกโตรสโคปี. ใน การอบรมเชิงปฏิบัติการ: ควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อ การแข่งขันในเวทีการค้าโลก. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [48] S, Kawano., 2002. **Application to Agricultural products and foodstuffs.** In: Siesler, H. W., Y. Ozaki, S. Kawata and H. M. Heise, (eds.), Near Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications. WILEY -VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany. pp. 269-288.
- [49] Givens, D. I., De Boever, J. L., Deville, E. R. 1997. The principle practices and some future applications of near infrared spectroscopy for predicting the nutritive value of foods for animal and human. Nutrition Research Review. 10, pp. 83-114.
- [50] Gabriele, R. 2005. Near-infrared spectroscopy and imaging: basic principles and pharmaceutical applications. Advanced Drug Delivery Reviews. 57, 1109-1143.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [51] Siesler, H. W., Ozaki, Y., Kawata, S. 2002. **Near-infrared spectroscopy**. WILEY-VCH Verlag, Federal Republic, Germany. pp. 348.
- [52] Karlberg, B. 2006. “**Principles of NIR and mid-IR spectroscopy**”. [Online]. Available: <http://lipas.uwasa.fi/~TAU/AUTO3220/Umea2handouts.pdf>.
- [53] ชงชัย สุวรรณสิขณน์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช. 2555. การวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ ในเทคโนโลยี อินฟราเรดย่านใกล้ในอุตสาหกรรมเกษตร. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [54] วิชัย รุ่งตระกูล และ และคณะ. 2527. พิมพ์ครั้งที่ 2. การประยุกต์สเปกโตรสโกปีในเคมีอินทรีย์. กรุงเทพฯ: นำอักษรการพิมพ์. หน้า 298.
- [55] Osborne, B. G., Fearn, T., Hindle, P. H. 1993. **Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis**. New York: John Wiley and Sons.
- [56] Kasemsamran, S. 2005. **Nondestructive Quantitative Analysis of biomedical Samples by Near Infrared Spectroscopy with Chemometrics and Development of novel Chemometric Methods for quantitative Analysis**. Ph. D. Thesis, Kwansai Gakuin University, Japan.
- [57] นัฐกรณ์ สอนสงวน. 2556. การประเมินสมบัติเชิงการยึดติดของข้าวในโรงงานปรับปรุงคุณภาพข้าวโดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [58] Williams, P. 2007. **Near-infrared Technology-Getting the best out of light**. 5th ed. A short course in the practical implementation of near-infrared spectroscopy for the user. Nanaimo: PDK Grain (Canada).
- [59] Conzen, J. P. 2006. **Multivariate Calibration. A practical guide for developing methods in the quantitative analytical chemistry**. Bruker Optik GmbH.
- [60] ศูนย์วิจัยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลิตผลทางการเกษตรและอาหาร. 2556. “**เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลิตผลเกษตรและอาหาร (ตอนที่ 1)**.” [ออนไลน์]. เข้าได้จาก : <http://www.nirsresearch.com>.
- [61] Williams, P. 2010. **Near-infrared Technology-Getting the best out of light**. 5th ed. A short course in the practical implementation of near-infrared spectroscopy for the user. Nanaimo: PDK Grain (Canada).
- [62] Pissard, A., Baeten, V., Romnée, J. M., Dupont, P., Mouteau, A., Lateur, M. 2012. Classical and NIR measurements of the quality and nutritional parameters of apples: a methodological study of intra-fruit variability. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*. 16, 294-306.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [63] Sreedhar Reddy, N., Nivetha, D., Yadav, B.K. 2016. NON-DESTRUCTIVE QUALITY ASSESSMENT OF CITRUS FRUITS USING FT-NEAR-INFRARED SPECTROSCOPY. *Journal of Science, Environment and Technology*. 5(4), 1850 – 1860.
- [64] Dardenne, P. “Some considerations about NIR spectroscopy: Closing speech at NIR-2009.” [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.impublications.com/content/some-considerations-about-nir-spectroscopy>. 2009.
- [65] Osborne, B. G., Fearn, T. 1986. **Near infrared spectroscopy in food analysis** (1st published, pp. 117). Longman Science & Technical. UK.
- [66] Popp, J., Tuchin, V. V., Chiou, A., Stefan, H. H. 2012. **Handbook of Biophotonics**. 3rd ed. WILAY-VCH Verlag & Co. KGaA, Germany.
- [67] Widemann, S.C.C., Hansen, W.G., Snieder, M., Wortel, V.A.L. 1998. NIR calibration in practice. *Analisis*. 26, M38.
- [68] Kader, A. A. 1992. Standardization and inspection of fresh fruits and vegetables, pp.191-200. *In* A. A. Kader (ed.). *Postarvest Technology of Horticultural Crops*. Publication 3311. Univ. of California, Div. Agr. Nat. Res., Oakland.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก1 ผลการตรวจวัดปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไปด้วยวิธีอ้างอิงในหน่วย mg/100g

ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณวิตามินซี	ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณวิตามินซี
1	5-1-IO	21.7834	36	152-7-IO	6.2941
2	6-1-IO	21.4304	37	153-7-IO	7.9895
3	7-1-IR	23.0938	38	154-7-IR	8.0406
4	8-1-IR	24.1397	39	155-7-IR	7.5469
5	9-1-IR	8.1401	40	156-7-IR	7.5469
6	28-2-IO	19.0255	41	171-8-IO	7.4553
7	29-2-IO	15.7508	42	172-8-IO	6.8964
8	30-2-IO	13.7987	43	173-8-IO	6.4358
9	31-2-IR	8.9633	44	174-8-IR	7.5962
10	33-2-IR	8.1037	45	175-8-IR	7.3717
11	58-3-IO	12.2246	46	176-8-IR	7.2609
12	59-3-IO	12.6678	47	191-9-IO	11.7228
13	60-3-IO	7.7108	48	192-9-IO	12.6397
14	61-3-IR	7.2907	49	193-9-IO	13.6930
15	62-3-IR	8.2189	50	194-9-IR	8.8581
16	63-3-IR	7.5725	51	195-9-IR	9.5282
17	74-4-IO	8.4718	52	196-9-IR	6.9531
18	75-4-IO	23.9955	53	211-10-IO	8.2661
19	76-4-IO	23.9331	54	212-10-IO	7.3812
20	77-4-IR	7.6477	55	213-10-IO	9.3070
21	78-4-IR	7.5800	56	214-10-IR	8.1041
22	79-4-IR	8.1820	57	215-10-IR	7.8499
23	110-5-IR	7.3758	58	216-10-IR	7.9762
24	111-5-IR	6.0913	59	231-11-IO	8.0732
25	112-5-IR	6.5187	60	232-11-IO	8.2757
26	113-5-IO	6.9706	61	233-11-IO	8.7922
27	114-5-IO	6.8424	62	234-11-IR	7.8975
28	115-5-IO	7.9015	63	235-11-IR	8.8147
29	131-6-IO	7.3381	64	236-11-IR	8.1516
30	132-6-IO	6.7442	65	251-12-IO	8.4856
31	133-6-IO	7.2425	66	252-12-IO	9.8322
32	134-6-IR	6.5785	67	253-12-IO	9.1929
33	135-6-IR	6.4231	68	254-12-IR	9.4145
34	136-6-IR	6.5475	69	255-12-IR	8.9641
35	151-7-IO	6.8233	70	256-12-IR	8.6419

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณวิตามินซี	ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณวิตามินซี
71	271-13-IO	9.4871	86	314-15-IR	8.2118
72	272-13-IO	12.6100	87	315-15-IR	8.0006
73	273-13-IO	12.6191	88	316-15-IR	8.3761
74	274-13-IR	8.6552	89	331-16-IO	6.7003
75	275-13-IR	8.3546	90	332-16-IO	6.8375
76	276-13-IR	8.8670	91	333-16-IO	5.9853
77	291-14-IO	8.1186	92	335-16-IR	6.8986
78	292-14-IO	8.5507	93	336-16-IR	12.4604
79	293-14-IO	16.4645	94	351-17-IO	5.3737
80	294-14-IR	7.5749	95	352-17-IO	5.6070
81	295-14-IR	6.5106	96	353-17-IO	7.7294
82	296-14-IR	7.9185	97	354-17-IR	6.5304
83	311-15-IO	13.8201	98	355-17-IR	5.7880
84	312-15-IO	6.7020	99	356-17-IR	6.9566
85	313-15-IO	7.2483			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก2 ผลการตรวจวัดปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศ GAP ด้วยวิธีอ้างอิงในหน่วย mg/100g

ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณวิตามินซี	ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณวิตามินซี
1	83-4-HO	8.8584	36	217-10-HO	8.8621
2	84-4-HO	6.9637	37	218-10-HO	5.8340
3	85-4-HO	7.0496	38	219-10-HO	8.9086
4	86-4-HR	7.6545	39	220-10-HR	8.4711
5	87-4-HR	7.2066	40	221-10-HR	9.0054
6	88-4-HR	5.4778	41	222-10-HR	8.3915
7	101-5-HR	5.9176	42	237-11-HO	9.8147
8	102-5-HR	6.4675	43	238-11-HO	8.1860
9	103-5-HR	6.3695	44	239-11-HO	8.6940
10	104-5-HO	8.0566	45	240-11-HR	8.7107
11	105-5-HO	6.3381	46	241-11-HR	8.4229
12	106-5-HO	6.9900	47	242-11-HR	9.1500
13	137-6-HO	7.3427	48	258-12-HO	10.1586
14	138-6-HO	6.8249	49	259-12-HO	9.4457
15	139-6-HO	7.5879	50	260-12-HR	8.1139
16	140-6-HR	7.0650	51	261-12-HR	7.4103
17	141-6-HR	6.9437	52	262-12-HR	8.1575
18	142-6-HR	6.8880	53	277-13-HO	9.3198
19	157-7-HO	6.4666	54	278-13-HO	8.7371
20	158-7-HO	5.7303	55	279-13-HO	8.1671
21	159-7-HO	7.9809	56	280-13-HR	7.9215
22	160-7-HR	7.3862	57	281-13-HR	8.2877
23	161-7-HR	7.1729	58	282-13-HR	7.9010
24	162-7-HR	7.4682	59	297-14-HO	8.3487
25	177-8-HO	7.2612	60	298-14-HO	8.4490
26	179-8-HO	8.9313	61	299-14-HO	8.5477
27	180-8-HR	7.7350	62	300-14-HR	7.2965
28	181-8-HR	7.1925	63	301-14-HR	7.1199
29	182-8-HR	7.0970	64	302-14-HR	7.3139
30	197-9-HO	8.5148	65	317-15-HO	8.3593
31	198-9-HO	8.9285	66	318-15-HO	8.5904
32	199-9-HO	9.1229	67	319-15-HO	8.7856
33	200-9-HR	5.5398	68	320-15-HR	8.6732
34	201-9-HR	7.7354	69	321-15-HR	7.8609
35	202-9-HR	6.9181	70	322-15-HR	8.6218

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณวิตามินซี	ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณวิตามินซี
71	337-16-HO	7.2703	85	373-18-HO	7.7980
72	338-16-HO	8.4995	86	374-18-HO	7.8877
73	339-16-HO	8.1019	87	375-18-HO	8.5020
74	340-16-HR	7.4145	88	376-18-HO	7.7748
75	341-16-HR	6.5488	89	379-18-HO	6.7464
76	342-16-HR	7.0869	90	380-18-HR	6.7246
77	357-17-HO	6.6852	91	381-18-HR	5.8225
78	358-17-HO	7.7934	92	382-18-HR	8.4420
79	359-17-HO	5.8789	93	383-18-HR	6.9891
80	360-17-HR	5.7374	94	384-18-HR	6.0002
81	361-17-HR	6.9987	95	385-18-HR	5.5272
82	362-17-HR	6.9488	96	386-18-HR	7.4758
83	371-18-HO	7.7668	97	387-18-HR	5.5595
84	372-18-HO	7.7027	98	388-18-HR	6.6362

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก1 ผลการตรวจวัดปริมาณวิตามินซีในมะเขือเทศทั่วไปกับมะเขือเทศ GAP ด้วยวิธีอ้างอิงใน
หน่วย mg/100g

ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณวิตามินซี	ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณวิตามินซี
1	5-1-IO	21.7834	35	151-7-IO	6.8233
2	6-1-IO	21.4304	36	152-7-IO	6.2941
3	7-1-IR	23.0938	37	153-7-IO	7.9895
4	8-1-IR	24.1397	38	154-7-IR	8.0406
5	9-1-IR	8.1401	39	155-7-IR	7.5469
6	28-2-IO	19.0255	40	156-7-IR	7.5469
7	29-2-IO	15.7508	41	171-8-IO	7.4553
8	30-2-IO	13.7987	42	172-8-IO	6.8964
9	31-2-IR	8.9633	43	173-8-IO	6.4358
10	33-2-IR	8.1037	44	174-8-IR	7.5962
11	58-3-IO	12.2246	45	175-8-IR	7.3717
12	59-3-IO	12.6678	46	176-8-IR	7.2609
13	60-3-IO	7.7108	47	191-9-IO	11.7228
14	61-3-IR	7.2907	48	192-9-IO	12.6397
15	62-3-IR	8.2189	49	193-9-IO	13.6930
16	63-3-IR	7.5725	50	194-9-IR	8.8581
17	74-4-IO	8.4718	51	195-9-IR	9.5282
18	75-4-IO	23.9955	52	196-9-IR	6.9531
19	76-4-IO	23.9331	53	211-10-IO	8.2661
20	77-4-IR	7.6477	54	212-10-IO	7.3812
21	78-4-IR	7.5800	55	213-10-IO	9.3070
22	79-4-IR	8.1820	56	214-10-IR	8.1041
23	110-5-IR	7.3758	57	215-10-IR	7.8499
24	111-5-IR	6.0913	58	216-10-IR	7.9762
25	112-5-IR	6.5187	59	231-11-IO	8.0732
26	113-5-IO	6.9706	60	232-11-IO	8.2757
27	114-5-IO	6.8424	61	233-11-IO	8.7922
28	115-5-IO	7.9015	62	234-11-IR	7.8975
29	131-6-IO	7.3381	63	235-11-IR	8.8147
30	132-6-IO	6.7442	64	236-11-IR	8.1516
31	133-6-IO	7.2425	65	251-12-IO	8.4856
32	134-6-IR	6.5785	66	252-12-IO	9.8322
33	135-6-IR	6.4231	67	253-12-IO	9.1929
34	136-6-IR	6.5475	68	254-12-IR	9.4145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณวิตามินซี	ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณวิตามินซี
69	255-12-IR	8.9641	104	87-4-HR	7.2066
70	256-12-IR	8.6419	105	88-4-HR	5.4778
71	271-13-IO	9.4871	106	101-5-HR	5.9176
72	272-13-IO	12.6100	107	102-5-HR	6.4675
73	273-13-IO	12.6191	108	103-5-HR	6.3695
74	274-13-IR	8.6552	109	104-5-HO	8.0566
75	275-13-IR	8.3546	110	105-5-HO	6.3381
76	276-13-IR	8.8670	111	106-5-HO	6.9900
77	291-14-IO	8.1186	112	137-6-HO	7.3427
78	292-14-IO	8.5507	113	138-6-HO	6.8249
79	293-14-IO	16.4645	114	139-6-HO	7.5879
80	294-14-IR	7.5749	115	140-6-HR	7.0650
81	295-14-IR	6.5106	116	141-6-HR	6.9437
82	296-14-IR	7.9185	117	142-6-HR	6.8880
83	311-15-IO	13.8201	118	157-7-HO	6.4666
84	312-15-IO	6.7020	119	158-7-HO	5.7303
85	313-15-IO	7.2483	120	159-7-HO	7.9809
86	314-15-IR	8.2118	121	160-7-HR	7.3862
87	315-15-IR	8.0006	122	161-7-HR	7.1729
88	316-15-IR	8.3761	123	162-7-HR	7.4682
89	331-16-IO	6.7003	124	177-8-HO	7.2612
90	332-16-IO	6.8375	125	179-8-HO	8.9313
91	333-16-IO	5.9853	126	180-8-HR	7.7350
92	335-16-IR	6.8986	127	181-8-HR	7.1925
93	336-16-IR	12.4604	128	182-8-HR	7.0970
94	351-17-IO	5.3737	129	197-9-HO	8.5148
95	352-17-IO	5.6070	130	198-9-HO	8.9285
96	353-17-IO	7.7294	131	199-9-HO	9.1229
97	354-17-IR	6.5304	132	200-9-HR	5.5398
98	355-17-IR	5.7880	133	201-9-HR	7.7354
99	356-17-IR	6.9566	134	202-9-HR	6.9181
100	83-4-HO	8.8584	135	217-10-HO	8.8621
101	84-4-HO	6.9637	136	218-10-HO	5.8340
102	85-4-HO	7.0496	137	219-10-HO	8.9086
103	86-4-HR	7.6545	138	220-10-HR	8.4711

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณวิตามินซี	ลำดับ	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณวิตามินซี
139	221-10-HR	9.0054	169	322-15-HR	8.6218
140	222-10-HR	8.3915	170	337-16-HO	7.2703
141	237-11-HO	9.8147	171	338-16-HO	8.4995
142	238-11-HO	8.1860	172	339-16-HO	8.1019
143	239-11-HO	8.6940	173	340-16-HR	7.4145
144	240-11-HR	8.7107	174	341-16-HR	6.5488
145	241-11-HR	8.4229	175	342-16-HR	7.0869
146	242-11-HR	9.1500	176	357-17-HO	6.6852
147	258-12-HO	10.1586	177	358-17-HO	7.7934
148	259-12-HO	9.4457	178	359-17-HO	5.8789
149	260-12-HR	8.1139	179	360-17-HR	5.7374
150	261-12-HR	7.4103	180	361-17-HR	6.9987
151	262-12-HR	8.1575	181	362-17-HR	6.9488
152	277-13-HO	9.3198	182	371-18-HO	7.7668
153	278-13-HO	8.7371	183	372-18-HO	7.7027
154	279-13-HO	8.1671	184	373-18-HO	7.7980
155	280-13-HR	7.9215	185	374-18-HO	7.8877
156	281-13-HR	8.2877	186	375-18-HO	8.5020
157	282-13-HR	7.9010	187	376-18-HO	7.7748
158	297-14-HO	8.3487	188	379-18-HO	6.7464
159	298-14-HO	8.4490	189	380-18-HR	6.7246
160	299-14-HO	8.5477	190	381-18-HR	5.8225
161	300-14-HR	7.2965	191	382-18-HR	8.4420
162	301-14-HR	7.1199	192	383-18-HR	6.9891
163	302-14-HR	7.3139	193	384-18-HR	6.0002
164	317-15-HO	8.3593	194	385-18-HR	5.5272
165	318-15-HO	8.5904	195	386-18-HR	7.4758
166	319-15-HO	8.7856	196	387-18-HR	5.5595
167	320-15-HR	8.6732	197	388-18-HR	6.6362
168	321-15-HR	7.8609			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นางสาวคันธรัตน์ กล่อมเกลี้ยง
- วัน เดือน ปีเกิด 18 ตุลาคม 2536
- ที่อยู่ตามทะเบียนบ้าน 39 หมู่ 1 ตำบล กบเจา อำเภอบางบาล จ. พระนครศรีอยุธยา
- โทรศัพท์ 098-2621133
- E-mail kan_tharat@hotmail.com
- ประวัติการศึกษา ปีการศึกษา 2558 จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ประวัติการทำงาน นักศึกษาฝึกงาน บริษัท กมล อินดัสตรี จำกัด
- ประสบการณ์และผลงานวิจัย
- พ.ศ.2557 โครงการปริญญาโท เรื่อง การประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี สำหรับการวัดเบต้ากลูแคนในเห็ดหอมฟรีซดราย (Application of near infrared spectroscopy for evaluation of beta-glucan in freeze dried shitake mushroom)
 - พ.ศ.2559 ส่งผลงานเข้าร่วมการประชุม The 18th TSAE National Conference and the 10th TSAE International Conference: TSAE 2016 เรื่อง Scanning precision test for organic and inorganic tomatoes at different maturity levels

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้