



การคัดแยกกลิ่นจีพีพีรีเมียมด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
ปีการศึกษา 2567
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การคัดแยกกลิ่นจี่พรีเมียมด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
ปีการศึกษา 2567
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การคัดแยกกลิ่นจี่พรีเมียมด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี"

ของ สาวินี สลับสี

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....	ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พันธ์สิริ สุทธิลักษณ์)	
.....	ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวลักษณ์ รุ่งแจ้ง)	
.....	กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สนธยา นุ่มท้วม)	
.....	กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณิกา อินต๊ะนนท์)	
.....	กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรสิทธิ์ โทจำปา)	

อนุมัติ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การคัดแยกลิ้นจี่พรีเมียมด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี
ผู้วิจัย	สาวินี สลับสี
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสาวลักษณ์ รุ่งแจ้ง
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สนธยา นุ่มท้วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณิกา อินตะนนท์
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2567
คำสำคัญ	ลิ้นจี่, คัดแยกเกรด, วิธีวัดแบบไม่ทำลาย, เทคนิคเนียร์อินฟราเรด

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการคัดแยกลิ้นจี่พรีเมียมแบบรวดเร็วด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Near infrared spectroscopy; NIRS) ในการตรวจสอบลิ้นจี่พรีเมียมด้วยวิธีการสร้างองค์ประกอบหลัก (principal component analysis; PCA) พร้อมทั้งตรวจสอบคุณภาพภายในของผลลิ้นจี่พรีเมียม การศึกษานี้ใช้ตัวอย่างลิ้นจี่พันธุ์ป่าชิดจำนวน 100 ผล โดยหลังการเก็บเกี่ยวจะนำลิ้นจี่ทั้งหมดมาลดอุณหภูมิผลลิ้นจี่ด้วยน้ำเย็น (Precooling) ที่ 4 องศาเซลเซียส เพื่อลดอัตราการหายใจ ป้องกันการสูญเสียน้ำและรสชาติของผลลิ้นจี่ จากนั้นเก็บรักษาผลลิ้นจี่ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส นำมาวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS ที่ตำแหน่งบนผลลิ้นจี่ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ตำแหน่งขั้วผล แก้มผล และท้ายผล ในช่วงความยาวเลซคลื่น $12000 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ ในระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ แล้วนำผลลิ้นจี่จากแต่ละตำแหน่งบนผลที่ทำกรวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS ไปวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี สร้างสมการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากการวัดในแต่ละตำแหน่งผลกับค่าทางเคมี ด้วยเทคนิคกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial least square regression; PLSR)

จากการวิเคราะห์ Confusion Matrix ระหว่างการคัดแยกผลลิ้นจี่จากพนักงานกับการผ่าตรวจสอบภายใน แสดงให้เห็นว่าระบบการคัดแยกของพนักงานมีความแม่นยำโดยรวมค่อนข้างดี แต่ยังมีการคัดแยกผิดพลาดระหว่างลิ้นจี่เมล็ดปกติและเมล็ดลีบที่พบการถูกทำลายของหนอน ซึ่งอาจเกิดจากลักษณะภายนอกที่คล้ายคลึงกัน จากการศึกษาพบว่าเทคนิค NIRS สามารถคัดแยกผลลิ้นจี่พรีเมียมออกจากลิ้นจี่เมล็ดปกติได้อย่างชัดเจนที่สุดจากตำแหน่งแก้มผลได้ดีที่สุด ที่ 96.78% อย่างไรก็ตามเทคนิค NIRS ไม่สามารถแยกลิ้นจี่พรีเมียมได้จากการถูกทำลายของหนอน โดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ตำแหน่งของการวัดสเปกตรัมบนผลลิ้นจี่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการ

ทำนายค่าด้วยเทคนิค NIRS อย่างไรก็ตามการคัดแยกผลลึ้นจีของการถูกทำลายของหนอนด้วยวิธี Linear discriminant analysis (LDA) พบว่าสามารถจำแนกผลลึ้นจีที่ถูกทำลายโดยหนอนได้ที่บริเวณข้าวผลที่ 92% ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการวางไข่ของหนอนเจาะข้าวและลักษณะทางกายภาพของผลลึ้นจีที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่ง ส่งผลให้การสะท้อนแสง NIR แตกต่างกันไป โดยอิทธิพลของตำแหน่งบนผลลึ้นจีมีผลต่อการทำนายคุณภาพ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solids; TSS) และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Titratable acidity; TA) โดยสมการการทำนายในการตรวจสอบค่า TSS และ TA ที่ตำแหน่งแก้มผลมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient; R) สูงกว่าตำแหน่งอื่นๆและมีค่าความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนาย (Root mean square error of cross validation; RMSECV) ต่ำกว่าตำแหน่งอื่นบนผลลึ้นจี โดยมีค่า R เท่ากับ 0.96 และ 0.96 และมีค่า RMSECV เท่ากับ 0.351 และ 0.0379 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามค่า R ของ TSS และ TA ที่ได้จากตำแหน่งข้าวผลและท้ายผลมีค่ามากกว่า 0.85 ซึ่งสามารถใช้ในการคัดเลือกและประมาณค่าได้

ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดมาใช้ในการคัดแยกผลลึ้นจีพรีเมียมและการตรวจวัดดัชนีคุณภาพของผลลึ้นจีพรีเมียมในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งช่วยลดเวลาและขั้นตอนในการวิเคราะห์ และเหมาะสำหรับการตรวจสอบจำนวนปริมาณตัวอย่างขนาดใหญ่ ซึ่งนำไปสู่การวางแผนผลิตได้อย่างถูกต้อง และขับเคลื่อนของอุตสาหกรรมผลไม้ให้ทันทั้งที่ต่อความต้องการของตลาด

Title	GRADING OF PREMIUM LITCHI BY USING NEAR INFRARED SPECTROSCOPY (NIRS) TECHNIQUE
Author	Sawinee Salabsee
Advisor	Assistant Professor Saowaluk Rungchang, Ph.D.
Co-Advisor	Assistant Professor Sonthaya Numthuam, Ph.D. Assistant Professor Suphannika Intanon, Ph.D.
Academic Paper	M.S. Thesis in Food Science and Technology - (Type A 2), Naresuan University, 2024
Keywords	Litchi, Grading, Non-destructive, Near infrared spectroscopy

ABSTRACT

This research aims to study the feasibility of rapidly sorting premium litchis using Near Infrared Spectroscopy (NIRS) techniques to inspect premium litchis through principal component analysis (PCA). Additionally, the study investigates the internal quality of premium litchis. The study utilizes 100 samples of "Pa Chit" litchis. After harvesting, all litchis are precooled with cold water at 4 °C to reduce respiration rates, preventing water loss and flavor degradation. The litchis are then stored at 5 °C. Spectra are measured using NIRS at different positions on the litchi fruit, including the stem, cheek, and bottom, in the wavelength range of 12000–4000 cm^{-1} in reflection mode. The litchi samples from each position, measured with NIRS, are then chemically analyzed. A relationship between the spectral data from each fruit position and the chemical values is established using partial least squares regression (PLSR). The study found that the confusion matrix analysis between litchi sorting by staff and internal inspection showed overall good accuracy in the staff's sorting system. However, there were errors in sorting between normal seeds and shriveled seeds damaged by larvae, possibly due to similar external appearances. The study concluded that the NIRS technique could clearly differentiate premium litchis from normal seed litchis, with the best accuracy at 96.78% from the cheek position. However, NIRS could not distinguish premium litchis damaged by larvae using PCA. The spectrum measurement position on the litchi affects the prediction efficiency

using NIRS. Nonetheless, sorting litchis damaged by larvae using linear discriminant analysis (LDA) showed a 92% accuracy at the stem end, which aligns with the egg-laying behavior of stem-boring larvae and different physical characteristics of the litchi at each position, leading to different NIR reflections. The litchi position influences the prediction of quality, including total soluble solids (TSS) and titratable acidity (TA). The prediction equations for TSS and TA at the cheek position have higher correlation coefficients (R) and lower root mean square error of cross validation (RMSECV) compared to other positions on the litchi, with R values of 0.96 and 0.96 and RMSECV values of 0.351 and 0.0379, respectively. However, the R values for TSS and TA at the stem and bottom positions are greater than 0.85, indicating feasibility for selection and estimation. Therefore, NIRS technique is suitable for using to monitor the sorting of premium litchi and measuring the quality index of premium litchi in the industrial scale. It is possible to save time, reduce the analysis steps and suitable for large amount of the sample. This technique can be used to assist in production planning and control the product quality and ensure a timely delivery of the growing market demand

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ ดร.เสาวลักษณ์ รุ่งแจ้ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งขอบพระคุณอย่างมากที่สอนให้ผู้เขียนได้เข้าใจว่าความตั้งใจ ความละเอียด ความรอบคอบในการทำงานทุกอย่างมีความสำคัญอย่างมาก ผู้เขียนขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สนธยา นุ่มท้วม และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพรรณิกา อินตะนันท์ ที่กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมในการทำวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้ความรู้และคำแนะนำเป็นอย่างดีเกี่ยวกับเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีและลิ้นจี่ อีกทั้งยังช่วยสละเวลาเป็นอย่างมากในการตรวจและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พันธุ์สิริ สุทธิลักษณ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรสิทธิ์ โทจำปา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณไร่ บี.เอ็น ที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดีในการเข้าไปทำวิจัยและเก็บข้อมูลในไร่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ลิ้นจี่พันธุ์ป่าชิดสำหรับการทำการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้

สุดท้ายนี้ขอกราบพระคุณบุคคลในครอบครัวอันเป็นที่รักของผู้วิจัยที่ให้อำนาจใจ ช่วยเหลือและให้การสนับสนุนในทุกๆด้านอย่างดีเสมอมา ผู้วิจัยขอกราบพระคุณด้วยความรักและความเคารพอย่างสูง

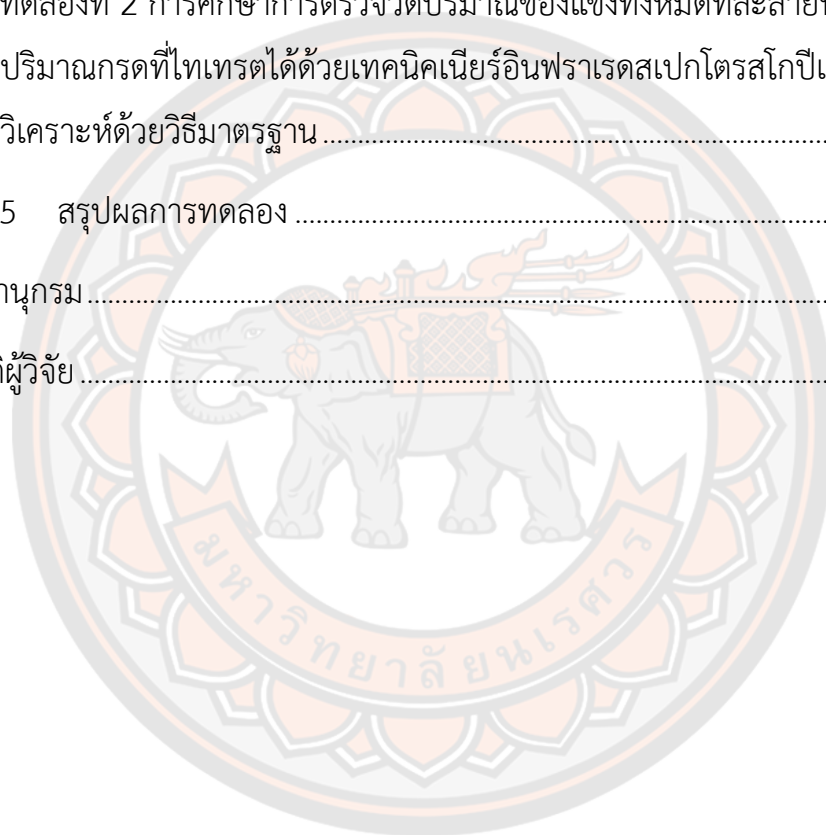
ผู้วิจัยหวังว่าข้อมูลจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นส่วนเล็กๆส่วนหนึ่งที่จะเป็นประโยชน์สำหรับการตรวจสอบคุณภาพผลลิ้นจี่ เพื่อช่วยเกษตรกรและการเกษตรไทยมีความก้าวหน้าไม่ทางตรงก็ทางอ้อม

สาวินี สลับสี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ	
ประกาศคุุณูปการ.....ช	
สารบัญ.....ซ	
สารบัญตาราง.....ญ	
สารบัญภาพ.....ท	
อักษรย่อ.....ณ	
บทที่ 1 บทนำ.....1	
ความเป็นมาของปัญหา.....1	
ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....2	
ขอบเขตการวิจัย.....2	
สมมติฐานของการวิจัย.....2	
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3	
ลิ้นจี่ (<i>Litchi chinensis</i> Sonn.).....3	
เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Near infrared spectroscopy; NIRS).....18	
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....39	
วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย.....39	
สารเคมี.....39	
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....39	

วิธีการวิจัย	40
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง	44
ผลการเปรียบเทียบเพื่อหาประสิทธิภาพของการคัดแยกผลล้นจี่	44
การทดลองที่ 1 การศึกษาลักษณะเมล็ดภายในและการถูกทำลายของหนอนของผลล้นจี่ ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด	45
การทดลองที่ 2 การศึกษาการตรวจวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และ ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีเทียบกับการ วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	65
บรรณานุกรม	67
ประวัติผู้วิจัย	111



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 องค์ประกอบและลักษณะทางสรีรวิทยาของผลลิ้นจี่ที่สุก	8
ตาราง 2 สถิติการผลิตลิ้นจี่ของประเทศไทย ตั้งแต่ปี 2561-2565	14
ตาราง 3 ปริมาณการส่งออกลิ้นจี่ของไทย ตั้งแต่ปี 2561-2563	15
ตาราง 4 Confusion matrix	16
ตาราง 5 การแบ่งชนิดแถบอินฟราเรดย่านใกล้	20
ตาราง 6 เกณฑ์การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ..	32
ตาราง 7 เกณฑ์การพิจารณาค่าอัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่ม Validation ต่อค่า SEP (RPD).....	33
ตาราง 8 Confusion Matrix การคัดแยกลิ้นจี่ระหว่างพนักงานและการตรวจภายใน	44
ตาราง 9 ค่าต่ำสุด ค่าต่ำสุด ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณของแข็งทั้งหมด ที่ละลายน้ำได้ (TSS) และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (TA) ของลิ้นจี่	53
ตาราง 10 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS regression ของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ ได้ในตัวอย่างลิ้นจี่ ทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ขั้วผล แก้มผล และท้ายผล	54
ตาราง 11 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS regression ของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ ได้ในตัวอย่างลิ้นจี่ ทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ขั้วผล แก้มผล และท้ายผลที่ปรับแต่งด้วย second derivative	55
ตาราง 12 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS regression ของปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ในตัวอย่าง ลิ้นจี่ ทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ขั้วผล แก้มผล และท้ายผล	60
ตาราง 13 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS regression ของปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ในตัวอย่าง ตัวอย่างลิ้นจี่ ทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ขั้วผล แก้มผล และท้ายผลที่ปรับแต่งด้วย second derivative	61

ตาราง 14 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้อผล ที่ไม่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัม.....	77
ตาราง 15 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้อผล ที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย SNV.....	78
ตาราง 16 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้อผล ที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย MSC.....	79
ตาราง 17 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้อผล ที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย First derivative.....	80
ตาราง 18 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้อผล ที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย Second derivative.....	81
ตาราง 19 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้อผล ที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย First derivative ร่วมกับ SNV.....	82
ตาราง 20 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้ว ผลที่ไม่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัม.....	83
ตาราง 21 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้ว ผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย SNV.....	84
ตาราง 22 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้ว ผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย MSC.....	85
ตาราง 23 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้ว ผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย First derivative.....	86
ตาราง 24 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้ว ผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย Second derivative.....	87
ตาราง 25 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIR ในตำแหน่งแก้ว ผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย First derivative ร่วมกับ SNV.....	88

ตาราง 26 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้าย ผลที่ไม่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัม.....	89
ตาราง 27 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้าย ผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย SNV	90
ตาราง 28 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้าย ผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย MSC.....	91
ตาราง 29 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้าย ผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย First derivative	92
ตาราง 30 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้าย ผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย Second derivative	93
ตาราง 31 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้าย ผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย First derivative ร่วมกับ SNV.....	94
ตาราง 32 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งหัวผลที่ไม่ผ่านการ ปรับแต่งสเปกตรัม	95
ตาราง 33 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งหัวผลที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วย SNV	96
ตาราง 34 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งหัวผลที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วย MSC	97
ตาราง 35 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งหัวผลที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วย First derivative.....	98
ตาราง 36 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งหัวผลที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วย Second derivative	99
ตาราง 37 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งหัวผลที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วย First derivative ร่วมกับ SNV.....	100

ตาราง 38 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้มผลที่ไม่ผ่าน การปรับแต่งสเปกตรัม	101
ตาราง 39 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้มผลที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วย SNV	102
ตาราง 40 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้มผลที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วย MSC	103
ตาราง 41 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้มผลที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วย First derivative.....	104
ตาราง 42 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้มผลที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วย Second derivative	105
ตาราง 43 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้มผลที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วย First derivative ร่วมกับ SNV.....	106
ตาราง 44 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้ายผลที่ไม่ผ่าน การปรับแต่งสเปกตรัม	107
ตาราง 45 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้ายผลที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วย SNV	108
ตาราง 46 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้ายผลที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วย MSC	109
ตาราง 47 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้ายผลที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วย First derivative.....	110

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 <i>Litchi chinensis</i> Sonn. บริเวณกิ่งที่ออกดอกและช่อผล	4
ภาพ 2 หนอนเจาะชั่วผล (ก) และผลลึ้นจี้ถูกหนอนเจาะชั่วทำลาย (ข).....	13
ภาพ 3 ตำแหน่งรังสีสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในแถบสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า...	19
ภาพ 4 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานการสั่น	19
ภาพ 5 อินฟราเรดย่านใกล้สเปกตรัมเป็นกราฟของค่าการดูดกลืนกับความยาวคลื่น	21
ภาพ 6 องค์ประกอบของสเปกโตรมิเตอร์ NIR.....	22
ภาพ 7 ลักษณะการเกิดปฏิสัมพันธ์ของตัวอย่างกับแสง NIR	24
ภาพ 8 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม NIR.....	26
ภาพ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรใหม่กับข้อมูลในตัวแปรเดิมของตัวแปรอิสระ.....	28
ภาพ 10 สเปกตรัมของข้าว ถั่วเหลือง แป้ง และองค์ประกอบอื่นๆ เช่น น้ำ น้ำมัน ที่ได้จากการวัด ด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปี NIR	34
ภาพ 11 การแบ่งตำแหน่งของลึ้นจี้สำหรับการทดลอง	39
ภาพ 12 ลักษณะภายในของผลลึ้นจี้พันธุ์ป่าชิด (a) ลึ้นจี้เมล็ดปกติ ไม่พบการถูกทำลายของหนอน, (b) ลึ้นจี้เมล็ดปกติ พบการถูกทำลายของหนอน, (c) ลึ้นจี้เมล็ดลีบ ไม่พบการถูกทำลายของหนอน และ (d) ลึ้นจี้เมล็ดลีบ พบการถูกทำลายของหนอน	40
ภาพ 13 การวางตัวอย่างในการวัดสเปกตรัม	41
ภาพ 14 สเปกตรัมเฉลี่ยของลึ้นจี้พันธุ์ป่าชิด	46
ภาพ 15 สเปกตรัมเฉลี่ยของลึ้นจี้พันธุ์ป่าชิดที่ผ่านการปรับแต่งด้วย second derivative...	46
ภาพ 16 PCA score plots ของผลลึ้นจี้จากเมล็ดปกติและเมล็ดลีบ ที่ตำแหน่ง (a) ชั่วผล, (b) แก้มผล, และ (c) ท้ายผล	49

ภาพ 17 PCA score plots ของผลลึ้นจากการถูกทำลายของหนอน ที่ตำแหน่ง (a) ข้าวผล, (b) แก้มผล, และ (c) ท้ายผล	50
ภาพ 18 Linear discriminant analysis (LDA) ในช่วงเลขคลื่น $12000 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ ของผลลึ้นจากการถูกทำลายของหนอน ที่ตำแหน่ง (a) ข้าวผล, (b) แก้มผล, และ (c) ท้ายผล	51
ภาพ 19 ความสัมพันธ์ของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของตัวอย่างลึ้นจี่ที่ได้จากค่าจริงและค่าที่ทำนายได้จาก NIRS ของสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วย second derivative ทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ (a) ข้าวผล, (b), แก้มผล และ (c) ท้ายผล	57
ภาพ 20 Regression coefficient ของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ที่ได้จากการวัดสเปกตรัมที่ตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค NIRS ที่ผ่านปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี second derivative	58
ภาพ 21 ความสัมพันธ์ของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของตัวอย่างลึ้นจี่ที่ได้จากค่าจริงและค่าที่ทำนายได้จาก NIRS ของสเปกตรัม ที่ผ่านการปรับแต่งด้วย second derivative ทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ (a) ข้าวผล, (b) แก้มผล และ (c) ท้ายผล	63
ภาพ 22 Regression coefficient ของปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จากการวัดสเปกตรัมที่ตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค NIRS ที่ผ่านปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี second derivative	64

อักษรย่อ

AV	=	Average
cm ⁻¹	=	Per centimeter
Dif	=	Difference
F	=	Factor of number
MAX	=	Maximum
MIN	=	Minimum
MSC	=	Multiplicative scatter correlation
N	=	Number
NIRS	=	Near infrared spectroscopy
nm	=	Nanometer
P	=	Predicted
PCA	=	Principal component analysis
PLSR	=	Partial least square regression
R	=	Correlation coefficient
R ²	=	Coefficient of determination
RMSEC	=	Root mean square error calibration
RMSECV	=	Root mean square error of cross validation
RPD	=	Residual prediction deviation
SD	=	Standard deviation
SNV	=	Standard normal variate
T	=	True

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

ลิ้นจี่ (*Litchi chinensis* Sonn.) เป็นผลไม้ที่มีความสำคัญในเศรษฐกิจ ส่วนใหญ่จะปลูกในทวีปเอเชีย ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศที่ผลิตลิ้นจี่อย่างมาก ในปี 2564 ไทยส่งออกลิ้นจี่สดออกไปยังเอเชียตะวันออกเฉียงใต้อันดับ 2 และอันดับ 10 ของโลก มูลค่ารวมกว่า 27.73 ล้านบาท (กรมวิชาการเกษตร, 2565) ในปัจจุบันมีการพัฒนาสายพันธุ์ลิ้นจี่ให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค เช่น สายพันธุ์ป่าชิด โดยลักษณะลิ้นจี่พันธุ์ป่าชิดมีลักษณะผลโต เนื้อหนา รสหวาน แต่ละต้นนอกจากจะมีเมล็ดขนาดปกติแล้วยังมีผลที่มีขนาดเมล็ดลีบเล็กอยู่ด้วยจำนวนมาก โดยคัดผลผลิตออกจำหน่ายสู่ตลาดออกเป็น 2 เกรด คือ เกรดพรีเมียม จะคัดผลสวย เมล็ดลีบเล็ก ตัดก้านสั้น และเกรดเอ จะคัดผลสวย มีก้าน เมล็ดขนาดปกติ รสชาติเหมือนกับเกรดพรีเมียม ลิ้นจี่พันธุ์ป่าชิดเก็บผลในช่วงปลายเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนมิถุนายน

ปัจจุบันการตรวจสอบคุณภาพของลิ้นจี่โดยทั่วไปใช้การตรวจสอบจากประสบการณ์ของผู้ผลิตซึ่งจะแตกต่างกันในแต่ละบุคคล ส่งผลต่อความสม่ำเสมอในคุณภาพของผลลิ้นจี่และอาจจะมีผลผิดพลาดได้ นอกจากนี้ยังใช้การตรวจสอบทางกายภาพและเคมี เช่น ตรวจสอบค่า TSS เป็นต้น ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่ทำลายตัวอย่าง ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบคุณภาพลิ้นจี่ได้ทุกผล ส่งผลต่อความไม่แน่นอนด้านคุณภาพ จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้เทคนิคการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายตัวอย่างในการตรวจวัดคุณภาพของลิ้นจี่

เทคนิคด้านเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Near infrared spectroscopy; NIRS) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการประเมินคุณภาพแบบไม่ทำลายตัวอย่าง โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงเลขคลื่น $12000-4000\text{ cm}^{-1}$ โดยเทคนิค NIRS อาศัยหลักการสั่น (Vibration) ของพันธะภายในโมเลกุลของสารอินทรีย์ ซึ่งการสั่นของพันธะ O-H, C-H และ N-H ของสารอินทรีย์ในตัวอย่างจะทำให้เกิดการดูดกลืนแสง (Absorption) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ จากนั้นสามารถนำค่าการดูดกลืนแสง NIR ไปหาความสัมพันธ์กับข้อมูลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของตัวอย่างต่อไปได้ด้วยเทคนิคทางเคโมเมทริกซ์ (Chemometrics) (Osborne B.G, 1993) มีรายงานว่าเทคนิค NIRS ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของผลลิ้นจี่หลายด้าน เช่น การหาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในผลลิ้นจี่ (Thanapase, Janhiran, Kasemsumran, & Anusornwongchai, 2012) การทำนายค่า pH และระยะการสุกของผลลิ้นจี่ (Pu, Liu, Wang, & Sun, 2016) และการจำแนกโรค

ผลเน่าของลิ้นจี่ (Li et al., 2022) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคโนโลยี NIRS ในการจำแนก ลักษณะภายในของผลไม้ เช่น การจัดกลุ่มและคัดแยกผลอินทผลัมที่มีการเข้าทำลายของเชื้อรา (Teena, Manickavasagan, Ravikanth, & Jayas, 2014) การตรวจสอบโรคแอนแทรกโนสใน มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง (Sonthiya, Seehanam, Theanjumol, & Maniwaru, 2022) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี NIRS ในการ คัดแยกเกรดลิ้นจี่พรีเมียมจากลักษณะเมล็ดภายในผลลิ้นจี่รวมไปถึงการตรวจสอบคุณภาพของเนื้อ ลิ้นจี่แบบรวดเร็วและไม่ทำลายตัวอย่าง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือในการตรวจสอบ ผลลิ้นจี่และยังช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันด้านการส่งออกผลไม้ของไทยได้ในอนาคต

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1. เพื่อคัดแยกกลุ่มผลลิ้นจี่จากขนาดเมล็ดภายในและการถูกทำลายของหนอนโดยใช้เทคนิค เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีมาใช้ในการ วิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ในผลลิ้นจี่

ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาที่ 1 การสร้างแบบจำลองเพื่อคัดแยกเกรดผลลิ้นจี่พรีเมียมด้วยวิธีการสร้าง องค์ประกอบหลัก (principal component analysis; PCA)

การศึกษาที่ 2 การสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายคุณภาพเนื้อผลลิ้นจี่ด้วยวิธี Partial least square regression

สมมติฐานของการวิจัย

1. เทคนิค NIRS สามารถใช้ในการคัดแยกเกรดผลลิ้นจี่พรีเมียมจากลักษณะเมล็ดภายในและ การทำลายของหนอนในผลลิ้นจี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ
2. เทคนิค NIRS สามารถใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของเนื้อลิ้นจี่แบบรวดเร็วและไม่ทำลาย ตัวอย่างได้อย่างแม่นยำเพื่อทดแทนวิธีแบบเดิม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลิ้นจี่ (*Litchi chinensis* Sonn.)

ถิ่นกำเนิดและการกระจายพันธุ์

ลิ้นจี่ชนิดที่เป็นสายพันธุ์ปลูกมีถิ่นกำเนิดในพื้นที่ในแถบตอนใต้ของจีน ตอนเหนือของเวียดนามและมาเลเซีย พบขึ้นอยู่ตามธรรมชาติในป่าฝนบนพื้นล่างและที่สูง ในบางพื้นที่ทางตอนใต้ของจีนลิ้นจี่เป็นพรรณไม้หลักในป่า ลิ้นจี่มีประวัติอันยาวนานในจีน มีการคัดเลือกพันธุ์อย่างจริงจังและเป็นไม้ผลที่มีการปลูกในแถบมาเลเซียตั้งแต่ 1,500 ปีก่อนคริสตกาล ซึ่งเป็นเวลาอันยาวนานก่อนหน้าที่ชาวจีนจะอพยพลงมาทางใต้ อย่างไรก็ตามการแพร่พันธุ์ของลิ้นจี่ในช่วงเวลา 400 ปีที่ผ่านมาเป็นไปอย่างช้าๆเนื่องจากต้องการสภาพแวดล้อมค่อนข้างจำกัดในการเจริญเติบโต และเมล็ดคงความงอกได้ในช่วงสั้นๆในพื้นที่แถบภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีเพียงตอนเหนือของประเทศไทยและในหุบเขาหนึ่งแห่งในบาห์ลีที่มีการปลูกลิ้นจี่เป็นการค้า นอกเหนือจากบริเวณดังกล่าวแล้วจะมีการปลูกแต่ไม่ติดผล ทั้งนี้ในประเทศไทยมีสายพันธุ์ลิ้นจี่ที่ให้ผลผลิตเมื่อปลูกบนพื้นล่าง (C.M. Menzel & Waite, 2001)

ลักษณะทั่วไป

ไม้ต้นขนาดใหญ่ ไม่ผลัดใบ อายุยืน สูงถึง 30 เมตร ลำต้นสั้น ในบางพันธุ์ก็มีลักษณะหักงอหรือเบี้ยว แผ่กว้าง เจริญออกไปด้านข้างมากกว่าสูงขึ้นด้านบน พุ่มต้นกลม แน่น ใบประกอบ ใบย่อย 2-4(-5) ใบ เรียงสลับ ก้านใบย่อย 3-8 มิลลิเมตร ใบย่อยรูปขอบขนานแกมรูปหอกขนาด (-3)8-11(-16) เซนติเมตร x 1.75-4 เซนติเมตร ใบบางไปจนถึงใบหนาและเหนียว ผิวใบด้านบนมีสีเขียวเข้มเป็นมัน ผิวใบด้านล่างมีขน ดอกออกเป็นช่อ มีการแตกแขนงช่อมากยาว 5-30 เซนติเมตร ดอกมีขนาดเล็กจำนวนมาก สีขาวแกมเหลือง ดอกเพศผู้หรือดอกเพศเมีย กลีบเลี้ยง 4 กลีบ ไม่มีกลีบดอก เกสรเพศผู้ 6(-10) อัน ในดอกเพศผู้ความยาวของก้านเกสรเป็น 2 เท่าของความยาวกลีบเลี้ยงเป็นอย่างน้อยและสั้นมากในดอกเพศเมีย ผลสดแบบผลเมล็ดเดี่ยวแข็ง รูปกลมรีหรือรูปหัวใจ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.0-3.5 เซนติเมตร เปลือกผลชั้นนอกบาง เหนียว สีแดงสดไปจนถึงสีม่วง มีลักษณะเกือบเรียบ เป็นเกล็ดเล็กๆหรือมีลักษณะเป็นปุ่มปมแบน รูปกรวยหรือเป็นปุ่มแหลม ส่วนเนื้อของผลเจริญมาจากก้านผล สีขาวใส ในผลลิ้นจี่พันธุ์ดีมีส่วนเนื้อมากถึง 70-80% ของน้ำหนักผล เมล็ดสีน้ำตาล ขนาด 10-23 มิลลิเมตร x 6-12 มิลลิเมตร (Groff, 1921)



ภาพ 1 *Litchi chinensis* Sonn. บริเวณกิ่งที่ออกดอกและช่อผล

ที่มา: Groff (1921)

การเจริญเติบโตและการพัฒนาการ (Growth and development)

การเจริญเติบโตทางลำต้นและใบของลิ้นจี่เกิดขึ้นในลักษณะของการผลิใบสลับกับการพักตัว ในสภาพอุณหภูมิสูง 25-30 องศาเซลเซียส มีความชื้นพอเพียงช่วงเวลาการผลิใบและพักตัวสั้นเกิดสลับกันหลายครั้ง ลักษณะของการเจริญเติบโตที่เหมาะสมได้แก่ มีการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบนาน 2-3 เดือนหลังการเก็บเกี่ยว ตามด้วยระยะพักตัวนาน 1-2 เดือน ก่อนที่จะมีการผลิดอกในช่วงต้นฤดูหนาว มีการเจริญเติบโตของช่อดอกอย่างต่อเนื่อง ดอกบานหลังจากมีการพัฒนาของตาดอก 6-12 สัปดาห์ มีการติดผลในช่วงปลายฤดูหนาว ซึ่งตามปกติมีช่วงหนาวนาน 4-6 สัปดาห์ และพร้อมที่จะเก็บเกี่ยวภายใน 11-16 สัปดาห์ เป็นการจบวงจรการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตในแต่ละปี การเจริญเติบโตทางลำต้นและใบมากเกินไปเป็นผลเสียต่อการออกดอกและติดผล ตามปกติลิ้นจี่ที่ปลูกด้วยกิ่งตอนสามารถเก็บผลผลิตได้ภายใน 3-6 ปี หลังปลูก

ลิ้นจี่เป็นไม้ผลที่มีการคัดเลือกพันธุ์มายาวนาน หนังสือเล่มแรกเกี่ยวกับไม้ผลของจีนมีคำอธิบายเกี่ยวกับลักษณะพันธุ์ลิ้นจี่จำนวนมาก พันธุ์ที่สำคัญในตอนใต้ของจีนได้แก่ ‘Souey Tung’, ‘Haak Yip’ และ ‘Wai Chee’ ติดตามมาด้วย ‘Tai So’, ‘Sum Yee Hong’, ‘Chen Zi’, ‘Kwai Mai’, ‘Fay Zee Siu’ และ ‘No Mai Chee’ พันธุ์ลิ้นจี่ที่ปลูกในประเทศอื่นๆเป็นพันธุ์ที่ไปจากจีน เช่น พันธุ์ ‘Haak Yip’ ในไต้หวัน และพันธุ์ ‘Tai So’ และ ‘Wai Chee’ ในไทย (ในไทยเรียกชื่อเป็นฮกฮวยและเงี้ยว) พันธุ์ ‘Tai So’, ‘Bengal’ (จากอินเดีย), ‘Kwai Mai’ และ ‘Wai Chee’ ใน

ออสเตรเลีย มีเฉพาะในอินเดียที่มีการคัดเลือกพันธุ์โดยนำเข้าพันธุ์จากจีน (Christoph M. Menzel, 1983)

สภาพนิเวศ (Ecological conditions)

ลิ้นจี่เป็นไม้ผลเมืองร้อนที่ตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมมากที่สุด สามารถปรับตัวได้ดีในเขตร้อนและเขตกึ่งร้อนที่มีอากาศอบอุ่น พื้นที่ระหว่างเส้นรุ้งที่ 13-32 องศาเหนือ และ 6-29 องศาใต้ ให้ผลผลิตได้ดีที่สุดในแถบที่มีช่วงค่อนข้างหนาวสั้น สภาพอากาศเย็นและแห้ง อุณหภูมิสูงสุดตอนกลางวัน 20-22 องศาเซลเซียส ไม่มีสภาพอากาศหนาวจัดจนน้ำแข็งค้างแข็ง มีฤดูร้อนยาวนาน มีอุณหภูมิสูงสุดตอนกลางวันสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส มีฝนตกชุกประมาณ 1,200 มิลลิเมตรต่อปี ความชื้นสูง ควรมีแนวกำบังลม สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละปี มีผลต่อการให้ผลผลิตมาก โดยเฉพาะการมีฝนตกนอกฤดูกาลตามปกติทำให้มีการผลิใบซึ่งจะทำให้มีการออกดอกน้อยลงหรือมีการติดผลน้อยในสภาพอากาศหนาวและชื้นในช่วงดอกบาน แม้ว่าค่าเฉลี่ยของสภาพแวดล้อมต่างๆจะมีค่าเหมาะสมก็ตาม (C.M. Menzel, 1984)

การขยายพันธุ์ (Propagation)

การขยายพันธุ์ลิ้นจี่ใช้ในการตอนกิ่งเป็นหลักโดยมีอัตราออกรากสูงมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ วิธีการอื่นๆที่ใช้ได้แก่ การทาบกิ่งเพื่อเปลี่ยนยอดในต้นที่มีอายุมาก การติดตา ตลอดจนการปักชำ ซึ่งใช้ในกรณีที่ต้องการต้นพันธุ์จำนวนมากในระยะเวลาดังนั้นมีปัญหาการยอมรับระหว่างกิ่งพันธุ์และต้นต่อในระหว่างบางสายพันธุ์ มีการควั่นกิ่งเพื่อทำให้เกิดการพักตัวและปรับปรุงการออกดอกและติดผล ในการปลูกลิ้นจี่เป็นการค้าในจีน ไทย ออสเตรเลีย ฟลอริดาและฮาวาย การควั่นกิ่งทำในช่วงสิ้นสุดระยะผลิใบหลังการเก็บเกี่ยวเฉพาะในต้นที่มีการเจริญเติบโตดีและมีการผลิใบใหม่เป็นจำนวนมาก (C.M. Menzel & Simpson, 1992)

การตัดแต่งกิ่งในลิ้นจี่ทำเฉพาะในช่วง 2-3 ปีแรก เพื่อให้มีการกระจายของกิ่งในพุ่มต้นสม่ำเสมอ หลังจากนั้นในทุกๆ 2-3 ปี ทำการตัดกิ่งแก่และตัดกิ่งที่อยู่ภายในพุ่มต้นทิ้งไปหลังเก็บเกี่ยวเพื่อให้พุ่มต้นมีความต้านทานลมต่อแรงได้ดีขึ้น การตัดข้อผลในช่วงของการเก็บเกี่ยวเป็นแบบหนึ่งของการตัดแต่งกิ่งเช่นกัน หากการตัดใบและดอกออกมากกว่าปกติอาจจะส่งผลต่อการออกดอกและติดผลในปีถัดไป ส่วนใหญ่ของพันธุ์ลิ้นจี่ที่ปลูกทั่วโลกเป็นพันธุ์ที่ได้มาจากจีน มีการคัดเลือกพันธุ์ภายใต้สภาพแวดล้อมของจีน ทำให้ความหลากหลายทางพันธุกรรมค่อนข้างแคบ มีความพยายามที่จะเก็บรวบรวมพันธุ์จาก 3 ชนิด มีการรวบรวมพันธุ์ลิ้นจี่ที่มีการปลูกทั่วไปในแถบตอนใต้ของจีน ตลอดจนในหน่วยงานวิจัยในไต้หวัน ไทย อินเดีย แอฟริกาใต้ ออสเตรเลีย และสหรัฐอเมริกา (Christopher M. Menzel, 1988)

พันธุ์ลิ้นจี่

ลิ้นจี่ในประเทศไทยมีมากมายหลายพันธุ์ ซึ่งพันธุ์นั้นมักเรียกกันตามท้องถิ่น สำหรับทางภาคเหนือของไทยมีพันธุ์ที่น่าสนใจอยู่ 3 พันธุ์ คือ ฮงฮวย โอวเฮียะ และกิมเจ็ง ส่วนภาคกลางก็มีพันธุ์ที่นิยมมาก คือ พันธุ์แห้ว ค่อมหรืออมลำเจียก กะโหลกใบยาว สาแหรกทอง สำเภาแก้ว ฯลฯ ซึ่งพันธุ์ดังกล่าวนี้จะมีความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่แต่ละแห่ง การนำพันธุ์ที่ปลูกได้ดีทางภาคเหนือมาปลูกทางภาคกลางจะไม่ออกดอกติดผลเหมือนกันปลูกในภาคเหนือ

1. พันธุ์ฮงฮวย เติบโตเร็ว ออกดอกติดผลง่าย ลำต้นสีน้ำตาลอมเทาและบิดเวียนซ้ายเป็นคลื่นยาวๆ ซึ่งเป็นลักษณะประจำพันธุ์นี้ ช่วงข้อบนกิ่งห่าง ยอดอ่อนมีสีเขียวอมแดงจางๆ ทรงพุ่มรูปไข่ และต้นค่อนข้างสูง ผลออกเป็นช่อยาวดก ลักษณะผลทรงยาวรีคล้ายรูปไข่ เปลือกสีแดงอมชมพู รสหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย ใบยาวรี โคนใบกว้าง ริมใบบิดเป็นคลื่น ปลายใบไม่ค่อยแหลม ใบมี 3-4 คู่ ให้ผลดกและค่อนข้างสม่ำเสมอไม่ค่อยเว้นปี ข้อเสียของพันธุ์นี้คือ เมล็ดมีขนาดค่อนข้างใหญ่ เปลือกบาง ข้าง่าย และชั่วผลบาง ทำให้ผลร่วงง่าย

2. พันธุ์โอวเฮียะ ชอบอากาศหนาวและความชื้นในดินสูง ลำต้นสีน้ำตาลแดงเป็นตะปุ่มตะป่ำ ง่ามกิ่งเป็นมุมแคบกว่าพันธุ์ฮงฮวย ยอดอ่อนสีแดงเข้ม ทรงพุ่มเกือบจะกลม ใบสีเขียวเข้มเป็นมันเกือบดำ ใบมี 2-3 คู่ โคนใบและปลายใบเรียวแหลมหากพับครึ่งจะทับกันพอดี ลักษณะผลคล้ายรูปหัวใจ รสหวาน เนื้อหนา เปลือกสีแดงคล้ำ เปลือกเปราะ เมล็ดเล็ก ข้อเสียของพันธุ์นี้คือ ง่ามกิ่งเป็นมุมแคบ มุมยิ่งแคบกิ่งยิ่งฉีกง่าย

3. พันธุ์กิมเจ็ง การเจริญเติบโตช้า ทรงพุ่มเตี้ยจนเกือบแบนมีส่วนกว้างมากกว่าส่วนสูง มีระยะของลำต้นจากพื้นดินถึงพุ่มสั้นมาก ลำต้นไม่บิด ข้อของกิ่งก้านสั้นมาก มีกิ่งเล็กมากๆ ใบรูปไข่มีขนาดสั้นและแคบ ใบมี 1-3 คู่ ยอดอ่อนมีสีใกล้เคียงกับพันธุ์โอวเฮียะแต่ออกดอกเป็นสีแดงซีดหรือสีชมพู ข้อไม่ใหญ่แต่สั้น ลักษณะผลค่อนข้างกลม การติดผลค่อนข้างยากและชอบอากาศเย็นจัด

4. พันธุ์จักรพรรดิ ต้นไม่มีทรงพุ่มใหญ่ ใบมีขนาดใหญ่ โคนใบกว้างค่อยๆเรียวไปด้านปลายใบ มีสีเขียวเข้มเป็นมัน ผลทรงหัวใจกลมใหญ่ เปลือกหนามีสีแดงเข้ม ผิวหยาบ หนามเรียบมีขนาดใหญ่ห่าง เนื้อหนามีสีขาวขุ่น ฉ่ำน้ำ รสหวาน เมล็ดมีขนาดโต สีน้ำตาลเข้ม พันธุ์นี้ต้องการอากาศเย็นจัด ฤดูกาลเก็บเกี่ยวเดือนพฤษภาคมถึงมิถุนายน

5. พันธุ์ค่อม ลำต้นและกิ่งเรียบสีน้ำตาลอ่อน กิ่งแข็งแรงทรงพุ่มค่อนข้างกลม ใบแคบเรียวกลางใบพอง ปลายใบเรียวแหลม ใบมี 2-4 คู่ สีใบด้านบนเขียวเป็นมัน ขอบใบเป็นคลื่นเล็กน้อย ผลมีขนาดใหญ่กลมสีแดงเข้ม เปลือกกรอบบาง หนามห่างสั้นแหลม เนื้อหนาหวาน มีกลิ่นพิเศษ เนื้อแห้งสีขาวขุ่น พันธุ์นี้ออกดอกติดผลง่าย ไม่ต้องการอากาศเย็นจัด ฤดูกาลเก็บเกี่ยวเดือนเมษายน

การปรับปรุงพันธุ์ (Plant breeding) (C.M. Menzel & Simpson, 1992)

พันธุ์ลันจีส่วนมากเป็นพันธุ์ที่ได้จากการคัดเลือกพันธุ์จากต้นที่เกิดจากการผสมข้าม พันธุ์ลันจีที่ปลูกในแถบตอนใต้ของไทยเป็นพันธุ์ที่คัดเลือกมาจากพันธุ์ที่นำเข้ามาจากจีน ให้ผลผลิตภายใต้สภาพแวดล้อมดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามคุณภาพของผลด้อยกว่าผลของพันธุ์ที่ปลูกในจีน ในช่วง 50 ปีที่ผ่านมา มีการผสมพันธุ์และคัดเลือกพันธุ์ 2-3 ชนิดในฟลอริดาและฮาวาย แต่ก็มีเพียงพันธุ์ 'Kaimana' ที่ควรจะได้มีการศึกษาเพิ่มเติม ในไต้หวันและออสเตรเลียมีการผสมเปิดของลันจีต่างสายพันธุ์ โดยแต่ละพันธุ์ที่มีลักษณะเฉพาะ โดยงานทางด้านผสมพันธุ์มีการผลิตกล้าเพียง 200-500 ต้น ลักษณะและคุณสมบัติที่ต้องการในลันจีมีดังต่อไปนี้ ให้ผลผลิตสูงสม่ำเสมอ ผลมีขนาดใหญ่ เปลือกผลสีแดงสด เมล็ดเล็ก รสชาติดี ผลสุกสม่ำเสมอและเก็บไว้ได้นาน มีการผสมข้ามระหว่างลันจีและลำไยในจีนระหว่างทศวรรษที่ 1920 แต่ลูกผสมที่ได้ไม่มีลักษณะเด่นเป็นพิเศษ

การจำแนกกลุ่มพันธุ์

ลันจีที่ปลูกทางการค้าโดยทั่วไปในประเทศไทยเป็นลันจีที่มีต้นกำเนิดมาจากประเทศจีน สามารถแบ่งออกได้ตามความสามารถในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อม เป็น 2 กลุ่ม (สำนักคุ้มครองพันธุ์พืช, 2545) คือ

1. กลุ่มลันจีที่ลุ่ม เป็นลันจีที่สามารถออกดอกได้โดยไม่ต้องการอากาศเย็นมากระตุ้นหรือต้องการอากาศเย็นติดต่อกันน้อยกว่า ปลูกกันแพร่หลายในแถบจังหวัดภาคกลางของประเทศไทย
2. กลุ่มลันจีที่ดอน ลันจีในกลุ่มนี้สามารถออกดอกได้ก็ต่อเมื่อมีอากาศเย็นติดต่อกันเป็นระยะเวลาหนึ่ง ปลูกกันมากในแถบภาคเหนือของประเทศไทย

ส่วนประกอบและคุณค่าทางโภชนาการ (Chemical composition and nutritional value)

ลันจีแต่ละพันธุ์มีส่วนประกอบของเนื้อแตกต่างกัน เนื่องจากลันจีเป็นผลไม้ไม่เปรี้ยว จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นภายหลังการเก็บเกี่ยว ส่วนประกอบทางเคมีในผลลันจีมีดังนี้

1. ความชื้น หรือปริมาณน้ำ ผลลันจีมีน้ำเป็นส่วนประกอบภายในผล 77-87 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์
2. โปรตีน ผลลันจีมีโปรตีนเล็กน้อย ประมาณ 0.8-0.9 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณสูงสุดที่เคยรายงานไว้ประมาณ 1.5 เปอร์เซ็นต์ โปรตีนที่พบมักอยู่ในรูปของเอนไซม์มากกว่า
3. ไขมัน ลันจีมีไขมันน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ไขมันส่วนใหญ่จะเป็นส่วนประกอบในเยื่อหุ้มเซลล์และไขมันเคลือบผิว

4. ปริมาณน้ำตาล เป็นส่วนประกอบทางเคมีประมาณ 20-60 เปอร์เซ็นต์ โดยอยู่ในรูปของ น้ำตาลซูโครส และน้ำตาลรีดิวซิง (reducing sugar) คาร์โบไฮเดรตในผลลิ้นจี่ ประกอบด้วยน้ำตาล ทั้งหมด 15.3 เปอร์เซ็นต์ เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ 81.7 เปอร์เซ็นต์ และน้ำตาลซูโครส 18.3 เปอร์เซ็นต์

5. กรด ชนิดของกรดที่พบมากในผลลิ้นจี่คือ กรดมาลิก และรองลงมาคือ กรดซิตริก กรดซัลซินิก กรดฟอสฟอริก กรดกลูตามิก กรดมาโลนิก และกรดแลคติก ปริมาณกรดในลิ้นจี่จะผันแปรไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ภูมิประเทศ ปริมาณในผลลิ้นจี่จะลดลงเมื่อผลสุกและระหว่างการเก็บรักษา อัตราส่วนขององศาบริกซ์ต่อปริมาณกรดจะเพิ่มขึ้นระหว่างการสุกและการเก็บรักษา โดยมีอัตราส่วนเป็น 80:1 ก่อนที่จะเกิดการเน่าเสีย

6. วิตามินและเกลือแร่ วิตามินที่พบมากในผลลิ้นจี่คือ กรดแอสคอร์บิก มีปริมาณ 40-90 mg/100 g และปริมาณกรดแอสคอร์บิกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและระยะเวลาเก็บรักษานานขึ้น (Bolanos et al., 2010) ปริมาณแร่ธาตุในผลลิ้นจี่ พบว่า โพแทสเซียมมีมากที่สุด องค์ประกอบและลักษณะทางสรีรวิทยาที่สำคัญบางลักษณะของผลลิ้นจี่ที่แก่แล้ว ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 องค์ประกอบและลักษณะทางสรีรวิทยาของผลลิ้นจี่ที่สุก

องค์ประกอบ/ลักษณะทางสรีรวิทยา	ความเข้มข้น/ปฏิกิริยา
คลอโรฟิลล์ที่ผิวเปลือก	
คลอโรฟิลล์เอ	25 μg . 100 mg^{-1}
คลอโรฟิลล์บี	14 μg . 100 mg^{-1}
น้ำตาลในเนื้อ	
ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้	13-20 brix
ฟรุคโตส	1.6-3.1 g . 100 g^{-1} น้ำหนักสด
กลูโคส	5.0 g . 100 g^{-1} น้ำหนักสด
ซูโครส	8.5 g . 100 g^{-1} น้ำหนักสด
กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid)	40-50 mg . 100 g^{-1} น้ำหนักสด
การสลายเอธิลีน (C_2H_4)	1-5 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ที่ 25 °C
อัตราการหายใจ (CO_2)	25 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ที่ 25 °C

ที่มา: Punia and Kumar (2021)

การเก็บเกี่ยวและการจัดการหลังการเก็บเกี่ยว

ดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvesting index) (รัตนชินกร, 2549)

ลิ้นจี่จัดเป็นผลไม้ประเภทบ่มไม่สุก (non-climacteric) หรือเรียกว่าเป็นผลไม้ที่ไม่สามารถบ่มให้สุกได้ ดังนั้นการเก็บเกี่ยวลิ้นจี่จึงควรเก็บเกี่ยวในระยะผลแก่พอดี เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ ผลลิ้นจี่แต่ละพันธุ์ออกดอกและสุกแก่ไม่พร้อมกัน การเก็บเกี่ยวนั้นต้องเก็บผลลิ้นจี่ที่ยังไม่แก่จัด เพราะหากเก็บเกี่ยวผลที่แก่จนเกินไปผลลิ้นจี่จะมีน้ำมาก เนื้อละ และมึรสจืด นอกจากนั้นการสุกของผลลิ้นจี่ในแต่ละต้นจะสุกไม่พร้อมกัน การเก็บเกี่ยวจึงต้องทยอยเก็บเกี่ยวประมาณ 20-25 วัน จึงหมดซึ่งดัชนีการเก็บเกี่ยวที่ใช้ตัดสินความแก่ของลิ้นจี่อาจทำได้โดยพิจารณาจาก

1. สีผิวเปลือก ผลลิ้นจี่ที่แก่สีเปลือกจะเปลี่ยนเป็นสีแดงหรือชมพู ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์
2. หนามของผล ลิ้นจี่ที่มีผลแก่ หนามบนผิวจะห่างออกจากกัน
3. การชิม ลิ้นจี่ที่แก่ได้จะมีรสชาติหวานและอาจจะมึรสฝาดนิดหน่อยหรือไม่ฝาดเลย
4. การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้

ดัชนีคุณภาพ (Quality index) (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2549)

1. ข้อกำหนดเรื่องคุณภาพ
 - 1.1 ลิ้นจี่ทุกชั้นมาตรฐานต้องมีคุณภาพดังต่อไปนี้ เว้นแต่มีข้อกำหนดเฉพาะของแต่ละชั้น และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้มีได้ตามที่ระบุไว้
 - 1.1.1 เป็นลิ้นจี่ทั้งผล และไม่เน่าเสีย
 - 1.1.2 สะอาดและปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่สามารถมองเห็นได้
 - 1.1.3 ไม่มีศัตรูพืชที่มีผลต่อรูปลักษณ์ทั่วไปของผลผลิต
 - 1.1.4 ไม่มีความเสียหายของผลผลิตเนื่องจากศัตรูพืช
 - 1.1.5 ไม่มีความเสียหายอันเนื่องมาจากอุณหภูมิต่ำ และ/หรือ อุณหภูมิสูง
 - 1.2 ผลลิ้นจี่ต้องได้รับการเก็บเกี่ยวด้วยความระมัดระวัง การดูแลภายหลังการเก็บเกี่ยวการขนส่งอย่างถูกต้องเพื่อให้ได้คุณภาพที่เหมาะสมกับพันธุ์และแหล่งผลิต ผลลิ้นจี่ต้องแก่พอเหมาะ
2. การจัดชั้นคุณภาพ ลิ้นจี่ตามมาตรฐานแบ่งออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดังนี้
 - 2.1 ชั้นพิเศษ (Extra class) ลิ้นจี่ชั้นนี้ต้องมีคุณภาพดีที่สุดตรงตามพันธุ์ ผลไม่มีตำหนิ ในกรณีที่มีตำหนิต้องเป็นตำหนิผิวเล็กน้อย โดยไม่มีผลต่อรูปลักษณ์ทั่วไปของผลผลิต ผลคุณภาพผลิตผล คุณภาพการเก็บรักษา และการจัดเรียงเสนอในบรรจุภัณฑ์

2.2 ชั้นหนึ่ง (Class I) ลิ้นจี่ชั้นนี้ต้องมีคุณภาพดี ตรงตามพันธุ์ ผลมีตำหนิได้เล็กน้อยด้านรูปทรง สี และผิว โดยไม่มีผลต่อรูปลักษณะทั่วไปของผลิตผล คุณภาพการเก็บรักษา คุณภาพผลิตผล และการจัดเรียงเสนอในบรรจุภัณฑ์

2.3 ชั้นสอง (Class II) ลิ้นจี่ชั้นนี้รวมผลลิ้นจี่ที่ไม่เข้าชั้นที่สูงกว่าตรงตามพันธุ์ แต่มีคุณภาพตามคุณภาพต่ำที่กำหนดไว้ และยังคงคุณภาพผลิตผล คุณภาพการเก็บรักษา และการจัดเรียงเสนอในบรรจุภัณฑ์ โดยพื้นผิวมีตำหนิรวมต่อผลไม่เกิน 0.5 ตารางเซนติเมตร

3. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเรื่องคุณภาพและขนาดในแต่ละบรรจุภัณฑ์ สำหรับผลิตผลที่ไม่เข้าชั้นที่ระบุไว้ (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2549)

3.1 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเรื่องคุณภาพ

3.1.1 ชั้นพิเศษ (Extra class) ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยจำนวนหรือน้ำหนักของผลลิ้นจี่ที่คุณภาพไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของชั้นพิเศษ แต่เป็นไปตามคุณภาพของชั้นหนึ่ง

3.1.2 ชั้นหนึ่ง (Class I) ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยจำนวนหรือน้ำหนักของผลลิ้นจี่ที่คุณภาพไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของชั้นหนึ่ง แต่ไม่เป็นไปตามคุณภาพของชั้นสอง

3.1.3 ชั้นสอง (Class II) ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยจำนวนหรือน้ำหนักของผลลิ้นจี่ที่คุณภาพไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของชั้นสองหรือไม่ได้คุณภาพชั้นต่ำ โดยไม่มีผลเน่าเสียหรือมีสภาพไม่เหมาะสมต่อการบริโภค

3.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเรื่องขนาด ลิ้นจี่ทุกรหัสขนาด ลิ้นจี่ขนาดใหญ่กว่าหรือเล็กกว่าชั้นถัดไปหนึ่งชั้นได้ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ โดนจำนวนหรือน้ำหนัก ทั้งนี้ให้ครอบคลุมทั้งลิ้นจี่ที่เป็นข้อและผลเดี่ยว

การวัดคุณภาพด้านรสชาติ (flavor quality) (วิไล รังสาดทอง, 2559)

รสชาติของผลผลิตเป็นลักษณะรวมระหว่างความหวาน ความเปรี้ยว และกลิ่นรสต่างๆ ซึ่งมีวิธีประเมิน ดังนี้

1. ความหวาน (sweetness) เกิดจากน้ำตาลที่มีในผลผลิต เช่น น้ำตาลซูโครส ฟรุคโทสและกลูโคส น้ำตาลแต่ละชนิดจะมีความหวานที่ไม่เท่ากันและเนื่องจากน้ำตาลเหล่านี้สามารถละลายน้ำได้ จึงสามารถหักเหแสงเมื่อส่องผ่านน้ำ ทำให้สามารถวัดปริมาณน้ำตาลโดยใช้ Hand refractometer เพื่อหาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solid; TSS) หรือใช้ Hydrometer เพื่อวัดความถ่วงจำเพาะที่สามารถบอกปริมาณน้ำตาลได้ นอกจากนี้อาจวัดโดยวิธีทางเคมีซึ่งมีความ

แม่นยำกว่าวิธีข้างต้น เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar)

2. ความเปรี้ยว (sourness) ความเปรี้ยวในผลไม้เกิดจากปริมาณกรดอินทรีย์ที่สะสมอยู่ในแวคิวโอล (vacuole) ของเซลล์พืช ซึ่งพืชแต่ละชนิดมีปริมาณกรดอินทรีย์ที่แตกต่างกัน สามารถตรวจวัดได้จากค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) หรือปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ (Titratable acidity; TA)

3. กลิ่น (aroma) โดยทั่วไปเกิดจากกรดอินทรีย์ที่ระเหยได้ (Volatile compound) โดยมีมากเมื่อผลไม้สุก สามารถวัดได้ด้วยเครื่อง Gas Chromatography หรือผู้ให้ทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยผู้ทดสอบที่ต้องผ่านการฝึกฝน (Sensory panels) เพื่อจดจำกลิ่นรสที่กำหนด

เทคโนโลยีการลดอุณหภูมิผลผลิตที่เหมาะสม (Precooling technology)

การลดอุณหภูมิผลไม้สามารถทำได้โดยนำผลผลิตผ่านอากาศเย็น (forced-air cooling) หรือการใช้น้ำเย็น (Hydrocooling) โดยลดอุณหภูมิให้ได้ประมาณ 4 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเก็บรักษาที่ 5 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ผลไม้เกิดการสูญเสียให้น้ำน้อย แต่ข้อควรระวัง คือ ควรรอให้ผลผลิตแห้งก่อนนำไปบรรจุ เพราะอาจทำให้ผลผลิตเกิดการปนเปื้อนและมีเชื้อโรคเข้าทำลาย (กรมวิชาการเกษตร, 2565) โดย นิพัทธ์ (2558) ลดอุณหภูมิผลไม้ด้วยการแช่ในน้ำเย็นเป็นเวลา 10 นาที พบว่า การลดอุณหภูมิด้วยน้ำเย็นช่วยยืดอายุผลไม้ได้ประมาณ 10 วัน เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 - 5 องศาเซลเซียส แต่ปัญหาที่พบ คือ การปนเปื้อนจุลินทรีย์จากน้ำเย็น

การเก็บรักษา (storage)

ลิ้นจี่เป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง ผลผลิตส่วนใหญ่กว่า 70 เปอร์เซ็นต์ใช้บริโภคภายในประเทศ นอกจากนี้ยังส่งออกไปยังสาธารณรัฐประชาชนจีน สิงคโปร์ ฟิลิปปินส์ มาเลเซีย และออสเตรเลีย เป็นต้น (วิทยา อภัย, 2558) โดยลิ้นจี่มีอายุการเก็บรักษาสั้น สาเหตุสำคัญที่ทำให้ลิ้นจี่เกิดการเสื่อมสภาพการเน่าเสียของผล และการเปลี่ยนของสีผิวของผลลิ้นจี่จากสีแดงเป็นสีน้ำตาล โดยการเกิดสีน้ำตาลของเปลือกผลจะถูกชักนำโดยปัจจัยหลายประการ เช่น การเข้าทำลายของเชื้อโรค การสูญเสียน้ำ และการได้รับความร้อน (Jiang & Fu, 1998) การลดการเน่าเสีย การป้องกันการสูญเสียน้ำ และการชะลอการเกิดสีน้ำตาลของผลลิ้นจี่สามารถทำได้โดย

1. การใช้อุณหภูมิต่ำในการเก็บรักษาลิ้นจี่ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส สามารถเก็บรักษาลิ้นจี่ได้นาน 2 สัปดาห์ และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 8-10 องศาเซลเซียส สามารถเก็บรักษาลิ้นจี่ได้นาน 7-10 วัน

2. เก็บรักษาลิ้นจี่ในสภาพดัดแปลงบรรยากาศ (modified atmosphere storage; MA storage) ร่วมกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ สามารถชะลอการหายใจและการคายน้ำของพืช ส่งผลให้การเสื่อมสภาพของผลผลิตเกิดขึ้นช้าลงและมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น (ผ่องเพ็ญ จิตอารีรัตน์, 2554) ได้ศึกษาผลของชนิดบรรจุภัณฑ์ต่อคุณภาพและการเกิดสีน้ำตาลของลิ้นจี่จักรพรรดิ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 28 วัน พบว่า การบรรจุลิ้นจี่จักรพรรดิในถาด PET (Polyethylene terephthalate) แล้วบรรจุลงในถุง Active ชนิด EMA (Equilibrium Modified Atmosphere) สามารถชะลอการสูญเสียน้ำหนักสด อัตราการหายใจ การเกิดสีน้ำตาลของเปลือกลิ้นจี่ และกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาล (peroxidase, polyphenol oxidase และ phenylalanine ammonia lyase) ได้ดีที่สุดในชุดทดลองจนมีคะแนนการยอมรับของผู้บริโภคที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับการบรรจุในบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่น

ความเสียหาย (damage)

1. การเสียหายทางกล การขนส่งที่ไม่ระมัดระวังมีการกระทบกระเทือนรุนแรง อาจจะทำให้ลิ้นจี่ผลแตกได้

2. ความเสียหายจากโรค โรคผลเน่าในลิ้นจี่ (ผ่องเพ็ญ จิตอารีรัตน์, 2554) ศึกษาชนิดบรรจุภัณฑ์ต่อการพัฒนาโรคผลเน่าของลิ้นจี่พันธุ์จักรพรรดิและทำการแยกชนิดของเชื้อราที่พบในผลลิ้นจี่ที่แสดงอาการผลเน่าในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 28 วัน พบว่า การบรรจุลิ้นจี่จักรพรรดิในถาด PET แล้วบรรจุลงในถุง Active ชนิด EMA สามารถชะลอและลดความรุนแรงของโรคผลเน่าได้ ส่วนการแยกชนิดของเชื้อรา พบเชื้อราที่เข้าทำลายผลลิ้นจี่ตั้งแต่ในแปลงปลูก ได้แก่

2.1 เชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* เชื้อราชนิดนี้เข้าทำลายแฝง (latent infection) อยู่ในผลตั้งแต่อยู่ในแปลงปลูกและจะแสดงอาการของโรคในระหว่างการเก็บรักษา ลักษณะอาการ ผิวเปลือกผลมีสีน้ำตาลดำ เกิดจุดเน่า และมีเมือกสีชมพูบนเปลือกผล มักเกิดด้านใดด้านหนึ่งของผลและลุกลามไปทั่วทั้งผล โดยทั่วไปมักจะมีของเหลวไหลออกมา เมื่อแกะเปลือกผลออก พบว่า เนื้อเยื่อภายในของผลเปลี่ยนจากใสเป็นขุ่นเหมือนกระจกฝ้า อ่อนนุ่ม ฉ่ำน้ำและมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยว

2.2 เชื้อรา *Lasiodiplodia theobromae* เชื้อราเข้าทำลายผลลิ้นจี่ทางบาดแผลหรือช่องเปิดต่างๆ ในระหว่างการเก็บรักษา ลักษณะอาการ ผิวเปลือกผลมีสีน้ำตาลดำ มีเส้นใยสีดำเจริญคลุมผลอย่างหนาแน่น เมื่อแกะเปลือกผลออก พบว่าเนื้อเยื่อภายในของผลเปลี่ยนจากใสเป็นขุ่นเหมือนกระจกฝ้าอ่อนนุ่ม ฉ่ำน้ำ และมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยว

2.3 เชื้อรา *Penicillium* sp. และ เชื้อรา *Aspergillus* sp. เชื้อราสองชนิดนี้เข้าทำลายผลลิ้นจี่ในระหว่างการเก็บรักษาทำให้ผลเน่าเสีย ซึ่งการเน่าเสียมักเริ่มจากการเข้าทำลายของ

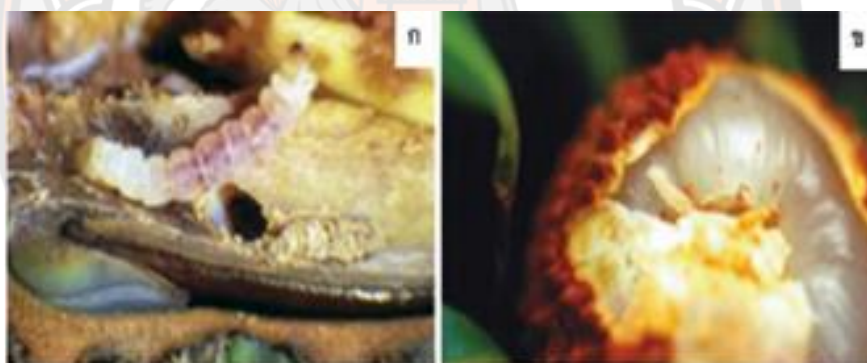
หนอนเจาะขั้วผล เมื่อผลลึ้นจีเกิดบาดแผลจากหนอนเจาะขั้วผลเข้าทำลายจะทำให้ของเหลวภายในผล รั่วไหลออกมาและกลายเป็นอาหารสำหรับการเจริญของเชื้อสาเหตุของโรค และเมื่อของเหลวไหล สัมผัสกับลึ้นจีผลอื่นจะทำให้เชื้อลุกลามและปกคลุมลึ้นจีผลอื่นไปด้วย

3. ความเสียหายจากแมลง (กลุ่มบริหารศัตรูพืช, 2557)

3.1 หนอนเจาะขั้วลึ้นจี เข้าทำลายลึ้นจีตั้งแต่เริ่มติดผลได้ประมาณ 1 เดือน จนถึง ระยะเก็บเกี่ยว โดยมีการทำลายผลลึ้นจี 2 ระยะ

3.1.1 ระยะที่ผลลึ้นจียังมีขนาดเล็ก ฝัเสื้อวางไข่บริเวณใกล้ขั้วผล เมื่อ หนอนฟักออกจากไข่แล้วเจาะเข้าไปกัดกินอยู่ภายในเมล็ด ทำให้ผลที่ถูกทำลายไม่สามารถเจริญเติบโตต่อไปได้และทำให้ผลร่วง โดยรอยที่ถูกหนอนเจาะขั้วผลเข้าทำลายไม่สามารถมองเห็นจากภายนอกได้ ต้องทำการผ่าดูถึงจะเห็น

3.1.2 ระยะที่ผลลึ้นจีมีขนาดโตขึ้นและมีการเปลี่ยนสีผิวของผล ฝัเสื้อ วางไข่อยู่บริเวณใกล้ขั้วผลและเจาะทำลายบริเวณขั้วผล ทำให้ผลที่ถูกทำลายร่วงหล่นได้ง่าย โดยบริเวณที่ถูกทำลายจะพบหนอนหรือขี้หนอนอยู่เสมอ



ภาพ 2 หนอนเจาะขั้วผล (ก) และผลลึ้นจีถูกหนอนเจาะขั้วทำลาย (ข)

ที่มา: กลุ่มบริหารศัตรูพืช (2557)

3.1.3 ฝัเสื้อมวนหวาน เข้าทำลายลึ้นจีเมื่อใกล้ระยะเก็บเกี่ยวและเข้า ทำลายในเวลากลางคืน โดยใช้วงปากเจาะผลและดูดน้ำหวานของผลลึ้นจีที่ใกล้สุกหรือสุกแล้ว ทำให้ผลลึ้นจีเน่าและร่วง เมื่อใช้มือบีบผลลึ้นจีเบาๆ จะมีน้ำออกมาจากรูที่ถูกเจาะเมื่อแกะดู พบว่า เนื้อในของลึ้นจีเน่าเสียเนื่องจากเชื้อโรคเข้าทำลาย

การผลิตและการค้าระหว่างประเทศ

แหล่งผลิตสำคัญของลิ้นจี่มี จีน (1,200,000 ตัน), อินเดีย (200,000 ตัน), ไทย (237,000 ตัน), แอฟริกาใต้ (150,000 ตัน), มาดากัสการ์ (100,000 ตัน), ออสเตรเลีย (100,000 ตัน), เม็กซิโก (50,000 ตัน), รัสเซีย (250,000 ตัน) และไต้หวัน (12,000 ตัน) มีการทดลองการปลูกในเวียดนาม นิวซีแลนด์ และสหรัฐอเมริกา ศูนย์กลางผลิตสำคัญทางตอนใต้ของจีนคือเมือง Guang และ Fujian โดยลิ้นจี่เป็นผลไม้ที่มีความสำคัญเป็นอันดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ รองลงมาจากส้มและลำไย มีการส่งออกลิ้นจี่สดจากไทยและจีนไปยังฮ่องกงและสิงคโปร์ ในปี 2564 ประมาณ 12,000 ตัน และมีการส่งออกประมาณ 2,000 ตัน ไปยังประเทศแถบยุโรป

สถานการณ์ลิ้นจี่ในประเทศไทย

ด้านการผลิต

ประเทศไทยมีผลผลิตลิ้นจี่ ปี 2561-2565 เฉลี่ยปีละ 37,021 ตัน โดยในปี 2561 ประมาณผลผลิต 48,027 ตัน แหล่งผลิตที่สำคัญได้แก่ เชียงใหม่ พะเยา เชียงราย น่าน และสมุทรสาคร ผลผลิตลิ้นจี่ของประเทศไทยมีแนวโน้มลดลงในช่วงปี 2562-2563 เนื่องจากสภาพอากาศแปรปรวน ส่งผลให้ดอกลิ้นจี่หลุดร่วง และเกิดศัตรูพืชและโรคระบาด อย่างไรก็ตาม ผลผลิตลิ้นจี่เริ่มปรับตัวเพิ่มขึ้นในปี 2564 และ 2565 สาเหตุมาจากสภาพอากาศที่เหมาะสม และเกษตรกรมีการปรับปรุงการผลิตอย่างต่อเนื่อง ดังตาราง 2

ตาราง 2 สถิติการผลิตลิ้นจี่ของประเทศไทย ตั้งแต่ปี 2561-2565

ปี	พื้นที่ให้ผล (ไร่)	ปริมาณผลผลิต (ตัน)
2561	109,234	48,027
2562	102,555	23,029
2563	99,985	33,997
2564	98,506	36,233
2565	94,165	43,817

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2566)

ด้านการตลาด

ลิ้นจี่เป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมทั้งในประเทศและต่างประเทศ ผลผลิตลิ้นจี่ของไทยส่วนใหญ่จะบริโภคภายในประเทศ โดยมีเพียงร้อยละ 30 ที่ส่งออกไปตลาดต่างประเทศ เช่น จีน มาเลเซีย สิงคโปร์ สหรัฐอเมริกา เวียดนาม เป็นต้น การส่งออกลิ้นจี่ของไทยส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบลิ้นจี่สด และลิ้นจี่บรรจุภาชนะอัดลม คิดเป็นร้อยละ 90 ของการส่งออกทั้งหมด โดยตลาดคู่ค้าที่สำคัญ ได้แก่ กลุ่มประเทศสหภาพยุโรป และสหรัฐอเมริกา

ปริมาณการส่งออกลิ้นจี่ของไทย 3 ปีย้อนหลัง พบว่าปริมาณการส่งออกลิ้นจี่ของไทยลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2561 มีปริมาณการส่งออก 6,740 ตัน มูลค่า 342 ล้านบาท ในปี 2562 มีปริมาณการส่งออก 4,900 ตัน มูลค่า 286 ล้านบาท และในปี 2563 มีปริมาณการส่งออก 4,762 ตัน มูลค่า 266 ล้านบาท สาเหตุที่ปริมาณการส่งออกลิ้นจี่ของไทยลดลงอย่างต่อเนื่อง คาดว่ามาจากปัจจัยหลายประการ ได้แก่ สภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการปลูกลิ้นจี่ เช่น อากาศร้อนจัด และฝนตกชุกปัญหาโรคและแมลงระบาด การแข่งขันจากผลไม้ชนิดอื่น เช่น ทูเรียน มังคุด และลำไย

นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการส่งออกลิ้นจี่ของไทย เช่น เศรษฐกิจของประเทศไทยคู่ค้าที่ชะลอตัว และการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยที่อาจส่งผลดีต่อการส่งออกลิ้นจี่ของไทยในอนาคต ได้แก่ ความต้องการลิ้นจี่ของผู้บริโภคในตลาดโลกที่เพิ่มขึ้น การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตและบรรจุภัณฑ์ลิ้นจี่ที่ทันสมัย และการขยายตลาดส่งออกไปยังประเทศใหม่ ๆ หากไทยสามารถแก้ไขปัญหาและปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการส่งออกลิ้นจี่ได้ คาดว่าปริมาณการส่งออกลิ้นจี่ของไทยจะเพิ่มขึ้นได้ในอนาคต

ตาราง 3 ปริมาณการส่งออกลิ้นจี่ของไทย ตั้งแต่ปี 2561-2563

	ปี		
	2561	2562	2563
ปริมาณ (ตัน)	6,740	4,900	4,762
มูลค่า (ล้านบาท)	342	286	266

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2556)

แนวทางในอนาคต

ลิ้นจี่เป็นผลไม้ที่เป็นที่นิยมของผู้บริโภคในประเทศจีน และในปัจจุบันมีจำหน่ายแพร่หลายไปทั่วโลก การขยายตัวของพื้นที่เพาะปลูกลิ้นจี่เป็นไปอย่างรวดเร็วในประเทศต่างๆ แต่ก็ยังจัดเป็นไม้ผลที่มีความสำคัญค่อนข้างน้อย อย่างไรก็ตามพื้นที่ปลูกโดยรวมของลิ้นจี่ในแต่ละประเทศอาจจะมีไม่มากนัก เนื่องจากความต้องการสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในวงจำกัดในการผลิตได้ดี

การขยายพื้นที่ปลูกลิ้นจี่ในภูมิภาคมีโอกาสเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อมีการปรับปรุงและพัฒนาเทคนิคในการดูแล บำรุง ที่ทำให้สามารถควบคุมการออกดอกของลิ้นจี่ได้ โดยเฉพาะในปีที่สภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมสำหรับการออกดอกและให้ผลผลิตตามธรรมชาติ ในหลายพื้นที่ในแถบตะวันออกของอินโดนีเซียอาจปลูกลิ้นจี่ในกลุ่มพันธุ์ซึ่งจำแนกอยู่ในชนิดย่อย *ssp. Chinensis* ซึ่งอาจนำไปสู่การปลูกลิ้นจี่ในชนิดย่อยอื่นๆเป็นการค้าในอนาคต

การประเมินประสิทธิภาพ (Evaluation model)

การประเมินประสิทธิภาพของโมเดลสำหรับการวิจัยใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า Confusion matrix ในการประเมินผลลัพธ์ของการทำนายสำหรับกระบวนการเรียนรู้ของเครื่อง ซึ่งมีแนวคิดจากการวัดสิ่งที่โมเดลทำนายกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงมีส่วนเป็นอย่างไร (Stehman, 1997) ตาราง Confusion matrix มีการประยุกต์ใช้วัดประสิทธิภาพของโมเดลกันอย่างแพร่หลาย เช่น การแยกแยะวัตถุประเภทต่างๆ สมมติว่าโมเดลถูกฝึกให้แยกแยะระหว่างผลไม้ 3 ชนิด ได้แก่ แอปเปิล ส้ม และกล้วย ตาราง Confusion Matrix จะแสดงจำนวนแอปเปิลที่ถูกจัดหมวดหมู่เป็นส้ม กล้วย และแอปเปิลเอง เช่นเดียวกับส้มและกล้วย ข้อมูลนี้ช่วยให้เข้าใจจุดอ่อนของโมเดลและปรับปรุงประสิทธิภาพในการแยกแยะวัตถุ

ตาราง 4 Confusion matrix

	Actually Positive (1)	Actually Negative (0)
Predicted Positive (1)	True Positives (TPs)	False Positives (FPs)
Predicted Negative (0)	False Negatives (FNs)	True Negatives (TNs)

ที่มา: Room (2019)

เมทริกซ์วัดประสิทธิภาพเป็นผลสรุปของการประเมินความสามารถในการจำแนกของโมเดล จำแนกข้อมูลโดยทดสอบด้วยชุดทดสอบ จากตาราง 4 แสดงค่า TPs หรือ True Positives คือ จำนวนข้อมูลทดสอบที่เป็นคลาส Positive และโมเดลจำแนกได้ถูกต้องว่าเป็น Positive ค่า FPs หรือ False Positive คือจำนวนข้อมูลทดสอบที่ไม่ใช่คลาส Positive แต่โมเดลทำนายผิดว่าเป็นคลาส Positive ค่า TNs หรือ True Negative คือ จำนวนข้อมูลทดสอบที่เป็นคลาส Negative และโมเดลทำนายได้ถูกต้องว่าเป็นคลาส Negative ค่า FNs หรือ False Negative คือจำนวนข้อมูลทดสอบที่เป็นคลาส Positive แต่โมเดลทำนายผิดว่าเป็นคลาส Negative โดยค่า TPs, FPs, TNs และ FNs สามารถนำมาคำนวณประสิทธิภาพการทำนายของโมเดล ค่าที่นิยมใช้โดยทั่วไปประกอบด้วยค่า Accuracy, Precision, Recall และ F1- score ซึ่งแต่ละค่าสามารถคำนวณได้ดังนี้ (ชัยศิริ สนิทพล กลาง, 2566)

1. ค่าความถูกต้อง (Accuracy) คือ ความถูกต้องที่ทำนายได้ตรงกับสิ่งที่เกิดขึ้น เป็นการประเมินประสิทธิภาพจำแนกโดยรวมทุกคลาสในโมเดล

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TPs} + \text{TNs}}{\text{TPs} + \text{TNs} + \text{FPs} + \text{FNs}}$$

2. ค่าความแม่นยำ (Precision) คือ ความแม่นยำที่ทำนายว่าใช่แล้วถูกต้องมากแค่ไหน ในการทำนายว่าใช่ทั้งหมด เป็นการวัดความแม่นยำของคลาส Positive

$$\text{Precision} = \frac{\text{TPs}}{\text{TPs} + \text{FPs}}$$

3. ค่า Sensitivity หรือ Recall คือ ความสามารถในการค้นหาข้อมูลที่เป็นคลาส Positive จากการหาอัตราส่วนของการทำนายว่าถูกต้องเมื่อเทียบกับข้อมูลที่ถูกต้องจริงหารด้วยค่าที่ทำนายว่าถูกต้องทั้งหมด

$$\text{Sensitivity} = \frac{\text{TPs}}{\text{TPs} + \text{FNs}}$$

4. ค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิกของความแม่นยำ (F1- score) คือ ค่าเฉลี่ยระหว่าง Precision และ Sensitivity แบบเฉลี่ย (Harmonic mean) ของการสร้าง F1- score เป็นการวัดความสามารถของโมเดล

$$\text{F1- score} = 2 \times \frac{(\text{Precision} \times \text{Sensitivity})}{(\text{Precision} + \text{Sensitivity})}$$

เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Near infrared spectroscopy; NIRS)

ทฤษฎีของ NIR Spectroscopy

เนียร์อินฟราเรดถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1800 โดย Sir William Herschel ซึ่งเป็นนักดาราศาสตร์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความร้อน (heating effect) ในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ของแถบสเปกตรัม ที่เกิดจากการแยกแสงด้วยปริซึมและพบว่า ผลกระทบของความร้อนเกิดขึ้นสูงสุดในแถบแสงที่อยู่ถัดไปจากแสงสีแดง (red end) แต่ไม่สามารถมองเห็นสเปกตรัม (spectrum) ได้ จึงเรียกช่วงรังสีที่ค้นพบว่า รังสีอินฟราเรด (infrared radiation) การค้นพบครั้งนี้ถือเป็นการค้นพบที่ยิ่งใหญ่ เพราะรังสีอินฟราเรดประกอบไปด้วยสามช่วงความยาวคลื่นที่สำคัญ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้แตกต่างกัน หนึ่งในนั้นก็คือ รังสีอินฟราเรดย่านใกล้หรือสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared spectroscopy; NIR) (Herschel, 1800)

NIR Spectroscopy เป็นวิธีการวิเคราะห์โมเลกุลที่รวดเร็วและไม่ทำลายตัวอย่าง โดยอาศัยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนตัวอย่างเป็นวิธีการที่ให้ผลที่ดี ถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดผลิตภัณฑ์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ตั้งแต่การตรวจสอบวัตถุดิบไปจนถึงการตรวจสอบและการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Donald A, 2008)

NIRS ได้ถูกนำมาใช้งานในช่วงปลายของทศวรรษ 1970 เป็นวิธีการวิเคราะห์โมเลกุลที่ไม่ทำลายตัวอย่าง โดยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกตัวอย่างดูดกลืน ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 700-2500 นาโนเมตร NIR Spectroscopy มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมหลายๆด้านโดยเฉพาะด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ในการจำแนกองค์ประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆของตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้เป็นอย่างดี

เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี หรือ NIR เป็นการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างรังสีอินฟราเรดย่านใกล้กับสาร สารที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ คือ สารที่โมเลกุลประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจน (X-H) อะตอม X ได้แก่ C, O, N, S ฯลฯ อันตรกิริยาดังกล่าว คือ การที่โมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้เข้าไป ซึ่งจะมีผลต่อการสั่นของพันธะต่างๆในโมเลกุล ระดับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของสารที่มีความยาวคลื่นต่างๆจะปรากฏในสเปกตรัม NIR เพื่อนำไปประมวลผลในการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพต่อไป

ตำแหน่งของรังสีอินฟราเรดในสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ระหว่างรังสีวิสิเบิล (visible radiation) และรังสีอินฟราเรดย่านกลาง (mid infrared radiation) รังสีอินฟราเรดย่านใกล้มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 800-2500 นาโนเมตร (เลขคลื่น $12000-4000\text{ cm}^{-1}$) เป็นย่านโอเวอร์โทน (overtone region) ดังแสดงในภาพ 3

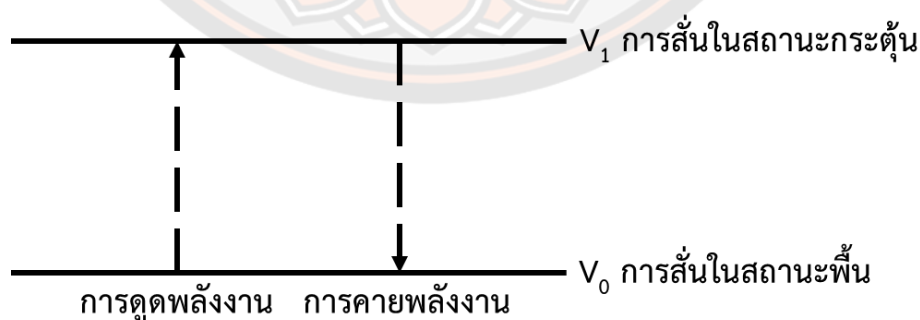
50000	25000	12500	4000	400	10	cm ⁻¹ (wavenumber)
Vacuum ultraviolet	Ultra-violet	Visible	Near Infrared	Infrared	Far Infrared	Microwave
200	400	800	2500	25000	100000	nm (wavelength)
			2.5 μ m	25 μ m	1 mm	
600	300	150	48	48	0.12	kJ mol ⁻¹ (energy)

ภาพ 3 ตำแหน่งรังสีสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในแถบสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: Osborne B.G (1993)

หลักการของสเปกโตรสโกปีการสั่น (Vibrational Spectroscopy)

จากทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม อธิบายว่าโมเลกุลของสารประกอบด้วยอะตอมที่เชื่อมต่อกันด้วยการสร้างพันธะเคมี (chemical bonding) พันธะในโมเลกุลจะเกิดการสั่น (vibration) อยู่ตลอดเวลา เรียกการสั่นชนิดนี้ว่า การสั่นในสถานะพื้น (vibrational ground state) ด้วยความถี่ซึ่งมีค่าเฉพาะ (quantized frequency) ถ้าโมเลกุลเกิดอันตรกิริยากับรังสี NIR จะดูดกลืนรังสีที่มีความถี่ตรงกับความถี่ค่าเฉพาะ จนทำให้เกิดการสั่นในสถานะกระตุ้น (vibrational excited state) ระดับโอเวอร์โทน โมเลกุลไม่สามารถอยู่ในสถานะกระตุ้นได้จึงเกิดการคายพลังงานออกมาในรูปความร้อนเพื่อให้กลับคืนสู่การสั่นในสถานะพื้นตามเดิม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า แทรนซิชัน (transition) ดังภาพ 4



ภาพ 4 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานการสั่น

ที่มา: Osborne B.G (1993)

การแบ่งช่วงรังสีสเปกโตรสโกปีรังสีย่านใกล้

รังสีอินฟราเรดย่านใกล้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ตามระดับพลังงานแบ่งได้เป็น 2 ช่วง และตามชนิดแถบอินฟราเรดย่านใกล้ของโมเลกุลแบ่งได้เป็น 2 ช่วง ดังตาราง 5

ตาราง 5 การแบ่งชนิดแถบอินฟราเรดย่านใกล้

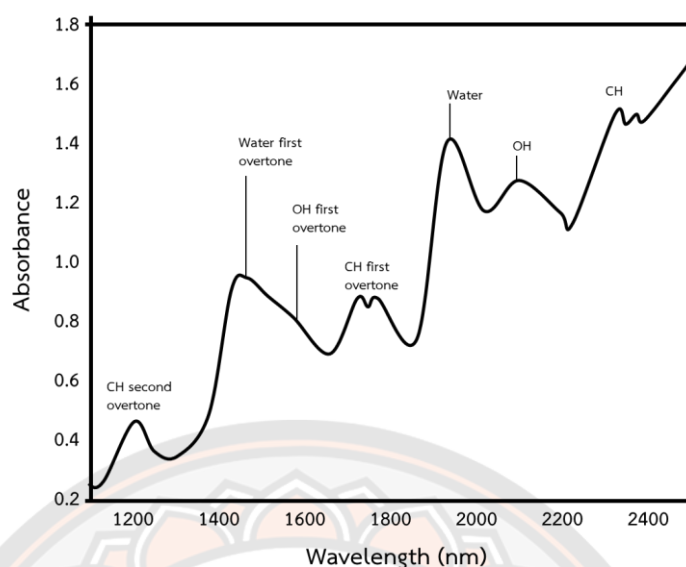
ความยาวคลื่น (nm)	ช่วง	พลังงาน (kJ/mol)
800-1100	คลื่นสั้น	~150-190
1100-2500	คลื่นยาว	~109-48

ที่มา: Ozaki, Huck, Tsuchikawa, and Engelsen (2021)

ช่วงคลื่นสั้นเริ่มตั้งแต่ความยาวคลื่น 800 ถึง 1100 นาโนเมตร เป็นช่วงที่มีพลังงานสูงสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อของตัวอย่างได้ดี สามารถทะลุเข้าไปได้ถึง 1 เซนติเมตร จึงมักใช้ความยาวคลื่นในช่วงนี้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ต้องการข้อมูลลึกเข้าไปภายใน ได้แก่ ตัวอย่างผลไม้ที่มีเปลือกหนา เช่น มังคุด เป็นต้น ลำแสงจะผ่านเข้าไปในเนื้อใน ทำให้ได้ข้อมูลสเปกตรัมเนื้อในของตัวอย่างสูง สำหรับช่วงความยาวคลื่นยาวเริ่มตั้งแต่ 1100 ถึง 2500 นาโนเมตร มีพลังงานต่ำกว่าช่วงคลื่นสั้น

การเกิดอันตรกิริยาของรังสีอินฟราเรดย่านใกล้

เมื่อรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ผ่านเข้าไปยังสสาร จะเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับอะตอมและโมเลกุลของสสารนั้น รังสีบางส่วนจะถูกดูดกลืน (absorption) เอาไว้บางส่วนจะผ่านออกมา (transmission) และบางส่วนเกิดการสะท้อน (reflection) ปรากฏการณ์ที่กล่าวข้างต้นจะเกิดเพียงอันใดอันหนึ่งหรือเกิดพร้อมๆ กันได้



ภาพ 5 อินฟราเรดย่านใกล้สเปกตรัมเป็นกราฟของค่าการดูดกลืนกับความยาวคลื่น

ที่มา: อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล (2558)

เมื่อสารเกิดอันตรกิริยากับรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ ความเข้มของแถบการดูดกลืนใน NIR สเปกตรัมจะนิยมแสดงในรูปค่าการดูดกลืน (absorbance) และความยาวคลื่น (wavelength) ดังภาพ 5 ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์กับความเข้มของแสง (Osborne B.G, 1993) ดังนี้

$$\text{กรณีแสงส่องผ่าน} : A = \epsilon bc = \log (1/T) = \log(I_0/I_t)$$

$$\text{กรณีแสงสะท้อน} : A = \epsilon bc = \log (1/R) = \log(I_0/I_r)$$

เมื่อ

A = ค่าการดูดกลืนแสง

ϵ = สภาพดูดกลืนโมลาร์ (molar absorptivity) เป็นค่าคงที่ของแต่ละสาร

b = ความหนาของตัวอย่าง

c = ความเข้มข้นของสารที่ดูดกลืนแสง

T = แสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่าง

R = แสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่าง

I_0 = ความเข้มแสงที่ตกกระทบตัวอย่าง

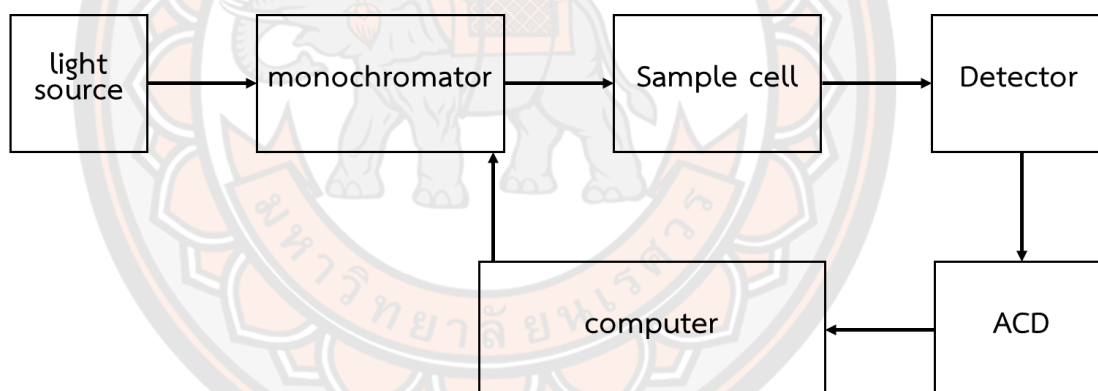
I_t = ความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่าง

I_r = ความเข้มแสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่าง

เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ NIR (Siesler, Ozaki, Kawata, & Heise, 2008)

การทำงานของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ NIR อาศัยการดูดกลืนพลังงานแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของสารแต่ละชนิดมีไม่เท่ากัน ดังนั้นเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ NIR ส่วนใหญ่จำเป็นที่จะต้องมีความสามารถในการแยกลำแสงออกเป็นทีละความยาวคลื่นได้ เพื่อที่จะใช้แสงความยาวนั้นส่องเข้าไป (Reflectance Type) หรือวัดความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มของแสงที่ส่องเข้าไป (Transmission Type) ทำแบบนี้ทีละความยาวคลื่นและนำค่าความเข้มแสงที่ได้ในแต่ละความยาวคลื่นมาเขียนกราฟโดยให้แกนนอนเป็นความยาวคลื่น แกนตั้งเป็นค่าการดูดกลืนแสง จะได้กราฟการดูดกลืนแสงของตัวอย่างนั้นๆ หลังจากนั้นข้อมูลจะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อไป การแยกลำแสงออกเป็นทีละความยาวคลื่นนี้เรียกว่า โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator)

องค์ประกอบของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ NIR ประกอบด้วย ต้นกำเนิดแสง (Light Source) อุปกรณ์แยกแสงออกเป็นแต่ละความยาวคลื่นหรือโมโนโครมาเตอร์ (monochromator) ช่องใส่ตัวอย่าง (Sample cell) ตัวรับแสง (Detector or sensor) และคอมพิวเตอร์ ดังภาพ 6



ภาพ 6 องค์ประกอบของสเปกโตรมิเตอร์ NIR

ที่มา: (นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, 2545)

ส่วนประกอบของเครื่อง NIRS (นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, 2545)

ส่วนประกอบหลักและการออกแบบเครื่องมือ spectrometer แต่ละประเภทมีความคล้ายคลึงกัน โดยประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสง ตัวเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการหาตำแหน่งที่วางตัวอย่าง

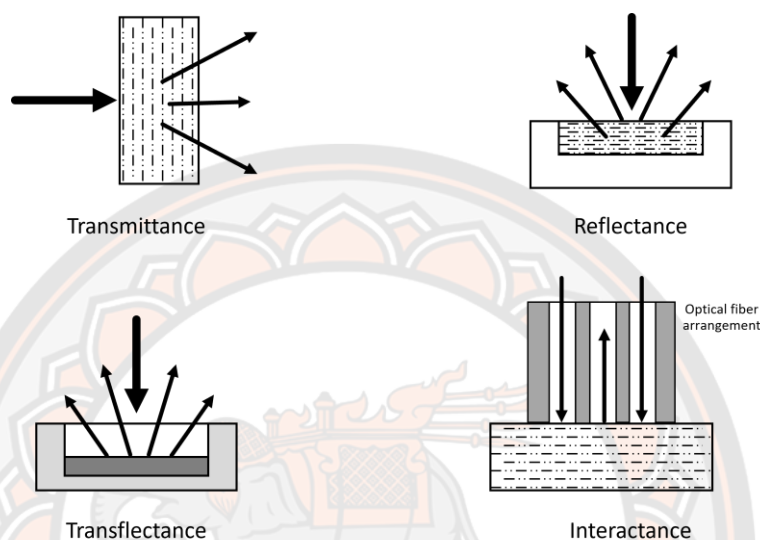
1. แหล่งกำเนิดรังสีในช่วง NIR โดยส่วนใหญ่จะใช้หลอดทั้งสแตนเลสเพราะราคาถูกและใช้งานได้ง่ายทันที แล้วใช้ตัวฟิลเตอร์ช่วยกรองแสงในช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการออกเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างร้อนจนเกินไป
2. โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) ช่วยในการกระจายแสงโดยอาศัยเกรตติง และควบคุมให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการด้วยช่องผ่านแสงเข้า (Entrance Slit) และช่องผ่านแสงออก (Exit Slit) ตัวอย่างจะมีการดูดกลืนหรืออินยอมนให้รังสีทะลุหรือสะท้อนกลับนั้น ขึ้นอยู่กับรูปแบบและองค์ประกอบของตัวอย่าง เช่น ของแข็ง ของเหลว อิมัลชัน สารแขวนลอย เป็นต้น
3. ตำแหน่งที่วางตัวอย่าง ต้องได้รับการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบของการวิเคราะห์และปริมาณของอนุภาคที่ใช้วิเคราะห์ มักทำจากวัสดุที่ยอมให้แสงสามารถทะลุผ่านได้ เช่น ควอตซ์หรือแก้ว และมีระยะทางเดินของแสงที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่าง
4. อุปกรณ์สำหรับตรวจวัด (Detector) ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการทาง Photoconductive effect การเลือกเครื่องตรวจวัดขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและการออกแบบต่างๆของ spectrometer

แบบวิธีการวัด (measurement modes)

สำหรับรูปแบบการปฏิสัมพันธ์ของตัวอย่างกับแสง NIR นั้นจะเกิดได้หลากหลายรูปแบบ เมื่อแสงผ่านไปยังตัวอย่างที่มีลักษณะต่างกัน จะมีปฏิสัมพันธ์ได้ 4 ลักษณะ (ภาพ 7) ดังนี้

1. การส่องผ่าน (Transmittance) แสง NIRS ตกกระทบที่ผิวของวัตถุแล้วส่องผ่านวัตถุ โดย detector สามารถวัดปริมาณแสงที่ส่องผ่านวัตถุออกมาในด้านตรงข้ามกัน
2. การส่องผ่านแล้วสะท้อนกลับ (Transflectance) แสง NIRS ตกกระทบที่ผิวของวัตถุด้านหนึ่งและส่องผ่านวัตถุที่ไม่ดูดกลืนแสงที่อยู่ด้านล่างวัตถุแล้วเกิดการสะท้อนมายัง detector เป็นการวัดแสงที่แสงส่องผ่านวัตถุแล้วสะท้อนกลับมายัง detector ในด้านเดียวกัน
3. การสะท้อน (Reflectance) แสง NIRS ตกกระทบที่ผิวของวัตถุแล้วเกิดการแพร่กระจาย ซึ่ง detector สามารถวัดแสงสะท้อนกลับออกมาจากผิวของวัตถุ โดยปรากฏการณ์นี้จะเกิดกับวัตถุที่มีผิวไม่เรียบ จึงนิยมใช้การวัดสะท้อนแสงกับผลิตภัณฑ์กลุ่มเมล็ดพืช ซึ่งเป็นการวัดที่แหล่งกำเนิดแสงและ detector ติดตั้งทำมุมเฉพาะต่อกัน 45 องศา

4. อินเทอร์แอคแทนซ์ (Interactance) เป็นลักษณะที่หัววัดอยู่ติดกับวัตถุ เมื่อแสงตกกระทบกับวัตถุ แสงจะสะท้อนออกมาจากวัตถุแล้วส่งไปยัง detector บริเวณส่วนกลางของใยแก้วนำแสง ซึ่งเป็นการวัดโดยที่แหล่งกำเนิดและ detector อยู่ในหัววัดเดียวกัน (Fiber optic probe)



ภาพ 7 ลักษณะการเกิดปฏิสัมพันธ์ของตัวอย่างกับแสง NIR

ที่มา: Kawano (2002)

การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์ (Pretreatment of spectrum for analysis)

น้ำเป็นองค์ประกอบหลักของผลผลิตเกษตรและโมเลกุลน้ำสามารถดูดกลืนแสง NIR ได้ดี ดังนั้นพีคขององค์ประกอบทางเคมีชนิดอื่นมักถูกบดบังด้วยพีคของน้ำ นอกจากนั้นสเปกตรัม NIR ยังเกิดจากการรวมตัวของแถบโอเวอร์โทนและคอมบิเนชันของกลุ่มฟังก์ชันต่างๆ ทำให้สเปกตรัมมีความซับซ้อนมาก สเปกตรัมถูกทำให้มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระเจิงแสงที่ส่งผลต่อการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันตามความยาวคลื่น ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่าง สัญญาณรบกวนของเครื่องมือ สภาพแวดล้อมและแหล่งแปรปรวนอื่นๆ ทำให้การระบุความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงของกลุ่มฟังก์ชันเฉพาะทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นในการดึงข้อมูลที่อยู่ในสเปกตรัมจะต้องใช้เทคนิคทางสถิติแบบพหุตัวแปร (Multivariate statistical technique) หรือที่เรียกว่า เคมีเมทริกซ์ ซึ่งเป็นหลักการที่สำคัญหลักทางเคมีร่วมกับหลักทางสถิติในการวิเคราะห์ เทคนิคนี้เป็นใช้การวิเคราะห์ความ

ถดถอยร่วมกับการปรับสเปกตรัมก่อนที่จะวิเคราะห์ (อนุพันธ์ เทอตวงศ์วรกุล, 2558) วิธีการคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ในการแปลงข้อมูลสเปกตรัม ได้แก่

1. วิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard Normal Variate, SNV) ตัวอย่างที่วัดด้วยการสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse reflectance) โดยทั่วไปจะทำให้เกิดสเปกตรัมที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอของอนุภาคในตัวอย่าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการกระเจิงแสงสูงและเป็นสาเหตุให้เกิดความแปรปรวนส่วนใหญ่ในข้อมูลที่วัดได้ วิธีการกำจัดอิทธิพลของการกระเจิงแสงออกจากสเปกตรัมคือ การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

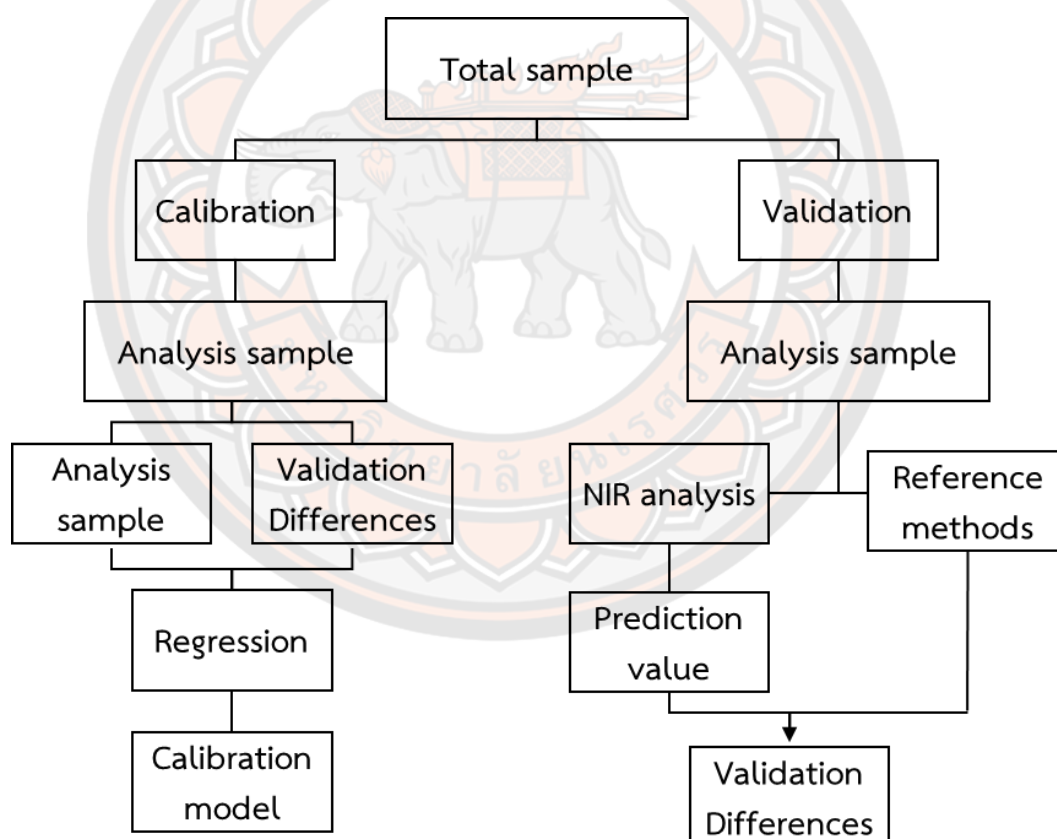
2. การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (Multiplicative scatter correction, MSC) เป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อลดผลที่เกิดจากการกระเจิงแสง (Scattered light) ต่อสเปกตรัม NIR ที่ได้จากการวัดแบบสะท้อนแพร่ (Diffuse reflectance) และแบบส่องผ่าน (Transmittance) โดยทั่วไปการกระเจิงแสงจะทำให้ความชันโดยรวมของสเปกตรัมเปลี่ยนไป ซึ่งเปรียบเสมือนว่าสเปกตรัมถูกทำให้หมุนรอบจุดที่ความยาวคลื่นต่ำสุดของสเปกตรัม (Multiplicative effect) การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณนั้นถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้สามารถลดผลกระทบแบบผลคูณแต่ในทางปฏิบัติสามารถลดในแบบผลบวกได้ด้วย หรือผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่ากันตลอดช่วงความยาวคลื่น

3. การแปลงค่าด้วยอนุพันธ์ (Derivative transformation) การหาอนุพันธ์ของสเปกตรัมเป็นวิธีที่ใช้ประโยชน์ในการแก้ปัญหาการซ้อนทับกันของจุดยอดในสเปกตรัม และการเลื่อนขึ้นของสเปกตรัม ทั้งแบบสไลด์ออฟเซต (Slide offset) และแบบไลน์ชิฟต์เชิงเส้น (Base line shift) (อนุพันธ์ เทอตวงศ์วรกุล, 2552) การแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first derivative) ของสเปกตรัมยังช่วยแก้ปัญหาที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่น (Base line shift) โดยถ้าค่าที่เพิ่มขึ้นของสเปกตรัมมาจากปัจจัยที่ทำให้สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นหรือเพิ่มขึ้นเสมือนถูกบวกเพิ่มด้วยเส้นตรงที่มีความชันเป็นบวก แต่พีก (Peak) ของสเปกตรัมยังมีฐานกว้าง จึงไม่สามารถแยกพีกออกจากกันอย่างชัดเจน ส่วนการแปลงค่าอนุพันธ์อันดับสอง (Second derivative) จะช่วยลดผลกระทบจากการกระเจิงแสง ทั้งที่ผลเชิงบวก (Additive effect) ที่ทำให้ขนาดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่นในลักษณะที่เป็นการบวกเพิ่มด้วยค่าบนเส้นตรงที่เป็นมุมเอียงซึ่งค่าบวกเพิ่มจะน้อยที่ความยาวคลื่นสั้นและค่าบวกเพิ่มจะสูงที่ความยาวคลื่นสูง โดยสรุปแล้วจุดเด่นของวิธีการแปลงค่าด้วยอนุพันธ์อันดับสองในงาน NIR คือ การแยกจุดยอดที่เหลื่อมกันซ้อนกันในสเปกตรัมออกจากกัน และการลดผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่น นอกจากนี้สามารถแยกพีกบนสเปกตรัม ที่ซ้อนออกจากกันได้ชัดเจนทำให้ทราบตำแหน่งความยาวคลื่น แต่สเปกตรัมที่ได้จะมีลักษณะหัวกลับลงมาด้านล่าง (Osborne B.G, 1993)

ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared spectra)

ในการสร้างสมการสำหรับการทำนายค่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิค NIR จะต้องใช้กลุ่มตัวอย่างที่ทราบปริมาณองค์ประกอบที่ต้องการทำนายและข้อมูลสเปกตรัม NIR ของตัวอย่าง โดยในการสร้างสมการประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในภาพ 8 ได้แก่

1. ขั้นตอนการสร้างสมการที่ใช้ทำนาย (Calibration model) เป็นขั้นตอนในการสร้างสมการมาตรฐานที่ใช้ในการทำนายค่าองค์ประกอบที่ต้องการทราบ
2. ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้น (Validation model) เป็นขั้นตอนในการตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของสมการมาตรฐานที่สร้างได้จากขั้นตอนการสร้างสมการที่ใช้ทำนาย เมื่อได้ผลที่น่าเชื่อถือแล้วจึงนำสมการที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการทำนายค่าองค์ประกอบที่ต้องการศึกษาจากสเปกตรัม NIR ที่ทำการวัดได้



ภาพ 8 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม NIR

ที่มา: วารุณี ธนะแพสย์ (2555)

การสร้างสมการ calibration (ศศิวิมล มากมูล, 2553)

ในขั้นตอนการสร้างสมการ calibration คือขั้นตอนการหาตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสำคัญกับค่าตัวแปรตามที่ต้องการทำนาย โดยการคัดเลือกหาตัวแปรอิสระสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีหลัก คือ วิธีการเลือกความยาวคลื่น (Wavelength selection methods) และวิธีใช้สเปกตรัมทั้งหมด (Full spectrum methods) ดังนี้

วิธีการเลือกความยาวคลื่น (Wavelength selection methods) เป็นวิธีการที่ใช้ในการคัดเลือกตัวแปรอิสระเฉพาะความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่จะทำนาย เทคนิคในการคัดเลือกตัวแปรนี้มีหลายเทคนิค เช่น การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย เป็นต้น

วิธีใช้สเปกตรัมทั้งหมด (Full spectrum methods) การใช้วิธีคัดเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดที่มีในสเปกตรัมมาสร้างสมการ calibration ค่าที่ได้มักไม่ถูกต้องและเกิดปัญหาได้ค่าที่ทำนายต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่แท้จริง (Underestimation) การใช้วิธีทางสถิติในการจัดกลุ่มแยกประเภทตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกันและทำการสร้างตัวแปรใหม่ที่เกิดมาจากตัวแปรเดิม จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ วิธีการทางสถิติที่นิยมได้แก่ การวิเคราะห์โดยใช้องค์ประกอบหลัก (principal component analysis; PCA) และการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial least square regression; PLS) เป็นต้น

1. การวิเคราะห์โดยใช้องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis; PCA) เป็นวิธีหนึ่งทางสถิติในการวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัว (multivariate analysis) โดยใช้เทคนิคการลดจำนวนตัวแปรอิสระด้วยการแบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์เพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่ที่เรียกว่า ปัจจัยหรือองค์ประกอบ (factors or Principal component) ประโยชน์ในการสร้างตัวแปรใหม่นอกจากจะสามารถลดจำนวนตัวแปรอิสระให้เหลือน้อยลงแล้ว จำนวนตัวแปรที่สร้างขึ้นมามายังคงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (ธีระดา ภิบุญ, 2561) ดังนี้

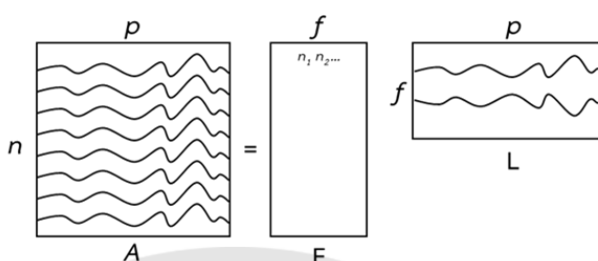
1.1 นำกลับไปประมาณค่าตัวแปรเดิม ดังภาพ 9

1.2 นำคะแนนปัจจัยที่หาได้ (PCA score) ไปใช้ในการทำนายค่าตัวแปรตามโดยนำไปสร้างสมการ calibration ด้วยวิธีทางสถิติการถดถอย (Regression)

1.3 ใช้ค่าน้ำหนักปัจจัย (PCA loading) และคะแนนปัจจัย (PCA score) ในการอธิบายโครงสร้างของข้อมูล โดยในแต่ละองค์ประกอบหลักจะสามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรเดิมได้แตกต่างกัน ซึ่ง PC1 จะอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลเดิมได้มากที่สุดเสมอ โครงสร้างของข้อมูลสามารถเขียนสมการในรูปแบบของผลรวมเชิงเส้นได้

1.4 ใช้ในการตรวจสอบข้อมูลที่ผิดปกติและข้อมูลที่เป็นข้อมูลผิดปกติ (Outlier) หมายถึง ตัวอย่างที่มีความแตกต่างกับตัวอย่างอื่นและไม่สามารถอธิบายได้ดีและไม่สามารถอธิบายได้

โดยใช้สมการที่สร้างขึ้น ทั้งนี้สามารถตรวจสอบตัวอย่างที่เป็นข้อมูลผิดปกตินี้โดยพิจารณาจากกราฟคะแนน



A = Original spectral data

n = Number of spectra

F = PCA score

p = Number of data point

L = PCA factor

f = Number of principal components

ภาพ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรใหม่กับข้อมูลในตัวแปรเดิมของตัวแปรอิสระ

ที่มา: ชีระดา ภิญโญ (2561)

2. การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเชิงเส้น (Linear Discriminant Analysis; LDA)

การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเชิงเส้นเป็นเทคนิควิเคราะห์ความสัมพันธ์ โดยประกอบด้วยตัวแปรตาม 1 ตัว ซึ่งเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ เรียกว่า ตัวแปรแสดงกลุ่ม และมีตัวแปรอิสระ p ตัว การจำแนกกลุ่มเชิงเส้นเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแบ่งกลุ่ม คน สัตว์ สิ่งของ ออกเป็นกลุ่มๆ อย่างน้อย 2 กลุ่มขึ้นไป (ศศิมล ศรีโรจน์, 2565) การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเป็นเทคนิคที่สร้างฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรอิสระที่จะทำให้หน่วยที่อยู่กลุ่มต่างกันมีความแตกต่างกันมากที่สุดเมื่อเทียบกับความแตกต่างของหน่วยที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน

3. การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial least square regression; PLS)

PLS เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หลายตัวแปร (multivariate analysis) เป็นเทคนิคในการลดจำนวนตัวแปรเช่นเดียวกับวิธี PCA โดย PLS เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบตัวแปรหลายตัวแปร โดยการสร้าง Factor แบบสมการเชิงเส้นตรงจากข้อมูลของสเปกตรัมเริ่มต้น และนำ Factor ที่ได้ไปใช้ในการสร้างสมการถดถอย โดย Factor ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยวิธีทางสถิติ PLS ต้องสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล และเกี่ยวข้องกับการประเมินค่าทางเคมีในเวลาเดียวกัน

วัตถุประสงค์ของ PLS เพื่อต้องการลดจำนวนข้อมูลสเปกตรัมให้ได้เฉพาะข้อมูลสเปกตรัมที่มีความสำคัญกับการทำนายค่าทางเคมีที่สนใจเท่านั้น เพื่อให้สามารถประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น สมการ PLSR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

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

เมื่อ Y คือ ตัวแปรตาม
 $F_1, F_2, \dots, F_n$ คือ ค่าตัวแปรใหม่ที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูล Y ที่ตำแหน่ง n ตัวแปร
 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่วงน้ำหนักที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูล Y ที่ตำแหน่ง n ตัวแปร

ลักษณะสเปกตรัมของคลื่นแสง NIR โดยทั่วไปจะมีสเปกตรัมซ้อนทับกัน และมีพีกที่กว้าง ดังนั้นการสร้างสมการทำนายองค์ประกอบทางเคมีที่พิจารณาเพียงความยาวคลื่นเดียวหรือจำนวนความยาวคลื่นน้อยๆจะให้ผลการวิเคราะห์ที่ไม่ถูกต้องเท่ากับการพิจารณาทั้งสเปกตรัม หรือบางช่วงของสเปกตรัม วิธีการพิจารณานี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น (Saranwong, Sornsrivichai, & Kawano, 2004) ได้ศึกษาการพัฒนาสมการที่ใช้ในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (total soluble solid) และค่าน้ำหนักเนื้อแห้ง (Dry matter) ของมะม่วงด้วยวิธี PLSR กับ MLR ในการสร้างสมการทำนายพบว่า PLSR ให้ค่าผิดพลาดของสมการทำนายของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่ำกว่าวิธี MLR แต่สำหรับสมการทำนายค่าน้ำหนักเนื้อแห้งด้วยวิธี PLSR กับ MLR ที่สร้างขึ้นให้ค่าไม่แตกต่างกัน สมการทำนายที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมหรือไม่ สามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient; R) ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มสร้างสมการ (Standard error of calibration; SEC) และค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิงกับค่าที่ได้จาก NIR (bias)

ขั้นตอนการทำ Validation

หลังจากได้สมการ calibration ที่เหมาะสมแล้ว ต้องมีการทวนสอบว่าสมการที่สร้างขึ้นมาจากชุดข้อมูลที่สุ่มมานั้นสามารถทำนายข้อมูลชุดอื่นที่เป็นประชากรเดียวกันได้หรือไม่ ตัวอย่างจะนำมาวิเคราะห์คุณภาพที่ต้องการทราบทั้งด้วยวิธีมาตรฐาน เรียกค่าที่ได้ว่าค่าจริง (Actual value) และสแกนค่าสเปกตรัม NIR เครื่องสเปกโตรสโกปี NIR นำค่าการดูดกลืนแสงของความยาวคลื่นที่เกี่ยวข้องและมีในสมการ calibration แทนค่าในสมการเพื่อทำนายค่าคุณลักษณะที่ต้องการทราบ (Predicted value) ต่อจากนั้นนำค่าจริงให้เป็นชุดข้อมูล X และค่าทำนายให้เป็นชุดข้อมูล Y มา

เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้ว่าการทำนายค่าคุณภาพด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปี NIR นั้นมีความถูกต้องมากน้อยแค่ไหน (Standard error of prediction: SEP) ค่าเฉลี่ยของการทำนายกับค่าเฉลี่ยของค่าจริงมีความแตกต่างกันหรือไม่ เมื่อได้สมการแล้วจำเป็นต้องนำสมการที่มาทดสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพของสมการว่าสามารถใช้ประเมินค่าได้แม่นยำมากน้อยเพียงใด โดยวิธีที่นิยมมี 2 วิธี ดังนี้

1. Full cross validation วิธีนี้ตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นตัวอย่างชุดเดียวกันกับกลุ่มที่ใช้ในการสร้างสมการมีวิธีการ คือ

ขั้นตอนที่ 1 ตัดตัวอย่างที่ 1 ออกไปจากกลุ่มแล้วนำตัวอย่างที่เหลือมาสร้างสมการ เมื่อได้สมการแล้วนำตัวอย่างที่ 1 ที่ตัดออกไปตอนแรกมาทดสอบสมการ

ขั้นตอนที่ 2 ตัดตัวอย่างที่ 2 ออกไป นำตัวอย่างที่ 1 กลับเข้ามาในกลุ่ม สร้างสมการรวมกับตัวอย่างอื่นๆที่เหลือเพื่อสร้างสมการ เมื่อได้สมการแล้วจึงนำตัวอย่างที่ 2 มาทดสอบสมการ ทำซ้ำอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งทดสอบสมการครบทุกตัว ซึ่งตัวอย่างแต่ละตัวจะถูกตัดออก 1 ครั้งเท่านั้น

การทดสอบในลักษณะนี้เป็นการทดสอบภายใน (Internal validation) ซึ่งวัดผลโดยการดูค่า Root mean square of cross validation (RMSECV) เป็นการวัดค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการประเมินด้วยสมการที่สร้างขึ้นกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ ถ้ามีความแตกต่างกันน้อยแสดงว่าสมการมีประสิทธิภาพให้ค่าที่สามารถยอมรับได้และมักใช้กับตัวอย่างที่มีจำนวนน้อย (ศศิวิมล มากมูล, 2553)

2. prediction test เป็นการทดสอบโดยการนำกลุ่มตัวอย่างชุดใหม่ (Test set) มาทดสอบค่าจากสมการที่ได้ โดยตัวอย่างชุดใหม่ที่น่ามาวิเคราะห์ต้องมีวิธีการเตรียมตัวอย่างการวัดสเปกตรัมปัจจัยต่างๆในระหว่างการวิเคราะห์และการแปลงข้อมูลสเปกตรัมต้องเหมือนกับกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการ การทดสอบลักษณะนี้เรียกว่า การทดสอบภายนอก (External validation) และพิจารณาความแม่นยำจากค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิงกับค่าที่ได้จาก NIR (Bias), ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มทดสอบสมการ (Root mean square error of prediction; RMSEP) หรือ (Root mean standard error of calibration; RMSEC) หรือ (standard error of calibration; SEC) และค่าอัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่ม validation ต่อค่า SEP (Ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP; RPD) ซึ่งค่าสถิติเหล่านี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสมการ calibration ถ้าผลการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับผลที่อ้างอิง และให้ค่าทางสถิติที่ดี แสดงว่าสมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีนั้นยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ทำนายปริมาณตัวอย่างต่อไปได้อย่างถูกต้อง

ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสมการ

1. ค่าเฉลี่ย (mean) ค่าเฉลี่ยเป็นค่าคณิตศาสตร์ของข้อมูลที่ใช้อ้างอิง (X) หรือ ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องสเปกโตรสโกปี NIR (Y) ค่าเฉลี่ยนั้นจะถูกคำนวณจากผลรวมของค่า X หรือ Y และถูกหารโดยจำนวนของข้อมูล (N) ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N}$$

2. Standard deviation (SD) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงถึงการเปลี่ยนแปลง หรือความแปรปรวนในข้อมูล คือ รากที่สองของความแปรปรวน สูตรในการหาค่า SD คือ

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

3. สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (Coefficient of correlation, R) แสดงระดับ ซึ่งข้อมูล 2 เซต (ข้อมูล X และ Y) สอดคล้องซึ่งกันและกัน ความสอดคล้องที่ไม่สมบูรณ์จะไม่มี ความแตกต่างกันเลยระหว่าง 2 เซตข้อมูล ผลของค่า R จะเท่ากับ 1.00 ในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ X และ Y อาจจะมี ความสัมพันธ์เป็นเชิงลบหรือบวกก็ได้ ดังตาราง 5 สูตรในการหาค่า R คือ

$$R = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

ตาราง 6 เกณฑ์การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

Value R	Value R ²	Interpretation
Up to +/- 0.5	Up to 0.25	Not usable in NIRS calibration
+/- 0.51-0.70	0.26-0.49	Poor correlation, research the reasons
+/- 0.71-0.80	0.50-0.64	Rough screening
+/- 0.81-0.90	0.66-0.81	Screening and approximate calibration
+/- 0.91-0.95	0.83-0.90	Usable with caution for most application, including research
		Usable in most application, including quality assurance
+/- 0.96-0.98	0.92-0.96	Usable in any application
+/- 0.99+	0.98+	

หมายเหตุ: R: Correlation coefficient, R²: Coefficient of determination

ที่มา: Oliveira and Franca (2011)

5. ค่า error มาตรฐานของ cross-validation (SECV) cross-validation สามารถใช้ตัวอย่างชุดเดียวกันที่ใช้ในการสร้าง calibration model เพื่อทำ validation โดยชักตัวอย่างออกหนึ่งตัวอย่างหรือกลุ่มของหลายตัวอย่างจากชุด calibration และทำการปรับปรุง calibration model ด้วยตัวอย่างที่เหลืออยู่ ตัวอย่างที่ถูกกำจัดเป็นตัวอย่างทำนายและบันทึกค่าความผิดพลาด แล้วนำตัวอย่างนั้นกลับมาแล้วชักตัวอย่างอื่นออกไปและทำซ้ำกระบวนการจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดถูกใช้ในการพัฒนาโมเดลซึ่งใช้ทำนาย ถ้าเอาออกเพียงทีละหนึ่ง ตัวอย่างวิธีนี้เรียกว่า full หรือ one out cross validation ถ้านำชุดตัวอย่างออกจะเรียกว่า segmental cross validation ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างที่เหลืออยู่ระหว่างค่าที่ถูกทำนายโดย NIR และค่าอ้างอิงคือ The standard error of cross validation (SECV)

Cross-validation ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางและถูกใช้ในการตีพิมพ์ สำหรับชุดตัวอย่างเล็ก (N = 100) นิยมใช้ cross validation มากกว่าวิธี test set ในการวิเคราะห์ calibration model เนื่องจากชุดตัวอย่างขนาดเล็กนั้นมีความสนใจในการเลือกตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของตัวอย่างทั้งช่วงซึ่งเป็นไปได้ใน test set, one out cross validation ใช้เพียง 2-3 วินาทีในการวิเคราะห์

6. Ratio of SEP to the SD (RPD) คือ อัตราส่วนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกับการทำนาย (validation) RPD คือสถิติอย่างง่ายที่ทำให้สามารถศึกษาความสัมพันธ์ของ SEP ในส่วนของ

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลอ้างอิง คำนวณโดยการหาร SD ของค่าอ้างอิงที่ใช้ใน validation ด้วย RMSEP

$$RPD = \frac{SD}{RMSEP}$$

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 ดังแสดงในตาราง 6

7. Factor คือ ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของสมการ เป็นปัจจัยภายใน โดยข้อมูลที่ใช้ในการทำสมการ ค่าที่มีผลต่อการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่นของค่าที่วิเคราะห์ เช่น เมื่อวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในเมล็ดพืช ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของสมการ ได้แก่ ความชื้น เส้นใย น้ำ หรืออื่นๆที่มีผลต่อสมการนั้น เห็นได้จากค่า regression coefficient ที่ความยาวคลื่น 400 – 2500 นาโนเมตร โดยปัจจัยที่มีผลต่อการประเมินปริมาณโปรตีนมีค่า F = 10 แสดงว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของสมการคือ 10 ปัจจัย (Osborne B.G, 1993)

ตาราง 7 เกณฑ์การพิจารณาค่าอัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่ม Validation ต่อค่า SEP (RPD)

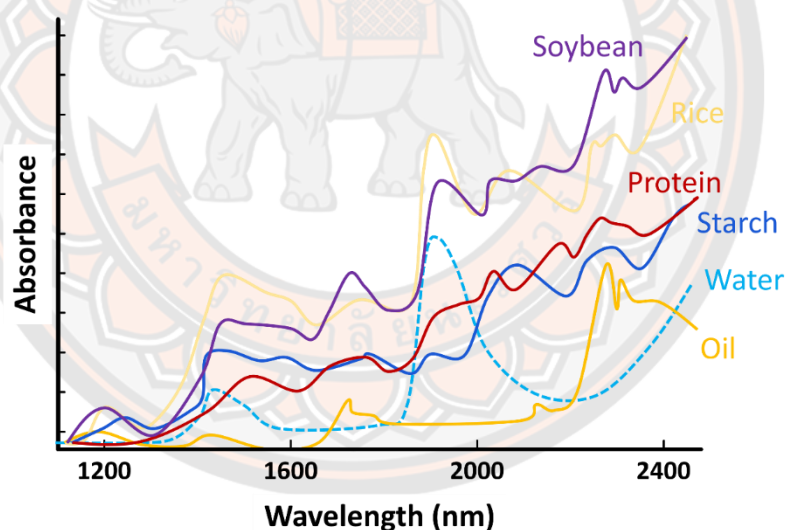
RPD Value	Classification	Application
0.0-2.3	Very poor	Not recommended
2.4-3.0	Poor	Rough screening
3.1-4.9	Fair	Screening
5.0-6.4	Good	Quality control
6.5-8.0	Very good	Process control
8.1 >	Excellent	Any application

หมายเหตุ: RPD: Ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP

ที่มา: Oliveira and Franca (2011)

การวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ (Qualitative and Quantitative analysis)

ข้อจำกัดของเครื่องสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้คือ ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ทันที เหมือนวิธีสเปกโตรทางเคมีแบบคลาสสิก (classic spectrochemical method) อื่นๆ คือ ความยุ่งยากในการหาวิธีการคำนวณหรือสร้างสมการที่เหมาะสมเพื่อทำนายองค์ประกอบที่ต้องการวิเคราะห์ในผลิตภัณฑ์ เช่น ปริมาณโปรตีน ความชื้น และไขมัน เป็นต้น ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จากเครื่อง NIR จะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการดูดกลืนแสงหรือที่เรียกว่า สเปกตรัม ดังภาพ 10 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมของข้าว ถั่วเหลือง แป้ง และองค์ประกอบอื่นๆ เช่น น้ำ ไขมัน ซึ่งข้อมูลนี้ไม่สามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าองค์ประกอบที่ต้องการทราบได้ในทันที ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS จำเป็นต้องใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัม รวมทั้งหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปกตรัมที่ได้กับค่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน



ภาพ 10 สเปกตรัมของข้าว ถั่วเหลือง แป้ง และองค์ประกอบอื่นๆ เช่น น้ำ ไขมัน ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปี NIR

ที่มา: Kawano (2002)

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis)

การนำ NIRS มาใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ แต่ยังสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้เช่นกัน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า NIRS สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ (ศศิวิมล มากมูล, 2553) พบว่าสามารถแยกข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงและข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำได้อย่างชัดเจน (รุ่งนภา ไกลถิ่น, 2555) และยังใช้แยกชนิดของชา ได้แก่ ชาดำ ชาจีน ชาเขียว ได้อย่างชัดเจน (Chen, Zhao, Zhang, & Wang, 2006)

การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis)

การวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยทั่วไป ต้องมีการสร้างสมการทำนายองค์ประกอบทางเคมี ในการสร้างสมการจำเป็นต้องมีกลุ่มตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการถดถอยเชิงเส้นระหว่างข้อมูลวิเคราะห์ทางเคมีกับข้อมูลสเปกตรัม กลุ่มตัวอย่างที่ดีจะต้องมีจำนวนอย่างที่น่ามาวิเคราะห์เพียงพอทั้งตัวอย่างในปัจจุบันและตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ในอนาคต โดยเฉพาะปริมาณองค์ประกอบทางเคมีจะต้องครอบคลุมปริมาณต่ำสุดและปริมาณสูงสุดของตัวอย่าง โดยมีการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) ที่ถูกต้องเพียงพอ และเป็นตัวแทนของประชากร การสุ่มตัวอย่างถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการที่จะได้สมการทำนายองค์ประกอบทางเคมีที่ดี ทำให้ค่าผิดพลาดได้จากการทดลองลดลง นอกจากนี้ควรพิจารณาวิธีการวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งเป็นวิธีที่เป็นมาตรฐานและมีความแม่นยำเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องเนื่องจากส่งผลต่อสมการที่สร้างขึ้นต่อไป

ประโยชน์ของการใช้เทคนิค NIR และข้อจำกัดของเครื่อง NIR

เครื่องมือแต่ละประเภทต่างก็มีข้อจำกัดในการใช้เครื่อง NIR มีประโยชน์ และข้อดีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีหรือการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่น

1. ง่ายต่อการเตรียมตัวอย่าง เนื่องจากบางตัวอย่างการบดให้มีขนาดเล็กอาจทำให้การทดลองเกิดการคลาดเคลื่อน เช่น ขนมะขบเคี้ยวจะมีองค์ประกอบของไขมันสูงจะมีปัญหาจากการบดตัวอย่างให้มีขนาดเล็กและความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มตัวอย่าง แต่ในการวัดค่าด้วยเครื่อง NIRS ไม่ต้องการเตรียมตัวอย่างถึงแม้จะมีการเตรียมตัวอย่าง แต่ไม่ยุ่งยาก ขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ วิธีการเตรียมตัวอย่าง เช่น การตัด การบด การคั้น เป็นต้น (ศุมาพร เกษมสำราญ, 2545)

2. มีความรวดเร็วในการวัดค่า เช่น การวิเคราะห์คุณภาพในเรื่องปริมาณสตาร์ช โปรตีน ไขมัน และความชื้นของตัวอย่าง สามารถให้ผลการตรวจสอบภายใน 30 วินาที และใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์เพียง 5 กรัม

3. ได้ผลการตรวจสอบที่แม่นยำและแน่นอน ซึ่งขึ้นอยู่กับสมการที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายค่าคุณภาพ รวมทั้งสามารถควบคุมคุณภาพได้อย่างใกล้ชิดเริ่มตั้งแต่วัตถุดิบขณะทำการผลิต รวมถึงผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ออกมาให้มีคุณภาพเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด
4. การตรวจสอบเป็นวิธีการแบบไม่ทำลาย ทำให้ตัวอย่างที่นำมาตรวจสอบสามารถนำไปจำหน่ายส่งออกหรือบริโภคได้ เป็นการประหยัดต้นทุนของผลิตภัณฑ์อีกทางหนึ่ง
5. ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมทำให้ลดต้นทุนในการดูแลรักษาสภาพแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี
6. สะดวกต่อการใช้งานเนื่องจากในการปฏิบัติ ไม่จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีประสบการณ์ หรือต้องได้รับการฝึกฝน โดยเฉพาะสามารถปฏิบัติตามคู่มือการใช้งานได้ทันที
7. ในการวัดสเปกตรัมแต่ละครั้งสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อทำนายค่าต่างๆ ได้หลายค่าในเวลาเดียวกัน
8. สามารถใช้ในสถานที่ที่มีการสั่นสะเทือนหรือเคลื่อนไหว เช่น บนเรือ เพราะไม่ต้องอาศัยการชั่งน้ำหนัก
9. สามารถนำเครื่องไปตรวจสอบคุณภาพผลผลิตทางการเกษตรก่อนเก็บเกี่ยวได้ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเก็บเกี่ยวผลผลิต

ข้อจำกัดของการวัดค่าด้วยเครื่อง NIRS

1. ข้อมูลการสะท้อนกลับของแสงขึ้นอยู่กับขนาดของตัวอย่าง รูปร่าง การบรรจุ และความชื้นเป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่าง เนื่องจากถ้าตัวอย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะแตกต่างกันส่งผลให้ความแม่นยำและความถูกต้องของการวิเคราะห์ลดลง รวมทั้งการสุ่มตัวอย่างที่ไม่ครอบคลุม และความชื้นที่สูงเกินไประหว่างการเตรียมตัวก็มีผลต่อความแม่นยำที่ได้เช่นกัน
2. การรบกวนอันเนื่องมาจากกลุ่มไฮดรอกซิล (O-H) หรือมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความชื้นภายในตัวอย่าง ดังนั้นในการตรวจสอบต้องมีการควบคุมความชื้น ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่าง เช่น ตัวอย่างที่มีคุณสมบัติไม่ดูดความชื้นหรือมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นค่อนข้างยาก การควบคุมความชื้นจึงไม่จำเป็น แต่ถ้าเป็นตัวอย่างที่มีความชื้นสูงต้องหาภาชนะที่ปิดมิดชิดเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากเมื่อความชื้นในตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงจะมีผลทำให้สเปกตรัมที่ได้แตกต่างไปจากเดิม
3. การตรวจสอบขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการวิเคราะห์ถึงแม้ว่าจะเป็นตัวอย่างเดียวกันแต่การทำให้อุณหภูมิต่างกันก็อาจทำให้ได้สเปกตรัมที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบที่ได้จะเกิดการเบี่ยงเบน ดังนั้นจึงควรมีการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างขณะทำการวิเคราะห์ เนื่องจากสเปกตรัม NIR ของน้ำค่อนข้างมาก การเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิต่างๆ ตัวอย่างที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายจึงต้อง

ควบคุมอุณหภูมิเป็นพิเศษ รวมทั้งต้องคำนึงถึงอุณหภูมิที่ใช้ขณะทำการวัดตัวอย่างจริง เนื่องจากอุณหภูมิจะมีผลต่อความแม่นยำของข้อมูลที่ได้

4. ค่าใช้จ่ายของเครื่อง NIRS มีราคาแพงทั้งตัวเครื่อง NIR และอุปกรณ์พิเศษ เนื่องจากเครื่องมือมีการออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับงานแต่ละประเภท

การประยุกต์ใช้ NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพผลิตผลทางการเกษตร

เทคนิค NIRS ถูกประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพผลิตผลทางการเกษตรอย่างแพร่หลาย ทั้งคุณภาพทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของผัก ผลไม้ เนื่องจากเป็นวิธีการตรวจสอบที่ไม่ทำลายผลิตผล สะดวกและรวดเร็ว ไม่ต้องการเตรียมตัวอย่าง และให้ผลตรวจสอบที่แม่นยำ ปัจจุบันจึงเป็นเทคนิคที่ยอมรับในการประยุกต์ใช้ตรวจสอบคุณภาพผลิตผลทางการเกษตรและอาหารในระบบการผลิตระดับอุตสาหกรรม (Theanjumpol et al., 2019)

Reddy and Yadav (2018) ได้ศึกษาการวิเคราะห์คุณภาพลิ้นจี่แบบไม่ทำลายตัวอย่างด้วยเทคนิค NIRS โดยทำการศึกษาผลลิ้นจี่ 100 ผล วัดค่าการดูดกลืนแสงในรูปแบบสะท้อนกลับ และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นช่วง NIRS กับคุณภาพของผลลิ้นจี่ ได้แก่ pH ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ PLSR พบว่า ผลการทำนายของค่า pH ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) เท่ากับ 0.96, 0.91 และ 0.94 ตามลำดับ และค่าความผิดพลาดของการทำนายเท่ากับ 0.009, 0.291 ปริกซ์ และ 0.011 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Kumpon Wongzeewasakun (2017) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของความฟ้ามของส้มสายน้ำผึ้งด้วยเครื่อง NIR System 6500 รูปแบบสะท้อนกลับ ช่วงความยาวคลื่น 400-1100 nm ทำการทดลองโดยหาความสัมพันธ์ของอาการฟ้ามของผลส้มกับความชื้น ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS) และปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ (TA) โดยใช้ผลส้มทั้งหมด 360 ผล แบ่งเป็นส้มที่พบอาการฟ้ามจำนวน 180 ผล และผลส้มปกติ 180 ผล ข้อมูลที่ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยวิธี PCA และ PLSR พบว่าสามารถจำแนกสเปกตรัมของผลส้มได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ส้มฟ้าม และส้มปกติด้วย PC1 (92%) แล้วจึงพัฒนาสมการเทียบมาตรฐานด้วยเทคนิค PLSR กับค่าความชื้นของส้มพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) เท่ากับ 0.87 และค่าความผิดพลาดของการทำนาย (RMSECV) 1.67% แสดงให้เห็นว่าอาการของผลส้มสามารถนำเทคนิค NIRS มาคัดแยกผลส้มฟ้ามออกจากผลส้มปกติได้

วารุณี ธนะแพสย์ (2555) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในตัวอย่างผลลันจี 400 ลูก ด้วยการใช้เทคนิคแสงเนียร์อินฟราเรดย่านใกล้ในช่วงคลื่นสั้น โดยการวัดตัวอย่างแบบทะลุผ่าน (transmittance) ในช่วงความยาวคลื่น 650-995 nm และแบบสะท้อนกลับ (reflectance) ในช่วงความยาวคลื่น 600-1100 nm จากนั้นสร้างสมการด้วยวิธี PLSR พบว่าวิธีทะลุผ่านให้ค่าสมการทำนายดีที่สุด คือ พันธุ์гимเจ็ง มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) เท่ากับ 0.940 RMSEP เท่ากับ 0.500 รวมสายพันธุ์ทั้งหมดมีค่า $R = 0.936$, $RMSEP = 0.358$

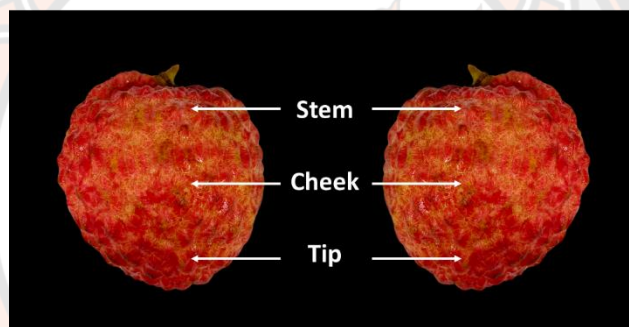


บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

ลิ้นจี่ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ ลิ้นจี่พันธุ์ป่าชิด เก็บเกี่ยวระยะสุกแก่ทางการค้า คัดเลือกผลที่มีขนาดสม่ำเสมอ จำนวน 100 ผล จากพื้นที่เพาะปลูกลิ้นจี่พันธุ์ป่าชิดของเกษตรกร ตำบลแคมป์สน อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ เพชรบูรณ์ ที่ผ่านกระบวนการลดอุณหภูมิด้วยน้ำเย็น (precooling) ที่ 4 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ จากนั้นเก็บรักษาผลลิ้นจี่ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส บรรจุผลลิ้นจี่ในกล่องแบบปิด เพื่อทำการขนส่งไปห้องปฏิบัติการ



ภาพ 11 การแบ่งตำแหน่งของลิ้นจี่สำหรับการทดลอง

สารเคมี

1. Sodium Hydroxide, NaOH (A.R grade: Labscan, Thailand)
2. Phenolphthalein (A.R grade: LOBA Chemie, Thailand)
3. น้ำกลั่น (distilled water)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

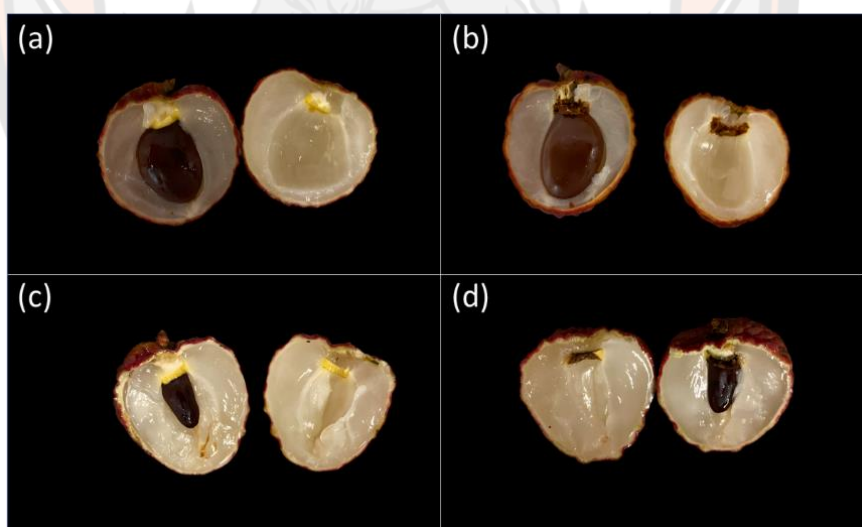
1. FT-Near infrared spectrometer (MATRIX-F, Bruker, Germany)
2. เครื่องวัดความแบบดิจิตอล (Digital reflectometer รุ่น MyBrix, Metter Toledo, Switzerland)

3. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล 3 ตำแหน่ง (Digital balance รุ่น ohaus, ACR 120, USA)
4. บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
5. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร
6. ซอฟต์แวร์ RStudio (เวอร์ชัน 2023.6.1.524, Posit Ltd.)
7. ซอฟต์แวร์ OPUS (เวอร์ชัน 7.8, Bruker Germany Ltd.)

วิธีการวิจัย

การทดลองที่ 1 การศึกษาลักษณะเมล็ดภายในและการถูกทำลายของหนอนเจาะข้อผลของผลลิ้นจี่ ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด

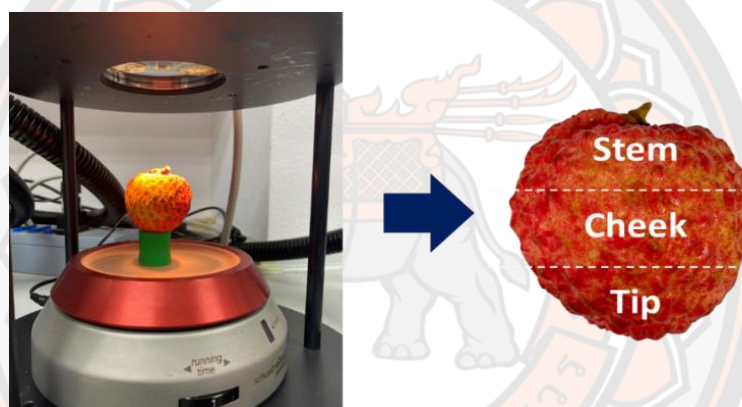
ลิ้นจี่จำนวน 100 ผล แบ่งเป็นลิ้นจี่เกรดพรีเมียมที่มีลักษณะลิ้นจี่เมล็ดปกติ ไม่พบการถูกทำลายของหนอน จำนวน 25 ผล ลิ้นจี่เมล็ดปกติ พบการถูกทำลายของหนอน จำนวน 25 ผล ลิ้นจี่เมล็ดลีบไม่พบการถูกทำลายของหนอน จำนวน 25 ผล และลิ้นจี่เมล็ดลีบพบการถูกทำลายของหนอน จำนวน 25 ผล มาวัดสเปกตรัมด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ดังภาพ 12



ภาพ 12 ลักษณะภายในของผลลิ้นจี่พันธุ์ป่าชิด (a) ลิ้นจี่เมล็ดปกติ ไม่พบการถูกทำลายของหนอน, (b) ลิ้นจี่เมล็ดปกติ พบการถูกทำลายของหนอน, (c) ลิ้นจี่เมล็ดลีบ ไม่พบการถูกทำลายของหนอน และ (d) ลิ้นจี่เมล็ดลีบ พบการถูกทำลายของหนอน

การวัดสเปกตรัม

ในการศึกษาทำการวัดสเปกตรัมด้วยเครื่องสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Fourier transform near infrared (FT-NIR) spectroscopy) ร่วมกับซอฟต์แวร์ OPUS ที่ใช้ควบคุมการวัดสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 800 ถึง 2500 นาโนเมตร ด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (Reflectance mode) ความละเอียดของการวัด 16 เลขคลื่น จำนวนการสแกน 32 ครั้ง ทำการวัดสเปกตรัมของลิ้นจี่จำนวน 100 ผล โดยเปิดเครื่อง NIRS ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที ทำการวัด back ground ของเครื่อง NIRS ก่อนการวัดสเปกตรัมของตัวอย่าง ทำการวัดสเปกตรัมของลิ้นจี่ที่ตำแหน่งซั้วผล แก้มผล และท้ายผลของลิ้นจี่ ดังภาพ 12 สเปกตรัมเฉลี่ยจากแต่ละตำแหน่งถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนาแบบจำลอง



ภาพ 13 การวางตัวอย่างในการวัดสเปกตรัม

การทดลองที่ 2 การศึกษาการตรวจวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และปริมาตรกรดที่ไทเทรตได้ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน

2.1 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solid; TSS)

ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในน้ำ คือ ปริมาณของสารประกอบชนิดต่างๆที่ละลายได้อย่างสมบูรณ์ในตัวทำละลายที่มีอยู่ในน้ำผลไม้ ของแข็งที่ละลายน้ำได้มักจะเป็นน้ำตาลและกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ รวมทั้งกรดอะมิโน และกรดแอสคอร์บิกด้วย (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2543)

วิธีวิเคราะห์

นำผลลึ้นจีแต่ละผลมาคั้นน้ำปริมาตร 10 มิลลิลิตร มาวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ด้วยเครื่องดิจิตอลรีแฟรกโทมิเตอร์ (MyBrix, Metter Toledo, Switzerland) ซึ่งอ่านค่าได้ตั้งแต่ 0 - 95 เปอร์เซนต์

2.2 ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Titratable acidity; TA)

กรดในผลไม้ส่วนใหญ่เป็นกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ เช่น กรดซิตริก กรดมาลิก กรดแอสคอร์บิก เป็นต้น กรดเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อรสชาติและคุณภาพของผลไม้ เช่น ช่วยให้ผลไม้มีรสเปรี้ยว ช่วยให้ผลไม้คงความสดและช่วยป้องกันไม่ให้ผลไม้เน่าเสีย

วิเคราะห์ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ โดยการนำน้ำคั้นของผลลึ้นจีเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ มาไทเทรตกับสารละลายต่างมาตรฐาน จนกระทั่งถึงจุดยุติ (End point)

การเตรียมสารละลาย

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล เตรียมโดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4.0 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1,000 มิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

นำน้ำคั้นปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 50 มิลลิลิตร ผสมตัวอย่างกับน้ำกลั่นให้เข้ากัน หยดฟีนอล์ฟทาลีน 2-3 หยด แล้วจึงไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล กระทั่งสารละลายตัวอย่างเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีชมพูเมื่อถึงจุดสิ้นสุดของปฏิกิริยา จดบันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป คำนวณหาปริมาณกรดที่ไทเทรตได้โดยใช้สูตรดังนี้ (AOAC, 2000)

$$\text{ปริมาณกรด (\%)} = \frac{\text{ความเข้มข้นของ NaOH (mL.)} \times \text{ปริมาตรของ NaOH (mL.)} \times 0.067 \times 100}{\text{ปริมาตรตัวอย่าง (mL.)}}$$

*milliequivalent of malic acid = 0.067

การสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ผล

การตัดแยกเกรตลิ่งจีด้วย principal component analysis (PCA)

เมื่อวัดสเปกตรัม NIRS แล้ว นำลิ่งจีมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ คือ เมล็ดปกติ เมล็ดลีบ ไม่พบการถูกทำลายของหนอน และพบการถูกทำลายของหนอน จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพ ด้วยวิธี PCA โดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ย ในแต่ละตำแหน่งของผลลิ่งจี โดยใช้โปรแกรม RStudio version 4.3.1 (RStudio Team 2021, Boston, MA, USA)

การตัดแยกเกรตลิ่งจีด้วย Linear discriminant analysis (LDA)

เมื่อวิเคราะห์เชิงคุณภาพเพื่อตัดแยกกลุ่มตัวอย่างที่ไม่มีพบการถูกทำลายของหนอน และตัวอย่างที่พบการถูกทำลายของหนอน ด้วยวิธี Linear discriminant analysis (LDA) โดยอาศัย โปรแกรม Python โดยดัดแปลงโค้ดจาก (Pelliccia, 2018)

การสร้างสมการเทียบมาตรฐานจากเทคนิค NIR

คุณภาพภายในที่นำมาสร้างสมการทำนายค่าด้วยเทคนิค NIR ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ นำมาศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลลิ่งจีต่อการใช้ เทคนิค NIRS ในการทำนายคุณภาพของลิ่งจี

การสร้างสมการทำโดยการนำข้อมูลสเปกตรัมมาหาความสัมพันธ์กับค่าทางเคมีที่ได้จากวิธีมาตรฐานด้วยซอฟต์แวร์ OPUS เวอร์ชัน 7.8 ซึ่งข้อมูลสเปกตรัมกับค่าทางเคมีที่ใช้สร้างสมการต้องเป็นข้อมูลจากผลลิ่งจีเดียวกัน โดยการสร้างสมการเทียบมาตรฐานด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial least square; PLS) ทดสอบสมการด้วยวิธีการทดสอบแบบภายใน ด้วยวิธีออกหนึ่ง (leave one out cross validation) มีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมด้วยวิธีต่างๆ เช่น การทำอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First derivative) อนุพันธ์อันดับสอง (Second derivative) การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (multiplicative scatter correlation, MSC) การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard normal variate, SNV) หรือการใช้ 2 เทคนิคร่วมกัน สร้างสมการเทียบมาตรฐานและ ทวนสอบสมการจากการหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยฟังก์ชันอัตโนมัติ (Optimize) การสร้างสมการด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient; R), bias, RMSEC (root mean square error of calibration), RMSECV (Root mean square error of cross validation) และ RPD (Ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP) ซึ่งประสิทธิภาพของสมการจะพิจารณาจากสมการ ทวนสอบค่า R และ RPD มีค่าสูง มีค่า bias, RMSEC และ RMSECV ต่ำ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง

ผลการเปรียบเทียบเพื่อหาประสิทธิภาพของการคัดแยกผลลันจี

Confusion matrix คือตารางที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพของการคัดแยก โดยเปรียบเทียบผลการทำนายกับผลลัพธ์จริง ในส่วนนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพของการคัดแยกลันจีทั้งหมด 4 กลุ่ม ได้แก่ ลันจีเมล็ดปกติ ไม่พบการถูกทำลายของหนอน (a) ลันจีเมล็ดปกติ พบการถูกทำลายของหนอน (b) ลันจีเมล็ดลีบ ไม่พบการถูกทำลายของหนอน (c) และ ลันจีเมล็ดลีบ พบการถูกทำลายของหนอน (d) จากตารางที่ 8 แสดงผล Confusion Matrix จากการทำนายในแต่ละคลาสพบว่า พนักงานสามารถคัดแยกลันจีได้ถูกต้องโดยรวม 83% ซึ่งถือว่าค่อนข้างดี ในคลาส a พนักงานสามารถคัดแยกลันจีในคลาสนี้ได้แม่นยำที่สุด โดยมีความแม่นยำ 97% แต่ Sensitivity ค่อนข้างต่ำที่ 74% ซึ่งหมายความว่ามีการพลาดในการระบุลันจีที่ไม่ถูกทำลายของหนอนบางส่วนและคลาส b, c, d มี Precision และ Sensitivity ที่ดีแสดงถึงพนักงานมีการคัดแยกผิด โดยเฉพาะการคัดแยกผิดระหว่างคลาส b และ d (ลันจีเมล็ดปกติและเมล็ดลีบที่ถูกทำลาย) ซึ่งอาจเป็นเพราะลักษณะภายนอกของลันจีในสองคลาสนี้มีความคล้ายคลึงกัน ทำให้พนักงานยากที่จะแยกแยะได้

ตาราง 8 Confusion Matrix การคัดแยกลันจีระหว่างพนักงานและการตรวจภายใน

		Predicted				Precision	Sensitivity
		a	b	c	d		
Actual	a	23	1	1	0	0.97	0.74
	b	3	21	0	1	0.94	0.88
	c	4	0	19	2	0.92	0.86
	d	1	2	2	20	0.93	0.87
Accuracy		83%					

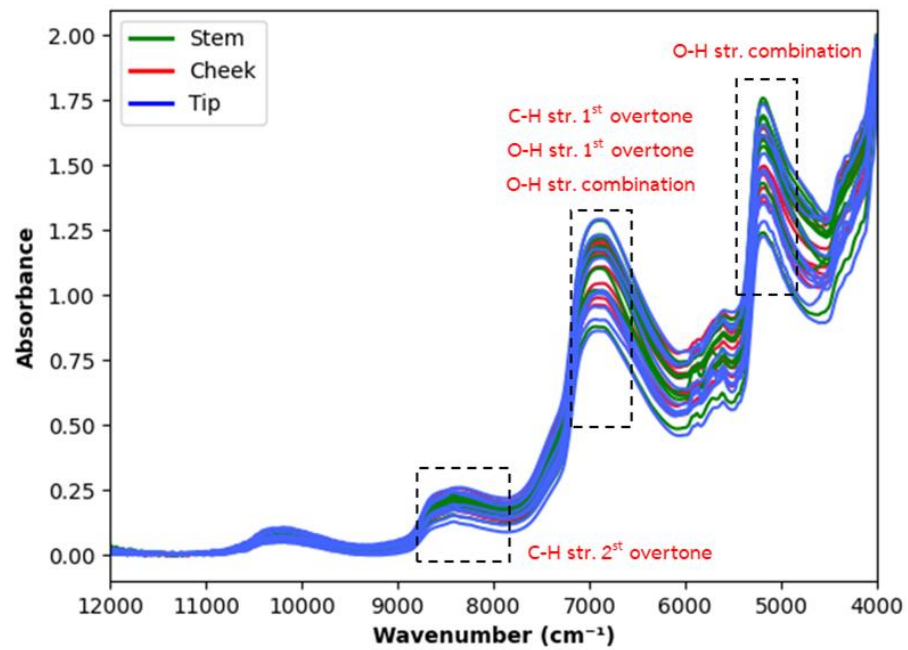
หมายเหตุ: a = ลันจีเมล็ดปกติ ไม่พบการถูกทำลายของหนอน, b = ลันจีเมล็ดปกติ พบการถูกทำลายของหนอน, c = ลันจีเมล็ดลีบ ไม่พบการถูกทำลายของหนอน, d = ลันจีเมล็ดลีบ พบการถูกทำลายของหนอน

การทดลองที่ 1 การศึกษาลักษณะเมล็ดภายในและการถูกทำลายของหนอนของผลลิ้นจี่ ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด

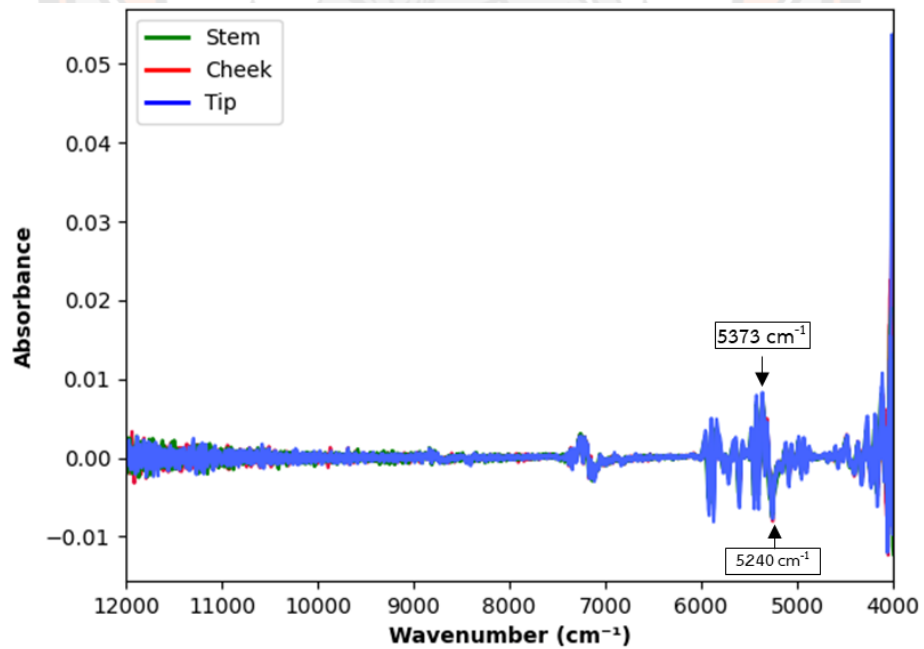
สเปกตรัมของลิ้นจี่

การเปลี่ยนแปลงหลังการเก็บเกี่ยวของผลไม้เกี่ยวข้องกับเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วย C, H, O ในโครงสร้าง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ส่งผลต่อการดูดกลืนแสงและสัญญาณของสเปกโตรสโกปี สเปกตรัมดั้งเดิมของลิ้นจี่โดยเฉลี่ย ด้วยเครื่อง FT-NIR spectroscopy ในช่วงเลขคลื่น $12000-4000\text{ cm}^{-1}$ แสดงดังภาพ 14 พบพีกฐานกว้างที่เด่นชัดที่ความยาวคลื่น 6900 cm^{-1} และ 5190 cm^{-1} ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพันธะ C-H และ O-H ในโมเลกุลของน้ำและอินทรีย์วัตถุ เช่น น้ำ น้ำตาล กรด ที่เป็นองค์ประกอบในผลลิ้นจี่ เช่นเดียวกับ Shen, Workman Jr, and Westerhaus (2007) รายงานว่าตำแหน่งพีกในสเปกตรัม NIR ของผลผลิตทางการเกษตร พบพีกน้ำชัดเจนที่เลขคลื่น 5154 cm^{-1} ซึ่งโมเลกุลของน้ำสามารถดูดกลืน (Absorb) แสง NIR ได้ดี ส่งผลให้เกิดการซ้อนทับกัน (Overlapping) กับพีกของโมเลกุลอื่นๆ ทำให้ไม่ปรากฏพีกขององค์ประกอบอื่นๆบนสเปกตรัมดั้งเดิม และมีความเกี่ยวข้องกับขนาดหรือรูปร่างของตัวอย่าง (Marques, de Freitas, Pimentel, & Pasquini, 2016)

สเปกตรัมที่มีการเปลี่ยนแปลงฐานและพีกที่ทับซ้อนกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำนาย ดังนั้นสเปกตรัมจึงถูกปรับก่อนการพัฒนาแบบจำลองการสอบเทียบโดยใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ ทั้งสเปกตรัมดั้งเดิมและสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งแล้วจากเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีถูกนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการสอบเทียบปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ด้วย Standard normal variate (SNV), Multiplicative scatter correction (MSC), First derivative และ Second derivative ถูกนำมาใช้ในการปรับแต่งสเปกตรัม



ภาพ 14 สเปกตรัมเฉลี่ยของลิ้นจี่พันธุ์ป่าชิด



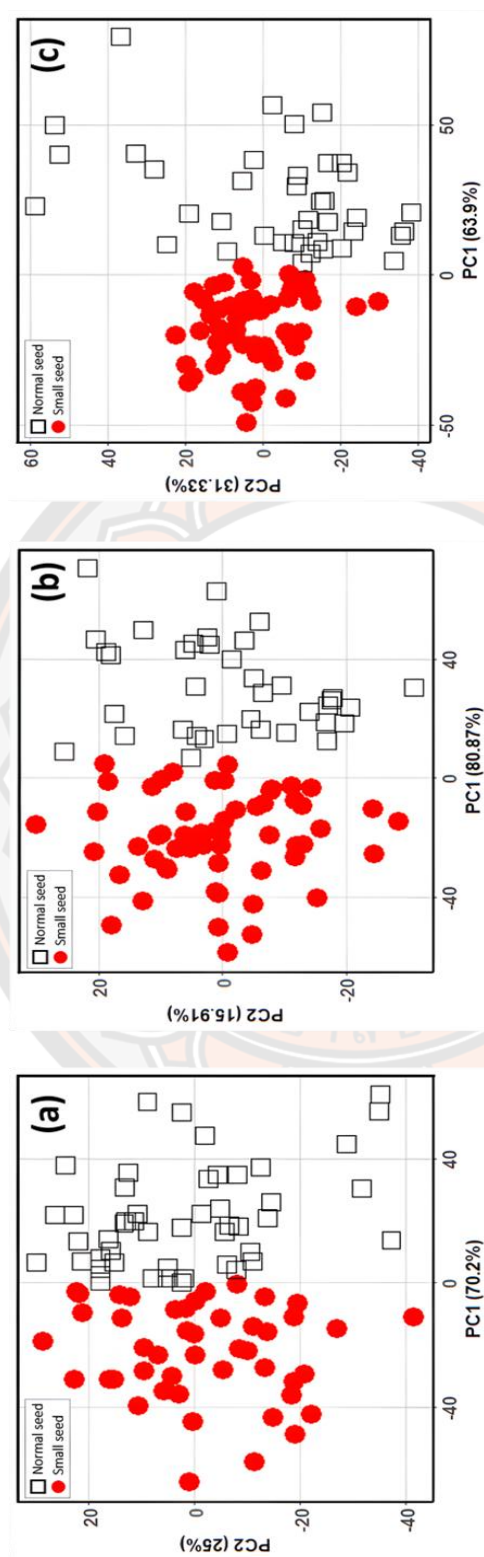
ภาพ 15 สเปกตรัมเฉลี่ยของลิ้นจี่พันธุ์ป่าชิดที่ผ่านการปรับแต่งด้วย second derivative

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA) ซึ่งเป็นเทคนิคการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) โดยการแบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรใหม่เรียกว่า Principal component (PC) ซึ่ง PC1 จะอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้มากที่สุดเสมอ โดยเฉพาะความแปรปรวนของรูปร่างและขนาดของตัวอย่าง ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทางเคมี (Robert, 1999) PC ลำดับถัดมาจะอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลลดน้อยลงตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ด้วย PCA ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งสเปกตรัมของลิ้นจี่ทั้ง 3 ตำแหน่ง คือ ขั้วผล แก้มผล และท้ายผล พบว่าลิ้นจี่ทั้ง 3 ตำแหน่งสามารถแยกสเปกตรัมของผลลิ้นจี่เป็น 2 กลุ่มอย่างชัดเจนตามเมลิตภายใน สามารถอธิบายค่าความแปรปรวนรวมได้ 95.20% 96.78% และ 95.23% ตามลำดับ ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากสามารถอธิบายความแตกต่างระหว่างผลลิ้นจี่เมลิตดิบและผลลิ้นจี่เมลิตปกติได้ค่อนข้างดี กล่าวได้ว่าลิ้นจี่เมลิตดิบมีบางองค์ประกอบที่แตกต่างจากลิ้นจี่เมลิตปกติ ได้แก่ ปริมาณน้ำตาลในเนื้อผลลิ้นจี่บริเวณใกล้เมลิตอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับขนาดของเมลิต จากผล PCA พบว่า PC1 สามารถคัดแยกผลลิ้นจี่เมลิตดิบออกจากผลลิ้นจี่เมลิตปกติได้ชัดเจน (ภาพ 16) เนื่องจากขนาดของเมลิตมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณเนื้อผลบริเวณแก้มผลที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสง NIR ที่แตกต่างกันระหว่างลิ้นจี่พรีเมียม (เมลิตดิบ เนื้อผลมาก) กับลิ้นจี่ปกติ (เมลิตโต เนื้อผลน้อย) ในขณะที่บริเวณขั้วผลและท้ายผลของลิ้นจี่ทั้งแบบพรีเมียมและแบบปกติจะมีลักษณะคล้ายกันมากกว่าตำแหน่งแก้มผล ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ F. Wang et al. (2020) ที่พบว่าผลการวิเคราะห์ PCA ของผลส้มแมนดารินที่ตัดแบ่งตาม 3 ด้าน พบว่าด้านขั้วผลและด้านท้ายผลมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน ส่วนด้านแก้มผลมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างจากด้านขั้วผลและด้านท้ายผล

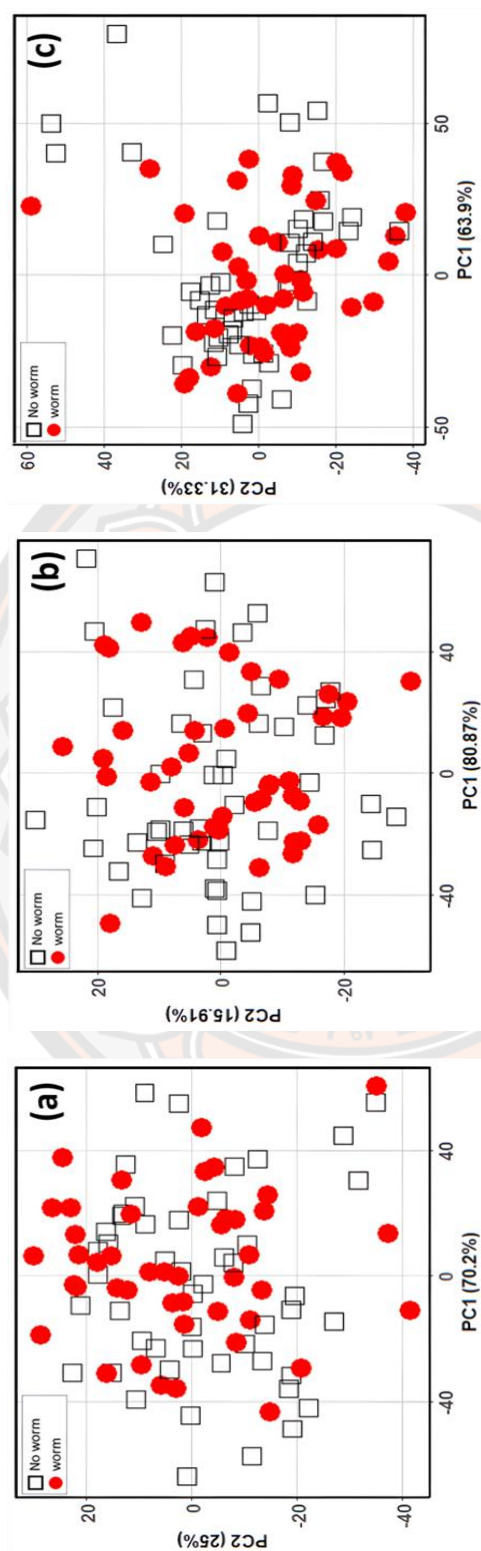
ผลการทดลองพบว่าไม่สามารถใช้ลักษณะของเส้นสเปกตรัมจำแนกกลุ่มตัวอย่างที่ต่างกันออกได้อย่างชัดเจนในตำแหน่งขั้วผล แก้มผล และท้ายผล ในการแยกการถูกทำลายของหนอน สังเกตได้จาก PCA score plot (ภาพ 17) เนื่องจากกลุ่มข้อมูลของตัวอย่างกระจายตัวซ้อนทับกัน พบว่า PC1 และ PC2 สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ 95.2, 96.78 และ 95.23 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งขั้วผล แก้มผล และท้ายผล ตามลำดับ ทั้งนี้คาดว่าสเปกตรัมการถูกทำลายของหนอนไม่แตกต่างกันมากพอที่จะทำให้เกิดความแตกต่างที่ชัดเจนในข้อมูลสเปกตรัมและองค์ประกอบทางเคมีของผลลิ้นจี่ที่ถูกทำลายของหนอนมีความคล้ายคลึงกับผลลิ้นจี่ที่ไม่ถูกทำลายของหนอน ในตำแหน่งขั้วผลลิ้นจี่ที่สามารถแยกการถูกทำลายของหนอนได้นั้นเกิดจากการเจาะของแมลงมักนำไปสู่การสลายตัวของโปรตีน ความหวาน และกรดภายในของผลลิ้นจี่ ซึ่งเทคนิค NIR สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบภายในของผลลิ้นจี่ได้ โดยการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในสเปกตรัมการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับพันธะของโปรตีนและกรดอะมิโน (Stathas et al., 2023) นอกจากนี้เกิดจากการเพิ่มขึ้นของกรดและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การมีอยู่ของเมตาบอไลต์ของแมลง เช่น กรดยูริกและ

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สามารถตรวจจับได้ผ่าน NIR เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ส่งผลต่อสเปกตรัมการดูดซับโดยรวมของตัวอย่าง (Hussain, Naseer, Qadri, Fatima, & Bhat, 2021)

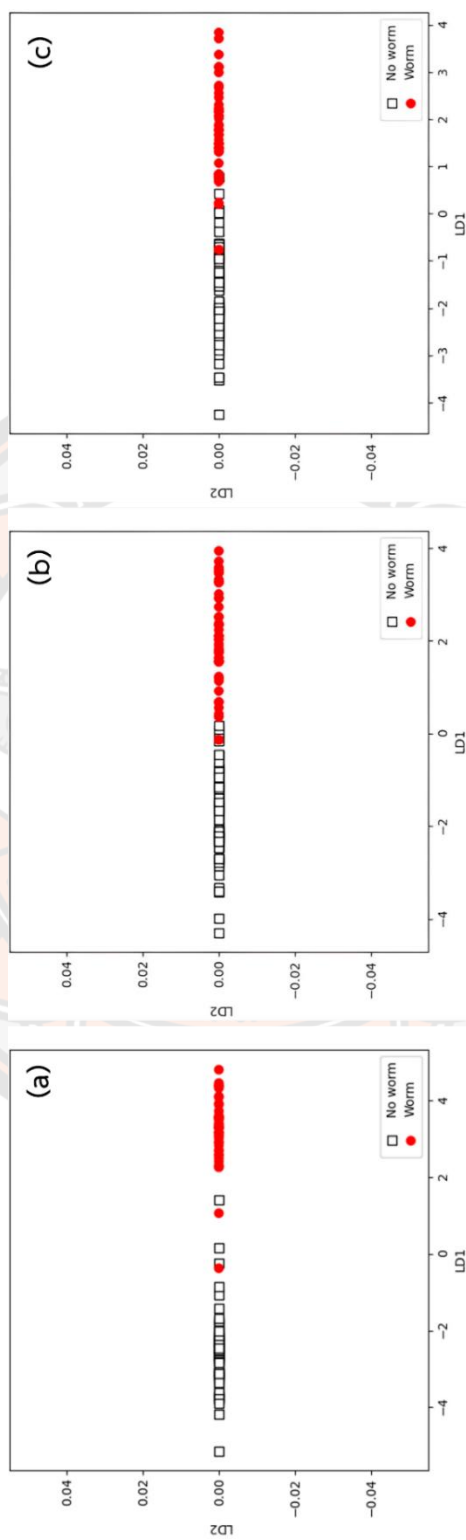




ภาพ 16 PCA score plots ของผลลึ้นจึจากเมล็ดปกติและเมล็ดลีบ ที่ตำแหน่ง (a) ขั้วผล, (b) แก้มผล, และ (c) ท้ายผล



ภาพ 17 PCA score plots ของผลลึ้นจากการทำลายของหนอน ที่ตำแหน่ง (a) ข้าวผล, (b) แก้วผล, และ (c) ข้าวผล



ภาพ 18 Linear discriminant analysis (LDA) ในช่วงเลขคลื่น $12000 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ ของผลลึ้นจากการถูกทำลายของหนอน ที่ตำแหน่ง (a) ขั้วผล, (b) แก้มผล, และ (c) ท้ายผล

การคัดแยกผลลึ้นจี่ของการถูกทำลายของหนอนด้วยวิธี Linear discriminant analysis (LDA)

จากการนำข้อมูลสเปกตรัมมาคำนวณเพียงอย่างเดียวด้วยวิธี PCA ทำให้ไม่สามารถคัดแยก การถูกทำลายของผลลึ้นจี่ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงมีการวิเคราะห์ด้วยวิธี Linear discriminant analysis (LDA) โดยอาศัยตัวแปร Python ซึ่งดัดแปลง code จาก Pelliccia (2018) ให้ตัวอย่างที่ไม่ พบการถูกทำลายของเป็นกลุ่ม 1 และตัวอย่างที่พบการถูกทำลายของหนอนเป็นกลุ่ม 2 ผลการสร้าง แบบจำลองการคัดแยกกลุ่มแสดงดังภาพ 18 จากภาพจะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถคัด แยกผลลึ้นจี่ที่ไม่พบการถูกทำลายของหนอนและพบการถูกทำลายของหนอนที่ตำแหน่งข้าวผล แก้มผล และท้ายผล ได้ด้วยความถูกต้องโดยรวมที่ 92%, 68% และ 58% ตามลำดับ โดยที่ตำแหน่งข้าวผล สามารถวิเคราะห์ได้ค่าถูกต้องได้นั้น กรรณิการ์, 2019 อธิบายว่าโดยธรรมชาติหนอนเจาะข้าวผล ลึ้นจี่จะวางไข่เป็นกลุ่มในบริเวณข้าวผล ทำให้พบร่องรอยการถูกทำลายของหนอน และแสงที่ยิง ตกกระทบบริเวณแก้มผลและท้ายผล อาจเป็นไปได้ว่าการตกกระทบของแสงจากเครื่องมืออาจไม่ตรงกับ กลุ่มของการถูกทำลายของหนอนเจาะข้าวผล นอกจากนี้ลักษณะของลึ้นจี่ที่ตำแหน่งข้าวผล แก้มผล และท้ายผลมีส่วนประกอบทางเคมีลักษณะทางกายภาพ และความหนาแน่นแตกต่างกัน โครงสร้าง ของผลผลิตที่ส่งผลต่อการสะท้อนแสง NIR เช่น ผิวผลผลิตที่ไม่เรียบจะสะท้อนแสงได้น้อยกว่าผลผลิต ที่มีผิวสม่ำเสมอ (Nicolai et al., 2014) ดังนั้นจากสมการการคัดแยกด้วยวิธี LDA สมการการคัดแยก ส่วนข้าวผลให้ผลการคัดแยกที่แม่นยำที่สุด ซึ่งแตกต่างจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี PCA

การทดลองที่ 2 การศึกษาการตรวจวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดที่ ไทเทรตได้ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน

การศึกษานี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีใน การสร้างแบบจำลองในการทำนายคุณภาพทั่วไปในผลลึ้นจี่ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ ได้ และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ตัวอย่างลึ้นจี่ทั้งหมด 100 ผล โดยวัดสเปกตรัมลึ้นจี่ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ข้าวผล แก้มผล และท้ายผล ซึ่งมีปริมาณ ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในช่วง 11.40 ถึง 19.75 ° brix และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ในช่วง 0.14 ถึง 0.98% แสดงในตาราง 10 ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานจะต้องมีค่าสูง ต่ำสุด เพื่อให้ครอบคลุมค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ

ตาราง 9 ค่าต่ำสุด ค่าต่ำสุด ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (TSS) และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (TA) ของลิ้นจี่

Parameter	Min	Max	Mean	S.D.
TSS (° brix)	11.40	19.75	17.23	1.17
TA (%)	0.14	0.98	0.31	0.11

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ด้วย PLS regression โดยใช้ข้อมูลกลุ่มสร้างสมการแบบ Leave one out cross validation จากสเปกตรัมของตัวอย่างที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมแบบต่างๆได้ผลการศึกษาดังแสดงในตาราง 11 ซึ่งจะเห็นว่าตัวอย่างลิ้นจี่ที่ตำแหน่งแก้มผลเมื่อผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Second derivative นั้นให้ผลการทำนายที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากค่าต่ำสุดของค่าเฉลี่ยกำลังสองของการทำนาย (Root mean square error of cross validation; RMSECV) เท่ากับ 0.351 ° brix และค่าสูงสุดของอัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มทดสอบต่อค่า SEP (Ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP; RPD) เท่ากับ 2.64 สำหรับตัวอย่างที่ตำแหน่งข้อผลและท้ายผลจะให้ผลการทำนายที่ดีที่สุดเมื่อผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี Second derivative ซึ่งมีค่า RMSECV เท่ากับ 0.348 และ 0.417 ตามลำดับ และ RPD เท่ากับ 2.24 และ 2.16 ตามลำดับ

ตาราง 10 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS regression ของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้
ในตัวอย่างลิ้นจี่ ทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ข้าวผล แก้มผล และท้ายผล

ตำแหน่ง	Pretreatment	F	R	RMSEC*	RMSECV*	Bias	RPD
ข้าวผล	Original spectra	5	0.93	0.392	0.428	-0.0073	2.11
	SNV	6	0.90	0.422	0.496	-0.0017	1.72
	MSC	4	0.92	0.381	0.431	-0.0132	1.93
	First derivative	4	0.93	0.438	0.483	-0.0049	1.92
	Second derivative	3	0.94	0.289	0.348	-0.0148	2.24
	First derivative + SNV	4	0.90	0.462	0.512	-0.0058	1.69
แก้มผล	Original spectra	6	0.93	0.337	0.394	-0.0048	2.01
	SNV	8	0.93	0.35	0.43	-0.0229	2.15
	MSC	4	0.93	0.347	0.401	-0.0065	2.13
	First derivative	6	0.95	0.324	0.347	0.0022	2.46
	Second derivative	8	0.96	0.298	0.351	-0.0024	2.64
	First derivative + SNV	9	0.94	0.268	0.358	-0.0166	2.31
ท้ายผล	Original spectra	7	0.92	0.436	0.503	-0.0106	1.88
	SNV	6	0.91	0.469	0.495	-0.0062	1.77
	MSC	4	0.89	0.465	0.527	0.019	1.64
	First derivative	6	0.92	0.435	0.71	-0.0094	1.94
	Second derivative	5	0.95	0.367	0.417	-0.0051	2.16
	First derivative + SNV	5	0.94	0.404	0.488	-0.0074	2.16

หมายเหตุ:

* หน่วย °brix

SNV: standard normal variate

MSC: Multiplicative scatter correlation

R: Correlation coefficient

RMSEC: Root mean square error of calibration

RMSECV: Root mean square error of cross validation

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

ตาราง 11 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS regression ของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้
ในตัวอย่างลิ้นจี่ ทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ขั้วผล แก้มผล และท้ายผลที่ปรับแต่งด้วย
second derivative

ตำแหน่ง	Region (cm ⁻¹)	F	R	RMSEC*	RMSECV*	Bias	RPD
ขั้วผล	8454.9-7498.4	3	0.94	0.289	0.348	-0.0148	2.24
แก้มผล	6102.1-5446.3	8	0.96	0.298	0.351	-0.0024	2.64
	4428.0-4242.9						
ท้ายผล	9403.8-5446.3	5	0.95	0.367	0.417	-0.0051	2.16

หมายเหตุ:

* หน่วย °brix

SNV: standard normal variate

MSC: Multiplicative scatter correlation

R: Correlation coefficient,

RMSEC: Root mean square error of calibration

RMSECV: Root mean square error of cross validation

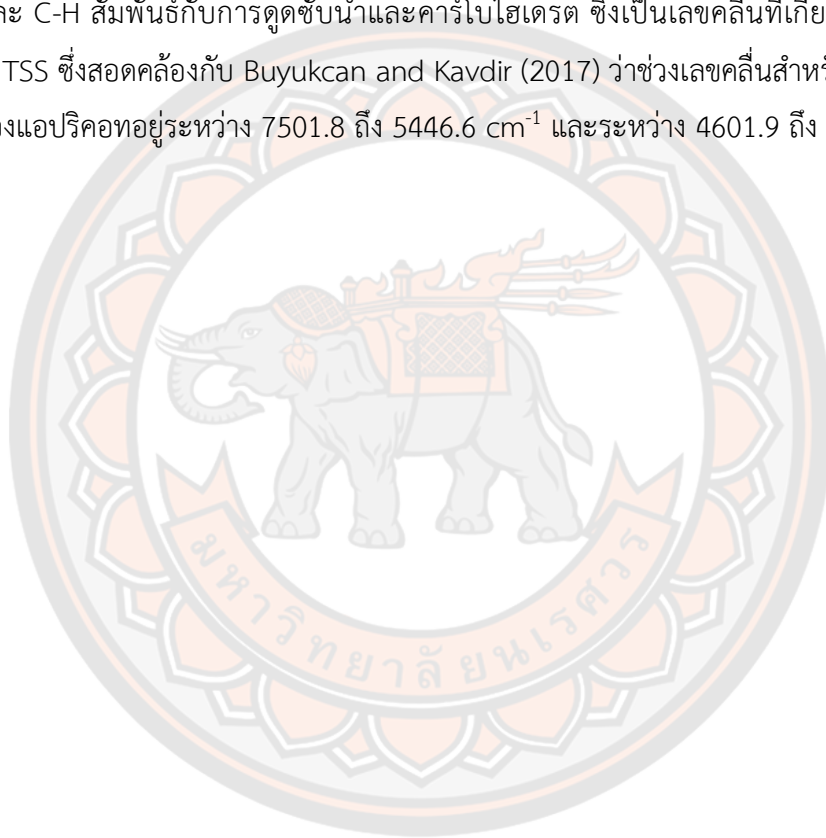
RPD: Ratio of standard deviation of reference data in the validation set to SEP

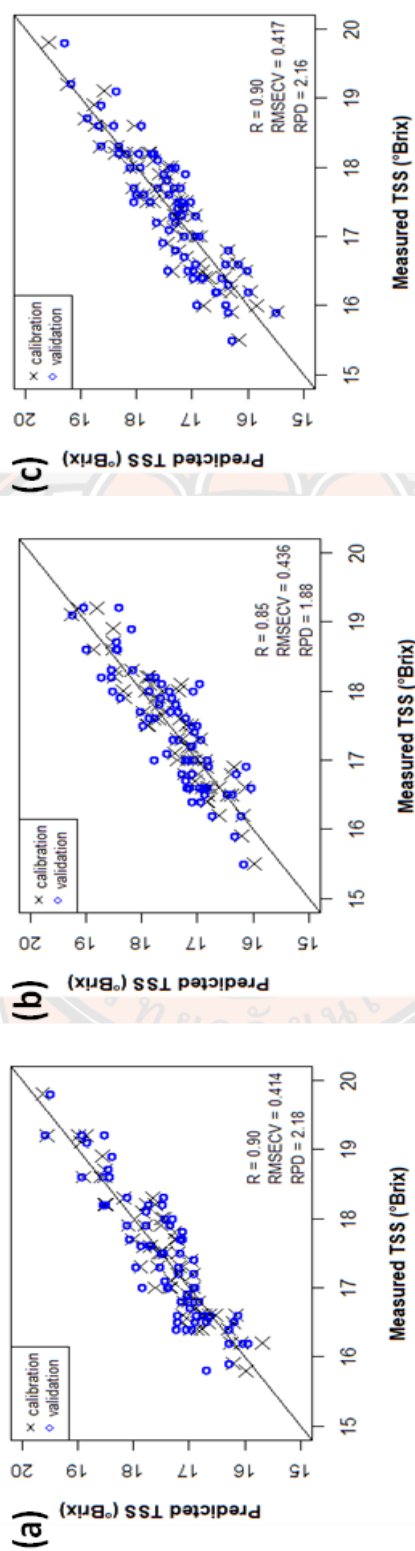
เมื่อเปรียบเทียบการสร้างแบบจำลองการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ผ่านข้อมูลการดูดกลืนแสงและการจัดการทางคณิตศาสตร์แบบต่างๆของตัวอย่างลิ้นจี่ที่ตำแหน่งต่างๆพบว่าประสิทธิภาพในการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จากสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วย second derivative ที่ตำแหน่งแก้มผลมีความแม่นยำในการทำนายดีที่สุดดังแสดงในตาราง 12 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

การศึกษาการใช้เทคนิค NIRS ในการทำนาย TSS ของผลลิ้นจี่ที่ตำแหน่งขั้วผล แก้มผล และท้ายผล พบว่าการสร้างสมการทำนายค่าจากข้อมูลสเปกตรัมที่ตำแหน่งแก้มผลมีความแม่นยำมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบภาพการกระจายตัวของค่า TSS ที่ได้จากสมการทำนายค่าที่ได้จากการวัดสเปกตรัมในแต่ละตำแหน่งบนผลลิ้นจี่ (ภาพ 19) เห็นได้ว่าการกระจายตัวของสมการทำนายค่าที่ได้จากการวัดสเปกตรัมที่ตำแหน่งแก้มผลมีค่าเข้าใกล้เส้นเป้าหมาย ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการทำนายค่า TSS ที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง และการสร้างสมการทำนายจากตำแหน่งแก้มผลให้ค่าที่แม่นยำ แต่ทั้งนี้ ค่า RPD มากกว่า 2 แสดงว่าสามารถนำเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปก

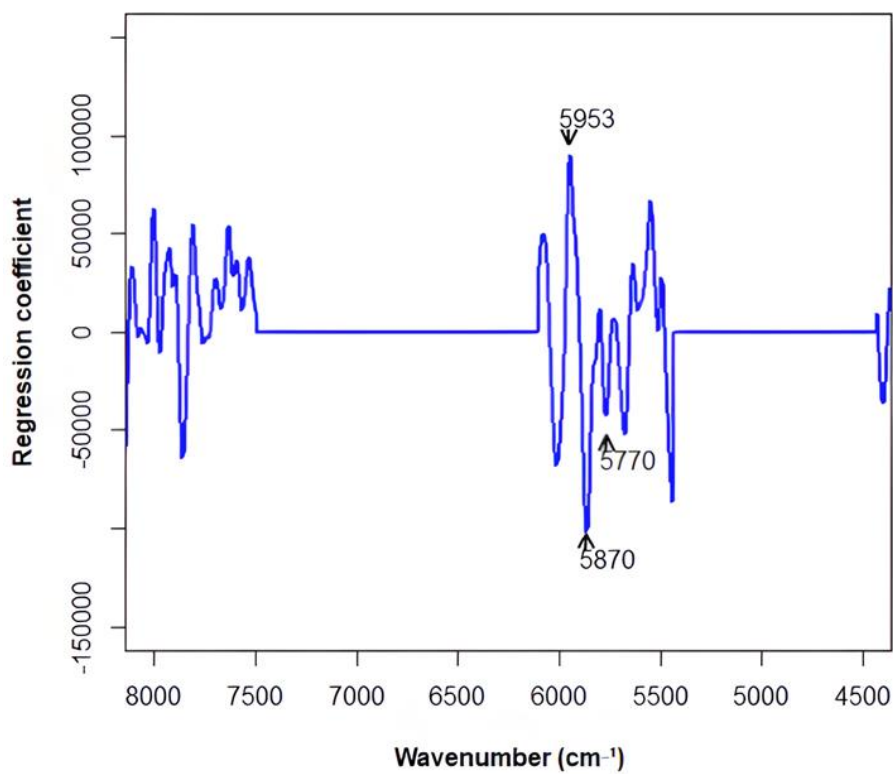
โทรสโกปีไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Pornarree Siriphollakul, 2020)

เพื่อระบุความยาวคลื่นที่เกี่ยวข้องซึ่งมีความสำคัญในการประมาณค่าพารามิเตอร์คุณภาพผลลันจี สัมประสิทธิ์การถดถอย PLS ภาพ 20 แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของ PLSR ซึ่งแสดงถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องสำหรับการทำนาย TSS ในช่วงเลขคลื่น 6102.1-5446.3 และ 4428.0 - 4242.9 cm^{-1} เลขคลื่นสำคัญ ได้แก่ 5953, 5870, 5770 cm^{-1} ช่วงเลขคลื่นแสดงถึงพันธะ O-H และ C-H สัมพันธ์กับการดูดซับน้ำและคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นเลขคลื่นที่เกี่ยวข้องสำหรับการทำนาย TSS ซึ่งสอดคล้องกับ Buyukcan and Kavdir (2017) ว่าช่วงเลขคลื่นสำหรับการทำนายของ SSC ของแอปเปิ้ลอยู่ระหว่าง 7501.8 ถึง 5446.6 cm^{-1} และระหว่าง 4601.9 ถึง 4601.9 cm^{-1}





ภาพ 19 ความสัมพันธ์ของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของตัวอย่างผลไม้ที่ได้จากค่าจริงและค่าที่ทำนายได้จาก NIRS ของสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วย second derivative ทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ (a) ขวามุม, (b), แก้มผล และ (c) ท้ายผล



ภาพ 20 Regression coefficient ของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ที่ได้จากการวัดสเปกตรัมที่ตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค NIRS ที่ผ่านปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี second derivative

การศึกษาการใช้เทคนิค NIRS ในการทำนายค่าปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ของน้ำลันจี โดยสมการทำนายค่า TA สร้างจากการ optimize ข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยที่ตำแหน่งช่วงผล แก้มผล และท้ายผลที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ที่เลขคลื่น $12000-4000\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งข้อมูลสเปกตรัมที่ตำแหน่งแก้มผลที่ปรับแต่งด้วยวิธี second derivative กับค่า TA ที่ได้จากการไทเทรต พบว่า สมการที่ได้มีค่า R เท่ากับ 0.96 ค่า RMSECV เท่ากับ 0.0379% และค่า RPD เท่ากับ 2.55 แสดงดังตาราง 10 โดยค่า R ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.82-0.90 หมายถึง สมการนั้นสามารถนำไปใช้ในการทำนายเพื่อการวิจัยและงานทั่วไปได้ (D.-j. Wang et al., 2004) สมการมีค่า RPD อยู่ในช่วง 2.5 - 3.0 หรือมีค่ามากกว่า 3.0 บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำนายที่ดีมากของสมการ (Nicolai et al., 2007) ซึ่งการทดลองสอดคล้องกับ Reddy and Yadav (2018) ได้ศึกษาปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ด้วยเทคนิค NIRS ในผลลันจีพันธุ์ Shahi ทำการวัดสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น $12500 - 3600\text{ cm}^{-1}$ ระบบการวัดสะท้อนกลับ สมการที่ได้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.94 และมีค่า SEP เท่ากับ 0.011% นอกจากนี้ Mahayothee, Leitenberger, Neidhart, Mühlbauer, and Carle (2004) พบว่า การวัดปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ด้วย NIRS ในช่วง 650-2500 นาโนเมตร สมการที่ดีที่สุด R^2 เท่ากับ 0.75 และมีค่า SEP เท่ากับ 0.3%

เมื่อเปรียบเทียบการสร้างแบบจำลองการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ผ่านข้อมูลการดูดกลืนแสงและการจัดการทางคณิตศาสตร์แบบต่างๆของตัวอย่างลันจีที่ตำแหน่งต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพในการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จากสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วย second derivative ที่ตำแหน่งแก้มผลมีความแม่นยำในการทำนายดีที่สุด ดังแสดงในตาราง 14 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ สร้างสมการในช่วงเลขคลื่น $5454.1-4597.8\text{ cm}^{-1}$ เมื่อเปรียบเทียบภาพการกระจายตัวของค่า TA ที่ได้จากสมการทำนายค่าในแต่ละตำแหน่งบนผลลันจี ดังแสดงในภาพ 20 เห็นได้ว่าการกระจายตัวของสมการทำนายค่าที่ได้จากการวัดสเปกตรัมที่ตำแหน่งแก้มผลมีค่าเข้าใกล้เส้นเป้าหมาย ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการทำนายค่า TA ที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง

ตาราง 12 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS regression ของปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ในตัวอย่างลินี
ทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ข้าวผล แก้มผล และท้ายผล

ตำแหน่ง	Pretreatment	F	R	RMSEC	RMSECV	Bias	RPD
ข้าวผล	Original spectra	7	0.92	0.0391	0.0415	-0.0001	1.89
	SNV	6	0.90	0.0389	0.0417	0.0039	1.69
	MSC	2	0.84	0.0496	0.0522	0.0005	1.40
	First derivative	4	0.85	0.0398	0.0428	-0.0006	1.47
	Second derivative	6	0.92	0.0335	0.0393	-0.0010	1.95
	First derivative + SNV	6	0.83	0.0424	0.0501	-0.0005	1.36
แก้มผล	Original spectra	7	0.89	0.0388	0.0436	-0.0007	1.63
	SNV	8	0.92	0.0359	0.0396	-0.0001	1.87
	MSC	6	0.90	0.0423	0.0457	-0.0008	1.75
	First derivative	8	0.92	0.037	0.0433	0.0000	1.98
	Second derivative	4	0.96	0.0358	0.0379	0.0007	2.55
	First derivative + SNV	7	0.92	0.0335	0.0404	-0.0002	1.89
ท้ายผล	Original spectra	8	0.92	0.0352	0.0392	-0.0004	1.88
	SNV	7	0.93	0.0400	0.0449	0.0003	1.98
	MSC	6	0.93	0.0339	0.0385	0.0003	1.94
	First derivative	7	0.93	0.0404	0.0455	0.0005	1.95
	Second derivative	6	0.94	0.0385	0.0465	0.0029	1.92
	First derivative + SNV	6	0.92	0.0399	0.0438	-0.0002	1.97

หมายเหตุ:

* หน่วย %

SNV: standard normal variate

MSC: Multiplicative scatter correlation

R: Correlation coefficient, RMSEC: Root mean square error of calibration

RMSECV: Root mean square error of cross validation

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

ตาราง 13 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS regression ของปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ในตัวอย่าง
ตัวอย่างลิ้นจี่ ทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ขั้วผล แก้มผล และท้ายผลที่ปรับแต่งด้วย
second derivative

ตำแหน่ง	Region (cm ⁻¹)	F	R	RMSEC*	RMSECV*	Bias	RPD
ขั้วผล	7506.1 – 5446.3	4	0.92	0.0335	0.0393	-0.0010	1.95
แก้มผล	5454.1 – 4597.8	4	0.96	0.0358	0.0379	0.0007	2.55
ท้ายผล	9403.8 – 7498.4, 5454.1 – 4242.9	6	0.94	0.0385	0.0465	0.0029	1.92

หมายเหตุ:

* หน่วย °Brix

SNV: standard normal variate

MSC: Multiplicative scatter correlation

R: Correlation coefficient,

RMSEC: Root mean square error of calibration

RMSECV: Root mean square error of cross validation

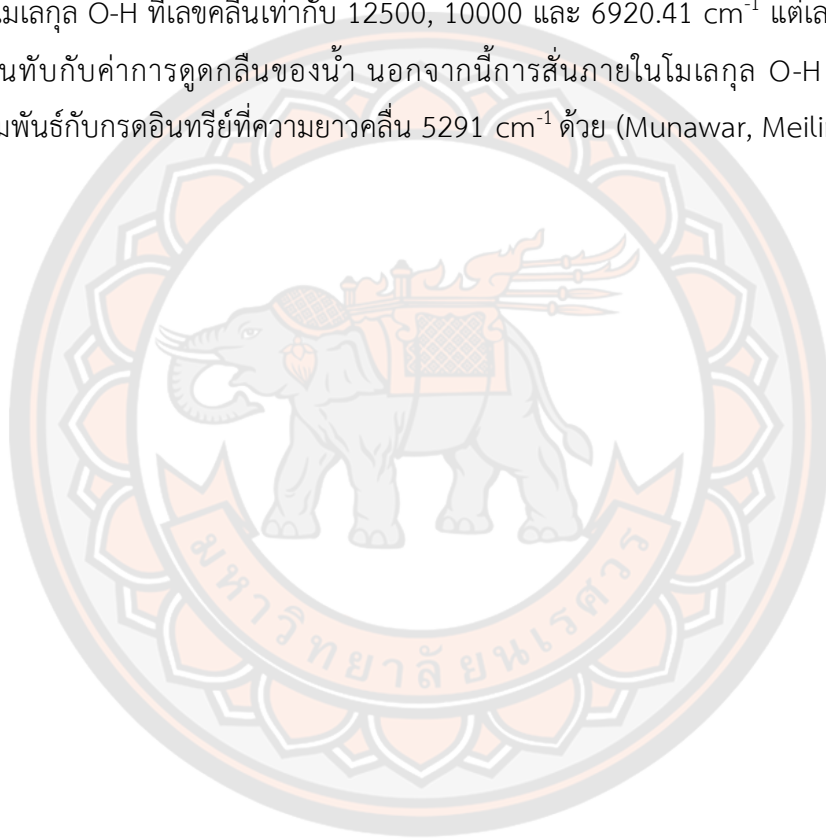
RPD: Ratio of standard deviation of reference data in the validation set to SEP

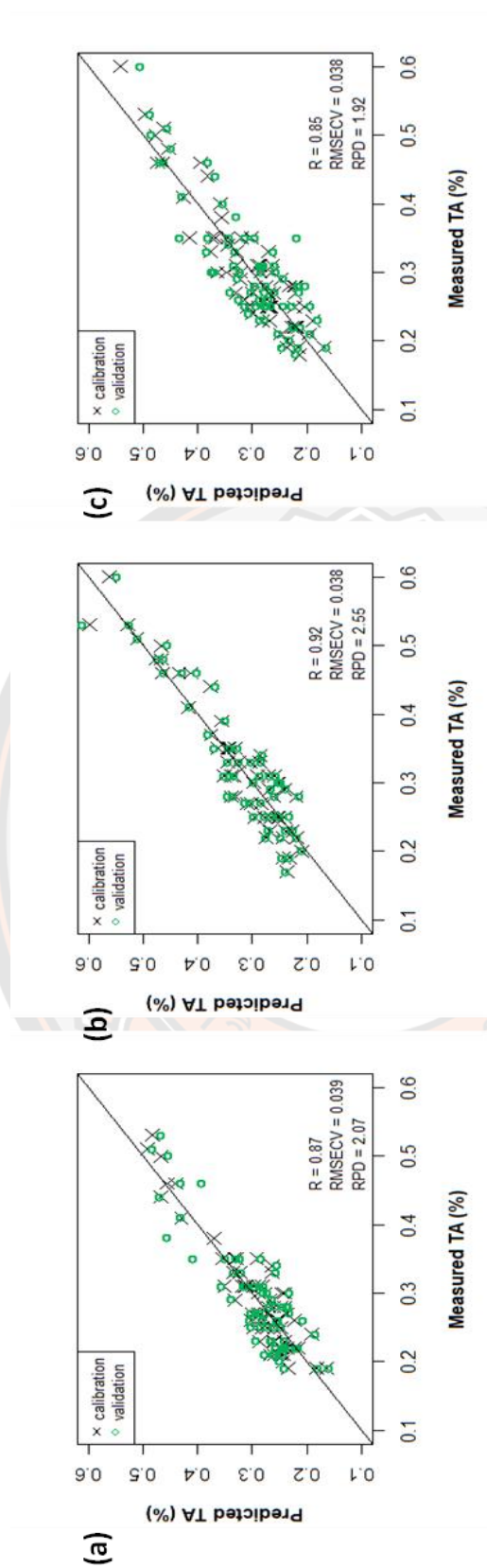
การถดถอย PLS ที่ดีที่สุดสำหรับการทำนายคุณภาพลิ้นจี่ในแต่ละส่วนของลิ้นจี่ โดยใช้สเปกตรัม NIR แสดงในตาราง 14 ความสามารถในการทำนายได้จากแบบจำลองที่พัฒนาจากสเปกตรัมโดยเฉลี่ย ซึ่งผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วย second derivative

เทคนิค second derivative เป็นวิธีแก้ปัญหาคอนแทกชันของพิกและการเลื่อนขึ้น (baseline shift) (Shenk et al., 2007) อย่างไรก็ตาม การทำนาย TSS ได้ดีที่สุดโดยใช้การพัฒนาแบบจำลองจากการปรับแต่งสเปกตรัม second derivative พบ RPD สูงสุดที่ 2.18 โดยมี RMSECV เท่ากับ 0.414 อย่างไรก็ตาม พบว่าความสามารถในการทำนายน้อยกว่าในโมเดล TA ที่มี R, RMSECV และ RPD อยู่ระหว่าง 0.90-0.96, 11.40 – 19.75 °Brix และ 1.8-2.5 ตามลำดับในการศึกษานี้ ค่า RPD ที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีอยู่ในช่วง 1.88 - 2.55 (Mahayothee et al., 2004) แนะนำว่าสำหรับการทำนายเชิงปริมาณ โมเดลที่มีค่า RPD ระหว่าง 2.0 ถึง 2.5 สามารถยอมรับได้ ในขณะที่ค่า RPD ระหว่าง 2.5 ถึง 3 หรือสูงกว่าบ่งชี้ว่ามีความแม่นยำในการทำนายที่ดี ดังนั้นแบบจำลองสำหรับคุณลักษณะด้านคุณภาพลิ้นจี่ทั้งหมดที่พัฒนาจากสเปกตรัมเฉลี่ยของ NIRS ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีแนวโน้มที่ดี ซึ่งคล้ายกับรายงานของ Xu, Xu, Xie, and

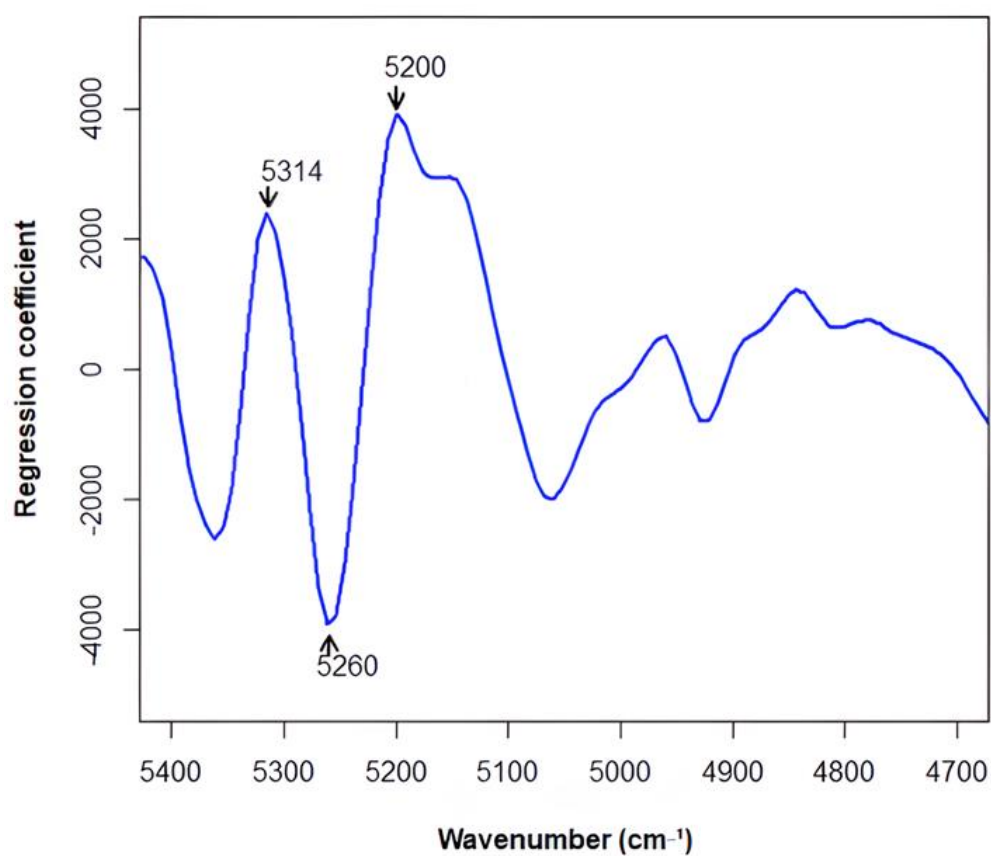
Ying (2019) ว่าแบบจำลองการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้พัฒนาจากสเปกตรัมเฉลี่ยที่ได้จากตำแหน่งผลแอปเปิลที่แตกต่างกัน 7 ตำแหน่งให้ประสิทธิภาพการทำนายที่แม่นยำ

ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของการทำนาย TA ของผลลิ้นจี่ที่ตำแหน่งแก้มผลที่พัฒนาจาก NIRS แสดงในภาพ 22 ซึ่งแสดงถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องสำหรับการทำนาย TA ในช่วงเลขคลื่น $5454.1 - 4597.8 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเลขคลื่น $5314, 5260, 5200 \text{ cm}^{-1}$ มีความสัมพันธ์กับค่า TA แสดงดังภาพ 9 โดยปกติกรดอินทรีย์จะมีความสัมพันธ์กับการเกิดไอเวอร์โทนอันดับที่ 1, 2 และ 3 ของการสั่นภายในโมเลกุล O-H ที่เลขคลื่นเท่ากับ $12500, 10000$ และ 6920.41 cm^{-1} แต่เลขคลื่นเหล่านี้ยังมีการซ้อนทับกับค่าการดูดกลืนของน้ำ นอกจากนี้การสั่นภายในโมเลกุล O-H ร่วมกับ C=O มีความสัมพันธ์กับกรดอินทรีย์ที่มีความยาวคลื่น 5291 cm^{-1} ด้วย (Munawar, Meilina, & Pawelzik, 2022)





ภาพ 21 ความสัมพันธ์ของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของตัวอย่างลินจี้ที่ได้จากค่าจริงและค่าที่ทำนายได้จาก NIRS ของสเปกตรัม
 ที่ผ่านการปรับแต่งด้วย second derivative ทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ (a) ข้าวผล, (b) แก้วผล และ (c) ท้ายผล



ภาพ 22 Regression coefficient ของปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จากการวัดสเปกตรัมที่ตำแหน่ง
แก้มผลด้วยเทคนิค NIRS ที่ผ่านปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี second derivative

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นศึกษาความเป็นไปได้ในการคัดแยกลิ้นจี่แบบรวดเร็วด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีพร้อมทั้งสร้างสมการการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solid: TSS) และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Titratable acidity: TA) ด้วยวิธี Partial least square regression (PLSR) พบว่า การวิเคราะห์ Confusion Matrix แสดงให้เห็นว่าระบบการคัดแยกของพนักงานมีความแม่นยำโดยรวมค่อนข้างดี แต่ยังมีการคัดแยกผิดพลาดระหว่างลิ้นจี่เมล็ดปกติและเมล็ดลีบที่ถูกทำลาย ซึ่งอาจเกิดจากลักษณะภายนอกที่คล้ายคลึงกัน

การตรวจสอบการคัดแยกลิ้นจี่ตามเมล็ดภายในและการถูกทำลายของหนอนด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี ด้วยวิธี principal component analysis (PCA) ที่ตำแหน่งข้าวผล แก้มผล และท้ายผล มีความเป็นไปได้ในการทำนายเมล็ดภายในที่ตำแหน่งแก้มผลได้ดีกว่าข้าวผลและท้ายผล โดยให้ผลการทำนายที่ดีที่สุด มีค่า PC score เท่ากับ 96.78% แต่การทำนายการถูกทำลายของหนอนของผลลิ้นจี่ที่ตำแหน่งข้าวผล แก้มผล และท้ายผลได้ไม่ดี

การคัดแยกผลลิ้นจี่ของการถูกทำลายของหนอนด้วยวิธี Linear discriminant analysis (LDA) พบว่าสามารถจำแนกผลลิ้นจี่ที่ถูกทำลายโดยหนอนได้ที่บริเวณข้าวผลที่ 92% ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการวางไข่ของหนอนและลักษณะทางกายภาพของผลลิ้นจี่ที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่ง ส่งผลให้การสะท้อนแสง NIR แตกต่างกันไป

การศึกษาการตรวจสอบคุณภาพของผลลิ้นจี่ โดยอิทธิพลของตำแหน่งการวัดบนผลลิ้นจี่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของผลลิ้นจี่ พบว่า ลิ้นจี่มีค่า TSS สูงสุดที่ตำแหน่งแก้มผล ข้าวผล และท้ายผล ตามลำดับ ในขณะที่ค่า TA สูงสุดที่ตำแหน่งแก้มผล ข้าวผล และท้ายผล เช่นเดียวกับ TSS จากการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลลิ้นจี่ต่อประสิทธิภาพของเทคนิค NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพของผลลิ้นจี่ พบว่า สมการทำนายค่า TSS ($RPD = 2.64$) และ TA ($RPD = 2.55$) มีความแม่นยำเมื่อสร้างสมการจากตำแหน่งแก้มผล โดยสมการที่ได้มีประสิทธิภาพในการแบ่งกลุ่มได้เบื้องต้น

ผลการทดลองโดยรวมที่ได้จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของเทคนิค NIRS ในการทำนายคุณภาพในการคัดแยกผลลิ้นจี่ อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ดำเนินการโดยใช้ลิ้นจี่จากพันธุ์

หนึ่งเท่านั้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการวิเคราะห์ตัวอย่างเพิ่มเติมจากปี การเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกันหรือพันธุ์อื่น

ข้อเสนอแนะ

- ควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างในการวิเคราะห์คุณภาพของลิ้นจี่ เพื่อให้ได้ตัวอย่างของลิ้นจี่มีช่วง ระดับดัชนีคุณภาพปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ในลิ้นจี่กว้างขึ้น เมื่อตัวอย่างกว้างขึ้นจะทำให้แบบจำลองที่ได้มีความเสถียรและแม่นยำมากขึ้นและสามารถนำไป ประยุกต์ใช้ในการทดแทนวิธีมาตรฐาน

- การขยายการศึกษาไปยังลิ้นจี่สายพันธุ์อื่นๆ เนื่องจากการศึกษานี้ใช้ลิ้นจี่จากพันธุ์เดียว เท่านั้น ควรขยายการศึกษาไปยังพันธุ์ลิ้นจี่อื่นๆ เพื่อให้สามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ได้ หลากหลายมากขึ้น

- การใช้เทคนิคเพิ่มเติมในการวิเคราะห์: แม้ว่าผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเทคนิค PCA และ LDA สามารถใช้ได้ดีในการคัดแยกลิ้นจี่ตามเมล็ดภายในและการถูกทำลายของหนอน แต่ควรทดลอง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์อื่นๆ เช่น Support Vector Machine (SVM) หรือ Neural Networks เพื่อ เปรียบเทียบประสิทธิภาพและความแม่นยำ

- การศึกษาผลลิ้นจี่จากปีการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ และปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเก็บเกี่ยวอาจมีผลต่อคุณภาพของผลลิ้นจี่ การศึกษาเพิ่มเติมจากปี การเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกันจะช่วยยืนยันความแม่นยำและความเชื่อถือได้ของเทคนิค NIRS

- การทดลองในห้องปฏิบัติการอาจมีผลต่างจากการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง การทดสอบเทคนิค NIRS ในการคัดแยกลิ้นจี่ในสภาพแวดล้อมจริง เช่น ในโรงงานหรือในพื้นที่ การเกษตร จะช่วยยืนยันความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคนี้ไปใช้จริง

บรรณานุกรม

- กรมวิชาการเกษตร. (2565). รายงานสถานการณ์การส่งออกผลไม้สดจากไทยไปยังสาธารณรัฐประชาชนจีน. Retrieved from
- กลุ่มบริหารศัตรูพืช. (2557). แมลงศัตรูไม้ผล. กรุงเทพฯ.
- ชัยศิริ สนิทพลกลาง. (2566). การจำแนกโรคราคะเน่าโคนเน่าของต้นทุเรียนด้วยอัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจ. Paper presented at the วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง.
- ธีระดา ภิญโญ. (2561). เทคนิคการแปรรูปการวิเคราะห์องค์ประกอบสำหรับงานวิจัย. Paper presented at the วารสารปัญญาภิวัฒน์.
- นิธิยา รัตนานนท์, ด. บ. (2543). การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีระหว่างการรักษาผลลิ้นจี่ที่รมด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์. Paper presented at the วารสารวิทยาศาสตร์การเกษตร.
- นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์. (2545). "หลักการพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้สเปกโตรสโกปี" การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค *Near infrared spectroscopy* เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก.
- นิพนธ์, ส. (2558). วิจัยและพัฒนาลิ้นจี่. Retrieved from กรุงเทพฯ:
- ผ่องเพ็ญ จิตอารีย์รัตน์, อ. อ., ทรงศิลป์พนชนะชัย, วาริช ศรีละออง, พนิดา บุญฤทธิ์ ชงไชย, นิธิภัทร บุญปก และการชนก กุศิริติกุล,. (2554). ผลของการฉายรังสีแกมมาและบรรจุภัณฑ์ต่อคุณภาพการเกิดสีน้ำตาลและการพัฒนาของโรคภายหลังการเก็บเกี่ยวของผลลิ้นจี่. Retrieved from กรุงเทพฯ:
- รัตนชินกร, เ. (2549). การคัดคุณภาพผลไม้เมืองร้อนเพื่อการส่งออก. กรุงเทพฯ.
- รุ่งนภา ไกลถิ่น. (2555). การตรวจหาการปนเปื้อนของเชื้อ *Aspergillus flavus* ในเมล็ดข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- วารุณี ธนะแพทย์, ศ. เ., ศิวลักษณ์ ปฐวิรัตน์, อนุพันธุ์ เทอดวงศ์วรกุล, ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, ชงชัย สุวรรณสิขินน์ และ รณฤทธิ์ ฤทธิธรม,. (2555). เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. Paper presented at the มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร.
- วิทยา อภัย. (2558). การพัฒนาเทคโนโลยีจัดการหลังการเก็บเกี่ยวลิ้นจี่ในเขตภาคเหนือ. Retrieved from
- วิไล รังสาดทอง. (2559). เทคโนโลยีการแปรรูป ผักและผลไม้ (Vol. พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ:

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ศศิมล ศรีโรจน์. (2565). การเรียนรู้แบบรวมกลุ่มด้วยตัวแบบที่แตกต่างกันแบบขนานสำหรับข้อมูลไม่สมดุล กรณีศึกษาข้อมูลเครดิตเยอรมัน. (วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ศศิวิมล มากมูล. (2553). การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีตรวจสอบการปนข้ามสารพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 ด้วยข้าวพันธุ์ชัยนาท 1. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, สุมาพร เกษมสำราญ. (2545). ขั้นตอนการสร้างสมการประเมินค่าทางเคมีและการทดสอบสมการในเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด. Paper presented at the การควบคุมมาตรฐานคุณภาพของสินค้าทางการเกษตรและอุตสาหกรรมโดยวิธีไม่ทำลายเพื่อการแข่งขันบนเวทีการค้าโลก สถาบันค้นคว้าพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักคุ้มครองพันธุ์พืช. (2545). ฐานข้อมูลพันธุ์พืช: ลิ่นจี. Retrieved from กรุงเทพฯ:

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. (2549). มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.7-2549) ลิ่นจี. Retrieved from กรุงเทพฯ:

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2556). สถิติการผลิตลิ่นจีของประเทศไทย In: กรุงเทพมหานคร.

อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. (2558). เทคนิคทางวิศวกรรมแบบไม่ทำลายสำหรับผลผลิตเกษตร: กรุงเทพฯ.

อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. (2552). บทที่ 5 การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.

Bolanos, E. N. A., Velazquez, R. C., Cardenaz, A. V., Santamaria, I. R., VERA, N. G., Fuentes, A. D. H., & Silva, E. M. (2010). Effect of storage temperature and time on quality in minimally processed litchi fruit (*Litchi Chinensis* Sonn.). *Journal of food quality*, 33(3), 299-311.

Buyukcan, M. B., & Kavdir, I. (2017). Prediction of some internal quality parameters of apricot using FT-NIR spectroscopy. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11, 651-659.

Chen, Q., Zhao, J., Zhang, H., & Wang, X. (2006). Feasibility study on qualitative and quantitative analysis in tea by near infrared spectroscopy with multivariate calibration. *Analytica chimica acta*, 572(1), 77-84.

Donald A, B. E. W., Ciurczak. (2008). *Handbook of Near-Infrared Analysis Third Edition*: CRC Press, Florida, USA.

Groff, G. W. (1921). *The Lychee and Lungan*. Orange Judd Company: New York.

Herschel, W. (1800). Experiments on the Refrangibility of the Invisible Rays of the Sun.

- By William Herschel, LL. D. F. R. S. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 90, 284-292. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/107057>
- Hussain, S. Z., Naseer, B., Qadri, T., Fatima, T., & Bhat, T. A. (2021). Litchi (*Litchi chinensis*): Morphology, taxonomy, composition and health benefits. In *Fruits Grown in Highland Regions of the Himalayas: Nutritional and Health Benefits* (pp. 181-191): Springer.
- Jiang, Y., & Fu, J. (1998). Inhibition of polyphenol oxidase and the browning control of litchi fruit by glutathione and citric acid. *food chemistry*, 62(1), 49-52.
- Kawano, S. (2002). Sampling and sample presentation. *Near-Infrared Spectroscopy*. Siesler, HW, Ozaki, Y., Kawata, S. and Heise, HM WILEY-VCH Verlag GmbH D-69469 Weinheim, Germany.
- Kumpon Wongzeewasakun, V. C., Nadthawat Muenmanee, Parichat Theanjumpol,. (2017). *Possibility of using Near Infrared Spectroscopy Technique to Detect Dry Juice Sac of Mandarin cv. Sai Nam Pueng* Paper presented at the Agricultural Science Journal.
- Li, J., Wu, J., Lin, J., Li, C., Lu, H., & Lin, C. (2022). Nondestructive Identification of Litchi Downy Blight at Different Stages Based on Spectroscopy Analysis. *Agriculture*, 12(3). doi:10.3390/agriculture12030402
- Mahayothee, B., Leitenberger, M., Neidhart, S., Mühlbauer, W., & Carle, R. (2004). Non-destructive determination of maturity of Thai mangoes by near-infrared spectroscopy. *Acta Horticulturae*, 645, 581-588. doi:10.17660/ActaHortic.2004.645.76
- Marques, E. J. N., de Freitas, S. T., Pimentel, M. F., & Pasquini, C. (2016). Rapid and non-destructive determination of quality parameters in the 'Tommy Atkins' mango using a novel handheld near infrared spectrometer. *food chemistry*, 197, 1207-1214.
- Menzel, C. M. (1983). The control of floral initiation in lychee: A review. *Scientia Horticulturae*, 21, 201-215.
- Menzel, C. M. (1984). The pattern and control of reproductive development in lychee: A review. *Scientia Horticulturae*, 22(4), 333-345.

doi:[https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(84\)80005-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(84)80005-9).

- Menzel, C. M. (1988). The lychee in Australia. *Queensland Agricultural Journal*(114), 19-27.
- Menzel, C. M., & Simpson, D. R. (1992). Growth, flowering and yield of lychee cultivars. *Scientia Horticulturae*, 49(3-4), 243-254. doi:[https://doi.org/10.1016/0304-4238\(92\)90161-5](https://doi.org/10.1016/0304-4238(92)90161-5).
- Menzel, C. M., & Waite, G. K. (2001). Litchi and Longan Botany, Production and Uses. *Maroochy Research Station Queensland Department of Primary Industries and Fisheries*.
- Munawar, A. A., Meilina, H., & Pawelzik, E. (2022). Near infrared spectroscopy as a fast and non-destructive technique for total acidity prediction of intact mango: Comparison among regression approaches. *Computers and Electronics in Agriculture*, 193, 106657.
- Nicolai, B. M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K. I., & Lammertyn, J. (2007). Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest biology and technology*, 46(2), 99-118.
- Nicolaï, B. M., Defraeye, T., De Ketelaere, B., Herremans, E., Hertog, M. L., Saeys, W., . . . Verboven, P. (2014). Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality. *Annual review of food science and technology*, 5(1), 285-312.
- Oliveira, L., & Franca, A. (2011). Applications of near infrared spectroscopy (NIRS) in food quality evaluation. *Food Quality: Control, Analysis and Consumer Concerns*, 131-180.
- Osborne B.G, F., T Hindle P.H.,. (1993). *Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis*. Harlow.
- Ozaki, Y., Huck, C., Tsuchikawa, S., & Engelsens, S. B. (2021). *Near-infrared spectroscopy: theory, spectral analysis, instrumentation, and applications*: Springer.
- Pelliccia, D. (2018). Classification of NIR spectra by Linear Discriminant Analysis in Python. Retrieved from <https://nirpyresearch.com/classification-nir-spectra-linear-discriminant-analysis-python/>. <https://nirpyresearch.com/classification-nir-spectra-linear-discriminant-analysis-python/>
- Pornarree Siriphollakul, P. T., Phonkrit Maniwara,. (2020). Evaluation of Grape Juice

- Quality by Near Infrared Spectroscopy and Chemometrics. *Thai Science and Technology*, 29(3).
- Pu, H., Liu, D., Wang, L., & Sun, D.-W. (2016). Soluble Solids Content and pH Prediction and Maturity Discrimination of Lychee Fruits Using Visible and Near Infrared Hyperspectral Imaging. *Food Analytical Methods*, 9, 235-244. doi:10.1007/s12161-015-0186-7
- Punia, S., & Kumar, M. (2021). Litchi (*Litchi chinensis*) seed: Nutritional profile, bioactivities, and its industrial applications. *Trends in Food Science & Technology*, 108, 58-70.
- Reddy, N., & Yadav, B. (2018). Nondestructive Analysis of Litchi Fruit Quality Using FT-NIR Spectroscopy. *International Journal of Biochemistry Research & Review*, 22(1), 1-10.
- Robert, C. (1999). Monte Carlo Statistical Methods. In: Springer-Verlag New York.
- Room, C. (2019). Confusion matrix. *Mach. Learn*, 6, 27.
- Saranwong, S., Sornsrivichai, J., & Kawano, S. (2004). Prediction of ripe-stage eating quality of mango fruit from its harvest quality measured nondestructively by near infrared spectroscopy. *Postharvest biology and technology*, 31(2), 137-145.
- Shenk, J. S., Workman Jr, J. J., & Westerhaus, M. O. (2007). Application of NIR spectroscopy to agricultural products. In *Handbook of near-infrared analysis* (pp. 365-404): CRC Press.
- Siesler, H. W., Ozaki, Y., Kawata, S., & Heise, H. M. (2008). *Near-infrared spectroscopy: principles, instruments, applications*: John Wiley & Sons.
- Sonthiya, K., Seehanam, P., Theanjumol, P., & Maniwara, P. (2022). *Detection of Anthracnose Disease in 'Namdokmai Sithong' Mango Using Near Infrared Spectroscopy*. Paper presented at the Journal of Agriculture, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University.
- Stathas, I. G., Sakellaris, A. C., Papadelli, M., Kapos, J., Papadimitriou, K., & Stathas, G. J. (2023). The effects of insect infestation on stored agricultural products and the quality of food. *Foods*, 12(10), 2046.
- Stehman, S. V. (1997). Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote sensing of Environment*, 62(1), 77-89.

- Teena, M. A., Manickavasagan, A., Ravikanth, L., & Jayas, D. S. (2014). Near infrared (NIR) hyperspectral imaging to classify fungal infected date fruits. *Journal of Stored Products Research*, 59, 306-313. doi:10.1016/j.jspr.2014.09.005
- Thanapase, W., Janhira, A., Kasemsumran, S., & Anusornwongchai, J. (2012). Using Near Infrared Spectroscopy Techniques for Non-Destructive Determination of Total Soluble Solids in Lychee Fruits *Proceedings of 48th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry*, 48th Kasetsart University annual conference, 646.
- Theanjumol, P., Wongzeewasakun, K., Muenmanee, N., Wongsapin, S., Krongchai, C., Changrue, V., . . . Kittiwachana, S. (2019). Non-destructive identification and estimation of granulation in 'Sai Num Pung' tangerine fruit using near infrared spectroscopy and chemometrics. *Postharvest biology and technology*, 153, 13-20.
- Wang, D.-j., Zhou, X.-y., Jin, T.-m., Hu, X.-n., Zhong, J.-e., & Wu, Q.-T. (2004). [Application of near-infrared spectroscopy to agriculture and food analysis]. *Guang pu xue yu guang pu fen xi = Guang pu*, 24, 447-450.
- Wang, F., Huang, Y., Wu, W., Zhu, C., Zhang, R., Chen, J., & Zeng, J. (2020). Metabolomics analysis of the peels of different colored citrus fruits (*Citrus reticulata* cv. 'Shatangju') during the maturation period based on UHPLC-QQQ-MS. *Molecules*, 25(2), 396.
- Xu, X., Xu, H., Xie, L., & Ying, Y. (2019). Effect of measurement position on prediction of apple soluble solids content (SSC) by an on-line near-infrared (NIR) system. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13, 506-512.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก code ที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. PCA

```
# Load required libraries
library(readr)
library(dplyr)
library(ggplot2)
library(cowplot)
library(cluster)
library(reshape2)

# Read spectral data from a CSV file
nir_data <- read_csv("A_WORM_A.csv")

# Extract wavelength columns (exclude 'sample' and 'Group' columns)
wavelength_data <- nir_data %>%
  select(starts_with("X"))

# Perform PCA
pca_result <- prcomp(wavelength_data, center = TRUE, scale. = TRUE)

# Perform k-means clustering
num_clusters <- 2
kmeans_result <- kmeans(pca_result$x[, 1:2], centers = num_clusters)
cluster_assignments <- kmeans_result$cluster

# Add the cluster assignments to the original data
nir_data$Cluster <- factor(cluster_assignments)

# Perform regression for 'Group'
regression_result <- lm(Group ~ pca_result$x[, 1] + pca_result$x[, 2], data = nir_data)

# Convert 'Cluster' to a factor if it's not already
nir_data$Cluster <- as.factor(nir_data$Cluster)

# Calculate PC percentages
pc1_percent <- (pca_result$sdev[1]^2 / sum(pca_result$sdev^2)) * 100
pc2_percent <- (pca_result$sdev[2]^2 / sum(pca_result$sdev^2)) * 100
```

```

# Create the PCA plot with color-coded clusters, renamed axes, solid symbols, and
different shapes

pca_plot <- ggplot(nir_data, aes(x = pca_result$x[, 1], y = pca_result$x[, 2], color =
Cluster, shape = Cluster)) +
  geom_point(size = 6) + # Adjust symbol size and make it solid by removing alpha
  labs(x = paste("PC1 (", round(pc1_percent, 2), "%)", sep = ""),
       y = paste("PC2 (", round(pc2_percent, 2), "%)", sep = "")) +
  scale_color_manual(values = c("black", "red")) + # Specify cluster colors
  scale_shape_manual(values = c(22, 19)) + # Define shapes for the clusters (15 for
circles, 17 for triangles)
  # 19 for filled circle, 22 for square
  theme(
    axis.text.x = element_text(size = 12, face = "bold"),
    axis.text.y = element_text(size = 12, face = "bold"),
    axis.title = element_text(size = 14, face = "bold"),
    panel.background = element_rect(fill = "white"),
    panel.grid.major = element_line(color = "lightgray"),
    axis.line.x = element_line(color = "black"),
    axis.line.y = element_line(color = "black"),
  )
# Display the PCA plot
print(pca_plot)

```

2. LDA

```

import pandas as pd
from sklearn.discriminant_analysis import LinearDiscriminantAnalysis as LDA
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# Read data
litchi = pd.read_csv(r"C:\Users\User\PycharmProjects\pythonProject2\C_WORM.csv")
y = litchi.values[:, 1].astype('uint8')

```

```

X = litchi.values[:, 2:]
# Create LDA model
lda = LDA(n_components=1)
Xlda = lda.fit_transform(X, y)
from sklearn.model_selection import train_test_split, cross_val_score
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.25, random_state=2)
lda = LDA()
lda.fit(X_train, y_train)
y_pred = lda.predict(X_test)
print(lda.score(X_test, y_test))
# Define the labels for the plot legend
labplot = ['No worm', 'Worm']
unique = list(set(y))
# Define colors and markers for the scatter plot
facecolors = ['white', 'red'] # Face colors for 'No worm' and 'Worm'
edgecolors = ['black', 'none'] # Edge colors for 'No worm' and 'Worm'
markers = ['s', 'o'] # 's' for square, 'o' for circle
plt.figure(figsize=(6, 6))
ax = plt.gca()
ax.set_facecolor('white')
for i, u in enumerate(unique):
    xi = [Xlda[j, 0] for j in range(len(Xlda[:, 0])) if y[j] == u]
    yi = [0 for _ in xi] # All y values are 0 since we have only one component
    plt.scatter(xi, yi, facecolors=facecolors[i], edgecolors=edgecolors[i], s=60,
marker=markers[i], label=labplot[i])
plt.xlabel('LD1')
plt.ylabel('LD2')
plt.legend(loc='lower right')
plt.title('LDA_A')
plt.show()

```

ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Partial least square regression

ตาราง 14 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้าวผลที่ไม่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัม

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
2	19.2	19.1	0.1	57	18.6	18.1	0.5	2	19.2	19.1	0.2	57	18.6	17.9	0.7
3	18.6	19.0	-0.4	60	16.4	16.6	-0.2	3	18.6	19.0	-0.4	60	16.4	16.7	-0.2
4	19.1	18.5	0.6	62	16.8	17.0	-0.2	4	19.1	18.4	0.7	62	16.8	17.0	-0.2
5	18.2	18.8	-0.6	63	16.9	16.6	0.3	5	18.2	18.8	-0.6	63	16.9	16.6	0.3
6	18.7	19.0	-0.3	65	17.6	17.0	0.6	6	18.7	18.9	-0.2	65	17.6	16.9	0.7
7	19.2	18.5	0.7	66	17.1	17.4	-0.2	7	19.2	18.4	0.8	66	17.1	17.4	-0.3
8	18.3	18.6	-0.3	67	16.0	16.4	-0.4	8	18.3	18.6	-0.3	67	16.0	16.5	-0.5
9	16.2	16.3	-0.1	68	16.2	15.9	0.3	9	16.2	16.4	-0.2	68	16.2	15.8	0.4
10	16.4	16.7	-0.3	69	15.8	15.9	-0.1	10	16.4	16.8	-0.3	69	15.8	16.2	-0.4
11	16.5	16.4	0.1	72	17.9	17.1	0.8	11	16.5	16.4	0.1	72	17.9	17.0	0.9
13	17.5	17.0	0.5	73	17.3	16.7	0.6	13	17.5	17.0	0.6	73	17.3	16.6	0.7
17	17.3	17.6	-0.3	74	16.4	16.3	0.1	17	17.3	17.7	-0.4	74	16.4	16.3	0.1
18	17.4	17.8	-0.4	76	17.9	18.5	-0.6	18	17.4	17.8	-0.4	76	17.9	18.6	-0.7
19	16.6	16.8	-0.2	77	18.1	17.9	0.2	19	16.6	16.9	-0.3	77	18.1	17.9	0.2
20	16.7	17.1	-0.4	79	18.3	17.9	0.4	20	16.7	17.2	-0.5	79	18.3	17.9	0.4
21	17.7	17.1	0.6	80	17.6	17.6	0.0	21	17.7	17.1	0.6	80	17.6	17.6	0.0
22	17.2	17.3	-0.1	82	17.2	17.1	0.1	22	17.2	17.3	-0.1	82	17.2	17.2	0.1
23	16.5	17.2	-0.7	84	16.6	16.6	0.0	23	16.5	17.3	-0.8	84	16.6	16.7	-0.1
24	16.8	17.2	-0.4	85	15.6	16.0	-0.4	24	16.8	17.2	-0.4	85	15.6	16.1	-0.5
26	18.9	19.2	-0.3	86	16.6	17.0	-0.4	26	18.9	19.3	-0.4	86	16.6	17.0	-0.4
27	19.8	19.3	0.5	88	16.6	16.7	-0.1	27	19.8	19.1	0.7	88	16.6	16.7	-0.1
31	17.0	16.9	0.1	89	16.4	16.7	-0.3	31	17.0	16.9	0.1	89	16.4	16.8	-0.4
32	18.6	18.4	0.2	90	17.4	17.6	-0.2	32	18.6	18.3	0.3	90	17.4	17.6	-0.2
34	18.0	18.0	0.0	92	17.5	17.2	0.3	34	18.0	17.9	0.2	92	17.5	17.1	0.4
35	17.0	17.5	-0.5	93	16.3	16.4	-0.1	35	17.0	17.6	-0.6	93	16.3	16.5	-0.2
37	17.0	17.2	-0.2	94	17.5	17.3	0.2	37	17.0	17.3	-0.3	94	17.5	17.3	0.2
40	16.7	17.3	-0.6	95	16.5	16.5	0.0	40	16.7	17.3	-0.6	95	16.5	16.5	0.0
41	16.8	16.2	0.6	98	17.0	16.8	0.2	41	16.8	16.2	0.6	98	17.0	16.8	0.2
42	16.9	16.9	0.0	99	16.1	16.4	-0.3	42	16.9	17.0	-0.1	99	16.1	16.5	-0.4
43	17.7	17.7	0.0	100	16.5	16.7	-0.2	43	17.7	17.7	0.0	100	16.5	16.8	-0.3
44	17.0	17.0	0.0					44	17.0	17.0	0.0				
46	17.7	17.5	0.2	Av	0.7	0.7	0.3	46	17.7	17.4	0.3	Av	0.7	0.6	0.4
47	18.2	17.5	0.7	SD	0.9	0.8	0.4	47	18.2	17.4	0.8	SD	0.9	0.8	0.4
48	16.6	17.2	-0.6	Min	15.6	15.9	-0.7	48	16.6	17.2	-0.6	Min	15.6	15.8	-0.8
50	16.6	16.7	-0.1	Max	19.8	19.3	0.8	50	16.6	16.7	-0.1	Max	19.8	19.3	0.9
51	18.0	17.5	0.5					51	18.0	17.5	0.6				
52	17.5	17.9	-0.4					52	17.5	18.0	-0.4				
53	17.6	17.2	0.4					53	17.6	17.2	0.4				
55	17.9	17.5	0.4					55	17.9	17.4	0.5				
56	18.2	18.3	-0.1					56	18.2	18.3	-0.1				

ตาราง 15 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้าวผลที่
ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย SNV

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	19.2	19.0	0.2	58	16.5	16.6	-0.1	1	19.2	18.9	0.3	58	16.5	16.8	-0.3
2	19.2	18.8	0.4	59	15.5	16.1	-0.6	2	19.2	18.7	0.5	59	15.5	16.2	-0.7
3	18.6	19.1	-0.5	60	16.4	16.6	-0.2	3	18.6	19.1	-0.5	60	16.4	16.6	-0.2
4	19.1	19.2	-0.1	61	16.0	16.7	-0.7	4	19.1	19.1	0.0	61	16.0	16.8	-0.8
5	18.2	18.8	-0.6	62	16.8	16.4	0.4	5	18.2	18.9	-0.7	62	16.8	16.4	0.4
6	18.7	18.8	-0.1	63	16.9	16.6	0.3	6	18.7	18.8	-0.1	63	16.9	16.6	0.3
7	19.2	19.2	0.0	64	17.0	16.7	0.3	7	19.2	19.2	0.0	64	17.0	16.6	0.4
12	17.8	17.7	0.1	65	17.6	17.3	0.4	12	17.8	17.6	0.2	65	17.6	17.2	0.4
13	17.5	17.4	0.1	66	17.1	17.4	-0.3	13	17.5	17.3	0.2	66	17.1	17.4	-0.3
14	18.2	17.7	0.5	68	16.2	16.2	0.0	14	18.2	17.5	0.7	68	16.2	16.0	0.2
17	17.3	17.3	0.0	69	15.8	15.8	0.0	17	17.3	17.3	0.1	69	15.8	15.2	0.6
18	17.4	16.8	0.6	70	17.7	17.5	0.2	18	17.4	16.7	0.7	70	17.7	17.5	0.2
19	16.6	17.1	-0.5	72	17.9	17.4	0.5	19	16.6	17.2	-0.6	72	17.9	17.3	0.6
20	16.7	17.1	-0.4	73	17.3	17.6	-0.3	20	16.7	17.2	-0.4	73	17.3	17.6	-0.3
21	17.7	16.8	0.9	75	17.8	17.6	0.3	21	17.7	16.7	1.0	75	17.8	17.5	0.3
22	17.2	16.8	0.4	76	17.9	17.6	0.3	22	17.2	16.8	0.4	76	17.9	17.5	0.4
23	16.5	16.9	-0.4	77	18.1	17.9	0.2	23	16.5	17.0	-0.5	77	18.1	17.9	0.2
24	16.8	17.0	-0.2	78	18.0	17.5	0.5	24	16.8	17.0	-0.2	78	18.0	17.4	0.6
25	17.5	16.9	0.6	79	18.3	17.8	0.5	25	17.5	16.9	0.6	79	18.3	17.7	0.6
26	18.9	18.8	0.1	80	17.6	18.0	-0.4	26	18.9	18.8	0.1	80	17.6	18.0	-0.4
28	16.4	16.7	-0.3	82	17.2	17.6	-0.4	28	16.4	16.9	-0.5	82	17.2	17.8	-0.6
31	17.0	16.9	0.1	84	16.6	16.2	0.4	31	17.0	17.0	0.0	84	16.6	16.1	0.5
33	16.9	16.7	0.2	86	16.6	16.6	0.0	33	16.9	16.7	0.2	86	16.6	16.6	0.0
35	17.0	16.4	0.6	89	16.4	16.9	-0.5	35	17.0	16.2	0.8	89	16.4	17.1	-0.7
36	15.9	16.7	-0.8	90	17.4	16.9	0.5	36	15.9	16.8	-0.9	90	17.4	16.8	0.6
37	17.0	16.9	0.1	93	16.3	16.8	-0.5	37	17.0	16.9	0.1	93	16.3	17.2	-0.9
38	16.2	16.6	-0.4	94	17.5	17.7	-0.2	38	16.2	16.7	-0.5	94	17.5	18.0	-0.5
40	16.7	16.8	-0.1	95	16.5	17.2	-0.7	40	16.7	16.8	-0.1	95	16.5	17.3	-0.8
41	16.8	16.8	0.0	97	16.5	17.3	-0.8	41	16.8	16.8	0.0	97	16.5	17.5	-1.0
42	16.9	17.1	-0.2	98	17.0	17.2	-0.2	42	16.9	17.3	-0.4	98	17.0	17.3	-0.3
43	17.7	17.4	0.3					43	17.7	17.3	0.4				
44	17.0	16.9	0.1	Av	0.7	0.6	0.3	44	17.0	16.9	0.1	Av	0.7	0.6	0.4
45	16.3	16.9	-0.6	SD	0.9	0.8	0.4	45	16.3	16.9	-0.6	SD	0.9	0.8	0.5
46	17.7	17.0	0.7	Min	15.5	15.8	-0.8	46	17.7	16.9	0.8	Min	15.5	15.2	-1.0
48	16.6	16.9	-0.2	Max	19.2	19.2	0.9	48	16.6	16.9	-0.3	Max	19.2	19.2	1.0
50	16.6	16.9	-0.3					50	16.6	17.0	-0.4				
52	17.5	17.8	-0.3					52	17.5	17.9	-0.4				
53	17.6	17.5	0.1					53	17.6	17.5	0.1				
55	17.9	17.5	0.4					55	17.9	17.5	0.4				
56	18.2	17.6	0.6					56	18.2	17.4	0.8				

ตาราง 16 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้าวผลที่
ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย MSC

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	19.2	18.8	0.4	60	16.4	16.4	0.0	1	19.2	18.7	0.5	60	16.4	16.5	-0.1
3	18.6	18.8	-0.2	61	16.0	16.6	-0.6	3	18.6	18.8	-0.2	61	16.0	16.7	-0.7
4	19.1	19.0	0.1	62	16.8	16.4	0.4	4	19.1	18.9	0.2	62	16.8	16.4	0.4
5	18.2	18.8	-0.6	63	16.9	16.6	0.3	5	18.2	18.8	-0.6	63	16.9	16.6	0.3
6	18.7	18.7	0.0	64	17.0	16.7	0.3	6	18.7	18.6	0.1	64	17.0	16.6	0.4
7	19.2	18.9	0.3	65	17.6	17.3	0.3	7	19.2	18.8	0.4	65	17.6	17.2	0.4
12	17.8	18.0	-0.2	66	17.1	17.2	-0.1	12	17.8	17.9	-0.1	66	17.1	17.2	-0.1
13	17.5	17.7	-0.2	68	16.2	16.3	-0.1	13	17.5	17.7	-0.2	68	16.2	16.5	-0.3
14	18.2	18.0	0.2	69	15.8	15.8	0.0	14	18.2	17.9	0.3	69	15.8	15.6	0.2
15	18.2	17.9	0.3	70	17.7	17.5	0.3	15	18.2	17.7	0.5	70	17.7	17.4	0.3
16	18.0	17.4	0.6	72	17.9	17.5	0.4	16	18.0	17.4	0.6	72	17.9	17.4	0.5
17	17.3	17.6	-0.3	73	17.3	17.6	-0.3	17	17.3	17.6	-0.3	73	17.3	17.6	-0.3
19	16.6	17.0	-0.4	75	17.8	17.3	0.5	19	16.6	17.1	-0.5	75	17.8	17.3	0.5
20	16.7	16.9	-0.2	76	17.9	18.0	-0.1	20	16.7	17.0	-0.3	76	17.9	18.0	-0.1
21	17.7	17.1	0.6	77	18.1	18.3	-0.2	21	17.7	17.0	0.7	77	18.1	18.3	-0.2
22	17.2	17.1	0.1	78	18.0	18.1	-0.1	22	17.2	17.1	0.1	78	18.0	18.1	-0.1
23	16.5	17.1	-0.6	79	18.3	18.1	0.2	23	16.5	17.2	-0.6	79	18.3	18.1	0.2
24	16.8	16.8	0.0	81	17.3	17.1	0.2	24	16.8	16.9	-0.1	81	17.3	17.5	-0.2
25	17.5	17.1	0.4	82	17.2	16.5	0.7	25	17.5	17.1	0.4	82	17.2	16.5	0.7
26	18.9	18.6	0.3	84	16.6	16.2	0.4	26	18.9	18.5	0.4	84	16.6	16.2	0.4
28	16.4	16.3	0.1	86	16.6	16.3	0.3	28	16.4	16.4	0.0	86	16.6	16.3	0.3
31	17.0	16.7	0.3	88	16.6	16.8	-0.2	31	17.0	16.7	0.3	88	16.6	17.3	-0.7
33	16.9	16.6	0.4	89	16.4	17.0	-0.6	33	16.9	16.6	0.4	89	16.4	17.1	-0.7
35	17.0	16.7	0.3	90	17.4	16.7	0.7	35	17.0	16.7	0.3	90	17.4	16.6	0.8
37	17.0	17.1	-0.1	93	16.3	16.8	-0.5	37	17.0	17.1	-0.1	93	16.3	16.9	-0.6
38	16.2	16.9	-0.7	94	17.5	17.5	0.0	38	16.2	17.0	-0.8	94	17.5	17.6	-0.1
40	16.7	17.1	-0.4	95	16.5	17.2	-0.6	40	16.7	17.1	-0.4	95	16.5	17.2	-0.7
41	16.8	17.2	-0.4	97	16.5	16.8	-0.3	41	16.8	17.2	-0.4	97	16.5	16.9	-0.4
42	16.9	17.4	-0.5	98	17.0	16.7	0.3	42	16.9	17.6	-0.7	98	17.0	16.7	0.3
43	17.7	17.6	0.1	100	16.5	16.7	-0.2	43	17.7	17.6	0.1	100	16.5	16.8	-0.3
44	17.0	17.2	-0.2					44	17.0	17.2	-0.2				
46	17.7	17.2	0.5	Av	0.7	0.6	0.3	46	17.7	17.2	0.5	Av	0.7	0.6	0.4
48	16.6	16.8	-0.2	SD	0.8	0.8	0.4	48	16.6	16.8	-0.2	SD	0.8	0.7	0.4
50	16.6	17.2	-0.6	Min	15.5	15.8	-0.7	50	16.6	17.3	-0.7	Min	15.5	15.6	-0.8
53	17.6	18.1	-0.5	Max	19.2	19.0	0.7	53	17.6	18.1	-0.5	Max	19.2	18.9	0.8
55	17.9	17.9	0.0					55	17.9	17.9	0.0				
56	18.2	18.1	0.2					56	18.2	18.0	0.2				
57	18.6	18.1	0.5					57	18.6	18.0	0.6				
58	16.5	16.5	0.0					58	16.5	16.6	-0.1				
59	15.5	16.1	-0.6					59	15.5	16.2	-0.7				

ตาราง 17 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้าวผลที่
ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย First derivative

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	19.2	18.8	0.4	65	17.6	17.2	0.4	1	19.2	18.8	0.4	65	17.6	17.1	0.5
2	19.2	19.2	0.0	66	17.1	17.5	-0.4	2	19.2	19.2	0.0	66	17.1	17.5	-0.4
4	19.1	19.0	0.1	68	16.2	16.2	0.1	4	19.1	19.0	0.1	68	16.2	16.1	0.1
6	18.7	19.0	-0.3	69	15.8	16.0	-0.2	6	18.7	19.0	-0.3	69	15.8	16.3	-0.5
7	19.2	19.1	0.1	70	17.7	17.2	0.5	7	19.2	19.1	0.1	70	17.7	17.1	0.6
9	16.2	16.6	-0.4	72	17.9	17.3	0.6	9	16.2	16.7	-0.5	72	17.9	17.2	0.7
10	16.4	17.1	-0.7	73	17.3	17.3	0.0	10	16.4	17.2	-0.8	73	17.3	17.3	0.0
13	17.5	17.0	0.5	74	16.4	17.0	-0.6	13	17.5	17.0	0.5	74	16.4	17.0	-0.6
17	17.3	16.9	0.4	75	17.8	17.3	0.5	17	17.3	16.9	0.4	75	17.8	17.2	0.6
18	17.4	17.6	-0.2	76	17.9	17.9	0.0	18	17.4	17.6	-0.2	76	17.9	17.9	0.0
19	16.6	17.2	-0.6	77	18.1	17.7	0.4	19	16.6	17.3	-0.7	77	18.1	17.6	0.5
20	16.7	17.2	-0.5	78	18.0	17.4	0.6	20	16.7	17.3	-0.6	78	18.0	17.3	0.7
22	17.2	16.8	0.4	79	18.3	17.7	0.6	22	17.2	16.8	0.4	79	18.3	17.6	0.7
23	16.5	16.7	-0.2	80	17.6	17.6	0.0	23	16.5	16.8	-0.3	80	17.6	17.6	0.0
24	16.8	16.9	-0.1	81	17.3	17.3	0.1	24	16.8	16.9	-0.1	81	17.3	17.3	0.0
26	18.9	19.5	-0.6	82	17.2	17.5	-0.3	26	18.9	19.6	-0.7	82	17.2	17.6	-0.4
27	19.8	19.8	0.0	84	16.6	16.4	0.2	27	19.8	19.7	0.1	84	16.6	16.4	0.2
30	17.6	17.8	-0.2	86	16.6	17.0	-0.4	30	17.6	17.7	-0.1	86	16.6	17.1	-0.4
31	17.0	17.5	-0.5	88	16.6	17.2	-0.6	31	17.0	17.6	-0.6	88	16.6	17.3	-0.7
32	18.6	18.5	0.1	90	17.4	17.3	0.1	32	18.6	18.4	0.2	90	17.4	17.3	0.1
34	18.0	17.7	0.3	92	17.5	17.1	0.4	34	18.0	17.5	0.5	92	17.5	17.1	0.4
37	17.0	16.8	0.2	93	16.3	16.9	-0.6	37	17.0	16.8	0.2	93	16.3	17.0	-0.7
38	16.2	16.8	-0.6	94	17.5	17.8	-0.3	38	16.2	16.9	-0.7	94	17.5	17.9	-0.4
39	15.9	16.4	-0.5	95	16.5	17.1	-0.6	39	15.9	16.5	-0.6	95	16.5	17.2	-0.7
40	16.7	16.6	0.1	98	17.0	17.5	-0.5	40	16.7	16.6	0.1	98	17.0	17.5	-0.5
42	16.9	16.7	0.2					42	16.9	16.7	0.2				
43	17.7	17.3	0.5	Av	0.7	0.6	0.3	43	17.7	17.2	0.5	Av	0.7	0.6	0.4
44	17.0	16.5	0.5	SD	0.9	0.8	0.4	44	17.0	16.5	0.5	SD	0.9	0.8	0.5
45	16.3	16.5	-0.2	Min	15.8	16.0	-0.7	45	16.3	16.5	-0.2	Min	15.8	16.1	-0.8
48	16.6	16.7	-0.1	Max	19.8	19.8	0.6	48	16.6	16.7	-0.1	Max	19.8	19.7	0.7
50	16.6	16.4	0.2					50	16.6	16.3	0.3				
51	18.0	17.5	0.5					51	18.0	17.5	0.5				
52	17.5	17.4	0.2					52	17.5	17.3	0.2				
53	17.6	17.2	0.4					53	17.6	17.2	0.4				
55	17.9	17.4	0.5					55	17.9	17.4	0.5				
56	18.2	17.6	0.6					56	18.2	17.5	0.7				
58	16.5	17.1	-0.5					58	16.5	17.2	-0.7				
60	16.4	16.8	-0.4					60	16.4	16.9	-0.5				
62	16.8	16.5	0.3					62	16.8	16.5	0.3				
63	16.9	16.6	0.3					63	16.9	16.6	0.3				

ตาราง 18 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้าวผลที่
ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย Second derivative

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	19.2	18.8	0.4	51	18.0	17.6	0.4	1	19.2	18.4	0.8	51	18.0	17.5	0.5
3	18.6	18.9	-0.3	53	17.6	17.7	-0.1	3	18.6	19.0	-0.4	53	17.6	17.8	-0.2
4	19.1	19.3	-0.2	55	17.9	17.7	0.2	4	19.1	19.3	-0.2	55	17.9	17.5	0.4
5	18.2	18.5	-0.3	56	18.2	18.5	-0.3	5	18.2	18.6	-0.4	56	18.2	18.7	-0.5
6	18.7	18.5	0.2	57	18.6	18.5	0.1	6	18.7	18.5	0.2	57	18.6	18.4	0.2
7	19.2	19.2	0.0	58	16.5	16.4	0.1	7	19.2	19.0	0.2	58	16.5	16.4	0.1
8	18.3	18.2	0.1	59	15.5	16.0	-0.5	8	18.3	18.2	0.1	59	15.5	16.2	-0.7
9	16.2	16.6	-0.4	62	16.8	16.4	0.4	9	16.2	16.7	-0.5	62	16.8	16.3	0.5
10	16.4	16.8	-0.4	63	16.9	16.8	0.1	10	16.4	16.9	-0.5	63	16.9	16.8	0.1
12	17.8	17.7	0.1	64	17.0	17.1	-0.1	12	17.8	17.7	0.1	64	17.0	17.2	-0.2
13	17.5	17.9	-0.4	65	17.6	17.8	-0.2	13	17.5	18.0	-0.5	65	17.6	17.9	-0.3
14	18.2	17.9	0.3	66	17.1	17.4	-0.3	14	18.2	17.8	0.4	66	17.1	17.6	-0.4
16	18.0	17.9	0.1	72	17.9	17.7	0.2	16	18.0	17.9	0.1	72	17.9	17.7	0.2
17	17.3	17.3	0.0	73	17.3	17.0	0.3	17	17.3	17.3	0.0	73	17.3	16.9	0.4
18	17.4	17.1	0.3	75	17.8	17.5	0.3	18	17.4	17.1	0.3	75	17.8	17.4	0.4
19	16.6	16.8	-0.2	76	17.9	18.3	-0.4	19	16.6	16.8	-0.2	76	17.9	18.4	-0.5
20	16.7	17.0	-0.3	77	18.1	17.9	0.3	20	16.7	17.2	-0.5	77	18.1	17.7	0.5
21	17.7	17.4	0.3	78	18.0	17.3	0.7	21	17.7	17.3	0.4	78	18.0	17.1	0.9
22	17.2	17.2	0.1	79	18.3	18.5	-0.2	22	17.2	17.1	0.1	79	18.3	18.6	-0.2
23	16.5	16.8	-0.3	81	17.3	17.4	-0.1	23	16.5	16.9	-0.4	81	17.3	17.4	-0.1
24	16.8	17.2	-0.4	82	17.2	17.1	0.1	24	16.8	17.3	-0.5	82	17.2	17.1	0.1
25	17.5	17.9	-0.4	84	16.6	17.0	-0.4	25	17.5	18.0	-0.5	84	16.6	17.2	-0.5
26	18.9	18.5	0.4	86	16.6	16.2	0.4	26	18.9	18.2	0.7	86	16.6	16.0	0.6
28	16.4	16.8	-0.4	88	16.6	16.6	0.0	28	16.4	17.1	-0.7	88	16.6	16.9	-0.3
30	17.6	17.3	0.3	92	17.5	17.1	0.4	30	17.6	17.2	0.4	92	17.5	17.0	0.5
32	18.6	18.5	0.1	94	17.5	17.2	0.3	32	18.6	18.5	0.1	94	17.5	17.1	0.4
33	16.9	16.4	0.6	95	16.5	16.5	0.0	33	16.9	16.1	0.8	95	16.5	16.5	0.0
34	18.0	18.3	-0.3	98	17.0	17.4	-0.4	34	18.0	18.5	-0.5	98	17.0	17.8	-0.8
35	17.0	17.0	0.0					35	17.0	17.1	-0.1				
37	17.0	16.9	0.1	Av	17.4	17.4	0.0	37	17.0	16.8	0.2	Av	17.4	17.5	0.0
38	16.2	16.2	0.0	SD	0.8	0.8	0.3	38	16.2	16.2	0.0	SD	0.8	0.8	0.4
39	15.9	16.2	-0.3	Min	15.5	16.0	-0.5	39	15.9	16.3	-0.4	Min	15.5	16.0	-0.8
41	16.8	17.0	-0.2	Max	19.2	19.3	0.8	41	16.8	17.1	-0.3	Max	19.2	19.3	1.1
43	17.7	18.0	-0.3					43	17.7	18.0	-0.3				
44	17.0	17.2	-0.2					44	17.0	17.2	-0.2				
46	17.7	17.6	0.1					46	17.7	17.5	0.2				
47	18.2	17.9	0.3					47	18.2	17.8	0.4				
48	16.6	16.8	-0.2					48	16.6	17.2	-0.6				
49	18.1	17.3	0.8					49	18.1	17.0	1.1				
50	16.6	16.9	-0.3					50	16.6	17.0	-0.4				

ตาราง 19 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้าวผลที่
ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย First derivative ร่วมกับ SNV

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	19.2	18.7	0.5	53	17.6	17.2	0.4	1	19.2	18.6	0.6	53	17.6	17.2	0.4
2	19.2	18.7	0.5	55	17.9	17.2	0.7	2	19.2	18.6	0.6	55	17.9	17.2	0.7
3	18.6	19.0	-0.4	58	16.5	16.7	-0.2	3	18.6	19.1	-0.5	58	16.5	16.8	-0.3
4	19.1	19.1	0.0	59	15.5	16.1	-0.6	4	19.1	19.0	0.1	59	15.5	16.3	-0.8
5	18.2	18.8	-0.6	60	16.4	16.5	-0.1	5	18.2	18.8	-0.6	60	16.4	16.6	-0.2
6	18.7	18.8	-0.1	61	16.0	16.7	-0.7	6	18.7	18.8	-0.1	61	16.0	16.7	-0.7
7	19.2	19.1	0.1	62	16.8	16.5	0.3	7	19.2	19.1	0.1	62	16.8	16.5	0.3
9	16.2	16.5	-0.3	63	16.9	16.4	0.6	9	16.2	16.6	-0.4	63	16.9	16.3	0.6
10	16.4	16.8	-0.4	64	17.0	16.5	0.5	10	16.4	16.9	-0.5	64	17.0	16.5	0.5
11	16.5	17.1	-0.6	65	17.6	17.3	0.3	11	16.5	17.1	-0.6	65	17.6	17.3	0.3
12	17.8	17.2	0.6	66	17.1	17.6	-0.5	12	17.8	17.1	0.7	66	17.1	17.6	-0.5
13	17.5	16.9	0.6	68	16.2	16.2	0.0	13	17.5	16.9	0.7	68	16.2	16.2	0.0
14	18.2	17.4	0.8	69	15.8	15.8	0.0	14	18.2	17.2	1.0	69	15.8	15.8	0.0
17	17.3	17.2	0.1	70	17.7	17.5	0.2	17	17.3	17.2	0.1	70	17.7	17.4	0.3
18	17.4	17.0	0.4	72	17.9	17.4	0.5	18	17.4	16.9	0.5	72	17.9	17.3	0.6
19	16.6	17.3	-0.7	73	17.3	17.7	-0.4	19	16.6	17.3	-0.7	73	17.3	17.7	-0.4
20	16.7	17.3	-0.6	75	17.8	17.6	0.2	20	16.7	17.4	-0.7	75	17.8	17.6	0.2
22	17.2	16.6	0.6	76	17.9	17.3	0.6	22	17.2	16.6	0.6	76	17.9	17.2	0.7
23	16.5	16.9	-0.4	77	18.1	17.8	0.3	23	16.5	16.9	-0.4	77	18.1	17.7	0.4
24	16.8	16.8	0.0	79	18.3	17.5	0.8	24	16.8	16.8	0.0	79	18.3	17.4	0.9
25	17.5	16.8	0.7	80	17.6	17.6	0.0	25	17.5	16.7	0.8	80	17.6	17.6	0.1
26	18.9	18.5	0.4	82	17.2	17.7	-0.4	26	18.9	18.4	0.5	82	17.2	17.7	-0.5
30	17.6	17.1	0.5	84	16.6	16.4	0.2	30	17.6	17.0	0.6	84	16.6	16.4	0.2
31	17.0	17.3	-0.3	86	16.6	16.9	-0.3	31	17.0	17.3	-0.3	86	16.6	17.0	-0.4
33	16.9	17.3	-0.4	89	16.4	17.0	-0.6	33	16.9	17.3	-0.4	89	16.4	17.1	-0.7
34	18.0	18.5	-0.4	90	17.4	17.5	-0.1	34	18.0	18.6	-0.6	90	17.4	17.5	-0.1
36	15.9	16.5	-0.6	92	17.5	17.3	0.2	36	15.9	16.5	-0.6	92	17.5	17.3	0.2
37	17.0	16.7	0.3	94	17.5	18.0	-0.5	37	17.0	16.7	0.3	94	17.5	18.1	-0.6
38	16.2	16.6	-0.4	95	16.5	17.1	-0.6	38	16.2	16.7	-0.5	95	16.5	17.2	-0.7
39	15.9	16.4	-0.5	98	17.0	17.2	-0.2	39	15.9	16.5	-0.6	98	17.0	17.2	-0.2
40	16.7	16.8	-0.1					40	16.7	16.8	-0.1				
41	16.8	16.4	0.4	Av	0.7	0.6	0.4	41	16.8	16.4	0.4	Av	0.7	0.6	0.5
42	16.9	17.2	-0.3	SD	0.9	0.7	0.4	42	16.9	17.4	-0.5	SD	0.9	0.7	0.5
43	17.7	17.5	0.2	Min	15.5	15.8	-0.7	43	17.7	17.4	0.3	Min	15.5	15.8	-0.8
44	17.0	16.6	0.4	Max	19.2	19.1	0.8	44	17.0	16.6	0.4	Max	19.2	19.1	1.0
45	16.3	16.8	-0.5					45	16.3	16.9	-0.6				
48	16.6	16.9	-0.3					48	16.6	17.0	-0.4				
50	16.6	16.7	-0.1					50	16.6	16.7	-0.1				
51	18.0	17.2	0.8					51	18.0	17.0	1.0				
52	17.5	18.0	-0.5					52	17.5	18.3	-0.7				

ตาราง 20 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้วผลที่ไม่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัม

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	19.2	19.2	0.0	53	17.6	18.0	-0.4	1	19.2	19.2	0.0	53	17.6	18.0	-0.4
2	19.2	19.1	0.1	55	17.9	17.9	0.0	2	19.2	18.5	0.7	55	17.9	17.8	0.1
3	18.6	18.7	-0.1	56	18.2	18.4	-0.1	3	18.6	18.7	-0.1	56	18.2	18.3	-0.1
4	19.1	18.6	0.5	57	18.6	18.2	0.4	4	19.1	18.5	0.6	57	18.6	18.0	0.6
5	18.2	18.8	-0.6	58	16.5	16.2	0.3	5	18.2	18.8	-0.6	58	16.5	16.1	0.4
6	18.7	18.8	-0.1	60	16.4	16.8	-0.4	6	18.7	18.7	0.0	60	16.4	16.8	-0.4
7	19.2	18.8	0.4	62	16.8	17.2	-0.4	7	19.2	18.7	0.5	62	16.8	17.2	-0.4
8	18.3	18.3	0.0	63	16.9	17.0	-0.1	8	18.3	18.2	0.1	63	16.9	17.0	-0.1
9	16.2	16.4	-0.2	64	17.0	16.9	0.2	9	16.2	16.5	-0.2	64	17.0	16.8	0.2
10	16.4	16.6	-0.2	65	17.6	17.2	0.5	10	16.4	16.7	-0.3	65	17.6	17.1	0.5
11	16.5	17.2	-0.7	66	17.1	17.2	-0.1	11	16.5	17.3	-0.8	66	17.1	17.2	-0.1
12	17.8	17.4	0.4	69	15.8	15.9	-0.1	12	17.8	17.3	0.5	69	15.8	16.4	-0.6
13	17.5	17.3	0.2	70	17.7	17.3	0.4	13	17.5	17.3	0.2	70	17.7	17.3	0.4
14	18.2	17.7	0.5	72	17.9	17.6	0.3	14	18.2	17.6	0.6	72	17.9	17.5	0.4
16	18.0	17.7	0.3	73	17.3	17.6	-0.3	16	18.0	17.6	0.4	73	17.3	17.6	-0.3
17	17.3	17.4	0.0	75	17.8	17.8	0.0	17	17.3	17.3	0.0	75	17.8	17.8	0.0
18	17.4	17.0	0.4	76	17.9	18.2	-0.3	18	17.4	16.9	0.5	76	17.9	18.2	-0.3
19	16.6	17.0	-0.4	77	18.1	18.0	0.1	19	16.6	17.1	-0.5	77	18.1	17.9	0.2
20	16.7	16.7	0.0	81	17.3	17.6	-0.3	20	16.7	16.7	0.0	81	17.3	17.8	-0.5
21	17.7	17.4	0.3	82	17.2	16.9	0.3	21	17.7	17.4	0.3	82	17.2	17.0	0.2
22	17.2	17.1	0.1	84	16.6	16.1	0.5	22	17.2	17.1	0.1	84	16.6	16.1	0.5
24	16.8	17.6	-0.8	86	16.6	17.4	-0.8	24	16.8	17.7	-0.9	86	16.6	17.5	-0.8
25	17.5	17.9	-0.4	88	16.6	16.8	-0.2	25	17.5	17.9	-0.4	88	16.6	16.9	-0.3
28	16.4	16.5	-0.1	89	16.4	16.7	-0.3	28	16.4	16.6	-0.2	89	16.4	16.9	-0.5
30	17.6	17.2	0.4	90	17.4	17.4	0.0	30	17.6	17.2	0.4	90	17.4	17.4	0.0
31	17.0	16.8	0.2	91	18.1	17.7	0.4	31	17.0	16.8	0.2	91	18.1	17.7	0.5
33	16.9	16.6	0.3	92	17.5	17.5	0.0	33	16.9	16.5	0.4	92	17.5	17.5	0.0
34	18.0	18.0	0.0	95	16.5	16.8	-0.3	34	18.0	18.1	0.0	95	16.5	16.9	-0.4
35	17.0	16.5	0.5	98	17.0	17.0	0.0	35	17.0	16.5	0.5	98	17.0	17.1	-0.1
37	17.0	17.0	0.0	100	16.5	16.8	-0.3	37	17.0	16.9	0.1	100	16.5	16.9	-0.4
38	16.2	16.3	-0.1					38	16.2	16.4	-0.2				
40	16.7	17.0	-0.2	Av	0.7	0.6	0.3	40	16.7	17.0	-0.3	Av	0.7	0.5	0.3
41	16.8	17.1	-0.3	SD	0.8	0.7	0.3	41	16.8	17.2	-0.4	SD	0.8	0.7	0.4
43	17.7	17.7	0.0	Min	15.8	15.9	-0.8	43	17.7	17.7	0.0	Min	15.8	16.1	-0.9
44	17.0	17.0	0.0	Max	19.2	19.2	0.5	44	17.0	17.0	0.0	Max	19.2	19.2	0.7
46	17.7	17.7	0.0					46	17.7	17.7	0.0				
47	18.2	17.7	0.5					47	18.2	17.6	0.6				
48	16.6	16.8	-0.1					48	16.6	17.1	-0.5				
50	16.6	16.9	-0.3					50	16.6	16.9	-0.3				
52	17.5	17.0	0.5					52	17.5	16.9	0.6				

ตาราง 21 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่ง
แก้มผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย SNV

Calibration				Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	19.2	18.9	0.3	54	19.7	19.8	-0.1	1	19.2	18.7	0.5
3	18.6	18.9	-0.3	55	17.9	17.7	0.2	3	18.6	18.9	-0.3
4	19.1	18.7	0.4	56	18.2	18.6	-0.4	4	19.1	18.5	0.6
5	18.2	18.5	-0.3	58	16.5	16.2	0.3	5	18.2	18.5	-0.3
6	18.7	18.6	0.1	60	16.4	16.5	-0.1	6	18.7	18.5	0.2
7	19.2	18.7	0.5	61	16.0	16.1	-0.1	7	19.2	18.5	0.7
8	18.3	18.1	0.2	62	16.8	17.0	-0.2	8	18.3	18.0	0.3
9	16.2	16.4	-0.2	63	16.9	16.9	0.0	9	16.2	16.5	-0.3
10	16.4	16.5	-0.1	64	17.0	16.7	0.3	10	16.4	16.5	-0.1
11	16.5	17.1	-0.6	66	17.1	17.2	-0.1	11	16.5	17.3	-0.7
12	17.8	17.6	0.2	68	16.2	16.2	0.0	12	17.8	17.5	0.3
13	17.5	17.5	0.0	70	17.7	17.3	0.4	13	17.5	17.5	0.0
14	18.2	17.9	0.3	72	17.9	17.4	0.5	14	18.2	17.8	0.4
16	18.0	17.8	0.2	73	17.3	17.4	-0.1	16	18.0	17.7	0.3
17	17.3	17.3	0.0	74	16.4	17.3	-0.9	17	17.3	17.3	0.0
19	16.6	16.5	0.1	75	17.8	17.6	0.2	19	16.6	16.8	-0.2
20	16.7	16.7	0.0	76	17.9	18.4	-0.5	20	16.7	16.8	-0.1
21	17.7	17.4	0.3	77	18.1	18.1	0.0	21	17.7	17.3	0.4
22	17.2	17.1	0.1	78	18.0	17.1	0.9	22	17.2	17.1	0.1
23	16.5	17.1	-0.6	79	18.3	19.0	-0.7	23	16.5	17.4	-0.9
24	16.8	17.2	-0.4	81	17.3	17.2	0.1	24	16.8	17.3	-0.5
25	17.5	17.9	-0.4	82	17.2	17.1	0.1	25	17.5	18.0	-0.5
26	18.9	18.7	0.2	84	16.6	16.5	0.1	26	18.9	18.9	0.0
27	19.8	19.8	0.0	88	16.6	16.6	0.0	27	19.8	19.7	0.1
30	17.6	17.3	0.3	89	16.4	16.8	-0.3	30	17.6	17.3	0.3
31	17.0	16.6	0.4	90	17.4	17.4	0.0	31	17.0	16.6	0.4
32	18.6	18.0	0.6	92	17.5	17.6	-0.1	32	18.6	17.8	0.8
33	16.9	16.4	0.5	95	16.5	16.9	-0.4	33	16.9	16.2	0.7
34	18.0	18.0	0.0	98	17.0	17.0	0.0	34	18.0	18.1	-0.1
36	15.9	16.6	-0.7	100	16.5	16.3	0.2	36	15.9	16.8	-0.9
37	17.0	17.0	0.0					37	17.0	17.0	0.0
38	16.2	16.2	0.0	Av	0.8	0.7	0.2	38	16.2	16.3	-0.1
39	15.9	16.2	-0.3	SD	0.9	0.9	0.3	39	15.9	16.3	-0.3
40	16.7	16.9	-0.2	Min	15.9	16.1	-0.9	40	16.7	17.0	-0.3
41	16.8	17.0	-0.2	Max	19.8	19.8	0.9	41	16.8	17.0	-0.2
44	17.0	16.9	0.1					44	17.0	16.9	0.1
46	17.7	17.6	0.1					46	17.7	17.5	0.2
47	18.2	18.3	-0.1					47	18.2	18.3	-0.1
50	16.6	16.7	-0.1					50	16.6	16.7	-0.1
52	17.5	17.3	0.2					52	17.5	17.3	0.2

ตาราง 22 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้วผลที่
ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย MSC

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	19.2	18.9	0.3	52	17.5	17.1	0.4	1	19.2	18.9	0.3	52	17.5	17.1	0.4
2	19.2	19.3	-0.1	53	17.6	18.2	-0.6	2	19.2	18.7	0.5	53	17.6	18.2	-0.6
3	18.6	18.9	-0.3	55	17.9	18.3	-0.4	3	18.6	18.9	-0.3	55	17.9	18.3	-0.4
4	19.1	18.6	0.5	56	18.2	18.5	-0.3	4	19.1	18.6	0.6	56	18.2	18.5	-0.3
5	18.2	18.8	-0.6	57	18.6	18.4	0.2	5	18.2	18.8	-0.6	57	18.6	18.3	0.3
6	18.7	18.7	0.0	58	16.5	16.1	0.4	6	18.7	18.6	0.1	58	16.5	16.1	0.4
7	19.2	19.1	0.1	60	16.4	16.8	-0.4	7	19.2	19.0	0.2	60	16.4	16.8	-0.4
8	18.3	18.7	-0.3	61	16.0	16.4	-0.4	8	18.3	18.6	-0.3	61	16.0	16.5	-0.5
9	16.2	16.1	0.1	62	16.8	17.1	-0.3	9	16.2	16.2	0.0	62	16.8	17.1	-0.3
10	16.4	16.4	0.0	63	16.9	17.1	-0.2	10	16.4	16.4	0.0	63	16.9	17.1	-0.2
11	16.5	17.1	-0.6	64	17.0	17.0	0.0	11	16.5	17.1	-0.6	64	17.0	17.0	0.0
12	17.8	17.4	0.4	65	17.6	17.1	0.5	12	17.8	17.3	0.5	65	17.6	17.1	0.5
13	17.5	17.1	0.4	66	17.1	17.1	0.0	13	17.5	17.0	0.5	66	17.1	17.1	0.0
16	18.0	17.6	0.4	69	15.8	15.6	0.2	16	18.0	17.5	0.5	69	15.8	16.0	-0.2
17	17.3	17.3	0.0	70	17.7	17.1	0.6	17	17.3	17.3	0.0	70	17.7	17.1	0.6
19	16.6	16.9	-0.3	72	17.9	17.5	0.4	19	16.6	16.9	-0.3	72	17.9	17.5	0.4
20	16.7	16.6	0.1	73	17.3	17.3	0.0	20	16.7	16.7	0.0	73	17.3	17.3	0.0
21	17.7	17.2	0.5	75	17.8	17.6	0.3	21	17.7	17.2	0.5	75	17.8	17.5	0.3
22	17.2	17.0	0.2	76	17.9	17.9	0.0	22	17.2	17.0	0.2	76	17.9	17.8	0.1
24	16.8	17.5	-0.7	77	18.1	17.8	0.3	24	16.8	17.5	-0.7	77	18.1	17.6	0.5
25	17.5	17.7	-0.2	81	17.3	17.4	-0.1	25	17.5	17.7	-0.2	81	17.3	17.6	-0.3
26	18.9	18.3	0.6	82	17.2	16.9	0.3	26	18.9	18.1	0.8	82	17.2	16.9	0.3
28	16.4	16.2	0.2	86	16.6	17.3	-0.6	28	16.4	16.3	0.1	86	16.6	17.3	-0.7
30	17.6	17.2	0.4	88	16.6	16.7	0.0	30	17.6	17.2	0.4	88	16.6	16.8	-0.2
31	17.0	16.6	0.4	89	16.4	16.9	-0.4	31	17.0	16.6	0.4	89	16.4	17.0	-0.6
33	16.9	16.7	0.2	90	17.4	17.3	0.1	33	16.9	16.7	0.2	90	17.4	17.3	0.1
34	18.0	18.2	-0.2	91	18.1	17.6	0.5	34	18.0	18.3	-0.3	91	18.1	17.6	0.6
36	15.9	16.3	-0.4	92	17.5	17.5	0.0	36	15.9	16.4	-0.5	92	17.5	17.5	0.0
37	17.0	16.8	0.2	95	16.5	16.7	-0.2	37	17.0	16.8	0.2	95	16.5	16.7	-0.2
38	16.2	16.4	-0.2	98	17.0	17.0	0.0	38	16.2	16.4	-0.2	98	17.0	17.1	-0.1
39	15.9	16.5	-0.6	100	16.5	16.5	0.0	39	15.9	16.6	-0.7	100	16.5	16.6	-0.1
40	16.7	17.0	-0.3					40	16.7	17.1	-0.4				
41	16.8	16.9	-0.1	Av	0.7	0.6	0.3	41	16.8	17.0	-0.2	Av	0.7	0.6	0.3
43	17.7	17.6	0.1	SD	0.9	0.8	0.3	43	17.7	17.6	0.1	SD	0.9	0.7	0.4
44	17.0	17.0	0.0	Min	15.8	15.6	-0.7	44	17.0	17.0	0.0	Min	15.8	16.0	-0.9
46	17.7	17.6	0.1	Max	19.2	19.3	0.6	46	17.7	17.6	0.1	Max	19.2	19.0	0.8
47	18.2	17.7	0.5					47	18.2	17.7	0.5				
48	16.6	16.9	-0.3					48	16.6	17.5	-0.9				
50	16.6	17.1	-0.5					50	16.6	17.1	-0.5				

ตาราง 23 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้วผลที่
ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย First derivative

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
3	18.6	18.1	0.5	57	18.6	18.7	-0.1	3	18.6	18.0	0.6	57	18.6	18.7	-0.1
5	18.2	18.1	0.1	58	16.5	16.5	0.0	5	18.2	18.1	0.1	58	16.5	16.5	0.0
6	18.7	18.6	0.1	59	15.5	16.1	-0.6	6	18.7	18.6	0.1	59	15.5	16.2	-0.7
8	18.3	18.1	0.3	62	16.8	16.9	-0.1	8	18.3	18.0	0.3	62	16.8	16.9	-0.1
9	16.2	16.1	0.1	63	16.9	17.0	-0.1	9	16.2	16.1	0.1	63	16.9	17.1	-0.1
10	16.4	16.2	0.2	64	17.0	17.1	-0.1	10	16.4	16.2	0.2	64	17.0	17.1	-0.1
11	16.5	16.7	-0.2	65	17.6	17.9	-0.3	11	16.5	16.8	-0.3	65	17.6	18.0	-0.4
13	17.5	17.1	0.5	66	17.1	17.3	-0.2	13	17.5	17.0	0.5	66	17.1	17.3	-0.2
17	17.3	17.4	-0.1	68	16.2	16.0	0.2	17	17.3	17.4	-0.1	68	16.2	15.6	0.6
18	17.4	17.1	0.3	69	15.8	16.1	-0.3	18	17.4	17.1	0.3	69	15.8	16.3	-0.4
20	16.7	17.1	-0.4	72	17.9	17.6	0.3	20	16.7	17.1	-0.4	72	17.9	17.6	0.3
21	17.7	17.3	0.4	73	17.3	17.2	0.1	21	17.7	17.3	0.4	73	17.3	17.2	0.1
22	17.2	17.3	-0.1	75	17.8	17.3	0.5	22	17.2	17.3	-0.1	75	17.8	17.2	0.6
23	16.5	16.4	0.1	76	17.9	17.8	0.1	23	16.5	16.4	0.1	76	17.9	17.8	0.1
24	16.8	16.8	0.0	77	18.1	18.2	0.0	24	16.8	16.8	0.0	77	18.1	18.2	-0.1
25	17.5	17.6	-0.1	78	18.0	17.6	0.4	25	17.5	17.6	-0.1	78	18.0	17.6	0.4
26	18.9	18.8	0.1	79	18.3	18.3	0.0	26	18.9	18.8	0.1	79	18.3	18.3	0.0
27	19.8	19.5	0.3	80	17.6	17.5	0.1	27	19.8	19.4	0.4	80	17.6	17.5	0.1
29	19.3	19.0	0.3	81	17.3	17.2	0.1	29	19.3	18.9	0.4	81	17.3	17.2	0.1
30	17.6	17.8	-0.2	82	17.2	17.1	0.1	30	17.6	17.8	-0.2	82	17.2	17.1	0.1
31	17.0	17.1	-0.1	84	16.6	17.0	-0.4	31	17.0	17.1	-0.1	84	16.6	17.1	-0.5
32	18.6	19.2	-0.6	86	16.6	16.9	-0.3	32	18.6	19.3	-0.7	86	16.6	16.9	-0.3
33	16.9	17.2	-0.3	88	16.6	17.0	-0.4	33	16.9	17.2	-0.3	88	16.6	17.1	-0.5
35	17.0	16.5	0.5	90	17.4	17.2	0.2	35	17.0	16.4	0.6	90	17.4	17.2	0.2
36	15.9	16.4	-0.5	92	17.5	16.9	0.6	36	15.9	16.4	-0.5	92	17.5	16.8	0.7
37	17.0	16.5	0.5	93	16.3	16.6	-0.3	37	17.0	16.5	0.5	93	16.3	16.6	-0.3
38	16.2	16.4	-0.2	94	17.5	17.7	-0.2	38	16.2	16.4	-0.2	94	17.5	17.7	-0.2
39	15.9	16.2	-0.3	95	16.5	16.4	0.1	39	15.9	16.2	-0.3	95	16.5	16.4	0.1
40	16.7	17.1	-0.4	98	17.0	17.5	-0.5	40	16.7	17.2	-0.5	98	17.0	17.6	-0.6
41	16.8	16.3	0.6	100	16.5	16.6	-0.1	41	16.8	16.2	0.6	100	16.5	16.6	-0.1
43	17.7	18.1	-0.3					43	17.7	18.1	-0.4				
44	17.0	17.0	0.0	Av	0.7	0.6	0.3	44	17.0	17.0	0.0	Av	0.7	0.6	0.3
46	17.7	17.3	0.4	SD	0.9	0.8	0.3	46	17.7	17.2	0.5	SD	0.9	0.8	0.3
47	18.2	17.8	0.4	Min	15.5	16.0	-0.6	47	18.2	17.8	0.4	Min	15.5	15.6	-0.7
48	16.6	16.3	0.3	Max	19.8	19.5	0.6	48	16.6	16.1	0.5	Max	19.8	19.4	0.7
50	16.6	17.1	-0.5					50	16.6	17.1	-0.5				
51	18.0	18.3	-0.3					51	18.0	18.3	-0.3				
53	17.6	17.6	0.0					53	17.6	17.6	0.0				
55	17.9	17.8	0.1					55	17.9	17.8	0.1				
56	18.2	18.4	-0.2					56	18.2	18.4	-0.2				

ตาราง 24 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้วผลที่
ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย Second derivative

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	19.2	18.9	0.3	51	18.0	17.5	0.5	1	19.2	18.5	0.7	51	18.0	17.4	0.6
2	19.2	19.6	-0.4	52	17.5	17.4	0.1	2	19.2	19.6	-0.4	52	17.5	17.5	0.0
3	18.6	18.9	-0.3	53	17.6	17.7	-0.1	3	18.6	18.9	-0.3	53	17.6	17.7	-0.1
4	19.1	19.0	0.2	55	17.9	17.5	0.4	4	19.1	18.9	0.3	55	17.9	17.4	0.5
5	18.2	18.5	-0.3	56	18.2	18.5	-0.3	5	18.2	18.6	-0.4	56	18.2	18.5	-0.3
6	18.7	18.5	0.2	57	18.6	18.5	0.1	6	18.7	18.5	0.2	57	18.6	18.4	0.2
7	19.2	19.0	0.2	58	16.5	16.7	-0.2	7	19.2	18.9	0.3	58	16.5	16.7	-0.2
8	18.3	17.7	0.6	62	16.8	16.8	0.0	8	18.3	17.5	0.8	62	16.8	16.8	0.0
9	16.2	16.1	0.1	63	16.9	17.0	-0.1	9	16.2	16.0	0.2	63	16.9	17.0	-0.1
10	16.4	16.3	0.1	64	17.0	17.3	-0.3	10	16.4	16.3	0.1	64	17.0	17.4	-0.4
11	16.5	17.1	-0.6	65	17.6	17.8	-0.2	11	16.5	17.2	-0.7	65	17.6	17.9	-0.3
12	17.8	17.3	0.5	66	17.1	17.3	-0.2	12	17.8	17.1	0.7	66	17.1	17.4	-0.3
13	17.5	17.5	0.0	68	16.2	15.7	0.5	13	17.5	17.5	0.0	68	16.2	15.9	0.3
14	18.2	17.6	0.6	69	15.8	16.0	-0.2	14	18.2	17.5	0.7	69	15.8	16.7	-0.9
16	18.0	17.5	0.5	72	17.9	17.8	0.1	16	18.0	17.3	0.7	72	17.9	17.8	0.1
17	17.3	17.9	-0.6	73	17.3	17.2	0.1	17	17.3	18.0	-0.7	73	17.3	17.2	0.1
18	17.4	17.0	0.4	74	16.4	17.0	-0.6	18	17.4	16.9	0.5	74	16.4	17.1	-0.6
19	16.6	16.7	-0.1	76	17.9	18.1	-0.2	19	16.6	16.9	-0.3	76	17.9	18.1	-0.2
20	16.7	16.9	-0.2	77	18.1	17.8	0.3	20	16.7	17.0	-0.3	77	18.1	17.8	0.3
21	17.7	17.2	0.5	79	18.3	18.2	0.1	21	17.7	17.2	0.5	79	18.3	18.1	0.2
22	17.2	16.9	0.3	81	17.3	17.6	-0.3	22	17.2	16.9	0.3	81	17.3	17.5	-0.2
23	16.5	16.9	-0.3	82	17.2	17.2	0.0	23	16.5	16.9	-0.4	82	17.2	17.2	0.0
24	16.8	17.1	-0.3	84	16.6	17.1	-0.5	24	16.8	17.2	-0.3	84	16.6	17.2	-0.6
25	17.5	17.5	0.0	86	16.6	16.2	0.4	25	17.5	17.5	0.0	86	16.6	16.1	0.5
26	18.9	18.6	0.3	88	16.6	16.5	0.1	26	18.9	18.4	0.5	88	16.6	16.7	-0.1
27	19.8	19.6	0.2	89	16.4	16.9	-0.5	27	19.8	19.5	0.3	89	16.4	17.2	-0.8
28	16.4	16.8	-0.4	92	17.5	17.2	0.3	28	16.4	17.0	-0.6	92	17.5	17.2	0.3
30	17.6	17.7	-0.1	95	16.5	16.2	0.3	30	17.6	17.7	-0.1	95	16.5	16.2	0.3
32	18.6	18.6	0.0	98	17.0	17.6	-0.6	32	18.6	18.6	0.0	98	17.0	17.8	-0.8
35	17.0	17.4	-0.4					35	17.0	17.4	-0.4				
37	17.0	16.9	0.1	Av	17.4	17.4	0.0	37	17.0	16.9	0.1	Av	17.4	17.4	0.0
38	16.2	16.3	-0.1	SD	0.9	0.9	0.3	38	16.2	16.3	-0.1	SD	0.9	0.8	0.4
39	15.9	16.2	-0.3	Min	15.8	15.7	-0.6	39	15.9	16.3	-0.4	Min	15.8	15.9	-0.9
41	16.8	17.0	-0.2	Max	19.8	19.6	0.6	41	16.8	17.0	-0.2	Max	19.8	19.6	0.8
43	17.7	18.0	-0.3					43	17.7	18.1	-0.4				
44	17.0	16.9	0.1					44	17.0	16.9	0.1				
46	17.7	17.3	0.5					46	17.7	17.1	0.6				
47	18.2	17.8	0.4					47	18.2	17.7	0.5				
48	16.6	16.8	-0.2					48	16.6	16.6	0.0				
50	16.6	16.6	0.0					50	16.6	16.7	0.0				

ตาราง 25 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIR ในตำแหน่งแก้วผลที่
ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย First derivative ร่วมกับ SNV

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
3	18.6	18.8	-0.2	55	17.9	17.7	0.2	3	18.6	18.8	-0.2	55	17.9	17.6	0.3
4	19.1	18.7	0.4	56	18.2	18.0	0.2	4	19.1	18.5	0.6	56	18.2	18.0	0.2
5	18.2	18.5	-0.3	57	18.6	18.6	0.0	5	18.2	18.5	-0.3	57	18.6	18.6	0.0
6	18.7	18.6	0.1	58	16.5	16.3	0.2	6	18.7	18.5	0.2	58	16.5	16.2	0.3
7	19.2	19.2	0.0	60	16.4	16.7	-0.3	7	19.2	19.4	-0.1	60	16.4	16.9	-0.5
8	18.3	18.3	0.0	62	16.8	16.7	0.2	8	18.3	18.3	0.0	62	16.8	16.6	0.2
9	16.2	16.1	0.1	63	16.9	17.0	-0.1	9	16.2	16.1	0.1	63	16.9	17.0	-0.1
10	16.4	16.5	-0.1	64	17.0	17.1	-0.1	10	16.4	16.6	-0.2	64	17.0	17.2	-0.2
11	16.5	17.0	-0.5	65	17.6	17.5	0.1	11	16.5	17.1	-0.6	65	17.6	17.5	0.1
13	17.5	17.6	-0.1	66	17.1	17.4	-0.3	13	17.5	17.6	-0.1	66	17.1	17.6	-0.4
14	18.2	17.7	0.5	72	17.9	17.6	0.3	14	18.2	17.5	0.7	72	17.9	17.5	0.4
16	18.0	17.6	0.4	73	17.3	17.3	0.1	16	18.0	17.5	0.5	73	17.3	17.3	0.0
17	17.3	17.5	-0.2	75	17.8	17.4	0.4	17	17.3	17.6	-0.3	75	17.8	17.3	0.5
18	17.4	17.3	0.1	76	17.9	17.8	0.1	18	17.4	17.3	0.1	76	17.9	17.8	0.1
20	16.7	17.2	-0.5	78	18.0	17.8	0.2	20	16.7	17.5	-0.8	78	18.0	17.6	0.4
21	17.7	17.8	-0.1	79	18.3	18.4	-0.1	21	17.7	17.7	0.0	79	18.3	18.4	-0.1
22	17.2	17.1	0.1	80	17.6	17.5	0.1	22	17.2	17.1	0.1	80	17.6	17.5	0.2
23	16.5	16.5	0.0	81	17.3	17.3	0.0	23	16.5	16.5	0.0	81	17.3	17.5	-0.2
24	16.8	16.6	0.2	82	17.2	17.1	0.1	24	16.8	16.5	0.4	82	17.2	17.1	0.1
25	17.5	17.5	0.0	84	16.6	16.8	-0.2	25	17.5	17.5	0.0	84	16.6	16.9	-0.3
26	18.9	19.0	-0.1	86	16.6	16.9	-0.3	26	18.9	19.1	-0.2	86	16.6	17.0	-0.4
27	19.8	20.0	-0.2	88	16.6	16.3	0.3	27	19.8	20.0	-0.2	88	16.6	16.2	0.4
30	17.6	17.6	0.0	89	16.4	16.5	-0.1	30	17.6	17.7	-0.1	89	16.4	16.6	-0.2
31	17.0	17.0	0.0	90	17.4	17.1	0.3	31	17.0	17.0	0.0	90	17.4	17.1	0.4
32	18.6	18.8	-0.2	92	17.5	17.0	0.5	32	18.6	19.2	-0.6	92	17.5	16.8	0.7
33	16.9	16.9	0.0	93	16.3	16.5	-0.2	33	16.9	16.8	0.1	93	16.3	16.6	-0.3
35	17.0	16.4	0.6	94	17.5	17.6	-0.1	35	17.0	16.3	0.8	94	17.5	18.3	-0.8
37	17.0	16.8	0.2	95	16.5	16.5	0.0	37	17.0	16.7	0.3	95	16.5	16.5	0.0
38	16.2	16.3	-0.1	98	17.0	17.0	0.0	38	16.2	16.5	-0.3	98	17.0	17.2	-0.2
39	15.9	16.4	-0.5	100	16.5	16.7	-0.2	39	15.9	16.5	-0.6	100	16.5	16.8	-0.3
40	16.7	17.1	-0.4					40	16.7	17.3	-0.6				
41	16.8	16.7	0.1	Av	0.7	0.6	0.2	41	16.8	16.7	0.2	Av	0.7	0.6	0.3
43	17.7	17.9	-0.2	SD	0.8	0.8	0.3	43	17.7	18.0	-0.3	SD	0.8	0.8	0.4
44	17.0	17.1	-0.1	Min	15.9	16.1	-0.6	44	17.0	17.1	-0.1	Min	15.9	16.1	-0.8
45	16.3	17.0	-0.6	Max	19.8	20.0	0.6	45	16.3	17.1	-0.8	Max	19.8	20.0	0.8
46	17.7	17.4	0.3					46	17.7	17.2	0.5				
47	18.2	17.9	0.3					47	18.2	17.8	0.4				
50	16.6	16.7	-0.1					50	16.6	16.7	-0.1				
51	18.0	18.0	0.0					51	18.0	18.1	-0.1				
53	17.6	17.5	0.1					53	17.6	17.4	0.2				

ตาราง 26 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้ายผลที่ไม่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัม

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	19.2	18.6	0.6	55	17.9	17.7	0.2	1	19.2	18.5	0.7	55	17.9	17.6	0.3
2	19.2	18.7	0.5	56	18.2	18.3	-0.1	2	19.2	18.7	0.5	56	18.2	18.3	0.0
3	18.6	19.1	-0.5	57	18.6	18.2	0.4	3	18.6	19.2	-0.6	57	18.6	18.1	0.5
4	19.1	19.4	-0.3	59	15.5	15.6	-0.1	4	19.1	19.5	-0.3	59	15.5	15.7	-0.2
5	18.2	18.4	-0.2	60	16.4	16.6	-0.2	5	18.2	18.4	-0.2	60	16.4	16.7	-0.3
6	18.7	18.9	-0.2	61	16.0	16.4	-0.4	6	18.7	18.9	-0.2	61	16.0	16.5	-0.5
7	19.2	19.1	0.1	62	16.8	16.3	0.5	7	19.2	19.1	0.1	62	16.8	16.2	0.6
8	18.3	18.4	-0.1	64	17.0	16.7	0.3	8	18.3	18.4	-0.1	64	17.0	16.5	0.5
9	16.2	16.0	0.2	65	17.6	16.9	0.7	9	16.2	16.0	0.2	65	17.6	16.8	0.8
10	16.4	16.8	-0.4	66	17.1	16.7	0.4	10	16.4	16.9	-0.5	66	17.1	16.6	0.5
11	16.5	16.4	0.1	67	16.0	16.2	-0.2	11	16.5	16.5	0.1	67	16.0	16.3	-0.3
13	17.5	17.4	0.1	69	15.8	16.0	-0.2	13	17.5	17.4	0.1	69	15.8	16.1	-0.3
14	18.2	17.4	0.8	73	17.3	17.4	-0.1	14	18.2	17.3	0.9	73	17.3	17.4	-0.1
15	18.2	17.7	0.5	74	16.4	17.0	-0.6	15	18.2	17.6	0.6	74	16.4	17.2	-0.8
17	17.3	17.1	0.2	75	17.8	17.2	0.6	17	17.3	17.1	0.2	75	17.8	17.1	0.7
19	16.6	16.6	0.0	76	17.9	17.6	0.3	19	16.6	16.7	-0.1	76	17.9	17.5	0.4
21	17.7	17.4	0.3	78	18.0	17.3	0.7	21	17.7	17.4	0.3	78	18.0	17.2	0.8
23	16.5	16.6	-0.1	79	18.3	18.0	0.4	23	16.5	16.6	-0.1	79	18.3	17.8	0.5
24	16.8	17.1	-0.3	80	17.6	17.8	-0.2	24	16.8	17.1	-0.3	80	17.6	17.8	-0.2
25	17.5	17.3	0.3	81	17.3	17.3	0.0	25	17.5	17.2	0.3	81	17.3	17.3	0.0
26	18.9	18.7	0.2	82	17.2	17.7	-0.4	26	18.9	18.7	0.2	82	17.2	17.8	-0.6
27	19.8	20.1	-0.3	84	16.6	16.7	-0.1	27	19.8	20.2	-0.4	84	16.6	16.7	-0.1
30	17.6	18.0	-0.4	86	16.6	16.9	-0.3	30	17.6	18.1	-0.5	86	16.6	17.0	-0.4
31	17.0	17.2	-0.2	88	16.6	17.3	-0.7	31	17.0	17.3	-0.3	88	16.6	17.5	-0.9
32	18.6	18.1	0.5	90	17.4	17.0	0.4	32	18.6	18.0	0.6	90	17.4	16.9	0.5
33	16.9	17.0	-0.1	92	17.5	17.3	0.2	33	16.9	17.1	-0.2	92	17.5	17.2	0.3
36	15.9	16.0	-0.1	94	17.5	17.6	-0.1	36	15.9	16.1	-0.2	94	17.5	17.8	-0.3
37	17.0	16.8	0.2	95	16.5	16.8	-0.3	37	17.0	16.7	0.3	95	16.5	16.9	-0.4
38	16.2	16.4	-0.2	98	17.0	17.4	-0.4	38	16.2	16.5	-0.3	98	17.0	17.5	-0.5
39	15.9	16.4	-0.5	100	16.5	17.1	-0.6	39	15.9	16.5	-0.6	100	16.5	17.3	-0.8
40	16.7	16.4	0.3					40	16.7	16.4	0.3				
41	16.8	17.0	-0.2	Av	17.3	17.3	0.0	41	16.8	17.1	-0.3	Av	17.3	17.4	0.0
42	16.9	16.8	0.1	SD	1.0	0.9	0.4	42	16.9	16.9	0.0	SD	1.0	0.9	0.4
43	17.7	17.2	0.5	Min	15.5	15.6	-0.7	43	17.7	17.2	0.5	Min	15.5	15.7	-0.9
44	17.0	17.0	0.0	Max	19.8	20.1	0.8	44	17.0	17.1	-0.1	Max	19.8	20.2	0.9
46	17.7	17.7	0.0					46	17.7	17.8	-0.1				
48	16.6	16.8	-0.2					48	16.6	16.9	-0.3				
50	16.6	17.0	-0.4					50	16.6	17.1	-0.5				
52	17.5	17.9	-0.4					52	17.5	18.0	-0.5				
53	17.6	17.8	-0.2					53	17.6	17.8	-0.2				

ตาราง 27 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่ง
ท้ายผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย SNV

Calibration				Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	19.2	18.9	0.3	59	15.5	16.5	-1.0	1	19.2	18.9	0.3
3	18.6	19.1	-0.5	61	16.0	16.8	-0.8	3	18.6	19.3	-0.7
4	19.1	18.9	0.2	62	16.8	16.9	-0.1	4	19.1	18.7	0.4
5	18.2	18.0	0.2	63	16.9	16.5	0.5	5	18.2	18.0	0.2
6	18.7	18.9	-0.2	65	17.6	17.2	0.4	6	18.7	18.9	-0.2
8	18.3	17.8	0.5	66	17.1	17.6	-0.5	8	18.3	17.7	0.6
9	16.2	16.1	0.1	67	16.0	16.1	-0.1	9	16.2	16.1	0.1
10	16.4	16.3	0.1	68	16.2	16.4	-0.2	10	16.4	16.3	0.1
11	16.5	16.2	0.3	69	15.8	16.4	-0.6	11	16.5	16.0	0.5
17	17.3	17.3	0.0	70	17.7	17.5	0.2	17	17.3	17.3	0.0
18	17.4	17.1	0.3	73	17.3	17.7	-0.3	18	17.4	17.1	0.3
19	16.6	17.1	-0.5	74	16.4	16.6	-0.2	19	16.6	17.1	-0.5
20	16.7	16.8	-0.1	75	17.8	17.1	0.7	20	16.7	16.8	-0.1
21	17.7	17.6	0.1	76	17.9	17.6	0.3	21	17.7	17.6	0.1
22	17.2	17.2	0.0	79	18.3	18.2	0.1	22	17.2	17.2	0.0
24	16.8	16.9	-0.1	80	17.6	17.7	-0.1	24	16.8	16.9	-0.1
25	17.5	16.6	0.9	81	17.3	17.8	-0.5	25	17.5	16.5	1.0
29	19.3	18.8	0.5	82	17.2	17.9	-0.7	29	19.3	18.8	0.5
30	17.6	17.8	-0.2	84	16.6	16.8	-0.2	30	17.6	17.9	-0.3
31	17.0	16.8	0.2	86	16.6	16.6	0.0	31	17.0	16.8	0.2
32	18.6	18.5	0.1	89	16.4	16.5	-0.1	32	18.6	18.5	0.1
33	16.9	17.5	-0.6	90	17.4	17.6	-0.2	33	16.9	17.6	-0.7
34	18.0	17.9	0.2	91	18.1	17.2	0.9	34	18.0	17.8	0.2
36	15.9	16.0	-0.1	92	17.5	17.4	0.1	36	15.9	16.0	-0.1
37	17.0	17.1	-0.1	93	16.3	16.7	-0.4	37	17.0	17.2	-0.2
38	16.2	16.4	-0.2	95	16.5	17.2	-0.7	38	16.2	16.4	-0.2
39	15.9	15.9	0.0	97	16.5	17.4	-0.9	39	15.9	15.9	0.0
40	16.7	16.7	0.0	98	17.0	16.4	0.6	40	16.7	16.7	0.0
41	16.8	16.1	0.7	99	16.1	16.8	-0.7	41	16.8	16.0	0.8
43	17.7	17.5	0.2	100	16.5	17.3	-0.7	43	17.7	17.5	0.2
44	17.0	16.5	0.5					44	17.0	16.5	0.5
46	17.7	17.4	0.3	Av	17.2	17.2	0.0	46	17.7	17.4	0.3
47	18.2	17.5	0.7	SD	0.9	0.8	0.4	47	18.2	17.4	0.8
48	16.6	17.3	-0.7	Min	15.5	15.9	-1.0	48	16.6	17.4	-0.8
50	16.6	16.3	0.3	Max	19.3	19.1	0.9	50	16.6	16.2	0.4
51	18.0	17.7	0.3					51	18.0	17.6	0.4
53	17.6	17.3	0.3					53	17.6	17.3	0.3
56	18.2	17.7	0.5					56	18.2	17.6	0.6
57	18.6	17.9	0.7					57	18.6	17.9	0.7
58	16.5	16.5	0.0					58	16.5	16.5	0.0

ตาราง 28 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้ายผลที่
ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย MSC

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
3	18.6	17.8	0.8	54	19.7	20.1	-0.4	3	18.6	17.8	0.8	54	19.7	20.7	-1.0
4	19.1	19.3	-0.2	55	17.9	18.3	-0.4	4	19.1	19.2	-0.1	55	17.9	18.2	-0.3
5	18.2	17.6	0.6	56	18.2	18.2	0.0	5	18.2	17.5	0.7	56	18.2	18.1	0.1
6	18.7	18.2	0.5	57	18.6	17.8	0.8	6	18.7	18.1	0.6	57	18.6	17.7	0.9
7	19.2	18.3	0.9	58	16.5	16.2	0.3	7	19.2	18.3	1.0	58	16.5	16.0	0.5
8	18.3	18.0	0.3	59	15.5	16.2	-0.7	8	18.3	17.9	0.4	59	15.5	16.1	-0.6
9	16.2	16.1	0.1	60	16.4	16.8	-0.4	9	16.2	16.1	0.1	60	16.4	16.8	-0.4
10	16.4	16.6	-0.2	61	16.0	16.7	-0.7	10	16.4	16.4	0.0	61	16.0	16.7	-0.7
11	16.5	16.6	-0.1	62	16.8	16.6	0.2	11	16.5	16.3	0.2	62	16.8	16.6	0.2
13	17.5	17.0	0.5	63	16.9	16.7	0.2	13	17.5	17.0	0.5	63	16.9	16.7	0.2
14	18.2	17.5	0.7	64	17.0	16.5	0.5	14	18.2	17.5	0.7	64	17.0	16.2	0.8
15	18.2	17.7	0.5	65	17.6	17.5	0.2	15	18.2	17.7	0.5	65	17.6	17.4	0.2
16	18.0	17.4	0.6	66	17.1	17.7	-0.6	16	18.0	17.4	0.6	66	17.1	17.7	-0.6
17	17.3	17.2	0.1	68	16.2	15.7	0.5	17	17.3	17.2	0.1	68	16.2	14.5	1.7
19	16.6	17.0	-0.4	70	17.7	17.4	0.3	19	16.6	17.0	-0.4	70	17.7	17.4	0.3
21	17.7	17.4	0.3	72	17.9	17.2	0.7	21	17.7	17.4	0.3	72	17.9	17.2	0.7
22	17.2	17.0	0.2	73	17.3	17.6	-0.3	22	17.2	17.0	0.2	73	17.3	17.6	-0.3
23	16.5	17.4	-0.9	75	17.8	17.5	0.3	23	16.5	17.3	-0.8	75	17.8	17.5	0.3
24	16.8	17.1	-0.3	77	18.1	17.2	0.9	24	16.8	17.1	-0.3	77	18.1	17.4	0.7
25	17.5	17.2	0.3	79	18.3	18.0	0.3	25	17.5	17.2	0.3	79	18.3	18.1	0.2
30	17.6	18.1	-0.5	80	17.6	17.7	-0.1	30	17.6	18.2	-0.6	80	17.6	17.8	-0.2
32	18.6	18.4	0.2	81	17.3	17.4	-0.1	32	18.6	18.4	0.2	81	17.3	17.4	-0.1
34	18.0	18.0	0.0	82	17.2	17.7	-0.5	34	18.0	18.0	0.0	82	17.2	17.8	-0.5
36	15.9	16.1	-0.1	84	16.6	16.6	0.0	36	15.9	16.1	-0.2	84	16.6	16.6	0.0
37	17.0	17.1	-0.1	86	16.6	16.9	-0.3	37	17.0	17.0	0.0	86	16.6	16.9	-0.3
38	16.2	16.6	-0.4	89	16.4	16.9	-0.5	38	16.2	16.7	-0.5	89	16.4	16.8	-0.4
39	15.9	16.6	-0.7	92	17.5	17.7	-0.2	39	15.9	16.6	-0.7	92	17.5	17.7	-0.2
40	16.7	17.0	-0.3	94	17.5	17.8	-0.3	40	16.7	17.0	-0.3	94	17.5	18.4	-0.9
41	16.8	16.5	0.3	95	16.5	17.0	-0.5	41	16.8	16.4	0.4	95	16.5	17.0	-0.5
42	16.9	17.5	-0.6	97	16.5	17.2	-0.7	42	16.9	17.5	-0.6	97	16.5	17.2	-0.7
43	17.7	17.4	0.3	98	17.0	16.9	0.1	43	17.7	17.4	0.3	98	17.0	16.9	0.1
44	17.0	17.0	0.0					44	17.0	17.0	0.0				
46	17.7	17.9	-0.2	Av	17.4	17.4	0.0	46	17.7	17.9	-0.2	Av	17.4	17.3	0.0
47	18.2	18.5	-0.3	SD	0.9	0.7	0.5	47	18.2	18.5	-0.3	SD	0.9	0.8	0.5
49	18.1	18.2	-0.1	Min	15.5	15.7	-0.9	49	18.1	18.0	0.2	Min	15.5	14.5	-1.0
50	16.6	17.4	-0.8	Max	19.7	20.1	0.9	50	16.6	17.4	-0.8	Max	19.7	20.7	1.7
51	18.0	17.4	0.6					51	18.0	17.4	0.6				
52	17.5	18.1	-0.6					52	17.5	18.2	-0.7				
53	17.6	17.6	0.0					53	17.6	17.6	0.0				

ตาราง 29 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้ายผลที่
ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย First derivative

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	19.2	18.6	0.6	53	17.6	18.0	-0.4	1	19.2	18.5	0.7	53	17.6	18.0	-0.4
3	18.6	18.7	-0.1	55	17.9	17.4	0.5	3	18.6	18.7	-0.1	55	17.9	17.3	0.6
4	19.1	18.9	0.2	56	18.2	17.9	0.3	4	19.1	18.8	0.3	56	18.2	17.9	0.3
5	18.2	17.9	0.3	57	18.6	17.8	0.8	5	18.2	17.9	0.3	57	18.6	17.8	0.9
6	18.7	19.1	-0.4	58	16.5	17.0	-0.4	6	18.7	19.1	-0.4	58	16.5	17.0	-0.5
7	19.2	18.6	0.6	62	16.8	16.9	-0.1	7	19.2	18.5	0.7	62	16.8	16.9	-0.1
8	18.3	17.9	0.4	63	16.9	16.6	0.3	8	18.3	17.9	0.4	63	16.9	16.6	0.3
9	16.2	15.9	0.3	65	17.6	17.1	0.5	9	16.2	15.9	0.3	65	17.6	17.1	0.5
10	16.4	16.7	-0.3	66	17.1	17.5	-0.4	10	16.4	16.7	-0.3	66	17.1	17.6	-0.5
11	16.5	17.0	-0.5	68	16.2	16.4	-0.2	11	16.5	17.2	-0.7	68	16.2	16.8	-0.6
13	17.5	17.0	0.5	70	17.7	17.3	0.4	13	17.5	17.0	0.5	70	17.7	17.2	0.5
14	18.2	17.5	0.7	73	17.3	17.0	0.3	14	18.2	17.4	0.8	73	17.3	17.0	0.3
18	17.4	17.3	0.1	74	16.4	16.3	0.1	18	17.4	17.3	0.1	74	16.4	16.3	0.1
19	16.6	17.1	-0.5	76	17.9	18.4	-0.5	19	16.6	17.2	-0.6	76	17.9	18.5	-0.6
21	17.7	17.4	0.3	77	18.1	18.0	0.1	21	17.7	17.4	0.3	77	18.1	17.9	0.2
22	17.2	17.3	-0.1	78	18.0	17.3	0.7	22	17.2	17.3	-0.1	78	18.0	17.3	0.7
23	16.5	17.1	-0.6	79	18.3	18.8	-0.5	23	16.5	17.2	-0.7	79	18.3	18.8	-0.5
24	16.8	16.5	0.3	80	17.6	17.7	-0.1	24	16.8	16.5	0.3	80	17.6	17.7	-0.1
26	18.9	18.6	0.3	81	17.3	17.4	-0.1	26	18.9	18.5	0.4	81	17.3	17.4	-0.1
27	19.8	19.9	-0.1	82	17.2	17.8	-0.6	27	19.8	19.9	-0.1	82	17.2	17.8	-0.6
29	19.3	18.7	0.6	84	16.6	16.8	-0.2	29	19.3	18.6	0.7	84	16.6	16.8	-0.2
30	17.6	17.9	-0.3	86	16.6	16.2	0.4	30	17.6	17.9	-0.3	86	16.6	16.2	0.4
32	18.6	19.2	-0.6	89	16.4	16.5	-0.1	32	18.6	19.3	-0.7	89	16.4	16.5	-0.1
33	16.9	17.0	-0.1	90	17.4	17.6	-0.1	33	16.9	17.1	-0.2	90	17.4	17.7	-0.3
34	18.0	17.4	0.6	92	17.5	17.7	-0.2	34	18.0	17.4	0.7	92	17.5	17.7	-0.2
35	17.0	16.6	0.4	93	16.3	16.2	0.1	35	17.0	16.5	0.5	93	16.3	16.2	0.1
36	15.9	15.9	0.0	95	16.5	17.3	-0.8	36	15.9	15.9	0.0	95	16.5	17.3	-0.8
37	17.0	17.5	-0.5	98	17.0	16.4	0.6	37	17.0	17.5	-0.5	98	17.0	16.4	0.6
38	16.2	16.5	-0.3	99	16.1	16.9	-0.8	38	16.2	16.7	-0.5	99	16.1	17.0	-0.9
39	15.9	16.4	-0.5	100	16.5	17.1	-0.6	39	15.9	16.5	-0.6	100	16.5	17.1	-0.6
40	16.7	17.2	-0.5					40	16.7	17.3	-0.6				
42	16.9	17.5	-0.6	Av	17.4	17.4	0.0	42	16.9	17.6	-0.7	Av	17.4	17.4	0.0
43	17.7	17.5	0.2	SD	0.9	0.8	0.4	43	17.7	17.5	0.2	SD	0.9	0.8	0.5
44	17.0	16.8	0.2	Min	15.9	15.9	-0.8	44	17.0	16.7	0.3	Min	15.9	15.9	-0.9
46	17.7	17.6	0.1	Max	19.8	19.9	0.8	46	17.7	17.6	0.1	Max	19.8	19.9	0.9
47	18.2	17.8	0.4					47	18.2	17.8	0.4				
49	18.1	17.6	0.5					49	18.1	17.4	0.7				
50	16.6	17.0	-0.4					50	16.6	17.0	-0.4				
51	18.0	18.1	-0.1					51	18.0	18.1	-0.1				
52	17.5	17.6	-0.1					52	17.5	17.6	-0.1				

ตาราง 30 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้ายผลที่
ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย Second derivative

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
3	18.6	18.5	0.1	58	16.5	16.0	0.5	3	18.6	18.4	0.2	58	16.5	16.0	0.5
4	19.1	18.6	0.5	59	15.5	16.2	-0.7	4	19.1	18.4	0.7	59	15.5	16.3	-0.8
5	18.2	18.4	-0.2	60	16.4	16.8	-0.4	5	18.2	18.3	-0.1	60	16.4	16.8	-0.4
6	18.7	18.9	-0.2	61	16.0	16.8	-0.8	6	18.7	18.9	-0.2	61	16.0	16.9	-0.9
7	19.2	19.3	0.0	62	16.8	16.4	0.4	7	19.2	19.2	0.0	62	16.8	16.4	0.4
8	18.3	18.7	-0.4	65	17.6	17.4	0.2	8	18.3	18.6	-0.3	65	17.6	17.4	0.2
9	16.2	16.0	0.2	66	17.1	17.3	-0.2	9	16.2	16.0	0.2	66	17.1	17.4	-0.3
10	16.4	16.7	-0.3	67	16.0	15.8	0.2	10	16.4	16.8	-0.4	67	16.0	16.4	-0.4
11	16.5	16.8	-0.3	68	16.2	16.3	-0.1	11	16.5	17.0	-0.5	68	16.2	16.6	-0.4
13	17.5	17.3	0.2	70	17.7	17.3	0.5	13	17.5	17.3	0.2	70	17.7	17.2	0.5
14	18.2	17.8	0.4	73	17.3	17.3	0.0	14	18.2	17.7	0.5	73	17.3	17.3	0.0
15	18.2	17.8	0.4	74	16.4	16.9	-0.5	15	18.2	17.7	0.5	74	16.4	17.0	-0.6
16	18.0	17.5	0.5	75	17.8	17.5	0.3	16	18.0	17.4	0.6	75	17.8	17.5	0.3
17	17.3	17.0	0.3	76	17.9	17.6	0.3	17	17.3	17.0	0.4	76	17.9	17.5	0.4
18	17.4	17.2	0.2	77	18.1	17.7	0.4	18	17.4	17.2	0.2	77	18.1	17.6	0.5
21	17.7	17.4	0.3	78	18.0	17.4	0.6	21	17.7	17.3	0.4	78	18.0	17.3	0.7
22	17.2	17.3	-0.1	79	18.3	18.4	-0.1	22	17.2	17.3	-0.1	79	18.3	18.3	0.0
23	16.5	17.4	-0.9	80	17.6	18.0	-0.4	23	16.5	17.4	-0.9	80	17.6	18.0	-0.4
24	16.8	17.2	-0.4	81	17.3	17.2	0.1	24	16.8	17.3	-0.5	81	17.3	17.2	0.1
25	17.5	17.1	0.4	82	17.2	17.6	-0.4	25	17.5	17.0	0.5	82	17.2	17.7	-0.5
26	18.9	18.8	0.1	84	16.6	16.4	0.2	26	18.9	18.6	0.3	84	16.6	16.4	0.2
27	19.8	19.6	0.2	86	16.6	16.2	0.4	27	19.8	19.3	0.5	86	16.6	16.2	0.4
32	18.6	18.8	-0.1	88	16.6	16.9	-0.3	32	18.6	18.7	-0.1	88	16.6	16.9	-0.3
34	18.0	18.1	-0.1	89	16.4	16.4	0.0	34	18.0	18.1	-0.1	89	16.4	16.5	-0.1
36	15.9	15.5	0.4	90	17.4	17.2	0.2	36	15.9	15.5	0.4	90	17.4	17.3	0.1
37	17.0	16.9	0.1	92	17.5	17.2	0.3	37	17.0	16.9	0.1	92	17.5	17.2	0.3
38	16.2	16.5	-0.3	93	16.3	16.3	0.0	38	16.2	16.6	-0.4	93	16.3	16.4	-0.1
39	15.9	16.3	-0.4	94	17.5	17.8	-0.3	39	15.9	16.4	-0.5	94	17.5	18.1	-0.6
40	16.7	17.1	-0.4	95	16.5	17.0	-0.5	40	16.7	17.1	-0.4	95	16.5	17.1	-0.6
42	16.9	17.5	-0.5	98	17.0	16.9	0.1	42	16.9	17.5	-0.6	98	17.0	16.9	0.1
43	17.7	17.6	0.1					43	17.7	17.6	0.1				
44	17.0	17.1	-0.1	Av	17.4	17.4	0.0	44	17.0	17.2	-0.2	Av	17.4	17.4	0.0
46	17.7	18.1	-0.4	SD	0.9	0.8	0.4	46	17.7	18.1	-0.4	SD	0.9	0.8	0.4
47	18.2	18.2	0.0	Min	15.5	15.5	-0.9	47	18.2	18.2	0.0	Min	15.5	15.5	-0.9
51	18.0	18.0	0.0	Max	19.8	19.6	0.6	51	18.0	17.9	0.1	Max	19.8	19.3	0.8
52	17.5	17.7	-0.2					52	17.5	17.8	-0.3				
53	17.6	17.9	-0.3					53	17.6	17.9	-0.3				
55	17.9	17.5	0.4					55	17.9	17.1	0.8				
56	18.2	18.1	0.2					56	18.2	18.0	0.2				
57	18.6	18.1	0.6					57	18.6	17.9	0.7				

ตาราง 31 ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้ายผลที่
ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย First derivative ร่วมกับ SNV

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	19.2	18.6	0.6	51	18.0	17.9	0.1	1	19.2	18.5	0.7	51	18.0	17.8	0.2
3	18.6	18.6	0.0	52	17.5	17.3	0.2	3	18.6	18.6	0.0	52	17.5	17.3	0.2
4	19.1	19.2	-0.1	53	17.6	17.8	-0.2	4	19.1	19.2	-0.1	53	17.6	17.8	-0.2
5	18.2	17.8	0.4	56	18.2	17.9	0.3	5	18.2	17.7	0.5	56	18.2	17.8	0.4
6	18.7	19.2	-0.5	57	18.6	17.9	0.7	6	18.7	19.2	-0.5	57	18.6	17.8	0.8
7	19.2	18.9	0.3	58	16.5	16.4	0.1	7	19.2	18.8	0.4	58	16.5	16.4	0.1
8	18.3	17.9	0.4	59	15.5	16.4	-0.9	8	18.3	17.9	0.5	59	15.5	16.6	-1.1
9	16.2	16.0	0.2	62	16.8	16.8	0.0	9	16.2	16.0	0.3	62	16.8	16.8	0.0
10	16.4	16.2	0.2	63	16.9	16.6	0.3	10	16.4	16.2	0.2	63	16.9	16.6	0.3
11	16.5	16.3	0.2	65	17.6	17.3	0.4	11	16.5	16.2	0.3	65	17.6	17.2	0.4
13	17.5	17.2	0.3	66	17.1	17.3	-0.2	13	17.5	17.1	0.4	66	17.1	17.4	-0.2
14	18.2	17.5	0.7	67	16.0	16.2	-0.2	14	18.2	17.5	0.7	67	16.0	16.3	-0.3
17	17.3	17.0	0.3	68	16.2	16.3	-0.1	17	17.3	17.0	0.3	68	16.2	16.3	-0.1
18	17.4	17.1	0.3	70	17.7	17.5	0.2	18	17.4	17.1	0.3	70	17.7	17.5	0.2
19	16.6	17.1	-0.5	73	17.3	17.3	0.0	19	16.6	17.1	-0.5	73	17.3	17.3	0.0
20	16.7	17.3	-0.6	74	16.4	16.7	-0.3	20	16.7	17.4	-0.7	74	16.4	16.7	-0.3
21	17.7	17.6	0.1	75	17.8	17.3	0.5	21	17.7	17.6	0.1	75	17.8	17.2	0.6
22	17.2	17.2	0.0	76	17.9	18.0	-0.1	22	17.2	17.2	0.0	76	17.9	18.0	-0.1
23	16.5	17.1	-0.6	77	18.1	17.9	0.2	23	16.5	17.1	-0.6	77	18.1	17.9	0.2
24	16.8	16.8	0.0	79	18.3	18.8	-0.5	24	16.8	16.8	0.0	79	18.3	18.8	-0.5
26	18.9	18.3	0.6	80	17.6	17.8	-0.2	26	18.9	18.3	0.6	80	17.6	17.8	-0.2
27	19.8	19.7	0.1	81	17.3	17.5	-0.2	27	19.8	19.7	0.2	81	17.3	17.5	-0.2
29	19.3	18.8	0.5	84	16.6	16.5	0.1	29	19.3	18.7	0.6	84	16.6	16.5	0.1
30	17.6	17.8	-0.2	86	16.6	16.5	0.2	30	17.6	17.9	-0.3	86	16.6	16.5	0.1
32	18.6	19.5	-0.9	89	16.4	16.6	-0.2	32	18.6	19.6	-1.0	89	16.4	16.7	-0.3
33	16.9	17.2	-0.3	90	17.4	17.5	-0.1	33	16.9	17.3	-0.4	90	17.4	17.9	-0.5
34	18.0	17.6	0.4	92	17.5	17.7	-0.2	34	18.0	17.6	0.5	92	17.5	17.7	-0.2
35	17.0	16.4	0.6	93	16.3	16.6	-0.3	35	17.0	16.4	0.6	93	16.3	16.7	-0.4
36	15.9	15.9	0.0	98	17.0	16.8	0.2	36	15.9	16.0	-0.1	98	17.0	16.8	0.2
37	17.0	17.2	-0.2	100	16.5	17.3	-0.8	37	17.0	17.2	-0.2	100	16.5	17.4	-0.9
38	16.2	16.4	-0.2					38	16.2	16.5	-0.2				
39	15.9	16.5	-0.6	Av	17.4	17.4	0.0	39	15.9	16.6	-0.7	Av	17.4	17.4	0.0
40	16.7	17.1	-0.4	SD	0.9	0.9	0.4	40	16.7	17.2	-0.5	SD	0.9	0.9	0.4
41	16.8	16.2	0.6	Min	15.5	15.9	-0.9	41	16.8	16.1	0.7	Min	15.5	16.0	-1.1
42	16.9	17.7	-0.8	Max	19.8	19.7	0.7	42	16.9	17.7	-0.8	Max	19.8	19.7	0.8
43	17.7	17.7	0.0					43	17.7	17.7	0.0				
44	17.0	17.0	0.0					44	17.0	17.0	0.0				
46	17.7	17.7	0.0					46	17.7	17.7	0.0				
47	18.2	17.8	0.4					47	18.2	17.7	0.5				
50	16.6	17.0	-0.4					50	16.6	17.0	-0.4				

ตาราง 32 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้าวผลที่ไม่ผ่านการ
ปรับแต่งสเปกตรัม

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	0.46	0.43	0.03	54	0.38	0.39	-0.01	1	0.46	0.42	0.04	54	0.38	0.40	-0.02
4	0.41	0.42	-0.01	56	0.35	0.38	-0.03	4	0.41	0.42	-0.01	56	0.35	0.39	-0.04
5	0.51	0.49	0.02	57	0.31	0.28	0.03	5	0.51	0.49	0.02	57	0.31	0.28	0.03
6	0.53	0.53	0.00	58	0.34	0.30	0.04	6	0.53	0.53	0.00	58	0.34	0.29	0.05
7	0.44	0.41	0.03	60	0.27	0.28	-0.01	7	0.44	0.41	0.03	60	0.27	0.28	-0.01
8	0.48	0.46	0.02	61	0.27	0.27	0.00	8	0.48	0.46	0.02	61	0.27	0.27	0.00
9	0.31	0.35	-0.04	63	0.21	0.28	-0.07	9	0.31	0.35	-0.04	63	0.21	0.28	-0.07
10	0.30	0.28	0.02	64	0.20	0.22	-0.02	10	0.30	0.28	0.02	64	0.20	0.22	-0.02
13	0.28	0.27	0.01	66	0.31	0.31	0.00	13	0.28	0.27	0.01	66	0.31	0.31	0.00
14	0.25	0.23	0.02	67	0.25	0.27	-0.02	14	0.25	0.23	0.02	67	0.25	0.27	-0.02
15	0.39	0.38	0.01	68	0.35	0.34	0.01	15	0.39	0.38	0.01	68	0.35	0.33	0.02
16	0.30	0.22	0.08	70	0.22	0.26	-0.04	16	0.30	0.21	0.09	70	0.22	0.26	-0.04
17	0.25	0.30	-0.05	72	0.33	0.24	0.09	17	0.25	0.31	-0.06	72	0.33	0.24	0.09
18	0.31	0.30	0.01	74	0.22	0.22	0.00	18	0.31	0.30	0.01	74	0.22	0.22	0.00
19	0.23	0.29	-0.06	75	0.21	0.21	0.00	19	0.23	0.30	-0.07	75	0.21	0.21	0.00
20	0.31	0.27	0.04	78	0.35	0.29	0.06	20	0.31	0.27	0.04	78	0.35	0.29	0.06
21	0.33	0.30	0.03	80	0.29	0.31	-0.02	21	0.33	0.30	0.03	80	0.29	0.32	-0.03
22	0.30	0.26	0.04	82	0.31	0.29	0.02	22	0.30	0.26	0.04	82	0.31	0.29	0.02
24	0.25	0.27	-0.02	84	0.26	0.30	-0.04	24	0.25	0.27	-0.02	84	0.26	0.31	-0.05
25	0.19	0.24	-0.05	85	0.23	0.28	-0.05	25	0.19	0.24	-0.05	85	0.23	0.29	-0.06
26	0.30	0.25	0.05	86	0.28	0.23	0.05	26	0.30	0.24	0.06	86	0.28	0.22	0.06
27	0.23	0.29	-0.06	88	0.24	0.21	0.03	27	0.23	0.31	-0.08	88	0.24	0.20	0.04
28	0.40	0.33	0.07	90	0.27	0.29	-0.02	28	0.40	0.32	0.08	90	0.27	0.29	-0.02
29	0.35	0.35	0.00	91	0.26	0.28	-0.02	29	0.35	0.35	0.00	91	0.26	0.28	-0.02
32	0.21	0.26	-0.05	93	0.22	0.28	-0.06	32	0.21	0.27	-0.06	93	0.22	0.29	-0.07
34	0.35	0.40	-0.05	95	0.25	0.25	0.00	34	0.35	0.42	-0.07	95	0.25	0.25	0.00
35	0.31	0.32	-0.01	96	0.23	0.23	0.00	35	0.31	0.33	-0.02	96	0.23	0.23	0.00
36	0.28	0.26	0.02	98	0.19	0.18	0.01	36	0.28	0.26	0.02	98	0.19	0.18	0.01
37	0.26	0.28	-0.02	99	0.22	0.23	-0.01	37	0.26	0.29	-0.03	99	0.22	0.23	-0.01
38	0.27	0.25	0.02	100	0.19	0.22	-0.03	38	0.27	0.25	0.02	100	0.19	0.23	-0.04
39	0.23	0.27	-0.04					39	0.23	0.27	-0.04				
41	0.19	0.20	-0.01	Av	0.29	0.29	0.00	41	0.19	0.20	-0.01	Av	0.29	0.29	0.00
43	0.28	0.29	-0.01	SD	0.08	0.07	0.04	43	0.28	0.29	-0.01	SD	0.08	0.07	0.04
44	0.30	0.23	0.07	Min	0.19	0.18	-0.07	44	0.30	0.23	0.07	Min	0.19	0.18	-0.08
45	0.23	0.24	-0.01	Max	0.53	0.53	0.09	45	0.23	0.24	-0.01	Max	0.53	0.53	0.09
46	0.33	0.29	0.04					46	0.33	0.29	0.04				
47	0.25	0.28	-0.03					47	0.25	0.28	-0.03				
49	0.26	0.27	-0.01					49	0.26	0.27	-0.01				
50	0.20	0.25	-0.05					50	0.20	0.25	-0.05				
53	0.46	0.38	0.08					53	0.46	0.37	0.09				

ตาราง 33 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้าวผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย SNV

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
2	0.46	0.47	-0.01	61	0.27	0.26	0.01	2	0.46	0.47	-0.01	61	0.27	0.26	0.01
4	0.41	0.40	0.01	62	0.22	0.25	-0.03	4	0.41	0.40	0.01	62	0.22	0.25	-0.03
6	0.53	0.47	0.06	63	0.21	0.25	-0.04	6	0.53	0.45	0.08	63	0.21	0.25	-0.04
7	0.44	0.42	0.02	64	0.20	0.21	-0.01	7	0.44	0.41	0.03	64	0.20	0.21	-0.01
8	0.48	0.44	0.04	66	0.31	0.33	-0.02	8	0.48	0.43	0.05	66	0.31	0.33	-0.02
9	0.31	0.31	0.00	67	0.25	0.28	-0.03	9	0.31	0.31	0.00	67	0.25	0.29	-0.04
10	0.30	0.25	0.05	68	0.35	0.34	0.01	10	0.30	0.25	0.05	68	0.35	0.33	0.02
13	0.28	0.26	0.02	70	0.22	0.25	-0.03	13	0.28	0.26	0.02	70	0.22	0.26	-0.04
14	0.25	0.25	0.00	71	0.29	0.25	0.04	14	0.25	0.25	0.00	71	0.29	0.24	0.05
15	0.39	0.38	0.01	72	0.33	0.27	0.06	15	0.39	0.38	0.01	72	0.33	0.26	0.07
16	0.30	0.23	0.07	73	0.27	0.28	-0.01	16	0.30	0.22	0.08	73	0.27	0.28	-0.01
18	0.31	0.27	0.04	74	0.22	0.24	-0.02	18	0.31	0.27	0.04	74	0.22	0.24	-0.02
19	0.23	0.27	-0.04	75	0.21	0.24	-0.03	19	0.23	0.27	-0.04	75	0.21	0.25	-0.04
20	0.31	0.28	0.03	76	0.21	0.29	-0.08	20	0.31	0.28	0.03	76	0.21	0.31	-0.10
21	0.33	0.31	0.02	78	0.35	0.28	0.07	21	0.33	0.31	0.02	78	0.35	0.28	0.07
22	0.30	0.27	0.03	80	0.29	0.31	-0.02	22	0.30	0.27	0.03	80	0.29	0.31	-0.02
24	0.25	0.27	-0.02	82	0.31	0.29	0.02	24	0.25	0.27	-0.02	82	0.31	0.28	0.03
25	0.19	0.24	-0.05	84	0.26	0.26	0.00	25	0.19	0.25	-0.06	84	0.26	0.26	0.00
27	0.23	0.27	-0.04	85	0.23	0.28	-0.05	27	0.23	0.28	-0.05	85	0.23	0.28	-0.05
29	0.35	0.34	0.01	86	0.28	0.25	0.03	29	0.35	0.34	0.01	86	0.28	0.24	0.04
32	0.21	0.23	-0.02	88	0.24	0.22	0.02	32	0.21	0.23	-0.02	88	0.24	0.22	0.02
34	0.35	0.38	-0.03	90	0.27	0.29	-0.02	34	0.35	0.37	-0.02	90	0.27	0.29	-0.02
35	0.31	0.27	0.04	91	0.26	0.29	-0.03	35	0.31	0.27	0.04	91	0.26	0.29	-0.03
36	0.28	0.25	0.03	92	0.35	0.27	0.08	36	0.28	0.25	0.03	92	0.35	0.26	0.09
37	0.26	0.27	-0.01	93	0.22	0.30	-0.08	37	0.26	0.27	-0.01	93	0.22	0.31	-0.09
38	0.27	0.24	0.03	95	0.25	0.24	0.01	38	0.27	0.24	0.03	95	0.25	0.24	0.01
40	0.25	0.32	-0.07	96	0.23	0.24	-0.01	40	0.25	0.32	-0.07	96	0.23	0.24	-0.01
41	0.19	0.21	-0.02	98	0.19	0.16	0.03	41	0.19	0.21	-0.02	98	0.19	0.15	0.04
43	0.28	0.28	0.00	99	0.22	0.23	-0.01	43	0.28	0.28	0.00	99	0.22	0.23	-0.01
44	0.30	0.23	0.07	100	0.19	0.24	-0.05	44	0.30	0.22	0.08	100	0.19	0.25	-0.06
45	0.23	0.24	-0.01					45	0.23	0.24	-0.01				
46	0.33	0.29	0.04	Av	0.29	0.29	0.00	46	0.33	0.28	0.05	Av	0.29	0.28	0.00
47	0.25	0.29	-0.04	SD	0.07	0.06	0.04	47	0.25	0.29	-0.04	SD	0.07	0.06	0.04
49	0.26	0.28	-0.02	Min	0.19	0.16	-0.08	49	0.26	0.29	-0.03	Min	0.19	0.15	-0.10
50	0.20	0.26	-0.06	Max	0.53	0.47	0.08	50	0.20	0.26	-0.06	Max	0.53	0.47	0.09
54	0.38	0.41	-0.03					54	0.38	0.43	-0.05				
55	0.33	0.29	0.04					55	0.33	0.28	0.05				
56	0.35	0.38	-0.03					56	0.35	0.39	-0.04				
57	0.31	0.29	0.02					57	0.31	0.28	0.03				
60	0.27	0.26	0.01					60	0.27	0.25	0.02				

ตาราง 34 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งช่วงผลที่ปรับแต่ง
สเปกตรัมด้วย MSC

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
4	0.41	0.42	-0.01	55	0.33	0.33	0.00	4	0.41	0.44	-0.03	55	0.33	0.33	0.00
5	0.51	0.41	0.10	56	0.35	0.39	-0.04	5	0.51	0.40	0.11	56	0.35	0.39	-0.04
6	0.53	0.43	0.10	57	0.31	0.28	0.03	6	0.53	0.41	0.12	57	0.31	0.29	0.02
7	0.44	0.44	0.00	60	0.27	0.29	-0.02	7	0.44	0.46	-0.02	60	0.27	0.30	-0.03
8	0.48	0.44	0.04	61	0.27	0.24	0.03	8	0.48	0.44	0.04	61	0.27	0.24	0.03
9	0.31	0.31	0.00	62	0.22	0.29	-0.07	9	0.31	0.31	0.00	62	0.22	0.30	-0.08
10	0.30	0.24	0.06	63	0.21	0.26	-0.05	10	0.30	0.24	0.06	63	0.21	0.26	-0.05
13	0.28	0.24	0.04	64	0.20	0.22	-0.02	13	0.28	0.24	0.04	64	0.20	0.23	-0.03
14	0.25	0.24	0.01	66	0.31	0.37	-0.06	14	0.25	0.24	0.01	66	0.31	0.37	-0.06
16	0.30	0.21	0.09	67	0.25	0.31	-0.06	16	0.30	0.20	0.10	67	0.25	0.32	-0.07
17	0.25	0.29	-0.04	70	0.22	0.30	-0.08	17	0.25	0.30	-0.05	70	0.22	0.30	-0.08
18	0.31	0.30	0.01	71	0.29	0.24	0.05	18	0.31	0.30	0.01	71	0.29	0.24	0.05
19	0.23	0.28	-0.05	72	0.33	0.26	0.07	19	0.23	0.28	-0.05	72	0.33	0.25	0.08
20	0.31	0.26	0.05	73	0.27	0.31	-0.04	20	0.31	0.26	0.05	73	0.27	0.31	-0.04
21	0.33	0.30	0.03	74	0.22	0.24	-0.02	21	0.33	0.30	0.03	74	0.22	0.25	-0.03
22	0.30	0.26	0.04	75	0.21	0.24	-0.03	22	0.30	0.25	0.05	75	0.21	0.24	-0.03
23	0.34	0.30	0.04	80	0.29	0.32	-0.03	23	0.34	0.30	0.04	80	0.29	0.32	-0.03
24	0.25	0.30	-0.05	82	0.31	0.33	-0.02	24	0.25	0.30	-0.05	82	0.31	0.33	-0.02
25	0.19	0.22	-0.03	84	0.26	0.28	-0.02	25	0.19	0.22	-0.03	84	0.26	0.28	-0.02
26	0.30	0.24	0.06	85	0.23	0.31	-0.08	26	0.30	0.22	0.08	85	0.23	0.32	-0.09
27	0.23	0.25	-0.02	86	0.28	0.27	0.01	27	0.23	0.24	-0.01	86	0.28	0.26	0.02
28	0.40	0.30	0.10	87	0.28	0.23	0.05	28	0.40	0.28	0.12	87	0.28	0.23	0.05
29	0.35	0.32	0.03	88	0.24	0.28	-0.04	29	0.35	0.32	0.03	88	0.24	0.30	-0.06
32	0.21	0.26	-0.05	90	0.27	0.31	-0.04	32	0.21	0.25	-0.04	90	0.27	0.31	-0.04
34	0.35	0.37	-0.02	91	0.26	0.29	-0.03	34	0.35	0.37	-0.02	91	0.26	0.28	-0.02
35	0.31	0.28	0.03	92	0.35	0.31	0.04	35	0.31	0.28	0.03	92	0.35	0.31	0.04
36	0.28	0.25	0.03	95	0.25	0.28	-0.03	36	0.28	0.24	0.04	95	0.25	0.28	-0.03
37	0.26	0.27	-0.01	96	0.23	0.25	-0.02	37	0.26	0.27	-0.01	96	0.23	0.25	-0.02
38	0.27	0.26	0.01	99	0.22	0.25	-0.03	38	0.27	0.26	0.01	99	0.22	0.25	-0.03
39	0.23	0.26	-0.03	100	0.19	0.30	-0.11	39	0.23	0.25	-0.02	100	0.19	0.30	-0.11
40	0.25	0.30	-0.05					40	0.25	0.31	-0.06				
41	0.19	0.22	-0.03	Av	0.29	0.29	0.00	41	0.19	0.22	-0.03	Av	0.29	0.29	0.00
43	0.28	0.26	0.02	SD	0.07	0.05	0.05	43	0.28	0.26	0.02	SD	0.07	0.06	0.05
44	0.30	0.21	0.09	Min	0.19	0.21	-0.11	44	0.30	0.20	0.10	Min	0.19	0.20	-0.11
45	0.23	0.25	-0.02	Max	0.53	0.44	0.10	45	0.23	0.26	-0.03	Max	0.53	0.46	0.12
46	0.33	0.25	0.08					46	0.33	0.25	0.08				
47	0.25	0.27	-0.02					47	0.25	0.27	-0.02				
49	0.26	0.29	-0.03					49	0.26	0.29	-0.03				
50	0.20	0.23	-0.03					50	0.20	0.23	-0.03				
53	0.46	0.38	0.08					53	0.46	0.38	0.08				

ตาราง 35 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งข้าวผลที่ปรับแต่ง
สเปกตรัมด้วย First derivative

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
4	0.41	0.38	0.03	57	0.31	0.28	0.03	4	0.41	0.38	0.03	57	0.31	0.28	0.03
7	0.44	0.38	0.06	60	0.27	0.28	-0.01	7	0.44	0.37	0.07	60	0.27	0.28	-0.01
8	0.48	0.42	0.06	61	0.27	0.26	0.01	8	0.48	0.41	0.07	61	0.27	0.26	0.01
9	0.31	0.32	-0.01	62	0.22	0.27	-0.05	9	0.31	0.32	-0.01	62	0.22	0.27	-0.05
10	0.30	0.22	0.08	63	0.21	0.26	-0.05	10	0.30	0.22	0.08	63	0.21	0.27	-0.06
13	0.28	0.24	0.04	64	0.20	0.22	-0.02	13	0.28	0.24	0.04	64	0.20	0.22	-0.02
14	0.25	0.24	0.01	66	0.31	0.34	-0.03	14	0.25	0.24	0.01	66	0.31	0.34	-0.03
15	0.39	0.37	0.02	67	0.25	0.30	-0.05	15	0.39	0.38	0.01	67	0.25	0.30	-0.05
17	0.25	0.29	-0.04	70	0.22	0.29	-0.07	17	0.25	0.29	-0.04	70	0.22	0.29	-0.07
18	0.31	0.29	0.02	71	0.29	0.22	0.07	18	0.31	0.29	0.02	71	0.29	0.21	0.08
19	0.23	0.29	-0.06	73	0.27	0.29	-0.02	19	0.23	0.30	-0.07	73	0.27	0.29	-0.02
20	0.31	0.27	0.04	74	0.22	0.22	0.00	20	0.31	0.26	0.05	74	0.22	0.22	0.00
21	0.33	0.30	0.03	75	0.21	0.23	-0.02	21	0.33	0.29	0.04	75	0.21	0.23	-0.02
22	0.30	0.25	0.05	76	0.21	0.24	-0.03	22	0.30	0.24	0.06	76	0.21	0.25	-0.04
23	0.34	0.29	0.05	80	0.29	0.29	0.00	23	0.34	0.29	0.05	80	0.29	0.28	0.01
24	0.25	0.30	-0.05	81	0.26	0.28	-0.02	24	0.25	0.30	-0.05	81	0.26	0.29	-0.03
25	0.19	0.20	-0.01	82	0.31	0.31	0.00	25	0.19	0.21	-0.02	82	0.31	0.31	0.00
26	0.30	0.27	0.03	84	0.26	0.27	-0.01	26	0.30	0.27	0.03	84	0.26	0.27	-0.01
27	0.23	0.23	0.00	85	0.23	0.29	-0.06	27	0.23	0.23	0.00	85	0.23	0.29	-0.06
29	0.35	0.30	0.05	86	0.28	0.24	0.04	29	0.35	0.29	0.06	86	0.28	0.23	0.05
30	0.21	0.24	-0.03	87	0.28	0.23	0.05	30	0.21	0.24	-0.03	87	0.28	0.23	0.05
34	0.35	0.32	0.03	88	0.24	0.22	0.02	34	0.35	0.31	0.04	88	0.24	0.22	0.02
35	0.31	0.29	0.02	90	0.27	0.29	-0.02	35	0.31	0.29	0.02	90	0.27	0.29	-0.02
36	0.28	0.25	0.03	91	0.26	0.26	0.00	36	0.28	0.24	0.04	91	0.26	0.26	0.00
37	0.26	0.27	-0.01	92	0.35	0.31	0.04	37	0.26	0.27	-0.01	92	0.35	0.30	0.05
38	0.27	0.28	-0.01	94	0.22	0.26	-0.04	38	0.27	0.28	-0.01	94	0.22	0.27	-0.05
39	0.23	0.26	-0.03	95	0.25	0.27	-0.02	39	0.23	0.27	-0.04	95	0.25	0.27	-0.02
40	0.25	0.31	-0.06	96	0.23	0.23	0.00	40	0.25	0.32	-0.07	96	0.23	0.23	0.00
41	0.19	0.21	-0.02	98	0.19	0.20	-0.01	41	0.19	0.22	-0.03	98	0.19	0.21	-0.02
43	0.28	0.23	0.05	99	0.22	0.24	-0.02	43	0.28	0.23	0.05	99	0.22	0.25	-0.03
44	0.30	0.22	0.08					44	0.30	0.22	0.08				
45	0.23	0.25	-0.02	Av	0.28	0.28	0.00	45	0.23	0.26	-0.03	Av	0.28	0.28	0.00
47	0.25	0.26	-0.01	SD	0.06	0.05	0.04	47	0.25	0.26	-0.01	SD	0.06	0.05	0.04
48	0.22	0.26	-0.04	Min	0.19	0.20	-0.07	48	0.22	0.29	-0.07	Min	0.19	0.21	-0.07
49	0.26	0.29	-0.03	Max	0.48	0.43	0.08	49	0.26	0.29	-0.03	Max	0.48	0.45	0.10
50	0.20	0.24	-0.04					50	0.20	0.24	-0.04				
53	0.46	0.38	0.08					53	0.46	0.36	0.10				
54	0.38	0.43	-0.05					54	0.38	0.45	-0.07				
55	0.33	0.33	0.00					55	0.33	0.33	0.00				
56	0.35	0.39	-0.04					56	0.35	0.39	-0.04				

ตาราง 36 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งช่วงผลที่ปรับแต่ง
สเปกตรัมด้วย Second derivative

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
2	0.46	0.46	0.00	62	0.22	0.24	-0.02	2	0.46	0.39	0.07	62	0.22	0.24	-0.02
4	0.41	0.43	-0.02	63	0.21	0.26	-0.05	4	0.41	0.43	-0.02	63	0.21	0.26	-0.05
5	0.51	0.49	0.02	64	0.20	0.24	-0.04	5	0.51	0.49	0.02	64	0.20	0.25	-0.05
6	0.53	0.48	0.05	66	0.31	0.35	-0.04	6	0.53	0.47	0.06	66	0.31	0.36	-0.05
7	0.44	0.47	-0.03	67	0.25	0.30	-0.05	7	0.44	0.47	-0.03	67	0.25	0.30	-0.05
9	0.31	0.31	0.00	68	0.35	0.36	-0.01	9	0.31	0.31	0.00	68	0.35	0.41	-0.06
10	0.30	0.24	0.06	70	0.22	0.25	-0.03	10	0.30	0.23	0.07	70	0.22	0.26	-0.04
13	0.28	0.26	0.02	71	0.29	0.27	0.02	13	0.28	0.26	0.02	71	0.29	0.26	0.03
14	0.25	0.28	-0.03	72	0.33	0.26	0.07	14	0.25	0.28	-0.03	72	0.33	0.26	0.07
18	0.31	0.30	0.01	73	0.27	0.30	-0.03	18	0.31	0.30	0.01	73	0.27	0.30	-0.03
19	0.23	0.26	-0.03	74	0.22	0.22	0.00	19	0.23	0.26	-0.03	74	0.22	0.22	0.00
20	0.31	0.31	0.00	75	0.21	0.24	-0.03	20	0.31	0.31	0.00	75	0.21	0.25	-0.04
21	0.33	0.32	0.01	76	0.21	0.25	-0.04	21	0.33	0.32	0.01	76	0.21	0.26	-0.05
22	0.30	0.28	0.02	78	0.35	0.29	0.06	22	0.30	0.28	0.03	78	0.35	0.29	0.06
23	0.34	0.26	0.08	80	0.29	0.33	-0.04	23	0.34	0.26	0.08	80	0.29	0.34	-0.05
24	0.25	0.26	-0.01	81	0.26	0.22	0.04	24	0.25	0.26	-0.01	81	0.26	0.21	0.05
25	0.19	0.18	0.01	82	0.31	0.28	0.03	25	0.19	0.18	0.01	82	0.31	0.28	0.03
26	0.30	0.29	0.01	84	0.26	0.25	0.01	26	0.30	0.28	0.02	84	0.26	0.25	0.01
29	0.35	0.33	0.02	85	0.23	0.29	-0.06	29	0.35	0.32	0.03	85	0.23	0.30	-0.07
30	0.50	0.47	0.03	86	0.28	0.24	0.04	30	0.50	0.46	0.04	86	0.28	0.24	0.04
32	0.21	0.27	-0.06	87	0.28	0.24	0.04	32	0.21	0.28	-0.07	87	0.28	0.24	0.04
34	0.35	0.35	0.00	88	0.24	0.19	0.05	34	0.35	0.35	0.00	88	0.24	0.19	0.06
35	0.31	0.29	0.02	90	0.27	0.29	-0.02	35	0.31	0.29	0.02	90	0.27	0.29	-0.02
36	0.28	0.27	0.01	91	0.26	0.26	0.00	36	0.28	0.27	0.01	91	0.26	0.26	0.00
37	0.26	0.28	-0.02	92	0.35	0.33	0.02	37	0.26	0.28	-0.02	92	0.35	0.33	0.02
38	0.27	0.29	-0.02	94	0.22	0.24	-0.02	38	0.27	0.29	-0.02	94	0.22	0.25	-0.03
39	0.23	0.26	-0.03	95	0.25	0.25	0.00	39	0.23	0.27	-0.04	95	0.25	0.25	0.00
41	0.19	0.24	-0.05	96	0.23	0.26	-0.03	41	0.19	0.24	-0.05	96	0.23	0.27	-0.04
43	0.28	0.25	0.03	98	0.19	0.16	0.03	43	0.28	0.24	0.04	98	0.19	0.16	0.03
44	0.30	0.24	0.06	99	0.22	0.24	-0.02	44	0.30	0.23	0.07	99	0.22	0.25	-0.03
45	0.23	0.24	-0.01					45	0.23	0.24	-0.01				
47	0.25	0.27	-0.02	Av	0.29	0.29	0.00	47	0.25	0.27	-0.02	Av	0.29	0.29	0.00
48	0.22	0.22	0.00	SD	0.08	0.07	0.03	48	0.22	0.22	0.00	SD	0.08	0.07	0.04
49	0.26	0.30	-0.04	Min	0.19	0.16	-0.06	49	0.26	0.31	-0.05	Min	0.19	0.16	-0.08
53	0.46	0.44	0.02	Max	0.53	0.49	0.08	53	0.46	0.43	0.03	Max	0.53	0.49	0.08
54	0.38	0.37	0.01					54	0.38	0.46	-0.08				
55	0.33	0.33	0.00					55	0.33	0.34	-0.01				
57	0.31	0.32	-0.01					57	0.31	0.32	-0.01				
60	0.27	0.27	0.00					60	0.27	0.28	-0.01				
61	0.27	0.24	0.03					61	0.27	0.23	0.04				

ตาราง 37 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งช่วงผลที่ปรับแต่ง
สเปกตรัมด้วย First derivative ร่วมกับ SNV

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
4	0.41	0.39	0.02	61	0.27	0.27	0.00	4	0.41	0.38	0.03	61	0.27	0.27	0.00
5	0.51	0.40	0.11	62	0.22	0.23	-0.01	5	0.51	0.36	0.15	62	0.22	0.24	-0.02
7	0.44	0.44	0.00	63	0.21	0.28	-0.07	7	0.44	0.42	0.02	63	0.21	0.28	-0.07
8	0.48	0.52	-0.04	64	0.20	0.22	-0.02	8	0.48	0.52	-0.04	64	0.20	0.22	-0.02
9	0.31	0.33	-0.02	66	0.31	0.35	-0.04	9	0.31	0.33	-0.02	66	0.31	0.35	-0.04
10	0.30	0.27	0.03	67	0.25	0.26	-0.01	10	0.30	0.26	0.04	67	0.25	0.27	-0.02
11	0.25	0.32	-0.07	70	0.22	0.26	-0.04	11	0.25	0.34	-0.09	70	0.22	0.26	-0.04
13	0.28	0.25	0.03	73	0.27	0.24	0.03	13	0.28	0.24	0.04	73	0.27	0.24	0.03
14	0.25	0.24	0.01	74	0.22	0.22	0.00	14	0.25	0.24	0.01	74	0.22	0.22	0.00
17	0.25	0.26	-0.01	75	0.21	0.22	-0.01	17	0.25	0.27	-0.02	75	0.21	0.23	-0.02
18	0.31	0.26	0.05	76	0.21	0.24	-0.03	18	0.31	0.24	0.07	76	0.21	0.26	-0.05
19	0.23	0.24	-0.01	78	0.35	0.30	0.05	19	0.23	0.24	-0.01	78	0.35	0.29	0.06
20	0.31	0.29	0.02	79	0.26	0.31	-0.05	20	0.31	0.29	0.02	79	0.26	0.33	-0.07
21	0.33	0.32	0.01	80	0.29	0.28	0.01	21	0.33	0.31	0.02	80	0.29	0.28	0.01
22	0.30	0.27	0.03	81	0.26	0.26	0.00	22	0.30	0.26	0.04	81	0.26	0.25	0.01
23	0.34	0.26	0.08	82	0.31	0.26	0.05	23	0.34	0.25	0.09	82	0.31	0.25	0.06
24	0.25	0.30	-0.05	84	0.26	0.27	-0.01	24	0.25	0.31	-0.06	84	0.26	0.28	-0.02
25	0.19	0.21	-0.02	85	0.23	0.30	-0.07	25	0.19	0.22	-0.03	85	0.23	0.32	-0.09
26	0.30	0.31	-0.01	87	0.28	0.25	0.03	26	0.30	0.31	-0.01	87	0.28	0.24	0.04
29	0.35	0.28	0.07	88	0.24	0.25	-0.01	29	0.35	0.27	0.08	88	0.24	0.26	-0.02
32	0.21	0.24	-0.03	90	0.27	0.27	0.00	32	0.21	0.26	-0.05	90	0.27	0.27	0.00
34	0.35	0.27	0.08	91	0.26	0.25	0.01	34	0.35	0.25	-0.10	91	0.26	0.25	0.01
35	0.31	0.27	0.04	92	0.35	0.29	0.06	35	0.31	0.25	0.06	92	0.35	0.28	0.07
36	0.28	0.24	0.04	93	0.22	0.30	-0.08	36	0.28	0.23	0.05	93	0.22	0.31	-0.09
37	0.26	0.25	0.01	94	0.22	0.24	-0.02	37	0.26	0.25	0.01	94	0.22	0.25	-0.03
38	0.27	0.24	0.03	95	0.25	0.26	-0.01	38	0.27	0.23	0.04	95	0.25	0.26	-0.01
39	0.23	0.27	-0.04	96	0.23	0.25	-0.02	39	0.23	0.27	-0.04	96	0.23	0.25	-0.02
40	0.25	0.28	-0.03	97	0.17	0.22	-0.05	40	0.25	0.29	-0.04	97	0.17	0.23	-0.06
41	0.19	0.20	-0.01	98	0.19	0.23	-0.04	41	0.19	0.21	-0.02	98	0.19	0.24	-0.05
43	0.28	0.25	0.03	99	0.22	0.22	0.00	43	0.28	0.24	0.04	99	0.22	0.23	-0.01
44	0.30	0.26	0.04					44	0.30	0.25	0.05				
45	0.23	0.24	-0.01	Av	0.28	0.28	0.00	45	0.23	0.24	-0.01	Av	0.28	0.28	0.00
47	0.25	0.26	-0.01	SD	0.07	0.06	0.04	47	0.25	0.26	-0.01	SD	0.07	0.05	0.05
48	0.22	0.21	0.01	Min	0.17	0.20	-0.09	48	0.22	0.23	-0.01	Min	0.17	0.21	-0.10
50	0.20	0.29	-0.09	Max	0.51	0.52	0.11	50	0.20	0.30	-0.10	Max	0.51	0.52	0.15
53	0.46	0.39	0.07					53	0.46	0.38	0.08				
55	0.33	0.30	0.03					55	0.33	0.29	0.04				
56	0.35	0.39	-0.04					56	0.35	0.41	-0.06				
57	0.31	0.28	0.03					57	0.31	0.27	0.04				
60	0.27	0.32	-0.05					60	0.27	0.34	-0.07				

ตาราง 38 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้มผลที่ไม่ผ่านการ
ปรับแต่งสเปกตรัม

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	0.46	0.42	0.04	60	0.27	0.30	-0.03	1	0.46	0.41	0.05	60	0.27	0.31	-0.04
2	0.46	0.44	0.02	61	0.27	0.28	-0.01	2	0.46	0.43	0.03	61	0.27	0.28	-0.01
4	0.41	0.44	-0.03	62	0.22	0.27	-0.05	4	0.41	0.45	-0.04	62	0.22	0.27	-0.05
6	0.53	0.51	0.02	63	0.21	0.25	-0.04	6	0.53	0.49	0.04	63	0.21	0.24	-0.03
7	0.44	0.36	0.08	64	0.20	0.19	0.01	7	0.44	0.35	0.09	64	0.20	0.18	0.02
8	0.48	0.40	0.08	66	0.31	0.29	0.02	8	0.48	0.38	0.10	66	0.31	0.29	0.02
9	0.31	0.31	0.00	67	0.25	0.29	-0.04	9	0.31	0.31	0.00	67	0.25	0.29	-0.04
10	0.30	0.27	0.03	68	0.35	0.34	0.01	10	0.30	0.26	0.04	68	0.35	0.34	0.01
11	0.25	0.29	-0.04	69	0.25	0.26	-0.01	11	0.25	0.30	-0.05	69	0.25	0.30	-0.05
13	0.28	0.23	0.05	70	0.22	0.27	-0.05	13	0.28	0.22	0.06	70	0.22	0.28	-0.06
14	0.25	0.27	-0.02	71	0.29	0.26	0.03	14	0.25	0.27	-0.02	71	0.29	0.26	0.03
17	0.25	0.27	-0.02	72	0.33	0.25	0.08	17	0.25	0.28	-0.03	72	0.33	0.24	0.09
18	0.31	0.34	-0.03	73	0.27	0.24	0.03	18	0.31	0.34	-0.03	73	0.27	0.23	0.04
19	0.23	0.26	-0.03	74	0.22	0.21	0.01	19	0.23	0.27	-0.04	74	0.22	0.20	0.02
20	0.31	0.30	0.01	75	0.21	0.20	0.01	20	0.31	0.30	0.01	75	0.21	0.20	0.01
21	0.33	0.33	0.00	77	0.37	0.40	-0.03	21	0.33	0.33	0.00	77	0.37	0.40	-0.03
22	0.30	0.33	-0.03	79	0.26	0.30	-0.04	22	0.30	0.33	-0.03	79	0.26	0.31	-0.05
23	0.34	0.29	0.05	80	0.29	0.25	0.04	23	0.34	0.28	0.06	80	0.29	0.24	0.05
24	0.25	0.28	-0.03	81	0.26	0.30	-0.04	24	0.25	0.28	-0.03	81	0.26	0.32	-0.06
27	0.23	0.28	-0.05	82	0.31	0.30	0.01	27	0.23	0.32	-0.09	82	0.31	0.30	0.01
29	0.35	0.35	0.00	83	0.31	0.36	-0.05	29	0.35	0.35	0.00	83	0.31	0.38	-0.07
34	0.35	0.34	0.01	86	0.28	0.29	-0.01	34	0.35	0.34	0.01	86	0.28	0.29	-0.01
35	0.31	0.31	0.00	90	0.27	0.28	-0.01	35	0.31	0.31	0.00	90	0.27	0.28	-0.01
36	0.28	0.24	0.04	91	0.26	0.28	-0.02	36	0.28	0.23	0.05	91	0.26	0.29	-0.03
37	0.26	0.29	-0.03	92	0.35	0.27	0.08	37	0.26	0.29	-0.03	92	0.35	0.26	0.09
39	0.23	0.24	-0.01	93	0.22	0.21	0.01	39	0.23	0.25	-0.02	93	0.22	0.21	0.01
40	0.25	0.25	0.01	95	0.25	0.21	0.04	40	0.25	0.25	0.00	95	0.25	0.20	0.05
41	0.19	0.21	-0.02	96	0.23	0.27	-0.04	41	0.19	0.21	-0.02	96	0.23	0.28	-0.05
43	0.28	0.30	-0.02	99	0.22	0.22	0.00	43	0.28	0.32	-0.04	99	0.22	0.22	0.00
44	0.30	0.23	0.07	100	0.19	0.25	-0.06	44	0.30	0.23	0.07	100	0.19	0.26	-0.07
45	0.23	0.25	-0.02					45	0.23	0.25	-0.02				
46	0.33	0.28	0.05	Av	0.05	0.04	0.03	46	0.33	0.26	0.07	Av	0.05	0.05	0.04
47	0.25	0.26	-0.01	SD	0.07	0.06	0.04	47	0.25	0.26	-0.01	SD	0.07	0.06	0.04
48	0.22	0.28	-0.06	Min	0.19	0.19	-0.06	48	0.22	0.29	-0.07	Min	0.19	0.18	-0.09
50	0.20	0.24	-0.04	Max	0.53	0.51	0.08	50	0.20	0.25	-0.05	Max	0.53	0.49	0.10
54	0.38	0.36	0.02					54	0.38	0.36	0.02				
55	0.33	0.30	0.03					55	0.33	0.29	0.04				
56	0.35	0.35	0.00					56	0.35	0.36	-0.01				
57	0.31	0.26	0.05					57	0.31	0.26	0.05				
58	0.34	0.33	0.01					58	0.34	0.32	0.02				

ตาราง 39 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้มผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย SNV

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
2	0.46	0.39	0.07	58	0.34	0.28	0.06	2	0.46	0.37	0.09	58	0.34	0.26	0.08
4	0.41	0.41	0.00	60	0.27	0.30	-0.03	4	0.41	0.41	0.00	60	0.27	0.31	-0.04
6	0.53	0.54	-0.01	61	0.27	0.28	-0.01	6	0.53	0.54	-0.01	61	0.27	0.28	-0.01
9	0.31	0.27	0.04	63	0.21	0.27	-0.06	9	0.31	0.26	0.05	63	0.21	0.27	-0.06
10	0.30	0.27	0.03	64	0.20	0.21	-0.01	10	0.30	0.27	0.03	64	0.20	0.21	-0.01
11	0.25	0.21	0.04	66	0.31	0.30	0.01	11	0.25	0.20	0.05	66	0.31	0.29	0.02
12	0.35	0.28	0.07	67	0.25	0.30	-0.05	12	0.35	0.27	0.08	67	0.25	0.30	-0.05
14	0.25	0.27	-0.02	68	0.35	0.31	0.04	14	0.25	0.27	-0.02	68	0.35	0.32	0.03
15	0.39	0.38	0.01	69	0.25	0.27	-0.02	15	0.39	0.37	0.02	69	0.25	0.26	-0.01
16	0.30	0.27	0.03	70	0.22	0.24	-0.02	16	0.30	0.27	0.03	70	0.22	0.24	-0.02
18	0.31	0.29	0.02	71	0.29	0.25	0.04	18	0.31	0.29	0.02	71	0.29	0.24	0.05
19	0.23	0.24	-0.01	72	0.33	0.30	0.03	19	0.23	0.25	-0.02	72	0.33	0.29	0.04
20	0.31	0.34	-0.03	73	0.27	0.22	0.05	20	0.31	0.35	-0.04	73	0.27	0.21	0.06
21	0.33	0.33	0.00	74	0.22	0.22	0.00	21	0.33	0.33	0.00	74	0.22	0.22	0.00
22	0.30	0.31	-0.01	75	0.21	0.18	0.03	22	0.30	0.31	-0.01	75	0.21	0.17	0.04
23	0.34	0.28	0.06	76	0.21	0.26	-0.05	23	0.34	0.27	0.07	76	0.21	0.27	-0.06
24	0.25	0.30	-0.05	77	0.37	0.37	0.00	24	0.25	0.30	-0.05	77	0.37	0.37	0.00
25	0.19	0.25	-0.06	79	0.26	0.26	0.00	25	0.19	0.26	-0.07	79	0.26	0.26	0.00
26	0.30	0.31	-0.01	82	0.31	0.29	0.02	26	0.30	0.31	-0.01	82	0.31	0.29	0.02
27	0.23	0.22	0.01	83	0.31	0.33	-0.02	27	0.23	0.22	0.01	83	0.31	0.33	-0.02
28	0.40	0.36	0.04	84	0.26	0.31	-0.05	28	0.40	0.35	0.05	84	0.26	0.32	-0.06
29	0.35	0.36	-0.01	85	0.23	0.24	-0.01	29	0.35	0.37	-0.02	85	0.23	0.24	-0.01
30	0.50	0.52	-0.02	90	0.27	0.32	-0.05	30	0.50	0.52	-0.02	90	0.27	0.33	-0.06
31	0.18	0.24	-0.06	91	0.26	0.26	0.00	31	0.18	0.25	-0.07	91	0.26	0.27	-0.01
33	0.48	0.44	0.04	92	0.35	0.30	0.05	33	0.48	0.43	0.05	92	0.35	0.29	0.06
34	0.35	0.36	-0.01	93	0.22	0.23	-0.01	34	0.35	0.35	0.00	93	0.22	0.23	-0.01
35	0.31	0.29	0.03	94	0.22	0.24	-0.02	35	0.31	0.28	0.03	94	0.22	0.26	-0.04
36	0.28	0.24	0.04	96	0.23	0.25	-0.02	36	0.28	0.24	0.04	96	0.23	0.26	-0.03
37	0.26	0.26	0.00	99	0.22	0.19	0.03	37	0.26	0.26	0.00	99	0.22	0.19	0.03
39	0.23	0.27	-0.04	100	0.19	0.21	-0.02	39	0.23	0.27	-0.04	100	0.19	0.22	-0.03
40	0.25	0.28	-0.03					40	0.25	0.29	-0.04				
41	0.19	0.25	-0.06	Av	0.06	0.05	0.03	41	0.19	0.26	-0.07	Av	0.06	0.05	0.03
43	0.28	0.29	-0.01	SD	0.07	0.07	0.03	43	0.28	0.31	-0.03	SD	0.07	0.07	0.04
45	0.23	0.21	0.02	Min	0.18	0.18	-0.06	45	0.23	0.21	0.02	Min	0.18	0.17	-0.07
46	0.33	0.29	0.04	Max	0.53	0.54	0.07	46	0.33	0.28	0.05	Max	0.53	0.54	0.09
47	0.25	0.25	0.00					47	0.25	0.25	0.00				
49	0.26	0.31	-0.05					49	0.26	0.32	-0.06				
54	0.38	0.39	-0.01					54	0.38	0.40	-0.02				
55	0.33	0.31	0.02					55	0.33	0.31	0.02				
57	0.31	0.32	-0.01					57	0.31	0.32	-0.01				

ตาราง 40 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้มผลที่
ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย MSC

Calibration				Validation			
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	0.46	0.43	0.03	54	0.38	0.39	-0.01
2	0.46	0.38	0.08	55	0.33	0.34	-0.01
4	0.41	0.42	-0.01	56	0.35	0.37	-0.02
5	0.51	0.44	0.08	57	0.31	0.30	0.01
6	0.53	0.56	-0.03	58	0.34	0.34	0.00
9	0.31	0.32	-0.01	60	0.27	0.30	-0.03
10	0.30	0.35	-0.05	61	0.27	0.30	-0.03
11	0.25	0.25	0.00	64	0.20	0.20	0.00
12	0.35	0.32	0.03	66	0.31	0.27	0.04
13	0.28	0.21	0.07	67	0.25	0.32	-0.07
14	0.25	0.25	0.00	68	0.35	0.34	0.01
15	0.39	0.37	0.02	70	0.22	0.29	-0.07
16	0.30	0.28	0.02	71	0.29	0.24	0.05
17	0.25	0.32	-0.07	72	0.33	0.30	0.03
18	0.31	0.32	-0.01	73	0.27	0.23	0.04
19	0.23	0.26	-0.03	74	0.22	0.22	0.00
20	0.31	0.36	-0.05	75	0.21	0.19	0.02
21	0.33	0.33	0.00	79	0.26	0.27	-0.01
22	0.30	0.36	-0.06	80	0.29	0.27	0.02
23	0.34	0.28	0.06	81	0.26	0.29	-0.03
24	0.25	0.29	-0.04	82	0.31	0.31	0.00
26	0.30	0.32	-0.02	83	0.31	0.35	-0.04
27	0.23	0.22	0.02	89	0.33	0.28	0.05
28	0.40	0.33	0.07	91	0.26	0.31	-0.05
29	0.35	0.34	0.01	92	0.35	0.30	0.05
30	0.50	0.47	0.03	93	0.22	0.26	-0.04
33	0.48	0.42	0.06	96	0.23	0.21	0.02
34	0.35	0.39	-0.04	97	0.17	0.23	-0.06
35	0.31	0.29	0.02	99	0.22	0.22	0.00
36	0.28	0.20	0.08	100	0.19	0.23	-0.04
37	0.26	0.28	-0.02				
39	0.23	0.27	-0.04	Av	0.06	0.05	0.03
40	0.25	0.25	0.00	SD	0.08	0.07	0.04
41	0.19	0.24	-0.05	Min	0.17	0.19	-0.07
44	0.30	0.27	0.03	Max	0.53	0.56	0.09
45	0.23	0.24	-0.01				
46	0.33	0.34	-0.01				
47	0.25	0.26	-0.01				
48	0.22	0.29	-0.07				
53	0.46	0.37	0.09				

ตาราง 41 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้วผลที่ปรับแต่ง
สเปกตรัมด้วย First derivative

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	0.46	0.45	0.01	56	0.35	0.38	-0.03	1	0.46	0.44	0.02	56	0.35	0.39	-0.04
2	0.46	0.46	0.00	57	0.31	0.30	0.01	2	0.46	0.46	0.00	57	0.31	0.30	0.01
4	0.41	0.43	-0.02	60	0.27	0.21	0.06	4	0.41	0.44	-0.03	60	0.27	0.20	0.07
5	0.51	0.51	0.00	61	0.27	0.24	0.03	5	0.51	0.50	0.01	61	0.27	0.24	0.03
6	0.53	0.52	0.01	62	0.22	0.21	0.01	6	0.53	0.52	0.01	62	0.22	0.21	0.01
7	0.44	0.40	0.04	63	0.21	0.24	-0.03	7	0.44	0.40	0.04	63	0.21	0.25	-0.04
8	0.48	0.49	-0.01	64	0.20	0.18	0.02	8	0.48	0.50	-0.02	64	0.20	0.18	0.02
9	0.31	0.30	0.01	66	0.31	0.28	0.03	9	0.31	0.31	0.00	66	0.31	0.28	0.03
10	0.30	0.29	0.01	68	0.35	0.35	0.00	10	0.30	0.29	0.01	68	0.35	0.34	0.01
11	0.25	0.30	-0.05	69	0.25	0.26	-0.01	11	0.25	0.30	-0.05	69	0.25	0.28	-0.03
13	0.28	0.27	0.01	71	0.29	0.27	0.02	13	0.28	0.26	0.02	71	0.29	0.27	0.02
14	0.25	0.26	-0.01	72	0.33	0.30	0.03	14	0.25	0.26	-0.01	72	0.33	0.30	0.03
15	0.39	0.35	0.04	74	0.22	0.21	0.01	15	0.39	0.33	0.06	74	0.22	0.21	0.01
17	0.25	0.29	-0.04	75	0.21	0.18	0.03	17	0.25	0.30	-0.05	75	0.21	0.18	0.03
18	0.31	0.24	0.07	77	0.37	0.39	-0.02	18	0.31	0.22	0.09	77	0.37	0.41	-0.04
19	0.23	0.24	-0.01	79	0.26	0.30	-0.04	19	0.23	0.24	-0.01	79	0.26	0.32	-0.06
20	0.31	0.34	-0.03	80	0.29	0.25	0.04	20	0.31	0.35	-0.04	80	0.29	0.24	0.05
21	0.33	0.35	-0.02	82	0.31	0.31	0.00	21	0.33	0.35	-0.02	82	0.31	0.32	-0.01
22	0.30	0.35	-0.05	83	0.31	0.26	0.05	22	0.30	0.36	-0.06	83	0.31	0.25	0.06
23	0.34	0.31	0.03	84	0.26	0.28	-0.02	23	0.34	0.30	0.04	84	0.26	0.28	-0.02
24	0.25	0.28	-0.03	85	0.23	0.29	-0.06	24	0.25	0.29	-0.04	85	0.23	0.30	-0.07
26	0.30	0.24	0.06	86	0.28	0.27	0.01	26	0.30	0.21	0.09	86	0.28	0.27	0.01
27	0.23	0.22	0.01	87	0.28	0.26	0.02	27	0.23	0.24	-0.01	87	0.28	0.26	0.02
29	0.35	0.37	-0.02	89	0.33	0.27	0.06	29	0.35	0.38	-0.03	89	0.33	0.26	0.07
30	0.50	0.44	0.06	90	0.27	0.28	-0.01	30	0.50	0.41	0.09	90	0.27	0.29	-0.02
33	0.48	0.44	0.04	93	0.22	0.29	-0.07	33	0.48	0.42	0.06	93	0.22	0.29	-0.07
35	0.31	0.26	0.05	96	0.23	0.25	-0.02	35	0.31	0.24	0.07	96	0.23	0.26	-0.03
37	0.26	0.29	-0.03	98	0.19	0.24	-0.05	37	0.26	0.30	-0.04	98	0.19	0.26	-0.07
38	0.27	0.28	-0.01	99	0.22	0.27	-0.05	38	0.27	0.29	-0.02	99	0.22	0.28	-0.06
39	0.23	0.25	-0.02	100	0.19	0.24	-0.05	39	0.23	0.26	-0.03	100	0.19	0.24	-0.05
40	0.25	0.26	-0.01					40	0.25	0.27	-0.02				
41	0.19	0.23	-0.04	Av	0.07	0.06	0.03	41	0.19	0.25	-0.06	Av	0.07	0.06	0.04
43	0.28	0.27	0.01	SD	0.09	0.08	0.03	43	0.28	0.27	0.01	SD	0.09	0.08	0.04
44	0.30	0.24	0.06	Min	0.19	0.18	-0.07	44	0.30	0.23	0.07	Min	0.19	0.18	-0.07
45	0.23	0.27	-0.04	Max	0.53	0.52	0.07	45	0.23	0.28	-0.05	Max	0.53	0.52	0.09
46	0.33	0.33	0.00					46	0.33	0.34	-0.01				
47	0.25	0.27	-0.02					47	0.25	0.28	-0.03				
51	0.53	0.47	0.06					51	0.53	0.44	0.09				
54	0.38	0.37	0.01					54	0.38	0.37	0.01				
55	0.33	0.37	-0.04					55	0.33	0.38	-0.05				

ตาราง 42 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้มผลที่ปรับแต่ง
สเปกตรัมด้วย Second derivative

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	0.46	0.41	0.05	62	0.22	0.24	-0.02	1	0.46	0.40	0.06	62	0.22	0.25	-0.03
2	0.46	0.47	-0.01	64	0.20	0.21	-0.01	2	0.46	0.47	-0.01	64	0.20	0.21	-0.01
4	0.41	0.42	-0.01	66	0.31	0.27	0.04	4	0.41	0.42	-0.01	66	0.31	0.27	0.04
5	0.51	0.51	0.00	68	0.35	0.34	0.01	5	0.51	0.51	0.00	68	0.35	0.34	0.01
6	0.53	0.60	-0.07	69	0.25	0.24	0.01	6	0.53	0.61	-0.08	69	0.25	0.23	0.02
7	0.44	0.38	0.06	70	0.22	0.27	-0.05	7	0.44	0.37	0.07	70	0.22	0.28	-0.06
8	0.48	0.48	0.00	71	0.29	0.24	0.05	8	0.48	0.47	0.01	71	0.29	0.24	0.05
10	0.30	0.30	0.00	72	0.33	0.29	0.04	10	0.30	0.30	0.00	72	0.33	0.29	0.04
13	0.28	0.34	-0.06	74	0.22	0.22	0.00	13	0.28	0.35	-0.07	74	0.22	0.22	0.00
14	0.25	0.27	-0.02	77	0.37	0.38	-0.01	14	0.25	0.27	-0.02	77	0.37	0.38	-0.01
15	0.39	0.36	0.03	78	0.35	0.34	0.01	15	0.39	0.35	0.04	78	0.35	0.34	0.01
16	0.30	0.25	0.05	80	0.29	0.27	0.02	16	0.30	0.25	0.05	80	0.29	0.27	0.02
17	0.25	0.25	0.00	82	0.31	0.33	-0.02	17	0.25	0.25	0.00	82	0.31	0.34	-0.03
18	0.31	0.26	0.05	86	0.28	0.26	0.02	18	0.31	0.26	0.05	86	0.28	0.26	0.02
19	0.23	0.23	0.00	87	0.28	0.33	-0.05	19	0.23	0.23	0.00	87	0.28	0.34	-0.06
20	0.31	0.29	0.02	89	0.33	0.30	0.03	20	0.31	0.29	0.02	89	0.33	0.30	0.03
21	0.33	0.35	-0.02	90	0.27	0.28	-0.01	21	0.33	0.35	-0.02	90	0.27	0.29	-0.02
23	0.34	0.29	0.06	92	0.35	0.33	0.02	23	0.34	0.28	0.06	92	0.35	0.33	0.02
24	0.25	0.28	-0.03	96	0.23	0.27	-0.04	24	0.25	0.28	-0.03	96	0.23	0.27	-0.04
25	0.19	0.24	-0.05	97	0.17	0.24	-0.07	25	0.19	0.25	-0.06	97	0.17	0.24	-0.07
26	0.30	0.26	0.04	100	0.19	0.23	-0.04	26	0.30	0.25	0.05	100	0.19	0.23	-0.04
27	0.23	0.27	-0.04					27	0.23	0.27	-0.04				
29	0.35	0.34	0.01	Av	0.08	0.07	0.03	29	0.35	0.34	0.01	Av	0.08	0.07	0.03
30	0.50	0.47	0.03	SD	0.10	0.09	0.03	30	0.50	0.46	0.04	SD	0.10	0.09	0.04
33	0.48	0.47	0.01	Min	0.17	0.21	-0.07	33	0.48	0.47	0.02	Min	0.17	0.21	-0.08
34	0.35	0.36	-0.01	Max	0.60	0.60	0.06	34	0.35	0.37	-0.02	Max	0.60	0.61	0.07
35	0.31	0.34	-0.03					35	0.31	0.34	-0.03				
40	0.25	0.29	-0.04					40	0.25	0.30	-0.05				
43	0.28	0.22	0.06					43	0.28	0.21	0.07				
44	0.30	0.26	0.04					44	0.30	0.25	0.05				
45	0.23	0.24	-0.01					45	0.23	0.24	-0.01				
46	0.33	0.33	0.00					46	0.33	0.33	0.00				
47	0.25	0.25	0.00					47	0.25	0.25	0.00				
51	0.53	0.53	0.00					51	0.53	0.53	0.00				
52	0.60	0.56	0.04					52	0.60	0.55	0.05				
53	0.46	0.43	0.03					53	0.46	0.43	0.03				
57	0.31	0.35	-0.04					57	0.31	0.35	-0.04				
60	0.27	0.31	-0.04					60	0.27	0.31	-0.04				
61	0.27	0.30	-0.03					61	0.27	0.31	-0.04				

ตาราง 43 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งแก้วผลที่ปรับแต่ง
สเปกตรัมด้วย First derivative ร่วมกับ SNV

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	0.46	0.43	0.03	61	0.27	0.26	0.01	1	0.46	0.42	0.04	61	0.27	0.26	0.01
2	0.46	0.44	0.02	62	0.22	0.25	-0.03	2	0.46	0.44	0.02	62	0.22	0.25	-0.03
5	0.51	0.50	0.01	63	0.21	0.23	-0.02	5	0.51	0.49	0.02	63	0.21	0.23	-0.02
6	0.53	0.53	0.00	64	0.20	0.17	0.03	6	0.53	0.52	0.01	64	0.20	0.17	0.03
7	0.44	0.44	0.00	66	0.31	0.30	0.01	7	0.44	0.44	0.00	66	0.31	0.30	0.01
8	0.48	0.45	0.03	68	0.35	0.35	0.00	8	0.48	0.44	0.04	68	0.35	0.30	0.05
9	0.31	0.35	-0.04	70	0.22	0.29	-0.07	9	0.31	0.35	-0.04	70	0.22	0.30	-0.08
10	0.30	0.28	0.02	71	0.29	0.26	0.03	10	0.30	0.28	0.02	71	0.29	0.25	0.04
11	0.25	0.30	-0.05	72	0.33	0.30	0.03	11	0.25	0.30	-0.05	72	0.33	0.29	0.04
13	0.28	0.28	0.00	74	0.22	0.20	0.02	13	0.28	0.27	0.01	74	0.22	0.19	0.03
14	0.25	0.25	0.00	75	0.21	0.17	0.04	14	0.25	0.25	0.00	75	0.21	0.16	0.05
15	0.39	0.38	0.01	77	0.37	0.36	0.01	15	0.39	0.37	0.02	77	0.37	0.37	0.00
17	0.25	0.28	-0.03	78	0.35	0.24	0.11	17	0.25	0.28	-0.03	78	0.35	0.23	0.12
18	0.31	0.29	0.02	79	0.26	0.28	-0.02	18	0.31	0.28	0.03	79	0.26	0.29	-0.03
19	0.23	0.24	-0.01	80	0.29	0.25	0.04	19	0.23	0.24	-0.01	80	0.29	0.25	0.04
20	0.31	0.33	-0.02	81	0.26	0.29	-0.03	20	0.31	0.34	-0.03	81	0.26	0.33	-0.07
21	0.33	0.35	-0.02	83	0.31	0.30	0.01	21	0.33	0.35	-0.02	83	0.31	0.30	0.01
22	0.30	0.32	-0.02	84	0.26	0.29	-0.03	22	0.30	0.32	-0.02	84	0.26	0.30	-0.04
25	0.19	0.25	-0.06	85	0.23	0.32	-0.09	25	0.19	0.26	-0.07	85	0.23	0.34	-0.11
26	0.30	0.28	0.02	86	0.28	0.28	0.00	26	0.30	0.27	0.03	86	0.28	0.27	0.01
27	0.23	0.22	0.01	87	0.28	0.23	0.01	27	0.23	0.23	0.00	87	0.28	0.26	0.02
29	0.35	0.35	0.00	89	0.33	0.23	0.05	29	0.35	0.35	0.00	89	0.33	0.27	0.06
32	0.21	0.26	-0.05	90	0.27	0.25	0.01	32	0.21	0.29	-0.08	90	0.27	0.26	0.01
34	0.35	0.35	0.00	91	0.26	0.28	-0.02	34	0.35	0.34	0.01	91	0.26	0.29	-0.03
35	0.31	0.30	0.01	92	0.35	0.32	0.03	35	0.31	0.30	0.01	92	0.35	0.31	0.04
37	0.26	0.28	-0.02	93	0.22	0.27	-0.05	37	0.26	0.28	-0.02	93	0.22	0.27	-0.05
39	0.23	0.24	-0.01	95	0.25	0.22	0.01	39	0.23	0.24	-0.01	95	0.25	0.21	0.04
40	0.25	0.27	-0.02	96	0.23	0.26	-0.03	40	0.25	0.28	-0.03	96	0.23	0.27	-0.04
41	0.19	0.17	0.02	99	0.22	0.26	-0.04	41	0.19	0.18	0.01	99	0.22	0.26	-0.04
43	0.28	0.28	0.00	100	0.19	0.24	-0.05	43	0.28	0.29	-0.01	100	0.19	0.25	-0.06
45	0.23	0.26	-0.03					45	0.23	0.26	-0.03				
46	0.33	0.31	0.02	Av	0.06	0.05	0.03	46	0.33	0.32	0.01	Av	0.06	0.05	0.03
47	0.25	0.26	-0.01	SD	0.08	0.07	0.03	47	0.25	0.26	-0.01	SD	0.08	0.07	0.04
50	0.20	0.24	-0.04	Min	0.19	0.17	-0.09	50	0.20	0.26	-0.06	Min	0.19	0.16	-0.11
54	0.38	0.36	0.02	Max	0.53	0.53	0.11	54	0.38	0.36	0.02	Max	0.53	0.52	0.12
55	0.33	0.33	0.00					55	0.33	0.34	-0.01				
56	0.35	0.31	0.04					56	0.35	0.29	0.06				
57	0.31	0.29	0.02					57	0.31	0.28	0.03				
58	0.34	0.27	0.07					58	0.34	0.27	0.07				
60	0.27	0.23	0.04					60	0.27	0.22	0.05				

ตาราง 44 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้ายผลที่ไม่ผ่านการ
ปรับแต่งสเปกตรัม

Calibration				Validation											
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	0.46	0.43	0.03	61	0.27	0.25	0.02	1	0.46	0.43	0.03	61	0.27	0.25	0.02
2	0.46	0.47	-0.01	62	0.22	0.26	-0.04	2	0.46	0.47	-0.01	62	0.22	0.27	-0.05
5	0.51	0.49	0.02	63	0.21	0.20	0.01	5	0.51	0.50	0.01	63	0.21	0.20	0.01
8	0.48	0.42	0.06	64	0.20	0.24	-0.04	8	0.48	0.41	0.07	64	0.20	0.25	-0.05
9	0.31	0.31	0.00	66	0.31	0.28	0.03	9	0.31	0.30	0.01	66	0.31	0.28	0.03
12	0.35	0.30	0.05	67	0.25	0.22	0.03	12	0.35	0.29	0.06	67	0.25	0.20	0.05
13	0.28	0.25	0.03	69	0.25	0.24	0.01	13	0.28	0.24	0.04	69	0.25	0.24	0.01
14	0.25	0.21	0.04	70	0.22	0.28	-0.06	14	0.25	0.21	0.04	70	0.22	0.29	-0.07
16	0.30	0.25	0.05	71	0.29	0.26	0.03	16	0.30	0.24	0.06	71	0.29	0.26	0.03
17	0.25	0.29	-0.04	72	0.33	0.26	0.07	17	0.25	0.30	-0.05	72	0.33	0.26	0.07
20	0.31	0.28	0.03	73	0.27	0.30	-0.03	20	0.31	0.28	0.03	73	0.27	0.30	-0.03
21	0.33	0.34	-0.01	74	0.22	0.22	0.00	21	0.33	0.34	-0.01	74	0.22	0.22	0.00
22	0.30	0.35	-0.05	75	0.21	0.20	0.01	22	0.30	0.36	-0.06	75	0.21	0.19	0.02
23	0.34	0.34	0.00	76	0.21	0.26	-0.05	23	0.34	0.34	0.00	76	0.21	0.28	-0.07
24	0.25	0.23	0.02	78	0.35	0.28	0.07	24	0.25	0.23	0.02	78	0.35	0.27	0.08
25	0.19	0.23	-0.04	79	0.26	0.23	0.03	25	0.19	0.24	-0.05	79	0.26	0.22	0.04
26	0.30	0.29	0.01	80	0.29	0.27	0.02	26	0.30	0.29	0.01	80	0.29	0.27	0.02
27	0.23	0.24	-0.01	81	0.26	0.29	-0.03	27	0.23	0.25	-0.02	81	0.26	0.30	-0.04
28	0.40	0.34	0.06	82	0.31	0.29	0.02	28	0.40	0.33	0.07	82	0.31	0.28	0.03
29	0.35	0.33	0.02	83	0.31	0.34	-0.03	29	0.35	0.33	0.02	83	0.31	0.35	-0.04
30	0.50	0.47	0.03	84	0.26	0.26	0.00	30	0.50	0.46	0.04	84	0.26	0.27	-0.01
31	0.18	0.15	0.03	85	0.23	0.29	-0.06	31	0.18	0.15	0.03	85	0.23	0.29	-0.06
32	0.21	0.23	-0.02	86	0.28	0.27	0.01	32	0.21	0.23	-0.02	86	0.28	0.27	0.01
34	0.35	0.38	-0.03	88	0.24	0.27	-0.03	34	0.35	0.39	-0.04	88	0.24	0.27	-0.03
35	0.31	0.32	-0.01	91	0.26	0.28	-0.02	35	0.31	0.33	-0.02	91	0.26	0.29	-0.03
36	0.28	0.25	0.03	93	0.22	0.24	-0.02	36	0.28	0.24	0.04	93	0.22	0.24	-0.02
39	0.23	0.23	0.00	95	0.25	0.25	0.00	39	0.23	0.23	0.00	95	0.25	0.25	0.00
40	0.25	0.28	-0.03	96	0.23	0.28	-0.05	40	0.25	0.29	-0.04	96	0.23	0.28	-0.05
41	0.19	0.17	0.02	98	0.19	0.20	-0.01	41	0.19	0.16	0.03	98	0.19	0.20	-0.01
43	0.28	0.27	0.01	99	0.22	0.21	0.01	43	0.28	0.27	0.01	99	0.22	0.21	0.01
45	0.23	0.27	-0.04					45	0.23	0.27	-0.04				
46	0.33	0.37	-0.04	Av	0.06	0.05	0.03	46	0.33	0.39	-0.06	Av	0.06	0.05	0.03
47	0.25	0.30	-0.05	SD	0.07	0.07	0.03	47	0.25	0.31	-0.06	SD	0.07	0.07	0.04
48	0.22	0.27	-0.05	Min	0.18	0.15	-0.06	48	0.22	0.28	-0.06	Min	0.18	0.15	-0.07
49	0.26	0.27	-0.01	Max	0.51	0.49	0.07	49	0.26	0.29	-0.03	Max	0.51	0.50	0.08
50	0.20	0.24	-0.04					50	0.20	0.25	-0.05				
56	0.35	0.31	0.04					56	0.35	0.30	0.05				
57	0.31	0.31	0.00					57	0.31	0.31	0.00				
58	0.34	0.32	0.02					58	0.34	0.31	0.03				
60	0.27	0.26	0.01					60	0.27	0.26	0.01				

ตาราง 45 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้ายผลที่ปรับแต่ง
สเปกตรัมด้วย SNV

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	0.46	0.48	-0.02	56	0.35	0.36	-0.01	1	0.46	0.49	-0.03	56	0.35	0.37	-0.02
2	0.46	0.53	-0.07	57	0.31	0.33	-0.02	2	0.46	0.54	-0.08	57	0.31	0.33	-0.02
4	0.41	0.39	0.02	58	0.34	0.34	0.00	4	0.41	0.34	0.07	58	0.34	0.34	0.00
5	0.51	0.55	-0.04	60	0.27	0.32	-0.05	5	0.51	0.55	-0.04	60	0.27	0.33	-0.06
6	0.53	0.48	0.05	61	0.27	0.25	0.02	6	0.53	0.47	0.06	61	0.27	0.25	0.02
7	0.44	0.37	0.07	62	0.22	0.28	-0.06	7	0.44	0.35	0.09	62	0.22	0.29	-0.07
8	0.48	0.49	-0.01	63	0.21	0.25	-0.04	8	0.48	0.49	-0.01	63	0.21	0.26	-0.05
9	0.31	0.33	-0.02	67	0.25	0.26	-0.01	9	0.31	0.33	-0.02	67	0.25	0.34	-0.09
12	0.35	0.31	0.04	69	0.25	0.28	-0.03	12	0.35	0.30	0.05	69	0.25	0.28	-0.03
13	0.28	0.22	0.07	73	0.27	0.30	-0.03	13	0.28	0.21	0.07	73	0.27	0.31	-0.04
14	0.25	0.23	0.02	74	0.22	0.26	-0.04	14	0.25	0.23	0.02	74	0.22	0.26	-0.04
16	0.30	0.27	0.03	75	0.21	0.22	-0.01	16	0.30	0.27	0.03	75	0.21	0.23	-0.02
17	0.25	0.28	-0.03	76	0.21	0.23	-0.02	17	0.25	0.29	-0.04	76	0.21	0.23	-0.02
18	0.31	0.33	-0.02	78	0.35	0.29	0.06	18	0.31	0.33	-0.02	78	0.35	0.29	0.06
20	0.31	0.29	0.02	79	0.26	0.30	-0.04	20	0.31	0.28	0.03	79	0.26	0.31	-0.05
21	0.33	0.26	0.07	80	0.29	0.29	0.00	21	0.33	0.25	0.08	80	0.29	0.29	0.00
22	0.30	0.34	-0.04	83	0.31	0.34	-0.03	22	0.30	0.34	-0.04	83	0.31	0.34	-0.03
23	0.34	0.39	-0.05	85	0.23	0.23	0.00	23	0.34	0.40	-0.06	85	0.23	0.24	-0.01
24	0.25	0.29	-0.04	86	0.28	0.27	0.01	24	0.25	0.29	-0.04	86	0.28	0.27	0.01
25	0.19	0.22	-0.03	87	0.28	0.26	0.02	25	0.19	0.23	-0.04	87	0.28	0.26	0.02
26	0.30	0.28	0.02	88	0.24	0.25	-0.01	26	0.30	0.27	0.03	88	0.24	0.25	-0.01
27	0.23	0.20	0.03	89	0.33	0.27	0.06	27	0.23	0.19	0.04	89	0.33	0.26	0.07
29	0.35	0.31	0.04	90	0.27	0.27	0.00	29	0.35	0.30	0.05	90	0.27	0.25	0.02
30	0.50	0.43	0.07	91	0.26	0.27	-0.01	30	0.50	0.40	0.10	91	0.26	0.28	-0.02
31	0.18	0.23	-0.05	93	0.22	0.23	-0.01	31	0.18	0.24	-0.06	93	0.22	0.23	-0.01
32	0.21	0.23	-0.02	96	0.23	0.27	-0.04	32	0.21	0.23	-0.02	96	0.23	0.27	-0.04
33	0.48	0.41	0.07	98	0.19	0.19	0.00	33	0.48	0.40	0.08	98	0.19	0.19	0.00
34	0.35	0.32	0.03	99	0.22	0.24	-0.02	34	0.35	0.32	0.04	99	0.22	0.25	-0.03
35	0.31	0.27	0.04	100	0.19	0.22	-0.03	35	0.31	0.26	0.05	100	0.19	0.23	-0.04
36	0.28	0.27	0.01					36	0.28	0.27	0.01				
38	0.27	0.28	-0.01	Av	0.30	0.30	0.00	38	0.27	0.28	-0.01	Av	0.30	0.30	0.00
40	0.25	0.26	-0.01	SD	0.09	0.08	0.04	40	0.25	0.26	-0.01	SD	0.09	0.08	0.04
41	0.19	0.21	-0.02	Min	0.18	0.19	-0.07	41	0.19	0.21	-0.02	Min	0.18	0.19	-0.09
43	0.28	0.26	0.02	Max	0.60	0.58	0.07	43	0.28	0.26	0.02	Max	0.60	0.57	0.10
44	0.30	0.25	0.05					44	0.30	0.24	0.06				
45	0.23	0.23	0.00					45	0.23	0.23	0.00				
46	0.33	0.28	0.05					46	0.33	0.28	0.05				
47	0.25	0.26	-0.01					47	0.25	0.26	-0.01				
50	0.20	0.23	-0.03					50	0.20	0.24	-0.04				
52	0.60	0.58	0.02					52	0.60	0.57	0.03				

ตาราง 46 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้ายผลที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วย MSC

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	0.46	0.42	0.04	60	0.27	0.27	0.00	1	0.46	0.41	0.05	60	0.27	0.27	0.00
2	0.46	0.46	0.00	61	0.27	0.27	0.00	2	0.46	0.45	0.01	61	0.27	0.27	0.00
5	0.51	0.50	0.01	62	0.22	0.27	-0.05	5	0.51	0.50	0.01	62	0.22	0.27	-0.05
8	0.48	0.44	0.04	63	0.21	0.24	-0.03	8	0.48	0.42	0.06	63	0.21	0.24	-0.03
9	0.31	0.32	-0.01	64	0.20	0.24	-0.04	9	0.31	0.32	-0.01	64	0.20	0.24	-0.04
12	0.35	0.30	0.05	69	0.25	0.27	-0.02	12	0.35	0.30	0.05	69	0.25	0.27	-0.02
13	0.28	0.23	0.05	70	0.22	0.26	-0.04	13	0.28	0.22	0.06	70	0.22	0.27	-0.05
14	0.25	0.21	0.04	71	0.29	0.25	0.04	14	0.25	0.21	0.04	71	0.29	0.25	0.04
16	0.30	0.28	0.02	72	0.33	0.25	0.08	16	0.30	0.27	0.03	72	0.33	0.24	0.09
17	0.25	0.31	-0.06	73	0.27	0.31	-0.04	17	0.25	0.31	-0.06	73	0.27	0.31	-0.04
18	0.31	0.34	-0.03	74	0.22	0.22	0.00	18	0.31	0.35	-0.04	74	0.22	0.22	0.00
20	0.31	0.29	0.02	75	0.21	0.23	-0.02	20	0.31	0.29	0.02	75	0.21	0.24	-0.03
21	0.33	0.30	0.03	76	0.21	0.23	-0.02	21	0.33	0.30	0.03	76	0.21	0.24	-0.03
23	0.34	0.34	0.00	78	0.35	0.28	0.07	23	0.34	0.34	0.00	78	0.35	0.28	0.07
24	0.25	0.28	-0.03	79	0.26	0.27	-0.01	24	0.25	0.28	-0.03	79	0.26	0.27	-0.01
25	0.19	0.23	-0.04	80	0.29	0.29	0.00	25	0.19	0.24	-0.05	80	0.29	0.29	0.00
26	0.30	0.29	0.01	81	0.26	0.29	-0.03	26	0.30	0.29	0.01	81	0.26	0.30	-0.04
27	0.23	0.22	0.01	82	0.31	0.29	0.02	27	0.23	0.22	0.01	82	0.31	0.29	0.02
28	0.40	0.34	0.06	83	0.31	0.34	-0.03	28	0.40	0.33	0.07	83	0.31	0.35	-0.04
29	0.35	0.33	0.02	84	0.26	0.25	0.01	29	0.35	0.32	0.03	84	0.26	0.26	0.00
30	0.50	0.50	0.00	85	0.23	0.25	-0.02	30	0.50	0.49	0.01	85	0.23	0.27	-0.04
31	0.18	0.22	-0.04	86	0.28	0.28	0.00	31	0.18	0.24	-0.06	86	0.28	0.28	0.00
32	0.21	0.25	-0.04	88	0.24	0.24	0.00	32	0.21	0.25	-0.04	88	0.24	0.24	0.00
34	0.35	0.38	-0.03	91	0.26	0.25	0.01	34	0.35	0.38	-0.03	91	0.26	0.25	0.01
35	0.31	0.26	0.05	93	0.22	0.22	0.00	35	0.31	0.25	0.06	93	0.22	0.22	0.00
36	0.28	0.26	0.02	95	0.25	0.27	-0.02	36	0.28	0.26	0.02	95	0.25	0.27	-0.02
38	0.27	0.33	-0.06	96	0.23	0.25	-0.02	38	0.27	0.34	-0.07	96	0.23	0.26	-0.03
39	0.23	0.20	0.03	98	0.19	0.17	0.02	39	0.23	0.19	0.04	98	0.19	0.17	0.02
40	0.25	0.28	-0.03	99	0.22	0.21	0.01	40	0.25	0.29	-0.04	99	0.22	0.22	0.00
41	0.19	0.19	0.00					41	0.19	0.19	0.00				
43	0.28	0.25	0.03					43	0.28	0.25	0.03				
44	0.30	0.23	0.07	Av	0.06	0.05	0.03	44	0.30	0.22	0.08	Av	0.06	0.05	0.03
45	0.23	0.29	-0.06	SD	0.11	0.07	0.03	45	0.23	0.30	-0.07	SD	0.11	0.07	0.04
46	0.33	0.33	0.00	Min	0.18	0.17	-0.06	46	0.33	0.33	0.00	Min	0.18	0.17	-0.07
47	0.25	0.25	0.00	Max	0.51	0.50	0.08	47	0.25	0.24	0.01	Max	0.51	0.50	0.09
48	0.22	0.20	0.02					48	0.22	0.17	0.05				
50	0.20	0.24	-0.04					50	0.20	0.25	-0.05				
56	0.35	0.35	0.00					56	0.35	0.35	0.00				
57	0.31	0.34	-0.03					57	0.31	0.35	-0.04				
58	0.34	0.31	0.03					58	0.34	0.30	0.04				

ตาราง 47 ผลการทำนายปริมาณกรดที่ไทเทรตได้จาก NIRS ในตำแหน่งท้ายผลที่ปรับแต่ง
สเปกตรัมด้วย First derivative

Calibration								Validation							
N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif	N	T	P	Dif
1	0.46	0.41	0.05	61	0.27	0.26	0.01	1	0.46	0.40	0.06	61	0.27	0.26	0.01
2	0.46	0.49	-0.03	62	0.22	0.27	-0.05	2	0.46	0.49	-0.03	62	0.22	0.28	-0.06
5	0.51	0.53	-0.02	63	0.21	0.27	-0.06	5	0.51	0.53	-0.02	63	0.21	0.27	-0.06
6	0.53	0.50	0.03	66	0.31	0.26	0.05	6	0.53	0.49	0.04	66	0.31	0.26	0.05
7	0.44	0.41	0.03	67	0.25	0.19	0.06	7	0.44	0.39	0.05	67	0.25	0.15	0.10
8	0.48	0.51	-0.03	69	0.25	0.24	0.01	8	0.48	0.51	-0.03	69	0.25	0.23	0.02
11	0.25	0.26	-0.01	71	0.29	0.24	0.05	11	0.25	0.25	0.00	71	0.29	0.23	0.06
12	0.35	0.27	0.08	72	0.33	0.29	0.04	12	0.35	0.26	0.09	72	0.33	0.28	0.05
13	0.28	0.24	0.04	74	0.22	0.27	-0.05	13	0.28	0.23	0.05	74	0.22	0.28	-0.06
14	0.25	0.24	0.01	75	0.21	0.24	-0.03	14	0.25	0.23	0.02	75	0.21	0.25	-0.04
16	0.30	0.27	0.03	76	0.21	0.21	0.00	16	0.30	0.27	0.03	76	0.21	0.22	-0.01
18	0.31	0.28	0.03	78	0.35	0.34	0.01	18	0.31	0.27	0.04	78	0.35	0.34	0.01
19	0.23	0.29	-0.06	80	0.29	0.34	-0.05	19	0.23	0.30	-0.07	80	0.29	0.35	-0.06
21	0.33	0.25	0.08	82	0.31	0.32	-0.01	21	0.33	0.24	0.09	82	0.31	0.33	-0.02
22	0.30	0.31	-0.01	83	0.31	0.29	0.02	22	0.30	0.31	-0.01	83	0.31	0.29	0.02
23	0.34	0.32	0.02	84	0.26	0.28	-0.02	23	0.34	0.32	0.02	84	0.26	0.28	-0.02
24	0.25	0.25	0.00	85	0.23	0.28	-0.05	24	0.25	0.25	0.00	85	0.23	0.31	-0.08
25	0.19	0.20	-0.01	86	0.28	0.24	0.04	25	0.19	0.21	-0.02	86	0.28	0.23	0.05
26	0.30	0.34	-0.04	87	0.28	0.29	-0.01	26	0.30	0.35	-0.05	87	0.28	0.30	-0.02
28	0.40	0.35	0.05	88	0.24	0.29	-0.05	28	0.40	0.34	0.06	88	0.24	0.29	-0.05
29	0.35	0.36	-0.01	89	0.33	0.32	0.01	29	0.35	0.36	-0.01	89	0.33	0.32	0.01
30	0.50	0.51	-0.01	90	0.27	0.24	0.03	30	0.50	0.53	-0.03	90	0.27	0.24	0.03
33	0.48	0.45	0.03	91	0.26	0.25	0.01	33	0.48	0.45	0.03	91	0.26	0.25	0.01
34	0.35	0.32	0.03	93	0.22	0.25	-0.03	34	0.35	0.31	0.04	93	0.22	0.25	-0.03
36	0.28	0.24	0.04	94	0.22	0.22	0.00	36	0.28	0.23	0.05	94	0.22	0.23	-0.01
38	0.27	0.25	0.02	95	0.25	0.33	-0.08	38	0.27	0.26	0.01	95	0.25	0.34	-0.09
39	0.23	0.23	0.00	96	0.23	0.28	-0.05	39	0.23	0.23	0.00	96	0.23	0.29	-0.06
40	0.25	0.29	-0.04	98	0.19	0.21	-0.02	40	0.25	0.30	-0.05	98	0.19	0.22	-0.03
41	0.19	0.21	-0.02	99	0.22	0.27	-0.05	41	0.19	0.22	-0.03	99	0.22	0.28	-0.06
43	0.28	0.28	0.00	100	0.19	0.24	-0.05	43	0.28	0.28	0.00	100	0.19	0.25	-0.06
44	0.30	0.27	0.03					44	0.30	0.26	0.04				
45	0.23	0.27	-0.04	Av	0.07	0.06	0.03	45	0.23	0.28	-0.05	Av	0.07	0.06	0.04
47	0.25	0.25	0.00	SD	0.09	0.08	0.04	47	0.25	0.26	-0.01	SD	0.09	0.08	0.05
48	0.22	0.27	-0.05	Min	0.19	0.19	-0.08	48	0.22	0.29	-0.07	Min	0.19	0.15	-0.09
49	0.26	0.25	0.01	Max	0.53	0.53	0.09	49	0.26	0.25	0.01	Max	0.53	0.53	0.11
51	0.53	0.44	0.09					51	0.53	0.42	0.11				
53	0.46	0.43	0.03					53	0.46	0.43	0.03				
54	0.38	0.39	-0.01					54	0.38	0.38	0.00				
55	0.33	0.37	-0.04					55	0.33	0.36	-0.03				
58	0.34	0.32	0.02					58	0.34	0.31	0.03				