



การใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้และเทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัมในการ
ติดตามคุณภาพภายในและปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง



โดย
นางสาวนิมิตรา ไชยรัตน์โชติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้และเทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัมในการ
ติดตามคุณภาพภายในและปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

NEAR INFRARED SPECTROSCOPY AND HYPERSPECTRAL IMAGING TECHNIQUES FOR
DETECTING INTERNAL QUALITY AND BETA-CAROTENE IN MANGO CV. NAM DOK
MAI SUBCV. SI THONG



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree
Master of Science Program in Food Technology
Department of Food Technology
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2016
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การใช้เทคนิค สเปกโทร-สโกปีอินฟราเรดย่านใกล้และเทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัมในการติดตามคุณภาพ ภายในและปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง” เสนอโดย นางสาวนิมิตรา ไชยรัตน์โชติ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราภรณ์ มหาโยธี
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ คุวิจิตรจากรู
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ดร. พีรพงษ์ แสงวนางค์กุล)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ คุวิจิตรจากรู)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราภรณ์ มหาโยธี)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย)

...../...../.....

56403207 : สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

คำสำคัญ : มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง, สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้, การถ่ายภาพเชิงสเปกตรัม, เบต้าแคโรทีน, คุณภาพภายใน, ดัชนีการสุก

นิมิตตรา ไชยรัตน์โชติ : การใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้และเทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัมในการติดตามคุณภาพภายในและปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.บุศราภรณ์ มหาโยธี ผศ.ดร.ปราโมทย์ คุวิจิตรจาร์ และ ผศ.ดร.เอกพันธ์ แก้วมณีชัย. 180 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (near-infrared spectroscopy, NIRS) และเทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัม (hyperspectral imaging, HSI) ในการตรวจสอบคุณภาพภายในและปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง การศึกษานี้ใช้ตัวอย่างมะม่วงจำนวน 188 ผล จากการซื้อมะม่วงมาทั้งหมด 4 ชุดการทดลอง โดยในแต่ละครั้งนำมาบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นในทุกๆวันของการบ่มทำการสุ่มมะม่วงจำนวน 6 ผล มาวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS ที่ตำแหน่งบนผลมะม่วงที่แตกต่างกัน ได้แก่ ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผล ในช่วงความยาวคลื่น 800 ถึง 2500 นาโนเมตร ระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ จากนั้นทำการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัมด้วยเทคนิค HSI ในช่วงความยาวคลื่น 450 ถึง 1000 นาโนเมตร ด้วยการถ่ายภาพแบบทั้งผลในระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ แล้วนำมาบ่มจากแต่ละตำแหน่งบนผลที่ทำการวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS และ HSI ไปวิเคราะห์หาค่าทางเคมีและปริมาณเบต้าแคโรทีน สร้างสมการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากการวัดในแต่ละตำแหน่งผล และสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งกับค่าทางเคมี ด้วยเทคนิคกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (partial least square, PLS) จากการศึกษาพบว่า ตำแหน่งของการวัดสเปกตรัมบนผลมะม่วงมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการทำนายค่าด้วยเทคนิค NIRS โดยอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงมีผลต่อการทำนายคุณภาพ ได้แก่ ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (titratable acidity, TA) และความเป็นกรดต่ำ (pH) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solids, TSS) และปริมาณเบต้าแคโรทีน (β -carotene) โดยสมการทำนายค่าในการตรวจสอบค่า TSS, TA และ pH ที่ตำแหน่งแก้มผลมีความสัมพันธ์การตัดสินใจ (coefficient of determination; R^2) ต่ำกว่าตำแหน่งอื่นๆ และมีค่าความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนาย (standard error of prediction, SEP) สูงกว่าตำแหน่งอื่นบนผลมะม่วง แต่อย่างไรก็ตามค่า R^2 ของ TSS และค่า pH ที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลมีค่ามากกว่า 0.80 ซึ่งสามารถใช้ในการคัดเลือกและประมาณค่าได้ และค่า R^2 ของ TA มีค่ามากกว่า 0.70 ซึ่งสมการยังสามารถใช้ในการคัดเลือกเบื้องต้นได้ แต่การสร้างสมการทำนายค่าจากสเปกตรัมเฉลี่ยทุกตำแหน่งบนผลมีความแม่นยำมากที่สุดในการตรวจสอบค่า TSS และ TA โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9 และ 0.84 และมีค่า SEP เท่ากับ 1.1 องศาบริกซ์ และ 0.29 กรัมกรดซิตริกต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างสด ตามลำดับ ส่วนสมการทำนายค่า pH มีความแม่นยำที่ตำแหน่งปลายผล มีค่า R^2 และ SEP เท่ากับ 0.90 และ 0.42 ตามลำดับ และในการตรวจสอบปริมาณเบต้าแคโรทีนด้วยเทคนิค NIRS พบว่าสมการทำนายค่าที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผล (R^2 อยู่ในช่วง 0.62 – 0.77) มีความแม่นยำน้อยกว่าสมการที่สร้างจากสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผล โดยสมการทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ได้มีค่า R^2 และ SEP เท่ากับ 0.90 และ 1.02 มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างแห้ง ตามลำดับ นอกจากนี้ ตำแหน่งการเลือกสเปกตรัมและค่าทางเคมีบนผลมะม่วงมีอิทธิพลต่อการตรวจสอบคุณภาพด้วยเทคนิค HSI พบว่า สมการที่ได้จากสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลมีความแม่นยำมากที่สุด โดยค่า TA และ pH มีค่า R^2 เท่ากับ 0.88 และ 0.92 และมีค่า SEP เท่ากับ 0.29 กรัมกรดซิตริกต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างสด และ 0.38 ตามลำดับ ในการศึกษาพบว่า การตรวจสอบค่า TSS ด้วยเทคนิค HSI ในทุกตำแหน่งผลของการวัดสเปกตรัมมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.5 – 0.6 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่มีความแม่นยำน้อย และในการตรวจสอบปริมาณเบต้าแคโรทีนด้วยเทคนิค HSI พบว่า สมการทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนมีความแม่นยำในทุกตำแหน่งผล แต่สมการทำนายค่าที่ได้จากการเฉลี่ยสเปกตรัมจากทุกตำแหน่งผลมีความแม่นยำมากที่สุด มีค่า R^2 และ SEP เท่ากับ 0.88 และ 1.11 มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างแห้ง ตามลำดับ

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2. 3.

56403207 : MAJOR : (FOOD TECHNOLOGY)

KEYWORD : MANGO, NEAR INFRARED SPECTROSCOPY, HYPERSPECTRAL IMAGING, INTERNAL QUALITY, BETA CAROTENE, RIPENING INDEX

NIMMITRA CHAIYARATTANACHOTE : NEAR INFRARED SPECTROSCOPY AND HYPERSPECTRAL IMAGING TECHNIQUES FOR DETECTING INTERNAL QUALITY AND BETA-CAROTENE IN MANGO CV. NAM DOK MAI SUBCV. SI THONG. THESIS ADVISORS : ASST.PROF.BUSARAKORN MAHAYOTHEE, Ph.D., ASST.PROF.PRAMOTE KHUWIJTJARU, Ph.D., AND ASST.PROF.EAKAPHAN KEOWMANEECHAI, Ph.D. . 180 pp.

The effect of fruit positions on the efficiency of NIRS and HSI application in determination of β -carotene and internal quality of mango cv Nam Dok Mai subcv Si Thong was investigated. A total of 188 fruits from 4 purchase lots was used. Fruits were ripened at room temperature for 7 days. At each day, six fruits were randomly selected for NIRS and HSI measurements. NIR spectra were acquired at 3 positions per fruit including shoulder, cheek and tip at the wavelength region (λ) of 800 – 2500 nm in a reflectance mode. HSI analysis was done at λ 450 – 1000 nm in a reflectance mode for a single shot. Fruits from three positions were taken to determine internal qualities and β -carotene content. Calibration models for predicting β -carotene content and internal qualities were developed using a PLS regression. It was found that the position of spectrum measurement on mango fruit affected the prediction efficiency in determination of internal quality and β -carotene using NIRS. The fruit position affected the accuracy of TA, TSS, pH and β -carotene prediction model. The prediction model of TSS, TA and pH developed from the cheek position spectra presented the lowest and the highest R^2 and SEP, respectively. However, the R^2 of TSS and pH obtained by spectrum measuring at cheek position were higher than 0.80 which can be used for selecting and predicting, while R^2 of TA was higher than 0.70 which can be used for the primary selection. The accuracy of the prediction model developed from average spectra of three positions was shown R^2 and SEP of 0.9 and 1.1 °Brix for TSS, respectively, and 0.84 and 0.29 g citric acid/100g sample for TA, respectively. The best prediction model of pH was developed from the tip position with R^2 and SEP of 0.9 and 0.42, respectively. For β -carotene, the prediction models developed from each position spectra showed lower R^2 than the prediction model developed from the average spectra. The best prediction model for β -carotene had R^2 and SEP of 0.90 and 1.02 g/100g dried sample, respectively. In addition, fruit position affected the prediction efficiency using HSI. The accuracy of the prediction models developed from average spectra, was shown as R^2 and SEP of 0.88 and 0.29 g citric acid/100g sample for TA model, 0.88 and 1.11 g/100g dried sample for β -carotene model and 0.92 and 0.38 for pH model. The TSS model has the lowest prediction accuracy (R^2 of 0.5 to 0.6 and SEP of 2.1 to 2.2).

Department of Food Technology

Graduate School, Silpakorn University

Student's signature

Academic Year 2016

Thesis Advisors' signature 1. 2. 3.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์ ความเมตตา ความช่วยเหลือ และความมีน้ำใจจากบุคคลหลายฝ่าย ดิฉันขอกราบขอบพระคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราภรณ์ มหาโยธี ซึ่งเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้การสนับสนุน และคอยให้คำปรึกษาตลอดการดำเนินงานวิจัย รวมไปถึงให้คำแนะนำต่างๆที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการทำงาน ตลอดจนตรวจเล่มวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ คุวิจิตรจากรู ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องการวิเคราะห์ข้อมูล และให้ความช่วยเหลือในแก้ปัญหาในระหว่างการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาในการวางแผนการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รณฤทธิ์ ฤทธิธรม ที่ให้ความรู้ในเรื่องเทคนิค NIRS และ HSI ตั้งแต่พื้นฐานตลอดจนการประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ Prof. Dr. Joachim Müller และ Dr. Macus Nagle จาก Institute of Agricultural Engineering, University of Hohenheim ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือ และอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่สนับสนุนสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนนักวิทยาศาสตร์ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท สวิฟท์ จำกัด จังหวัดนครปฐม ที่ให้การสนับสนุนมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสำหรับการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา รวมไปถึงทุกคนในครอบครัวของดิฉัน ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุนการทำงาน และช่วยเหลือด้านค่าใช้จ่ายของดิฉัน

ขอขอบพระคุณ นางสาวภาริกา รุ่งพิชยพิเชษฐ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ เรื่องการเตรียมตัวอย่างมะม่วงสำหรับการทดลอง ตลอดจนให้คำปรึกษาและแนะนำวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

ขอขอบพระคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจ ให้การสนับสนุน และช่วยเหลือดิฉันเป็นอย่างดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง.....	5
การเปลี่ยนแปลงทางสรีระวิทยาของมะม่วงภายหลังการเก็บเกี่ยว	
การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพ.....	6
ขนาด.....	6
น้ำหนักต่อผล.....	6
ความแน่นเนื้อ.....	7
สีเปลือกและสีเนื้อ.....	8
การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางเคมี.....	8
ปริมาณแป้ง.....	8
ปริมาณน้ำตาล.....	9
กรดอินทรีย์.....	10
เบต้าแคโรทีน.....	11
กระบวนการหายใจ.....	12
การผลิตเอทิลีน.....	13
ดัชนีการสุก (RPI).....	14

	หน้า
หลักการพื้นฐานของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIRS).....	15
การตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงด้วยเทคนิค NIRS.....	18
หลักการพื้นฐานของเทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัม (HSI).....	23
การตรวจสอบคุณภาพของผลไม้ด้วยเทคนิค HSI.....	26
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	32
วัตถุประสงค์และการเตรียมตัวอย่าง.....	32
สารเคมี.....	33
อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	33
วิธีการทดลอง.....	35
การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพใน ระหว่างการบ่มให้สุก.....	35
การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของมะม่วงในระหว่างการบ่มให้สุก.....	36
การวัดขนาดและน้ำหนัก.....	36
ความแน่นเนื้อ (Firmness).....	37
ค่าสี (Color).....	38
การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของมะม่วงในระหว่างการบ่มให้สุก.....	39
ความเป็นกรดต่าง (pH).....	39
ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (TA).....	39
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS).....	40
ปริมาณเบต้าแคโรทีน (β -carotene content).....	40
การคำนวณค่าดัชนีการสุก.....	41
การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	41
การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการใช้เทคนิค NIRS และ HSI ในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่ม ให้สุก.....	42
การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการใช้เทคนิค NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่ม ให้สุก.....	44
การวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS.....	44

	หน้า
การสร้างสมการเทียบมาตรฐานจากเทคนิค NIRS.....	45
การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการใช้เทคนิค HSI ในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่าง การบ่มให้สุก.....	48
การถ่ายภาพสเปกตรัม.....	48
การวิเคราะห์ภาพถ่ายสเปกตรัม.....	49
การสร้างสมการเทียบมาตรฐานจากเทคนิค HSI.....	50
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	52
การเปลี่ยนแปลงขนาด น้ำหนัก และความแน่นเนื้อของมะม่วงในระหว่างบ่มให้สุก....	52
การเปลี่ยนแปลงขนาดและน้ำหนักของมะม่วงในระหว่างบ่มให้สุก.....	52
การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของมะม่วงในระหว่างบ่มให้สุก.....	53
อิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของ มะม่วงในระหว่างบ่มให้สุก.....	54
การเปลี่ยนแปลงค่าสีเปลือกในระหว่างบ่มให้สุก.....	54
การเปลี่ยนแปลงค่าสีเนื้อในระหว่างบ่มให้สุก.....	59
การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในระหว่างบ่มให้สุก.....	63
ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้.....	64
ความเป็นกรดต่าง.....	65
ปริมาณเบต้าแคโรทีน.....	66
ดัชนีการสุก.....	68
ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองใน ระหว่างกระบวนการสุกด้วยวิธีสัมพันธ์ของเพียร์สัน.....	69
อิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อการใช้เทคนิค NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพ ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก.....	71
สเปกตรัม NIRS.....	71
การทำนายค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค NIRS.....	74
การทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และ ความเป็นกรดต่างของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค NIRS.....	77
การทำนายค่าดัชนีการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค NIRS.....	90

	หน้า
อิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อการใช้เทคนิค HSI ในการทำนายคุณภาพ ภายในของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างกระบวนการสุก.....	95
สเปกตรัม HSI.....	95
การทำนายค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค HSI.....	98
การทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และ ความเป็นกรดต่างของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค HSI.....	100
การทำนายค่าดัชนีการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค HSI.....	111
การทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วย เทคนิค NIRS และ HSI.....	116
การทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค NIRS.....	116
การทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค HSI.....	121
5 สรุปผลการทดลอง.....	125
เอกสารอ้างอิง.....	126
ภาคผนวก.....	137
ภาคผนวก ก.....	138
ภาคผนวก ข.....	142
ภาคผนวก ค.....	146
ภาคผนวก ง.....	158
ภาคผนวก จ.....	179
ประวัติผู้วิจัย.....	180

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การใช้เทคนิค NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วง.....	19
2	การใช้เทคนิค HSI ในการตรวจสอบคุณภาพของผลไม้.....	27
3	ความแตกต่างของเทคนิคสเปกโทรสโกปี เทคนิคการถ่ายภาพ และ HSI.....	31
4	แหล่งที่มา ฤดูกาลเก็บเกี่ยวและสภาวะในการบ่มของมะม่วง ที่ใช้ในการศึกษา.....	32
5	ตำแหน่งบนผลและชุดการทดลองที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพทางเคมีและ กายภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก.....	36
6	ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ในระหว่างกระบวนการสุกด้วยวิธีสัมพันธ์ของเพียร์สัน.....	70
7	ค่าทางสถิติของความแน่นเนื้อที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง.....	75
8	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม ความยาวคลื่น และค่าทางสถิติของความแน่นเนื้อที่ใช้ สร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS ในมะม่วง น้ำดอกไม้สีทอง.....	75
9	ค่าทางสถิติของค่า TSS, TA และ pH ที่ใช้การสร้างสมการเทียบมาตรฐาน และสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง.....	79
10	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม ความยาวคลื่น และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ใช้สร้าง สมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS ในมะม่วง น้ำดอกไม้สีทอง.....	80
11	ค่าทางสถิติของค่า RPI ที่ใช้การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวน สอบด้วยเทคนิค NIRS ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง.....	91
12	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม ความยาวคลื่น และค่าทางสถิติของค่า RPI ที่ใช้สร้าง สมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค.....	92
13	ค่าทางสถิติของความแน่นเนื้อที่ใช้การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบด้วยเทคนิค HSI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง.....	99

ตารางที่		หน้า
14	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของความแน่นเนื้อที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง.....	99
15	ค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ใช้การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง.....	101
16	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS, TA และ pH ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง.....	102
17	ค่าทางสถิติของ RPI ที่ใช้การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง.....	112
18	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า RPI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐาน.....	113
19	ค่าทางสถิติของปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ใช้การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS และ HSI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง....	117
20	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของปริมาณเบต้าแคโรทีนของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS และ HSI.....	118
21	ขนาดและน้ำหนักของมะม่วงในระหว่างการบ่มให้สุก.....	146
22	ค่าสีเปลือกและสีเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเฉลี่ยทุกชุดการทดลอง.....	147
23	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง.....	148
24	ค่าสีเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก.....	149
25	ค่าสีเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก.....	149
26	ค่าทางเคมีและกายภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในแต่ละวันบ่ม.....	150
27	ค่า L* ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่แต่ละตำแหน่งของผลในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก.....	150
28	ค่า a* ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่แต่ละตำแหน่งของผลในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก.....	151
29	ค่า b* ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่แต่ละตำแหน่งของผลในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก.....	151

ตารางที่	หน้า	
30	ค่า h° ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่แต่ละตำแหน่งของผลในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก.....	152
31	ค่า C ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่แต่ละตำแหน่งของผลในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก.....	152
32	แสดงค่า L^* ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก...	153
33	แสดงค่า a^* ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก...	153
34	แสดงค่า b^* ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก...	154
35	แสดงค่า h° ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก.....	154
36	แสดงค่า C ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก....	155
37	ค่า TSS ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก.....	155
38	ค่า TA ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก.....	156
39	ค่า pH ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก.....	156
40	ค่าปริมาณเบต้าแคโรทีนของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก.....	157
41	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของความแน่นเนื้อที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง.....	159
42	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ตำแหน่งไหล่ผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI.....	160
43	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ตำแหน่งแก้มผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI.....	161
44	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ตำแหน่งปลายผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI.....	162

ตารางที่		หน้า
45	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS เฉลี่ยจากทั้งผลของมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบ ด้วยเทคนิค HSI.....	163
46	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TA ที่ตำแหน่งไหล่ผลมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบ ด้วยเทคนิค HSI.....	164
47	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TA ที่ตำแหน่งแก้มผลมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบ ด้วยเทคนิค HSI.....	165
48	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TA ที่ตำแหน่งปลายผลมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบ ด้วยเทคนิค HSI.....	166
49	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TA เฉลี่ยจากทั้งผลของมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบ ด้วยเทคนิค HSI.....	167
50	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า pH ที่ตำแหน่งไหล่ผลของ มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบด้วยเทคนิค HSI.....	168
51	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า pH ที่ตำแหน่งแก้มผลของ มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบด้วยเทคนิค HSI	169
52	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า pH ที่ตำแหน่งปลายผลของ มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบด้วยเทคนิค HSI	170
53	วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า pH เฉลี่ยจากทั้งผลของมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบ ด้วยเทคนิค HSI.....	171

ตารางที่	หน้า
54	172
55	173
56	174
57	175
58	176
59	177
60	178

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การเปลี่ยนแปลงค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงสายพันธุ์ Dashehri ในระหว่างการเก็บรักษา.....	7
2	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งและน้ำตาลของมะม่วงสายพันธุ์ Haden ในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก.....	9
3	การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลและกรดในมะม่วง Keitt ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85-90%.....	10
4	สูตรโครงสร้างไอโซเมอร์ของ β -carotene.....	12
5	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ CO_2 และ C_2H_4 ที่เก็บเกี่ยวในวันที่ 100 หลังติดผลของมะม่วงพันธุ์ Cogshall.....	13
6	ความยาวคลื่นและช่วงการดูดกลืนของหมึกทั้งกักชั้น.....	16
7	ระบบการวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS.....	16
8	ส่วนประกอบของ NIRS.....	17
9	ข้อมูลภาพถ่าย 3 มิติ หรือ hypercube และสเปกตรัมที่ได้ในแต่ละพิกเซลของการถ่ายภาพด้วยเทคนิค HSI.....	23
10	ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่อง HSI.....	24
11	ระบบการถ่ายภาพ HSI และระบบการตรวจจับภาพ.....	25
12	แผนภาพการกระจายตัวของปริมาณความชื้นในมะม่วงแผ่นอบแห้ง.....	30
13	การแบ่งตำแหน่งของผลมะม่วงสำหรับการทดลอง.....	35
14	การวัดค่าความกว้าง ความยาว และความหนาของมะม่วง.....	37
15	ขั้นตอนทั่วไปในการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการตรวจสอบคุณภาพมะม่วงด้วยเทคนิค NIRS และ HSI.....	43
16	การวางตัวอย่างในการวัดเส้นสเปกตรัม ตำแหน่งบนผลมะม่วงการวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS และการเฉลี่ยเส้นสเปกตรัม.....	45
17	ขั้นตอนการสร้างสมการทำนายคุณภาพด้วยเทคนิค NIRS.....	47
18	ระบบการถ่ายภาพด้วยเทคนิค HSI.....	49
19	การวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงสเปกตรัม.....	50
20	ขั้นตอนการสร้างสมการทำนายคุณภาพด้วยเทคนิค HSI.....	51

ภาพที่	หน้า
36	การเปลี่ยนแปลงค่า RPI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก..... 68
37	เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลมะม่วงที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค NIRS ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้อง..... 72
38	เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลมะม่วงที่ได้จากเทคนิค NIRS และ ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสอง (D_2) ของมะม่วงในระหว่างการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้อง..... 72
39	เส้นสเปกตรัมที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล ปลายผล และเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผล ของมะม่วงที่ได้จากเทคนิค NIRS ในวันที่บ่มที่ 0, 2, 5 และ 7 ที่อุณหภูมิห้อง..... 73
40	สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่าความแน่นเนื้อที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D_1 ร่วมกับ MSC (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด) จากการวิเคราะห์ด้วย เทคนิค NIRS..... 76
41	การกระจายตัวของค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน และสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS..... 76
42	การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วยเทคนิค NIRS..... 82
43	การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค NIRS..... 82
44	การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค NIRS..... 83
45	การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค NIRS..... 83
46	สัมประสิทธิ์การถดถอยค่า TSS ที่ได้จาก การวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วย เทคนิค NIRS ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D_1 ร่วมกับ SNV (ปรับเรียบแบบซา วิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด)..... 84
47	การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวน สอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วยเทคนิค NIRS..... 85
48	การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวน สอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค NIRS..... 85

ภาพที่	หน้า	
49	การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค NIRS.....	86
50	การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค NIRS.....	86
51	สัมประสิทธิ์การถดถอยจากสมการทวนสอบค่า TA ที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วยเทคนิค NIRS ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D ₂ (ปรับเรียบแบบชวาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด).....	87
52	การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วยเทคนิค NIRS.....	88
53	การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค NIRS.....	88
54	การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค NIRS.....	89
55	การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค NIRS.....	89
56	สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่า pH ที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค NIRS ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D ₁ (ปรับเรียบแบบชวาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด).....	90
57	กราฟการกระจายตัวของ RPI ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยเส้นสเปกตรัมที่วัดจากด้าน A ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค NIRS.....	93
58	กราฟการกระจายตัวของ RPI ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยเส้นสเปกตรัมที่วัดจากด้าน B ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค NIRS.....	93
59	กราฟการกระจายตัวของ RPI ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยเส้นสเปกตรัมเฉลี่ยที่วัดจากด้าน A และ B ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค NIRS.....	94
60	สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่า RPI ที่ได้จากด้าน A ของผลมะม่วงด้วยเทคนิค NIRS ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D ₁ (ปรับเรียบแบบชวาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด).....	94
61	เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลมะม่วงที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค HSI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้อง.....	96

ภาพที่	หน้า	
62	เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลมะม่วงที่ได้จากเทคนิค HSI และ ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสอง (D_2) ของมะม่วงใน ระหว่างการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้อง.....	96
63	เส้นสเปกตรัมที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล ปลายผล และเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผล ของมะม่วงที่ได้จากเทคนิค HSI ในวันบ่มที่ 0, 2, 5 และ 7 ที่อุณหภูมิห้อง.....	97
64	การกระจายตัวของค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน และสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI.....	99
65	สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่าความแน่นเนื้อด้วยเทคนิค HSI ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วยวิธี D_2 ร่วมกับ SNV (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด).....	100
66	การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วยเทคนิค HSI.....	103
67	การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค HSI.....	103
68	การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค HSI.....	104
69	การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค HSI.....	104
70	สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่า TSS ที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค HSI ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D_2 (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด).....	105
71	การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวน สอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วยเทคนิค HSI.....	106
72	การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวน สอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค HSI.....	106
73	การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวน สอบที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค HSI.....	107
74	การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวน สอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค HSI.....	107
75	สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่า TA ที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วย เทคนิค HSI ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV.....	108

ภาพที่	หน้า	
76	การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วยเทคนิค HSI.....	109
77	การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค HSI.....	109
78	การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค HSI.....	110
79	การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการ ทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค HSI.....	110
80	สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่า pH ที่ได้จากการเฉลี่ยสเปกตรัมทุกตำแหน่งผล ด้วยเทคนิค HSI ที่ไม่ผ่านการปรับแต่งเส้นสเปกตรัม.....	111
81	กราฟการกระจายตัวของ RPI ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยเส้นสเปกตรัมที่วัด จากด้าน A ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค HSI.....	114
82	กราฟการกระจายตัวของ RPI ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยเส้นสเปกตรัมที่วัด จากด้าน B ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค HSI.....	114
83	กราฟการกระจายตัวของ RPI ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยเส้นสเปกตรัมที่วัด จากด้าน A และ B ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค HSI.....	115
84	สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่า RPI ที่ได้จากสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วยเทคนิค HSI ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV.....	115
85	การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน และสมการทวนสอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วยเทคนิค NIRS.....	119
86	การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน และสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค NIRS.....	119
87	การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน และสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค NIRS.....	120
88	การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน และสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค NIRS.....	120
89	สัมประสิทธิ์การถดถอยของปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ได้จากการเฉลี่ยสเปกตรัม ทั้งผลด้วยเทคนิค NIRS ที่ปรับสเปกตรัมแต่งด้วยวิธี SNV.....	121

ภาพที่		หน้า
90	การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน และสมการทวนสอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วยเทคนิค HSI.....	122
91	การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน และสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค HSI.....	123
92	การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน และสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค HSI.....	123
93	การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน และสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค HSI.....	124
94	สัมประสิทธิ์การถดถอยของปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ได้จากการเฉลี่ยสเปกตรัม ทั้งผลด้วยเทคนิค HSI ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV ร่วมกับ D_1 (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด).....	124
95	กราฟมาตรฐานสำหรับคำนวณปริมาณเบต้าแคโรทีน.....	140
96	โครมาโทแกรมของสารมาตรฐานเบต้าแคโรทีนที่ความเข้มข้น 1 ppm.....	141



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มะม่วง (*Mangifera indica* L.) เป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของโลก ในปี พ.ศ. 2559 ในช่วงเดือนมกราคมถึงตุลาคม ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกมะม่วง 2.9 หมื่นตัน คิดเป็นมูลค่า 1,043 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) มีตลาดส่งออกที่สำคัญได้แก่ ญี่ปุ่น อเมริกา และทวีปยุโรป (ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, 2559) โดยมะม่วงน้ำดอกไม้เป็นพันธุ์ส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย นิยมส่งออกเป็นผลสด (วรรณวรงค์ และคณะ, 2555) เนื่องจากเป็นพันธุ์ที่มีลักษณะคุณภาพด้านความหวาน และกลิ่นรสที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับมะม่วงสายพันธุ์อื่นๆ ของไทย (Ledeker และคณะ, 2014) นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ เบต้าแคโรทีน (β -carotene) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ (provitamin A) (Rungpichayapichet และคณะ, 2015) จึงทำให้มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองได้รับความสนใจจากผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ

อย่างไรก็ตามคุณภาพของมะม่วงมีการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเก็บเกี่ยว เช่น การเพิ่มขึ้นของความหวาน และการลดลงของความแน่นเนื้อ เป็นต้น (Wongmetha และคณะ, 2015) เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ แสง ปริมาณน้ำ และตำแหน่งการติดผลบนต้นมะม่วง เป็นต้น (Léchaudel และคณะ, 2013) ดังนั้นการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงจึงมีความสำคัญต่อการส่งออก โดยลักษณะคุณภาพที่สำคัญที่ใช้ในการซื้อขายมะม่วงเพื่อการส่งออก ได้แก่ ความแน่นเนื้อ (firmness, F) สีเปลือก (peel color) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solids, TSS) ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (titratable acidity, TA) และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) (Jha และคณะ, 2014; Padma และคณะ, 2011)

ปัจจุบันการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงโดยทั่วไปใช้การตรวจสอบจากประสบการณ์ของผู้ผลิตซึ่งจะแตกต่างกันในแต่ละบุคคล ส่งผลต่อความสม่ำเสมอในคุณภาพของมะม่วงและอาจมีความผิดพลาดได้ นอกจากนี้ยังใช้การทดสอบทางกายภาพและเคมี เช่น ตรวจสอบค่า TSS และความแน่นเนื้อ เป็นต้น ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่ทำลายตัวอย่าง ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบคุณภาพมะม่วงได้ทุกผล ส่งผลต่อความไม่แน่นอนด้านคุณภาพ จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้เทคนิคการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายตัวอย่างในการตรวจวัดคุณภาพของมะม่วง

เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (near-infrared spectroscopy, NIRS) เป็นเทคนิคตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายตัวอย่างที่ถูกนำมาศึกษาเพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วง พบว่าเทคนิค NIRS มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงภายหลังการเก็บเกี่ยว โดยสามารถตรวจสอบค่า TSS, TA, pH, ความแน่นเนื้อ วัตถุแห้ง (dry matter, DM) และค่าสีได้ (Schmilovitch และคณะ, 2000; Saranwong และคณะ, 2004; Mahayothee และคณะ, 2002; Jha และคณะ, 2012; Jha และคณะ, 2014; และ Rungpichayapichet และคณะ, 2016) โดย NIRS สามารถตรวจวัดค่า TSS, TA, ความแน่นเนื้อ และดัชนีการสุก (ripening index, RPI) ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับช่วงความยาวคลื่น 700 – 1100 นาโนเมตร ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficients of determination, R^2) เท่ากับ 0.90, 0.74, 0.82 และ 0.80 และค่าความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนาย (standard errors of prediction, SEP) เท่ากับ 1.20 องศาบริกซ์, 0.38 %, 4.22 N และ 0.80 ตามลำดับ (Rungpichayapichet และคณะ, 2016) อีกทั้งเทคนิค NIRS มีความเป็นไปได้ในการใช้ตรวจสอบปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง มีค่า $R^2 > 0.80$ มีค่า SEP อยู่ในช่วง 11.64 – 20.20 retinol equivalent (RE) 100 g¹ edible part (EP) (Rungpichayapichet และคณะ, 2015)

อย่างไรก็ตามการตรวจสอบคุณภาพด้วยเทคนิค NIRS ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากเป็นการตรวจสอบคุณภาพแบบจุดจึงไม่สามารถตรวจสอบคุณภาพได้ครอบคลุมทั้งผลของตัวอย่างมะม่วง ซึ่งมะม่วงทั้งผลจะมีการสุกแต่ละตำแหน่งที่แตกต่างกัน (Pu และ Sun, 2015) เช่น มะม่วงสายพันธุ์ Cogshall มีค่า TSS สูง และมีค่า TA ต่ำที่ตำแหน่งปลายผลมะม่วง และในทางตรงกันข้ามที่ตำแหน่งไหล่ของผลมะม่วงมีค่า TSS ต่ำและ TA สูง (Nordey และคณะ, 2014) ดังนั้นอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงน่าจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้ NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพมะม่วงทั้งผล นอกจากนี้มีรายงานการศึกษาศึกษาการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายตัวอย่างที่รวมกันระหว่างการวิเคราะห์เชิงพื้นที่และสเปกตรัมของตัวอย่างที่เรียกว่า เทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัม (Hyperspectral imaging, HSI) มีรายงานการศึกษาศึกษาการใช้เทคนิค HSI ในตรวจสอบค่าความแน่นเนื้อ ปริมาณความชื้น และ TSS ในมะม่วงสายพันธุ์ Tommy Atkins ได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R) เท่ากับ 0.88, 0.81 และ 0.78 ตามลำดับ (Servakaranpalayam, 2006) แต่ยังไม่มีการศึกษาเทคนิค HSI ในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

ดังนั้น จากการเปลี่ยนแปลงลักษณะคุณภาพของมะม่วงทั้งผลมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งในการตรวจสอบคุณภาพบนผลมะม่วงจึงมีความสำคัญอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำนายคุณภาพมะม่วงด้วยเทคนิค NIRS และ HSI

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมี ภายนอก และปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการใช้ NIRS และ HSI ในการตรวจสอบคุณภาพทางเคมี ภายนอก และปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้เทคนิค NIRS และ HSI ในการตรวจสอบคุณภาพทางเคมี ภายนอก และปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

ตำแหน่งของผลมะม่วง ได้แก่ ไหล่ผล แก้มผล และปลายผล มีคุณภาพทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกันภายหลังการเก็บเกี่ยวอาจส่งผลต่อความแม่นยำในการทำนายคุณภาพภายในของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองทั้งผลด้วยเทคนิค NIRS และ HSI

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 วัสดุดิบที่ใช้คือมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองดิบแก่ ขนาด 3 (น้ำหนักต่อผล 250-350 กรัม) ที่ไม่ผ่านการอบไอน้ำ (hot water treatment) จากบริษัท สวิฟท์ จำกัด จังหวัดนครปฐม

1.4.2 มะม่วงจะถูกนำมาทดสอบการลอย-จมน้ำ เพื่อคัดเลือกความแก่อ่อน โดยเลือกมะม่วงที่จมน้ำเพื่อการศึกษาในครั้งนี้

1.4.3 คุณภาพภายในของมะม่วงในระหว่างการบ่มให้สุกที่ทำการศึกษา ได้แก่ TSS, TA, pH ความแน่นเนื้อ และปริมาณเบต้าแคโรทีน โดยแบ่งศึกษาที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผล มะม่วงถูกนำมาบ่มเป็นระยะเวลา 7 วันหรือจนกว่าจะเน่าเสียที่อุณหภูมิห้อง (29.7 ± 0.7 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ $66.3 \pm 4.4\%$)

1.4.4 วัดสเปกตรัมของมะม่วงในระหว่างการบ่มให้สุกด้วย NIRS ที่ความยาวคลื่น 800-2500 นาโนเมตร ที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผล และถ่ายภาพสเปกตรัมด้วย HSI ที่ความยาวคลื่น 450-1000 นาโนเมตร

1.4.5 สร้างสมการเทียบมาตรฐาน (calibration models) ในการทำนายคุณภาพภายในของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง และสมการทวนสอบ (validation models) จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางเคมีกับเส้นสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS เพื่อศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการใช้ NIRS ในการติดตามคุณภาพของมะม่วง

1.4.6 สร้างสมการเทียบมาตรฐานในการทำนายคุณภาพภายในของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง และสมการทวนสอบ จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางเคมีกับภาพถ่ายสเปกตรัมด้วยเทคนิค HSI เพื่อศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการใช้ HSI ในการติดตามคุณภาพของมะม่วง



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

มะม่วง มีถิ่นกำเนิดทางแถบตะวันออกของอินเดีย มะม่วงเป็นพืชที่ถูกจำแนกอยู่ในวงศ์ Anacardiaceae มีลักษณะประจำวงศ์คือ ไม้ต้นเนื้อแข็ง ใบเลี้ยงเดี่ยวหรือใบประกอบ เส้นใบออกจากร่องข้างของเส้นกลางใบแบบขนนก ดอกออกเป็นช่อแตกแขนงที่ปลายยอด มีอวุล 1 หน่วยต่อ 1 รังไข่ ผลเมล็ดเดี่ยวแข็ง มะม่วงจัดอยู่ในสกุลแม็งจิเฟอรา (*Mangifera*) (สุภาวรรณ, 2556) ในปี พ.ศ. 2555 ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกมะม่วงเป็นอันดับที่ 4 ของโลก รองลงมาจากประเทศอินเดีย จีน และเคนยา (FAOSTAT, 2015) ซึ่งในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกมะม่วง 3.3 หมื่นตันต่อปี คิดเป็นมูลค่า 1,211 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2559) ส่วนมากส่งออกเป็นผลไม้สดมีตลาดส่งออกที่สำคัญได้แก่ ญี่ปุ่น อเมริกา และยุโรปเนื่องจากมะม่วงเป็นผลไม้ที่มีคุณค่าทางโภชนาการ มีรสชาติและกลิ่นรสที่ดีจึงเป็นที่นิยมของต่างประเทศ (ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, 2559) มะม่วงจัดเป็นผลไม้ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจภายหลังการเก็บเกี่ยว (climacteric fruit) ดังนั้นการเก็บเกี่ยวมะม่วงในระดับความบริบูรณ์ที่เหมาะสมจึงสำคัญต่อการส่งออกมะม่วง เนื่องจากมะม่วงจะมีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการขนส่ง (Baloch และ Bibi, 2012)

มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง มีลักษณะของต้นและใบไม่แตกต่างจากพันธุ์น้ำดอกไม้ ผลดิบเปลือกจะมีสีเขียวอมเหลือง เมื่อมีอายุผล 2 ถึง 3 เดือน เปลือกจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน ผลแก่จะมีสีเขียวอมเหลือง และเมื่อสุกจะมีสีเหลืองทอง ในขณะที่เนื้อมะม่วงมีสีขาวอมเหลืองเมื่อผลแก่จัดและผลสุกจะมีสีเหลืองอมส้ม มีเปลือกหนากว่ามะม่วงน้ำดอกไม้ทั่วไป มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเป็นผลไม้ที่รับประทานผลสุก ผลดิบจะมีรสเปรี้ยวจัดและมีรสชาติหวานเมื่อสุก มะม่วงจะมีอายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 100 ถึง 105 วัน นับตั้งแต่วันดอกบานถึงผลแก่ มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองกลายเป็นพันธุ์มาจากมะม่วงน้ำดอกไม้ เป็นสายพันธุ์ที่ถูกชักนำให้ออกดอกนอกฤดูได้ง่าย ผลมีสีเหลืองสวยงามตั้งแต่ยังไม่สุก แต่ถ้าห่อผลมากกว่า 45 วันขึ้นไป ผลจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองออกขาว การมีเปลือกหนาทำให้ทนทานต่อการขนส่งและโรคแอนแทรกคโนสได้ดี จึงนิยมปลูกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเพื่อการส่งออกมากที่สุดในปัจจุบัน (มหนู และธวัชชัย, 2556)

2.2 การเปลี่ยนแปลงทางสรีระวิทยาของมะม่วงภายหลังการเก็บเกี่ยว

ในระหว่างการบ่มมะม่วงให้สุกจะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และสรีระวิทยา ดังนี้

2.2.1 การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพ

2.2.1.1 ขนาด

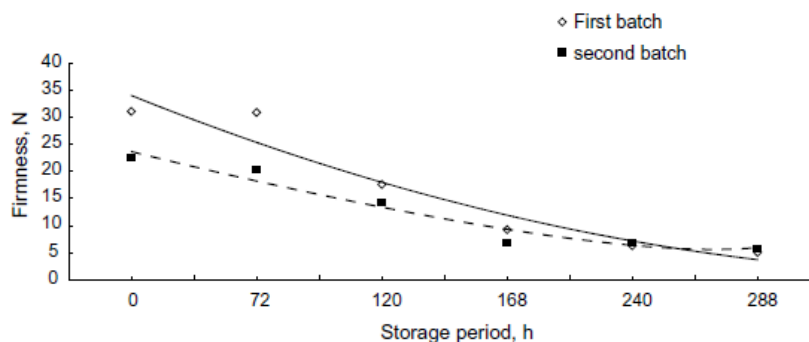
Ueda และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงขนาดและน้ำหนักของมะม่วงสายพันธุ์ Irwin ที่ถูกเก็บเกี่ยวจากต้นในสัปดาห์ที่ 10, 13, 16 และ 19 หลังดอกบาน พบว่า ในระหว่างเข้าสู่การเจริญเติบโตเต็มที่ (maturation) มะม่วงมีขนาดเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ Jha และคณะ (2006) ที่ได้ทำการศึกษาในมะม่วงพันธุ์ Dashehari ที่พบว่ามะม่วงมีขนาดเพิ่มขึ้นในระหว่างเข้าสู่การเจริญเติบโตเต็มที่ และมีขนาดลดลงภายหลังการเก็บเกี่ยวและเก็บรักษา (35 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $65 \pm 1\%$) เนื่องจากเกิดการหดตัวของมะม่วงที่เกิดจากกระบวนการหายใจและการสูญเสียน้ำในระหว่างเก็บรักษา

2.2.1.2 น้ำหนักต่อผล

วรรณวรางค์ และคณะ (2555) ได้มีการนำมะม่วงน้ำดอกไม้เก็บเมื่ออายุ 100-110 วันหลังดอกบาน และมะม่วงเขียวมรกตที่ถูกเก็บเกี่ยว 110-120 วันหลังดอกบาน มาเก็บรักษาเป็นเวลา 10 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $95 \pm 3\%$) พบว่ามะม่วงทั้งสองสายพันธุ์มีการสูญเสียน้ำหนัก (weight loss) ของผลมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น และสูญเสียน้ำหนักอย่างรวดเร็วใน 4 วันแรกของการเก็บรักษา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้มีความสอดคล้องกับมะม่วงสายพันธุ์ Dosehari ซึ่งถูกเก็บรักษาภายหลังการเก็บเกี่ยวเป็นเวลา 15 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ($32-35$ องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 53.6-78.8%) ส่งผลให้มีการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ย 15.67% โดยการสูญเสียน้ำหนักเกิดจากการระบวมคายน้ำของเซลล์พืช และการนำน้ำไปใช้ในกระบวนการทางชีววิทยา (Rathore และคณะ, 2007)

2.2.1.3 ความแน่นเนื้อ

ความแน่นเนื้อของมะม่วงเป็นลักษณะทางกายภาพที่สำคัญสามารถใช้บ่งชี้ระดับการสุกและคุณภาพภายหลังการเก็บเกี่ยวของมะม่วงในทางการค้า และยังส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค (Padtha และคณะ, 2011) Jha และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาความแน่นเนื้อของมะม่วงพันธุ์ Dashehari ที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งในระหว่างเก็บรักษามะม่วงที่อุณหภูมิห้อง (35 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $65 \pm 1\%$) พบว่าความแน่นเนื้อของมะม่วงมีค่าลดลง นอกจากนี้ Rungpichayapichet และคณะ (2015) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองภายหลังการเก็บเกี่ยว และทำการเก็บรักษาเป็นเวลา 8 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (33 ± 1.2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $63 \pm 6.9\%$) พบว่าความแน่นเนื้อมีการลดลงในระหว่างกระบวนการสุก เช่นเดียวกับมะม่วงพันธุ์ Ataulfo ที่มีค่าความแน่นเนื้อลดลงจาก 24.3 - 11.2 นิวตันเมื่อระดับการสุกมากขึ้น (Palafox-Carlos และคณะ, 2012) การอ่อนนุ่มลงของของผลไม้ในระหว่างกระบวนการสุกหรือระหว่างการเก็บรักษาเป็นการเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อคุณภาพและอายุการเก็บของผลไม้ โดยการอ่อนนุ่มของผลไม้เกิดจากการเสื่อมเสียโครงสร้างของพอลิแซ็กคาไรด์ ได้แก่ เซลลูโลสและสารจำพวกเพกตินที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ ซึ่งการเสื่อมเสียของพอลิแซ็กคาไรด์เกิดจากการทำงานของเอนไซม์ (Yashoda และคณะ, 2007)



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงสายพันธุ์ Dashehari ในระหว่างการเก็บรักษา (35 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $65 \pm 1\%$)

โดย (O) แทนการทดลองชุดที่ 1 (■) แทนการทดลองชุดที่ 2

ที่มา: Jha และคณะ (2006)

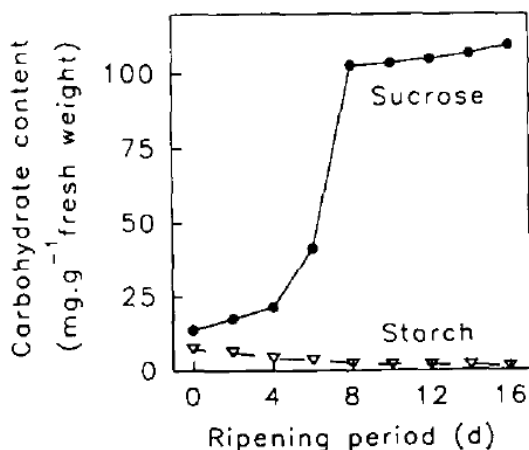
2.2.1.4 สีเปลือกและสีเนื้อ

ค่าสีเปลือกเป็นลักษณะคุณภาพที่สำคัญในการดึงดูดผู้บริโภค (Rathore และคณะ, 2007) Padda และคณะ (2011) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสีเปลือกและสีเนื้อของมะม่วงสายพันธุ์ Keitt ภายหลังจากเก็บเกี่ยวและเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 14 วัน (20 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85-90%) พบว่า ทั้งเปลือกและเนื้อของมะม่วงมีค่า L^* และ h° มีแนวโน้มลดลง และค่า a^* b^* และ C มีแนวโน้มสูงขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา เช่นเดียวกับการศึกษาของ Rungpichayapichet และคณะ (2015) ที่ศึกษาค่าสีเปลือกของมะม่วงน้ำดอกไม้ในช่วงเข้าสู่กระบวนการสุก ค่า a^* และ b^* ที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงการเปลี่ยนเป็นสีแดงเหลือง ซึ่งเกิดจากสลายตัวของคลอโรฟิลล์ และทำให้สีของแคโรทีนอยด์ปรากฏขึ้น

2.2.2 การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางเคมี

2.2.2.1 ปริมาณแป้ง

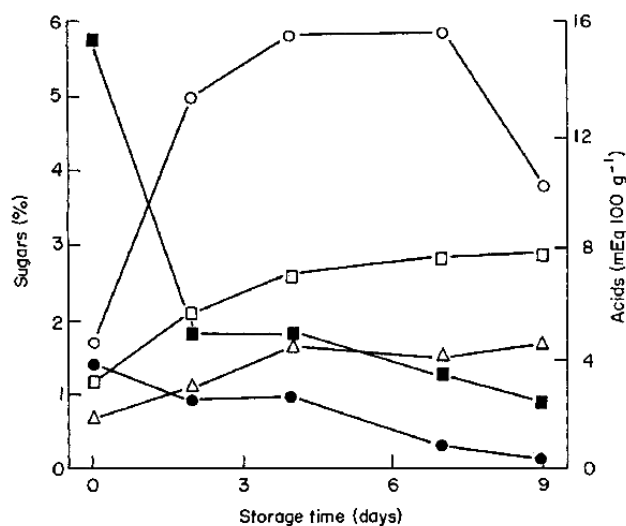
หลังจากที่พืชมีการสังเคราะห์แสง ผลไม้จะเก็บสะสมอาหารอยู่ในรูปของแป้งหรือคาร์โบไฮเดรต (เบญจวรรณ, 2556) จากการศึกษาของ Castrillo และคณะ (1992) พบว่า เมื่อมะม่วงสายพันธุ์ Haden เข้าสู่กระบวนการสุก (20.3 ± 0.02 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85%) ปริมาณแป้งลดลงอย่างช้าๆ ซึ่งตรงกันข้ามกับปริมาณน้ำตาลซูโครสที่มากขึ้นอย่างรวดเร็วในวันบ่มที่ 6 – 8 (ภาพที่ 2) Wongmetha และคณะ (2015) รายงานว่า ปริมาณแป้งที่ลดลงมีความสัมพันธ์กับการทำงานของเอนไซม์อะไมเลส เมื่อมะม่วงเข้าสู่กระบวนการสุกเอนไซม์จะย่อยแป้งเป็นน้ำตาล



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้ง (Δ) และน้ำตาล (\bullet) ของมะม่วงสายพันธุ์ Haden ในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก (20.3 ± 0.02 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85%)
ที่มา: Castrillo และคณะ (1992)

2.2.2.2 ปริมาณน้ำตาล

จากการสลายตัวของแป้งเปลี่ยนเป็นน้ำตาล ทำให้มะม่วงมีรสชาติหวานมากขึ้น Medicott และ Thompson (1985) ได้ทำการศึกษาปริมาณน้ำตาลในมะม่วงพันธุ์ Keitt ในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก (22 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85-90%) พบว่า มะม่วงมีปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 3) โดยน้ำตาลที่ถูกรับมากที่สุด ได้แก่ น้ำตาลซูโครส (57%) ฟรุกโทส (28%) และกลูโคส (25%) ซึ่งปริมาณน้ำตาลมีความสัมพันธ์กับค่าความหวานหรือปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (TSS) (Liu และคณะ, 2013) มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า TSS ในมะม่วงสายพันธุ์ต่างๆ Rungpichayapichet และคณะ (2015) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า TSS ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก (33 ± 1.2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $63 \pm 6.9\%$) พบว่า ค่า TSS ของมะม่วงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่า TSS มีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับมะม่วงพันธุ์ Tommy Atkins ที่มีความหวานเพิ่มขึ้น 11 องศาบริกซ์ (Vásquez-Caicedo และคณะ, 2006) มะม่วงพันธุ์ Keitt ที่มีค่า TSS เพิ่มขึ้นจาก 9 - 17 องศาบริกซ์ ในระหว่างเก็บรักษา 0-8 วัน (Ibarra-Garza และคณะ, 2015) มะม่วงพันธุ์ Dashehari มีความหวานในช่วง 6.90 - 19.73 องศาบริกซ์ และมีค่าลดลงเท่ากับ 15 องศาบริกซ์ ในระหว่างเก็บรักษาเป็นเวลา 12 วัน (35 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $65 \pm 1\%$) (Jha และคณะ, 2006) โดยระดับความหวานที่ 16 องศาบริกซ์ เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการบริโภคมะม่วงสด (Mahayothee และคณะ, 2007)



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลและกรดในมะม่วง Keitt ในระหว่างการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85-90% เมื่อ (O) แทนน้ำตาลซูโครส, (□) แทนน้ำตาลฟรุกโทส, (Δ) แทนน้ำตาลกลูโคส, (■) แทนกรดซิตริก, (●) แทนกรดมาลิก
ที่มา: Medicott และ Thompson (1985)

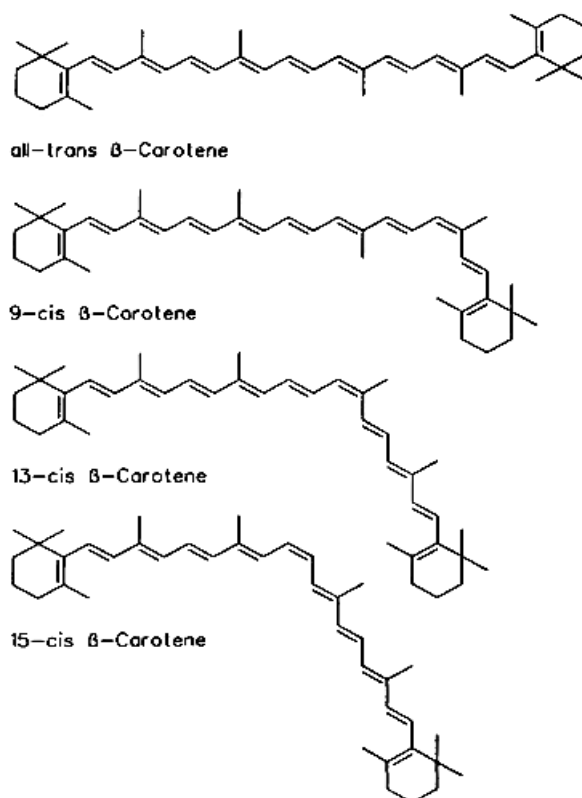
2.2.2.3 กรดอินทรีย์

กรดอินทรีย์ในมะม่วงจะมีปริมาณมากในผลอ่อนและลดลงเมื่อผลไม้เข้าสู่กระบวนการสุก จากการศึกษาของ Medicott และ Thompson (1985) ได้ทำการศึกษาระดับกรดในมะม่วงพันธุ์ Keitt ในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก (22 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85-90%) พบว่า ปริมาณกรดในมะม่วงมีค่าลดลงเมื่อระดับการสุกมากขึ้น (ภาพที่ 3) โดยกรดอินทรีย์ที่พบมากที่สุด ได้แก่ กรดซิตริก และกรดมาลิก นอกจากนี้ยังพบกรดทาร์ทาริก ออกซาลิก แอสคอร์บิก และกรดแอลฟา-คีโตกลูทาริก แต่พบในปริมาณน้อย ในการศึกษาปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (TA) ของมะม่วงมีความสัมพันธ์กับกรดอินทรีย์ จากรายงานของ Ibarra-Garza และคณะ (2015) พบว่าค่า TA ของมะม่วงพันธุ์ Keitt มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 0.90 – 0.65 % เมื่อมะม่วงเข้าสู่กระบวนการสุก และจากการศึกษาของ Rungpichayapichet และคณะ (2015) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า TA ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง พบว่า ค่า TA มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการใช้กรดซิตริกในกระบวนการหายใจ และนำไปใช้ในกระบวนการสร้างน้ำตาลส่งผลให้ปริมาณกรดลดลง (Baloch และ Bibi, 2012) การลดลงของค่า TA ส่งผลให้ความเป็นกรดต่าง (pH) มีค่าสูงขึ้นภายหลังการเก็บเกี่ยว ยังพบการลดลงของค่า TA ในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุกในมะม่วงพันธุ์ Tommy Atkins (Vásquez-Caicedo และคณะ, 2006) และ Dashehari (Jha และคณะ, 2006)

2.2.2.4 เบต้าแคโรทีน

มะม่วงอุดมไปด้วยสารประกอบแคโรทีนอยด์ (carotenoids) ที่ทำให้มะม่วงมีสีเหลืองส้ม มีคุณสมบัติในการเป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ที่ช่วยป้องกันการเกิดอนุมูลอิสระ ช่วยลดความเสี่ยงจากการเกิดโรคต่างๆ เช่น มะเร็ง หลอดเลือดหัวใจ โรคต่อกระบอกและต้อหิน เป็นต้น (วิจิตรรา, 2556) นอกจากนี้แคโรทีนอยด์ยังเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ (vitamin A) ซึ่งสามารถเปลี่ยนโครงสร้างให้อยู่ในรูปเรตินอล (retinol) และดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย (Giuliano และคณะ, 2008) เบต้าแคโรทีนเป็นสารประกอบธรรมชาติที่ละลายได้ดีในน้ำมัน เป็นรงควัตถุให้สีเหลืองส้ม ดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง 430 ถึง 450 นาโนเมตร มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{40}H_{56}$ ซึ่งประกอบไปด้วย ไอโซ-พรีน 8 หน่วย และวงแหวนเบต้าไอโอโนนที่ปลายของโมเลกุลทั้งสองข้าง ดังที่แสดงในภาพที่ 1 แสดงสูตรโครงสร้าง ไอโซเมอร์เบต้าแคโรทีน ในผักและผลไม้จะพบเบต้าแคโรทีนที่มีโครงสร้างแบบ cis และ trans ซึ่งส่วนใหญ่จะพบเป็น all-trans- β -carotene มากที่สุด (Pénicaud และคณะ, 2011) เนื่องจากมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเรตินอลได้มากกว่า cis ไอโซเมอร์ โดย all-trans จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็น cis ไอโซเมอร์ได้ด้วยความร้อนสูง แสง และกรด ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียวิตามินเอ นอกจากนี้การเกิดออกซิเดชันจากแสงสามารถทำให้ β -carotene เสื่อมสภาพได้ (Von Elbe และ Schwartz, 1996)

แคโรทีนอยด์ที่พบในมะม่วง ได้แก่ เบต้าแคโรทีน (β -carotene) ไวโอลาแซนทิน (violaxanthin) คริปโตแซนทิน (cryptoxanthin) ซีแซนทิน (zeaxanthin) นีโอแซนทิน (neoxanthin) ลูทีโอแซนทิน (luteoxanthin) เป็นต้น แคโรทีนอยด์ที่พบมากที่สุดในมะม่วง คือ เบต้าแคโรทีน (Mercadante และ Rodriguez-Amaya, 1998) เบต้าแคโรทีนยังพบมากในผักและผลไม้หลายชนิด เช่น แครอท ส้ม ฟักทอง ผักโขม แอปริคอต เป็นต้น (Pénicaud และคณะ, 2011) ในมะม่วงน้ำดอกไม้มีปริมาณ all-trans- β -carotene เท่ากับ 3,650 ไมโครกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมน้ำหนักแห้ง ในมะม่วงสายพันธุ์อื่น เช่น มะม่วงแก้ว Keitt และ Tommy Atkins มีปริมาณ all-trans- β -carotene เท่ากับ 11,680 4,580 และ 3,650 ไมโครกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมน้ำหนักแห้ง (Pott และคณะ, 2003) ปริมาณเบต้าแคโรทีนของมะม่วงที่พบจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน เนื่องจากอิทธิพลของระดับการสุกที่เปลี่ยนแปลงไป และสายพันธุ์ที่แตกต่างกัน โดย Mercadante และคณะ (1998) พบว่ามะม่วง Keitt มีปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด 12.3 ถึง 38.0 ไมโครกรัมต่อกรัมตัวอย่าง และมะม่วง Tommy Atkins มีปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมด 17.0 ถึง 51.2 ไมโครกรัมต่อกรัมตัวอย่าง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงระดับการสุกจากมะม่วงดิบแก่เป็นมะม่วงสุกส่งผลให้พบปริมาณ all-trans- β -carotene ของมะม่วง Keitt มีค่าสูงขึ้นจาก 1.7 เป็น 6.7 ไมโครกรัมต่อกรัมตัวอย่าง



ภาพที่ 4 สูตรโครงสร้างไอโซเมอร์ของ β -carotene
ที่มา: Pénicaud และคณะ (2011)

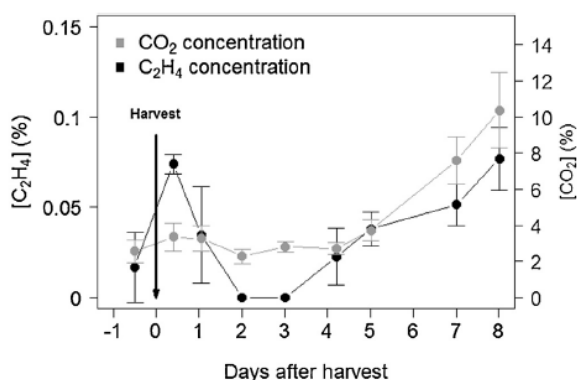
2.2.2.5 กระบวนการหายใจ

การสุกของผลไม้ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจหลังการเก็บเกี่ยว (climacteric fruit) มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดจากกระบวนการหายใจ และเอทิลีน (Bapat และคณะ, 2010) โดย Nordey และคณะ (2016) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจและปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของมะม่วงพันธุ์ Cogshall ที่เก็บเกี่ยวในวันที่ 113 หลังติดผล ติดตามการเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจและ CO_2 พบว่ามะม่วงมีอัตราการหายใจและการปลดปล่อย CO_2 เพิ่มขึ้นที่ระยะการเก็บรักษานานขึ้น เมื่อมะม่วงมีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นจะเกิดการสร้างเอทิลีนออกมาในปริมาณมาก ส่งผลให้มะม่วงเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีและกายภาพอย่างรวดเร็ว ทำให้มะม่วงมีอายุการเก็บรักษาสั้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการหายใจ ได้แก่ ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยว บาดแผลจากการหั่น สายพันธุ์ของผลไม้ และอุณหภูมิ เป็นต้น (ฉันทลักษณ์, 2556) การเก็บรักษามะม่วงที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยให้มะม่วงมีอัตราการหายใจช้าลง Nordey และคณะ (2016) รายงานว่า การลดอุณหภูมิในการเก็บรักษามะม่วงพันธุ์

Cogshall จากอุณหภูมิ 20, 12 และ 7 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียส จะทำให้มะม่วงเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงอัตราการหายใจช้าลง นอกจากนี้มะม่วงที่ผ่านการอบไอน้ำจะช่วยชะลออัตราการหายใจของมะม่วงให้ลดลงได้ จากการศึกษาของ Mitcham และ McDonald (1993) พบว่า มะม่วงที่ผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 46 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีอัตราการหายใจของมะม่วงน้อยลง หรือมีการปลดปล่อย CO_2 ออกมาน้อยกว่ามะม่วงที่ไม่ผ่านการอบไอน้ำ นอกจากนี้การใช้สารเคลือบผิวยังช่วยชะลออัตราการหายใจของมะม่วงได้ Liu และคณะ (2014) ศึกษาการใช้สาร bentonite และ potassium sorbate เป็นสารเคลือบผิวในมะม่วงพันธุ์ Ivory พบว่า สารเคลือบผิวทั้ง 2 ชนิดช่วยชะลออัตราการหายใจของมะม่วงได้ดีกว่ามะม่วงที่ไม่ได้เคลือบผิวในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

2.2.2.6 การผลิตเอทิลีน

เอทิลีน (C_2H_4) เป็นสารประกอบที่มีบทบาทสำคัญต่อการสุกของผลไม้ โดยจะไปกระตุ้นการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เช่น การสลายคลอโรฟิลล์ การเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล รวมไปถึงกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ต่างๆของผลไม้ ส่งผลให้มะม่วงสุก ซึ่งผลไม้จะมีการสังเคราะห์เอทิลีนจำนวนมากในระหว่างการสุก (วาสนา และนิธิยา, 2556) จากการศึกษาของ Nordey และคณะ (2016) ที่ได้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอทิลีน และ CO_2 ของมะม่วงพันธุ์ Cogshall ที่เก็บเกี่ยวในวันที่ 100 หลังติดผล พบว่า หลังจากเก็บเกี่ยวไปแล้ว 2 วันไม่พบปริมาณเอทิลีนและปริมาณ CO_2 ค่อนข้างคงที่ แต่จะเห็นว่าปริมาณเอทิลีนและปริมาณ CO_2 เพิ่มมากขึ้นในวันที่ 4 ภายหลังจากการเก็บเกี่ยว (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ CO_2 (เส้นสีเทา) และ C_2H_4 (เส้นสีดำ) ที่เก็บเกี่ยวในวันที่ 100 หลังติดผลของมะม่วงพันธุ์ Cogshall

ที่มา: Nordey และคณะ (2016)

มีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอทิลีน Ketsa และคณะ (1999) พบว่า มะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการให้ความร้อนอุณหภูมิตั้งที่ 38 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน แล้วนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีการยับยั้งการทำงานของเอทิลีนได้มากกว่ามะม่วงที่เก็บในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และไม่ผ่านการให้ความร้อน โดยอุณหภูมิยังส่งผลต่อปริมาณของ 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) ที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นเอทิลีน และส่งผลต่อการทำงานของเอนไซม์ 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthase (ACS) ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมอัตราการผลิตของเอทิลีน ความร้อนจะยังยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ACS ทำให้มะม่วงที่ผ่านความร้อนมีการทำงานของเอนไซม์ ACS น้อยกว่ามะม่วงที่ไม่ผ่านความร้อน และปริมาณ ACC มีการเปลี่ยนแปลงตามไปในทิศทางเดียวกับปริมาณเอทิลีน นอกจากนี้การทำงานของเอทิลีนยังสัมพันธ์กับสายพันธุ์ของผลไม้ ความบริบูรณ์ในช่วงการเก็บเกี่ยว ปริมาณ O_2 และ CO_2 ในชั้นบรรยากาศ (วาสนา, 2556)

2.2.2.7 ดัชนีการสุก (Ripening Index, RPI)

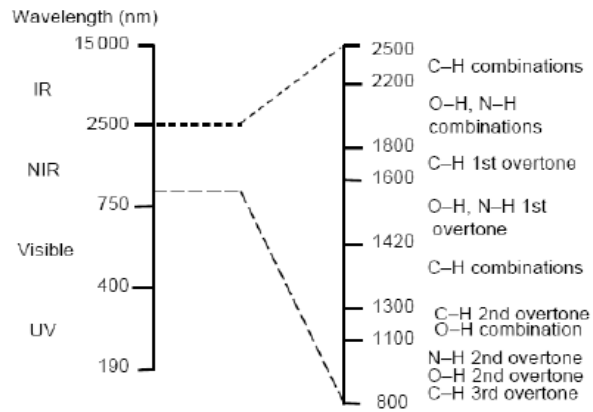
อิทธิพลของสายพันธุ์ สภาวะในการบ่ม ระดับการสุกของมะม่วงที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความไม่สม่ำเสมอด้านคุณภาพของมะม่วง ได้แก่ ความแน่นเนื้อ TSS, TA, pH, ค่าสี ความชื้น ปริมาณแคโรทีนอยด์ และแอนติออกซิแดนท์ เป็นต้น (Mahayothee และคณะ, 2007; Baloch และ Bibi, 2012; Palafox-Carlos และคณะ, 2012) ค่า RPI คำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหวานเปรี้ยว (TSS/TA) กับค่าความแน่นเนื้อ ซึ่งเป็นคุณภาพพื้นฐานที่สัมพันธ์กับการสุกของมะม่วงที่ส่งผลต่อรสชาติและการรับรู้ทางประสาท ค่า RPI ที่ได้สามารถอธิบายการสุกของมะม่วง โดยมะม่วงสุกจะมีค่า RPI น้อยลงและมะม่วงดิบจะมีค่า RPI มากขึ้น (Vásquez-Caicedo และคณะ, 2005; Mahayothee และคณะ, 2007) จากการศึกษาของ Rungpichayapichet และคณะ, 2016 ได้ทำการแบ่งระดับการสุกเพื่อศึกษาพฤติกรรมสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเป็น 3 ระดับด้วยค่า RPI ดังนี้ มะม่วงดิบมีค่า RPI มากกว่า 5 แต่ในมะม่วงสุกอมให้มีค่า RPI น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 และมะม่วงที่มีค่า RPI อยู่ในช่วง 2-5 คือมะม่วงที่กำลังเข้าสู่กระบวนการสุก ลักษณะคุณภาพด้านค่าความแน่นเนื้อ และค่า TA มีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าความชื้น และค่า TSS มีแนวโน้มสูงขึ้น ในขณะที่ค่า RPI ลดลง มีการใช้ค่า RPI ในการเป็นดัชนีที่บอกถึงการเปลี่ยนแปลงสีเหลืองส้มที่เกิดจากการสะสมของแคโรทีนอยด์ที่เพิ่มขึ้นของมะม่วงพันธุ์ Tommy Atkins ซึ่งสัมพันธ์กับค่า RPI ที่ลดลง (Vásquez-Caicedo และคณะ, 2005) ต่อมา Vásquez-Caicedo และคณะ (2006) ได้ทำตรวจวัดปริมาณเบต้าแคโรทีนและวิตามิน เอ ของมะม่วง 9 สายพันธุ์ในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก โดยแบ่งมะม่วงออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่มีผลเปลี่ยนเป็นสีเหลืองส้มเมื่อมะม่วงสุกเต็มที่) ได้แก่ มะม่วงแก้ว

มะม่วงมหาชนก มะม่วงโชคอนันต์ และมะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์ 4 พบว่า มีปริมาณเบต้าแคโรทีนมีค่าอยู่ในช่วง 6,544-11,249 $\mu\text{g}/100 \text{ g dry weight (DW)}$ และมีปริมาณวิตามิน เอ อยู่ในช่วง 892-1,573 retinol equivalents (RE)/100 g DW มีค่า RPI อยู่ในช่วง 1.5 -1.8 และมีอัตราส่วนหวานเปรี้ยวอยู่ที่ประมาณ 50 ซึ่งตรงกันข้ามกับมะม่วงกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงสีน้อย ได้แก่ มะม่วงมัน เตือนแก้ว มะม่วงแรด มะม่วงเขียวเสวย มะม่วงอกร่องทอง และมะม่วงอกร่องเขียว มีปริมาณเบต้าแคโรทีนมีค่าอยู่ในช่วง 1019-2195 $\mu\text{g}/100 \text{ g DW}$ และมีปริมาณวิตามิน เอ อยู่ในช่วง 136-298 RE/100 g DW ในอัตราส่วนเปรี้ยวหวานเดียวกัน

2.3 หลักการพื้นฐานของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-infrared spectroscopy, NIRS)

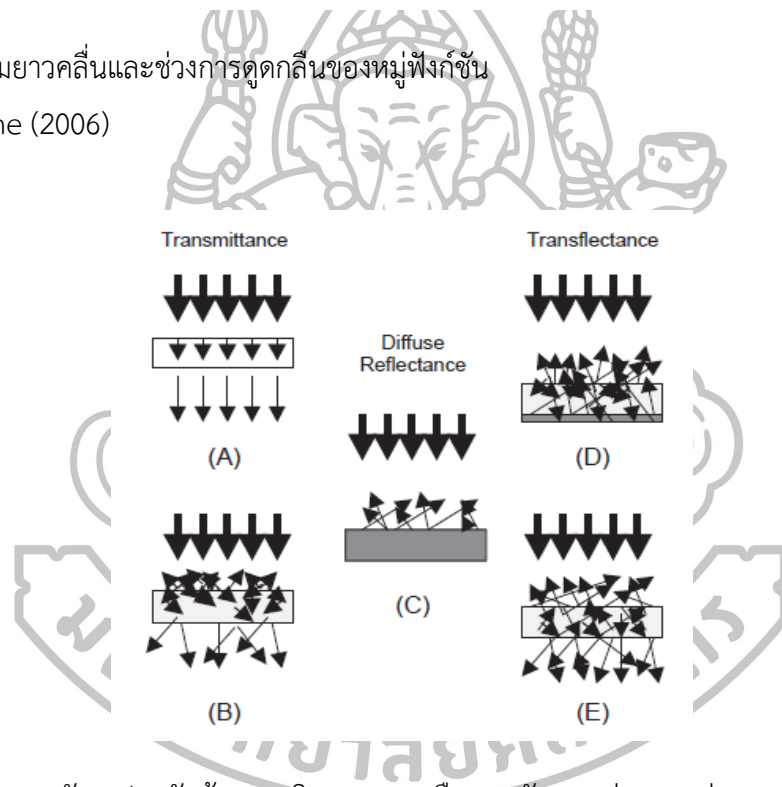
NIRS เป็นเทคนิคที่อาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่น 750 - 2500 นาโนเมตร (เลขคลื่น 12820 ถึง 3959 cm^{-1}) แสดงดังภาพที่ 5 โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลที่มีพันธะ -CH, -NH, และ -OH เป็นองค์ประกอบ เมื่อพันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลของสารดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง NIR ในความถี่ที่มีค่าเฉพาะ (quantized frequency) เข้าไปจะเกิดการสั่นและเปลี่ยนระดับพลังงานการสั่นจากสถานะพื้น (vibration ground state) ไปยังสถานะกระตุ้นแบบข้ามชั้น (vibration excited state) หรือเกิดการสั่นแบบโอเวอร์โทน (overtone vibration) และคอมบิเนชัน (combination vibration) คลื่นบางส่วนอาจถูกดูดกลืน (absorption) บางส่วนทะลุผ่านออกมา (transmission) และอาจเกิดการสะท้อน (reflection) ซึ่งจะแสดงออกมาเป็นสเปกตรัม (spectrum) นิยมแสดงในรูปของค่าการดูดกลืน (absorbance) กับความยาวคลื่น (wavelength) (Reich, 2005; ศุมาพร, ม.ป.ป)

ระบบการวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวอย่างที่ต้องการวัด แสดงดังภาพที่ 6 ถ้าตัวอย่างมีความโปร่งใสจะใช้ระบบการวัดแบบส่องทะลุผ่าน (transmittance) (ภาพที่ 7A) ส่วนตัวอย่างที่เป็นของเหลวขุ่นหรือมีสถานะกึ่งของแข็ง และเป็นของแข็ง ในการวัดจะมีการกระเจิงของแสงที่ผิวของวัตถุก่อนจะส่องทะลุผ่านหรือสะท้อนกลับออกมาจากตัวอย่างจะใช้ระบบการวัดแบบการสะท้อนแบบส่องผ่าน (diffuse transmittance) (ภาพที่ 7 B) หรือการวัดการสะท้อนแบบแพร่ (diffuse reflectance) (ภาพที่ 7 C) หรือการวัดการสะท้อนผ่านตัวอย่าง (transflectance) (ภาพที่ 7 D และ E)



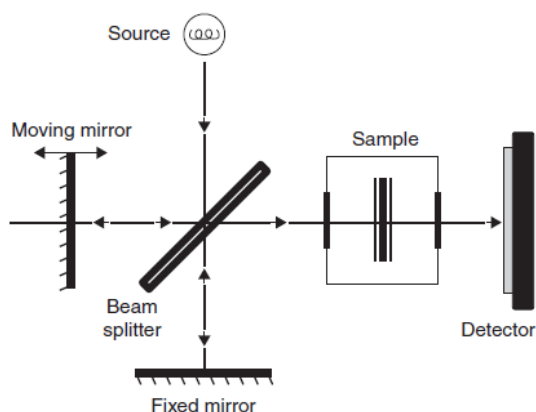
ภาพที่ 6 ความยาวคลื่นและช่วงการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชัน

ที่มา: Osborne (2006)



ภาพที่ 7 ระบบการวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS (A คือ การวัดแบบส่องทะลุผ่าน, B คือ การวัดแบบสะท้อนแบบส่องผ่าน, C คือ การวัดการสะท้อนแบบแพร่, D และ E คือการวัดการสะท้อนผ่าน ตัวอย่าง)

ที่มา: Reich (2005)



ภาพที่ 8 ส่วนประกอบของ NIRS

ที่มา: Subramanian และ Rodriguez-Saona (2009)

ส่วนประกอบพื้นฐานของ FT-NIR spectrometer ที่ใช้ในการศึกษา แสดงดังภาพที่ 7 โดยเครื่องมือจะประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง (light source) interferometer ทำหน้าที่เลือกความยาวคลื่นในการวัด ที่วางตัวอย่าง (sample holder) และเครื่องตรวจวัดสัญญาณ (detector) แหล่งกำเนิดแสงส่วนมากนิยมใช้ tungsten halogen lamp เนื่องจากมีขนาดเล็กและทนทาน ส่วนเครื่องตรวจวัดสัญญาณมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการวัด เช่น silicon มีขนาดเล็กให้สัญญาณรบกวนต่ำ มีความไวและรวดเร็วในการตรวจวัดในช่วง visible ถึง 1100 นาโนเมตร lead sulfide (PbS) ใช้ในการตรวจวัดแต่นิยมใช้เพราะตรวจวัดในช่วงความยาวคลื่น 1100 ถึง 2500 นาโนเมตร และให้สัญญาณรบกวนต่ำ และ indium gallium arsenide (InGaAs) เป็นชนิดที่มีราคาแพงที่สุด เพราะเป็นการรวมกันระหว่าง PbS และ silicon ทำให้สามารถตรวจวัดในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้น เป็นต้น (Reich, 2005)

เทคนิค NIRS สามารถวิเคราะห์ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพได้ โดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปกตรัมที่ได้กับค่าที่ได้จากวิธีมาตรฐาน แต่สเปกตรัมมีองค์ประกอบภายในและตัวแปรที่ซับซ้อน หรืออาจมีปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะสเปกตรัม เช่น ความชื้น องค์ประกอบที่ต้องการวัด ขนาดอนุภาคตัวอย่าง ทำให้สเปกตรัมที่ได้มีการกระเจิงแสงที่แตกต่างกัน จึงไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทางเคมีและกายภาพ หรือตัวแปรที่ต้องการศึกษาได้โดยตรง จึงต้องมีการใช้วิธีการคณิตศาสตร์และสถิติ คือ chemometric algorithms เข้ามาใช้ปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมก่อนการนำไปใช้สร้างสมการทำนาย เช่น การคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first derivative, D_1) และการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative, D_2) เป็นวิธีแก้ปัญหาคารรบกวนของพีคและการเลื่อนขึ้น (baseline shift) วิธีการปรับเรียบแบบซาวิตซกีโกลีย์ (savitzky – golay smoothing) ใช้ปรับแต่งเส้นสเปกตรัมที่มีสัญญาณรบกวน (noise) หรือสเปกตรัมมียอดแหลมมากเกินไป แต่ยัง

ต้องการให้สเปกตรัมเรียบและยังคงรูปร่างของสเปกตรัมเดิมไว้ นอกจากนี้ยังมีวิธีปรับแต่งเส้นสเปกตรัมเพื่อลดผลที่เกิดจากการกระเจิงของแสง (scattered light คือเทคนิคการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (multiplicative scatter correction, MSC) และการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (standard normal variate, SNV) (อนุพันธ์, ม.ป.ป., Reich, 2005., Wu และ Sun, 2013)

จากนั้นสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งแล้วจะถูกนำมาหาความสัมพันธ์กับค่าทางเคมีที่ได้ด้วยวิธีมาตรฐาน เพื่อสร้างสมการเทียบมาตรฐาน โดยอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์และทางสถิติ วิธีที่นิยมใช้ได้แก่ การถดถอยเชิงพหุคูณ (multiple linear regression, MLR) การถดถอยโดยใช้องค์ประกอบหลัก (principal component regression (PCR) และวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (partial least square, PLS) และทวนสอบสมการด้วยวิธีการทดสอบภายใน ได้แก่ วิธี full cross validation) และการทดสอบภายนอก ได้แก่ test set (Reich, 2005)

2.4 การตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงด้วยเทคนิค NIRS

เทคนิค NIRS เป็นวิธีการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายตัวอย่างที่มีการนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพทางเคมีและกายภาพของมะม่วงหลายสายพันธุ์ ได้แก่ TSS, TA, pH, TSS/TA ความแน่นเนื้อ การสูญเสียน้ำหนัก และดัชนีการสุก แสดงดังตารางที่ 1 จากการศึกษาของ Mahayothee และคณะ (2002) ได้ศึกษาการใช้ NIRS ในระบบการวัดแบบสะท้อนกลับช่วงความยาวคลื่น 600-2500 นาโนเมตร ในการตรวจสอบค่า TSS, TA, TSS/TA ความแน่นเนื้อ การสูญเสียน้ำหนัก และระยะเวลาในการบ่ม (ripening time, RT) ของมะม่วงน้ำดอกไม้และมะม่วงโชคอนันต์ในระหว่างการบ่มให้สุกเป็นเวลา 6 วัน (23 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 28-44 %) พบว่าเทคนิค NIRS มีความแม่นยำสูงในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานด้วยของค่า RT และการสูญเสียน้ำหนักของมะม่วงน้ำดอกไม้ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.97 และ 0.92 และมะม่วงโชคอนันต์ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.97 และ 0.90 และมีค่า SEP (standard error of prediction) ของมะม่วงทั้ง 2 ชนิดเท่ากับ 0.4 วัน และ 0.9% นอกจากนี้ค่า TSS, TA, TSS/TA และความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.59, 0.72, 0.84 และ 0.68 ตามลำดับ ส่วนในมะม่วงโชคอนันต์มีค่า R^2 เท่ากับ 0.73, 0.75, 0.77 และ 0.85 ตามลำดับ โดยพิจารณาประสิทธิภาพของสมการจากค่า R^2 มาก แต่มีค่า SEP และ PC (number of principal components) น้อย

ตารางที่ 1 การใช้เทคนิค NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วง

สายพันธุ์	ลักษณะคุณภาพ	จำนวนตัวอย่าง (ผล)	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระบบการวัด	การวิเคราะห์ ข้อมูล	ความแม่นยำ	อ้างอิง
น้ำดอกไม้	ระยะเวลาในการบ่ม	35	650-2500	แบบสะท้อนกลับ	PCA	$R^2 = 0.97, SEP = 0.4$	Mahayothee และคณะ (2002)
	การสูญเสียน้ำหนัก					$R^2 = 0.92, SEP = 0.9$	
	ความแน่นเนื้อ					$R^2 = 0.68, SEP = 25.8$	
	TA					$R^2 = 0.72, SEP = 0.3$	
	TSS					$R^2 = 0.59, SEP = 1.4$	
	TSS/TA		$R^2 = 0.84, SEP = 18.6$				
โชคอนันต์	ระยะเวลาในการบ่ม	35	650-2500	แบบสะท้อนกลับ	PLS	$R^2 = 0.97, SEP = 0.4$	Mahayothee และคณะ (2002)
	การสูญเสียน้ำหนัก					$R^2 = 0.90, SEP = 0.9$	
	ความแน่นเนื้อ					$R^2 = 0.85, SEP = 41.1$	
	TA					$R^2 = 0.75, SEP = 0.2$	
	TSS					$R^2 = 0.73, SEP = 1.9$	
	TSS/TA		$R^2 = 0.77, SEP = 12.5$				
Chausa/Langra/ Dashehri/Kesar/ Maldah/Mallika/ Neelam	TSS pH	1,180	1600 - 1799	แบบส่องทะลุผ่าน	PLS	$R = 0.762, SEP = 3.228, bias = -0.004$ $R = 0.703, SEP = 0.746, bias = 0.002$	Jha และคณะ (2012)
Chausa/ Langra/ Kesar/ Neelam/ Dasher/ Mallika/ Maldah	maturity index (I_m)	1,180	1600-1800	แบบสะท้อนกลับ	PLS	$R = 0.68, SEP = 0.335, bias = 0.014$	Jha และคณะ (2014)

ตารางที่ 1 การใช้เทคนิค NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วง (ต่อ)

สายพันธุ์	ลักษณะคุณภาพ	จำนวนตัวอย่าง (ผล)	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระบบการวัด	การวิเคราะห์ ข้อมูล	ความแม่นยำ	อ้างอิง
น้ำดอกไม้สีทอง	ปริมาณเบต้าแคโรทีน	120	700 - 1100	แบบสะท้อนกลับ	PLS	$R^2 = 0.826$, SECV = 15.630, bias = 0.325	Rungpichayapichet และคณะ (2015)
					MLR	$R^2 = 0.812$, SECV = 17.633, bias = 0.145	
			1000 - 2500	แบบสะท้อนกลับ	PLS	$R^2 = 0.823$, SECV = 11.642, bias = -5.795	
					MLR	$R^2 = 0.844$, SECV = 16.552, bias = 0.037	
Tommy Atkins	SS	239	950-1650	แบบสะท้อนกลับ	PLS	$R^2 = 0.92$, RMSEP = 0.55, bias = 0.00	Marques และคณะ (2016)
	DM	240			$R^2 = 0.67$, RMSEP = 0.51, bias = -0.07		
	TA	162			$R^2 = 0.50$, RMSEP = 0.17, bias = 0.01		
	ความแน่นเนื้อ	134			$R^2 = 0.72$, RMSEP = 12.20, bias = 0.50		
Osteen	RPI	140	400-700 600-1100 900-1750	แบบสะท้อนกลับ	PLS	$R^2 = 0.871$, RMSEP = 0.520	Cortés และคณะ (2016)
					PLS	$R^2 = 0.902$, RMSEP = 0.470	
					PLS	$R^2 = 0.845$, RMSEP = 0.592	
					PLS	$R^2 = 0.879$, RMSEP = 0.464	
น้ำดอกไม้สีทอง	ความแน่นเนื้อ	592	700-1100	แบบสะท้อนกลับ	PLS	$R^2 = 0.877$, RMSEP = 0.435	Rungpichayapichet และคณะ (2016)
					PLS	$R^2 = 0.833$, RMSEP = 0.507	
					PLS	$R^2 = 0.9$, SEP = 1.2, bias = -0.2	
					PLS	$R^2 = 0.74$, SEP = 0.38, bias = -0.01	
น้ำดอกไม้สีทอง	ความแน่นเนื้อ	592	700-1100	แบบสะท้อนกลับ	PLS	$R^2 = 0.71$, SEP = 4.22, bias = -0.78	Rungpichayapichet และคณะ (2016)
					PLS	$R^2 = 0.8$, SEP = 0.8, bias = 0.0	
					PLS	$R^2 = 0.8$, SEP = 0.8, bias = 0.0	

Jha และคณะ (2012) ศึกษาการใช้เทคนิค NIRS ตรวจสอบค่า TSS และ pH มะม่วง 7 สายพันธุ์ ในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก (26–30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60–70%) ทำการวัดสเปกตรัมในระบบการวัดแบบสะท้อนกลับในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 1200 – 2200 นาโนเมตร โดยสร้างสมการจากค่าทางเคมีและวัดสเปกตรัมจากมะม่วงทั้ง 7 สายพันธุ์ ด้วยเทคนิค PLS และ MLR พบว่า สมการที่ดีที่สุดของการทำนายค่า TSS และ pH ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 1600 – 1799 นาโนเมตร ด้วยเทคนิค PLS ร่วมกับการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative, D_2) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R), SEP และ bias ของค่า TSS เท่ากับ 0.762, 3.228 องศาบริกซ์ และ -0.004 องศาบริกซ์ ตามลำดับ และมีค่า R, SEP และ bias ของค่า pH เท่ากับ 0.703, 0.746 และ 0.002 ตามลำดับ จากค่า SEP และ bias ที่น้อย แสดงให้เห็นว่าเทคนิค NIRS สามารถนำไปใช้ในการทำนายค่า TSS และ pH คุณภาพของมะม่วงได้

Jha และคณะ (2014) ได้ศึกษาวิธีการตรวจสอบค่าดัชนีความแก่ (maturity index, I_m) จากความสัมพันธ์ของค่า TSS, TA และ วัตถุแห้ง (dry matter, DM) ของมะม่วง 7 สายพันธุ์ ในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก (26–30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60–70%) เทคนิค NIRS ถูกนำมาใช้ตรวจสอบค่า I_m ของมะม่วง โดยวัดสเปกตรัมด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับในช่วงความยาวคลื่น 1200 – 2200 นาโนเมตร สมการที่ดีที่สุดสร้างจากเทคนิค PLS ในช่วงความยาวคลื่น 1600 – 1800 นาโนเมตร และปรับแต่งสเปกตรัมด้วยเทคนิคการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (multiplicative scatter correction, MSC) มีค่า R, SEP และ bias เท่ากับ 0.68, 0.335 และ 0.014 ตามลำดับ

มีการศึกษาการใช้เทคนิค NIRS ในการตรวจสอบปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง จากการศึกษาของ Rungpichayapichet และคณะ (2015) มีการใช้เทคนิคการวัดค่าสีเปลือกและเนื้อด้วยเครื่องวัดสีเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจสอบปริมาณเบต้าแคโรทีนกับเทคนิค NIRS ที่ทำการวัดสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นสั้น (700 – 1100 นาโนเมตร) และช่วงความยาวคลื่นยาว (1000 – 2500 นาโนเมตร) ด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก (33.0 ± 1.2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $63.9 \pm 6.9\%$) เป็นเวลา 8 วัน สร้างสมการทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนด้วยเทคนิค PLS และ MLR พบว่า สมการทำนายค่าสีเนื้อด้วยเครื่องวัดสีมีค่า R^2 มาก (0.941) และมีค่า SECV (standard errors of cross validation) น้อย มีค่า (10.2 retinol equivalents (RE)/100 g^{-1} edible part) แต่สมการทำนายค่าสีเปลือกมีความแม่นยำต่ำ สมการทำนายค่ามีค่า R^2 มากกว่า 0.800 และมีค่า SEP อยู่ในช่วง 11.642 – 20.2 RE/100 g^{-1} EP สมการที่ได้จากการทำนายค่าในช่วงความยาวคลื่นยาวมีความแม่นยำมากกว่าความยาวคลื่นสั้น จะเห็นได้ว่าสมการที่ได้จากการวัดค่าเนื้อด้วยเครื่องวัดสีที่ความแม่นยำมากกว่าการใช้เทคนิค NIRS อย่างไรก็ตามการวัดค่าสีเนื้อเป็นวิธีที่ทำลายตัวอย่าง ดังนั้นเทคนิค NIRS ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง มีประสิทธิภาพในการทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

Marques และคณะ (2016) มีการศึกษาการใช้เทคนิค NIRS ช่วงความยาวคลื่น 950 – 1650 นาโนเมตร ด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงพันธุ์ Tommy Atkins ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (soluble solids, SS), DM, TA และความแน่นเนื้อ สร้างสมการเพื่อหาความสัมพันธ์ด้วยเทคนิค PLS พบว่า สมการทำนายค่า SS มีความแม่นยำในการค่ามี R^2 และ RMSEP (root mean square errors of prediction) เท่ากับ 0.92 และ 0.55 องศาบริกซ์ ตามลำดับ ส่วนสมการการทำนายค่า DM, TA และความแน่นเนื้อ มี R^2 เท่ากับ 0.67, 0.50 และ 0.72 ตามลำดับ และมีค่า RMSEP เท่ากับ 0.51%, 0.17% และ 12.20 นิวตัน ตามลำดับ

Cortés และคณะ (2016) มีการศึกษาการใช้เทคนิค NIRS ในการตรวจสอบดัชนีคุณภาพ ได้แก่ ค่า RPI และค่า IQI (internal quality index) ของมะม่วงพันธุ์ Osteen โดยค่า IQI เป็นค่าที่คำนวณได้จากการหาความสัมพันธ์ของค่า TSS ความแน่นเนื้อ และค่าสีเนื้อของมะม่วง ซึ่งจะทำการวัดสเปกตรัมด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับในช่วงความยาวคลื่น 400 – 700, 600 – 1100 และ 900 – 1750 นาโนเมตร สร้างสมการหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมกับดัชนีคุณภาพด้วยเทคนิค PLS พบว่า สมการมีประสิทธิภาพในการทำนายค่า RPI และ IQI ในช่วงความยาวคลื่นทั้งหมด (full wavelength) สมการทำนายค่า RPI มีค่า R^2 และ RMSEP อยู่ในช่วง 0.845 – 0.902 และ 0.470 – 0.592 ตามลำดับ สมการทำนายค่า IQI มีค่า R^2 และ RMSEP อยู่ในช่วง 0.833 – 0.879 และ 0.403 – 0.507 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเทคนิค NIRS มีประสิทธิภาพในการทำนายดัชนีคุณภาพของมะม่วงได้

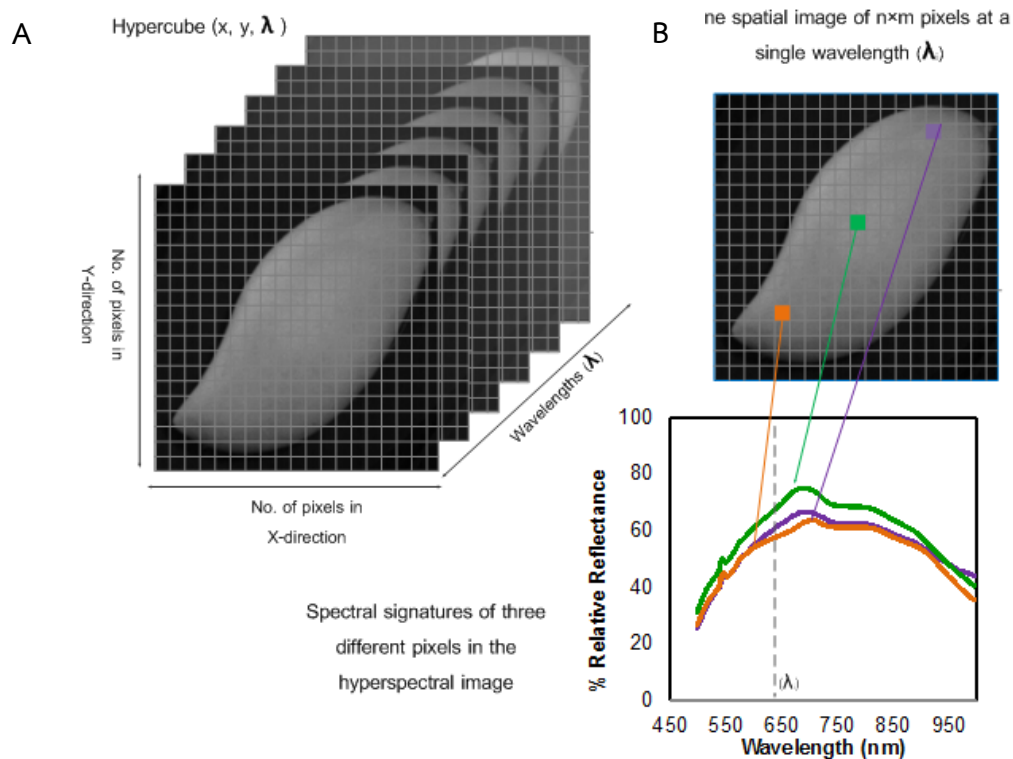
Rungpichayapichet และคณะ (2016) ได้มีการศึกษาอิทธิพลของปีที่เก็บเกี่ยวต่อความสามารถในการทำนายคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค NIRS มะม่วงถูกเก็บเกี่ยวในปี 2009 2012 และ 2013 ในแต่ละปีที่เก็บเกี่ยวมะม่วงถูกนำมาตรวจสอบค่าความแน่นเนื้อ TSS, TA และ RPI ในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุกเป็นเวลา 8 วัน และทำการวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 700 -1100 นาโนเมตร ด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ ใช้เทคนิค PLS ในการสร้างสมการทำนายคุณภาพในแต่ละปี สมการทำนายคุณภาพ 2 ปี และสมการทำนายคุณภาพรวม 3 ปี พบว่า การสร้างสมการทำนายคุณภาพของมะม่วงในแต่ละปีมีความแม่นยำสูงกว่าการสร้างสมการทำนายแบบอื่นๆ โดยสมการทำนายคุณภาพรวม 3 ปี มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำนายคุณภาพของมะม่วงได้ดี ซึ่งมีค่า R^2 และ SEP ของค่าความแน่นเนื้อ TSS, TA และ RPI เท่ากับ 0.82, 0.9, 0.74 และ 0.8 ตามลำดับ และมีค่า SEP เท่ากับ 4.22 นิวตัน 1.2%, 0.38 และ 0.8 ตามลำดับ

จากงานวิจัยที่กล่าวมานั้นจะเห็นว่า เทคนิค NIR มีประสิทธิภาพในการทำนายคุณภาพของมะม่วง โดยเฉพาะค่า TSS ซึ่งมีความแม่นยำในการทำนายค่าสูงในหลายๆงานวิจัย ดังนั้นเทคนิค

NIRS จึงน่าจะสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ทองสำหรับงานวิจัยนี้ได้ อย่างแม่นยำ

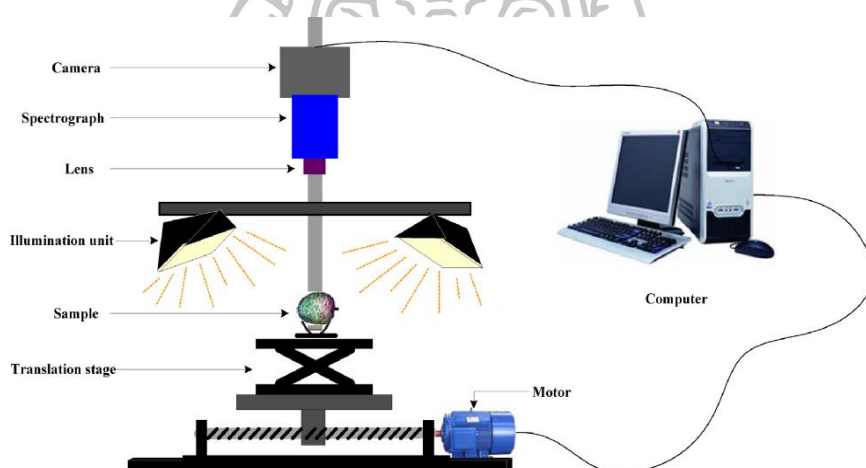
2.5 หลักการพื้นฐานของเทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัม (Hyperspectral imaging, HSI)

เทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัม HSI เป็นวิธีการถ่ายภาพพร้อมกับเทคนิคสเปกโทรสโกปี ซึ่งการถ่ายภาพด้วยเทคนิค HSI จะได้ข้อมูลภาพถ่ายและข้อมูลเชิงสเปกตรัมในเวลาเดียวกัน โดยภาพถ่ายสเปกตรัมจะได้ข้อมูลเป็นภาพถ่าย 3 มิติ เรียกว่า hypercube ประกอบไปด้วยข้อมูลเชิงพื้นที่ 2 มิติ แสดงภาพถ่ายที่มีความกว้างและความยาวเท่ากับจำนวนพิกเซลในแนวแกน X และแกน Y ตามลำดับ และภาพถ่ายสเปกตรัมในแต่ละความยาวคลื่น (แกน λ) แสดงดังภาพที่ 9A ซึ่งในแต่ละพิกเซลของภาพถ่ายเชิงสเปกตรัมจะมีข้อมูลสเปกตรัมที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา (ภาพที่ 9B) (Wu และ Sun, 2013)



ภาพที่ 9 ข้อมูลภาพถ่าย 3 มิติ หรือ hypercube (A) และสเปกตรัมที่ได้ในแต่ละพิกเซล (B) ของการถ่ายภาพด้วยเทคนิค HSI

องค์ประกอบหลักของ HSI ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสง โดยทั่วไปนิยมใช้ halogen lamps, light emitting diodes และ lasers ในการเลือกใช้ชนิดของแหล่งกำเนิดแสงนั้น ขึ้นอยู่กับ ช่วงของความยาวคลื่นของแสงจากแหล่งกำเนิดและช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการจะศึกษา โดยจะมี อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เลือกความยาวคลื่น เช่น filter wheels, imaging spectrographs, Fourier transform imaging spectrometers และ single shot imagers เพื่อแยกแสงออกเป็นความยาว คลื่นต่างๆกันและบันทึกภาพถ่ายด้วยเครื่องตรวจจับสัญญาณภาพ ทำหน้าที่บันทึกความเข้มแสงที่ได้ โดยทั่วไปนิยมใช้ CCD detector และ CMOS detector โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะประกอบอยู่ใน กล้อง HSI นอกจากนี้ยังมีกระจกสำหรับกระจายแสง และคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการถ่ายภาพ และการวิเคราะห์ผล แสดงดังภาพที่ 10 (Yang และคณะ, 2015)

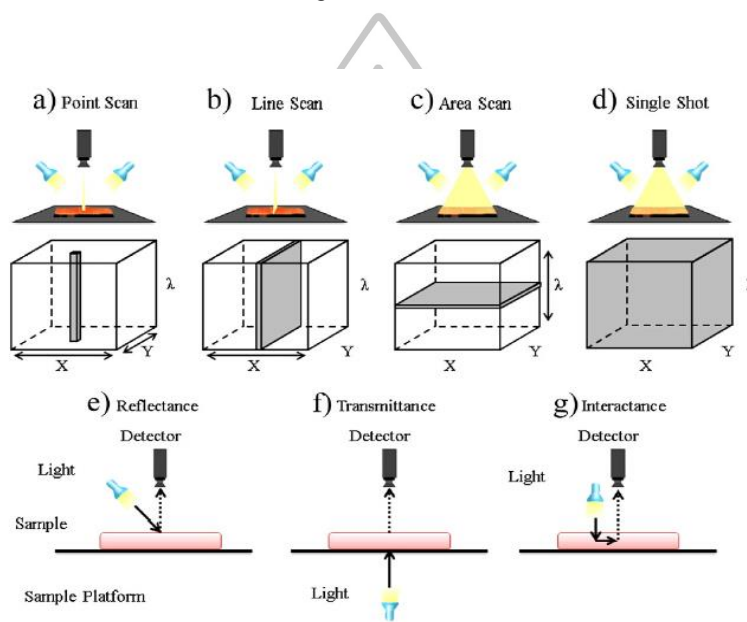


ภาพที่ 10 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่อง HSI

ที่มา: Yang และคณะ (2015)

การถ่ายภาพด้วยเทคนิค HSI แสงจากแหล่งกำเนิดแสง (ช่วงความยาวคลื่น 450 – 1000 นาโนเมตร) ตกกระทบสู่ตัวอย่าง แสงบางส่วนถูกตัวอย่างดูดกลืนแล้วเกิดการสะท้อนกลับเข้าสู่เลนส์ไปยัง spectrographs ที่ทำหน้าที่แยกแสงและเปลี่ยนเป็นสัญญาณความถี่ ซึ่งสัญญาณจะถูกบันทึกด้วย CCD detector โดยระบบการถ่ายภาพ HSI แบ่งเป็น 4 แบบ แสดงดังภาพที่ 11 ได้แก่ การถ่ายภาพแบบ single point วิธีนี้จะทำการถ่ายภาพที่ 1 พิกเซลและจะได้สเปกตรัมที่พิกเซลนี้เพียงอย่างเดียว ถ้าต้องการข้อมูลบริเวณอื่นให้เปลี่ยนตำแหน่งตัวตรวจรับข้อมูลหรือตำแหน่งตัวอย่างไปบริเวณที่ต้องการวัดตามแนวแกน X และ Y (ภาพที่ 11a) แบบที่ 2 คือ การถ่ายภาพแบบ line scanning จะได้ hypercube เป็นเส้นตามแนวแกน X วิธีนี้นิยมใช้กันในการวัดคุณภาพแบบต่อเนื่อง เนื่องจากตัวอย่างที่วัดจะเคลื่อนที่ไปตามสายพาน (ภาพที่ 11b) วิธีการข้างต้นจะได้ข้อมูลเชิงพื้นที่บางส่วน การ

ถ่ายภาพแบบ area scanning หรือ plane scanning (ภาพที่ 11c) จะได้ข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ความยาวคลื่นเดียวในการถ่ายเพียงครั้งเดียว และวิธีการถ่ายภาพแบบ single shot (ภาพที่ 11d) จะให้ข้อมูลเชิงพื้นที่ทั้งหมดของในหลายๆความยาวคลื่นของการถ่ายภาพเพียงครั้งเดียว ซึ่งข้อมูลที่ได้จะมีปริมาณมาก ดังนั้นเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ที่ใช้จึงต้องมีสมรรถนะเพียงพอต่อการถ่ายภาพ นอกจากนี้ระบบที่ใช้ในการตรวจจับภาพมีทั้งหมด 3 แบบ คือ แบบสะท้อนกลับ (ภาพที่ 11e) แบบส่องทะลุผ่าน (ภาพที่ 11f) และแบบ Interactance (ภาพที่ 11g)



ภาพที่ 11 ระบบการถ่ายภาพ HSI (ลูกศรและพื้นที่สีเทาบอกถึงข้อมูลที่ได้มาในแต่ละครั้ง) และระบบการตรวจจับภาพ
ที่มา: Wu และ Sun (2013)

เทคนิค HSI สามารถวิเคราะห์ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพได้ โดยวิธีการสร้างสมการมีวิธีที่คล้ายกับเทคนิค NIRS แต่เทคนิค HSI จะต้องมีขั้นตอนในการสกัดเส้นสเปกตรัมจากภาพถ่ายเชิงสเปกตรัมด้วยซอฟต์แวร์ที่เหมาะสม โดยจะมีการสกัดข้อมูลสเปกตรัมจากตำแหน่งของภาพถ่ายในตำแหน่งที่สนใจหรือมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบที่ต้องการศึกษา (region of interest, ROI) จะได้สเปกตรัมเฉลี่ยตลอดช่วงความยาวคลื่นของการถ่ายภาพ จากนั้นจึงนำข้อมูลสเปกตรัมที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากวิธีมาตรฐาน เนื่องจากปริมาณข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัมมีขนาดใหญ่มากและข้อมูลภาพมีความสัมพันธ์ขององค์ประกอบที่ซับซ้อน จึงต้องอาศัย chemometric algorithms ในการปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการนำไปใช้สร้างสมการทำนาย (He และ Sun 2015, Wu และ Sun, 2013)

2.6 การตรวจสอบคุณภาพของผลไม้ด้วยเทคนิค HSI

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้เทคนิค HSI ในการตรวจสอบคุณภาพของผลไม้หลายชนิด ได้แก่ มะม่วง สตรอว์เบอร์รี่ แอปเปิ้ล กล้วย องุ่น และ บลูเบอร์รี่ ลักษณะคุณภาพโดยทั่วไปที่ทำการตรวจสอบ ได้แก่ TSS pH MC ปริมาณแอนโทไซยานิน และความแน่นเนื้อ แสดงดังตารางที่ 2)

Servakaranpalayam (2006) ได้ศึกษาการใช้เทคนิค HSI ในการตรวจสอบค่า TSS ปริมาณความชื้น (moisture content, MC) และความแน่นเนื้อของมะม่วงพันธุ์ Tommy Atkins เมื่อเข้าสู่กระบวนการสุกเป็นเวลา 14 วัน ทำการถ่ายภาพสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 400 - 1000 นาโนเมตร และสร้างสมการหาความสัมพันธ์ด้วยวิธี PLS พบว่า ในการสร้างสมการทำนายค่า TSS, MC และความแน่นเนื้อ มีการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First derivative, D_1) มีค่า R และ SEP ของ TSS เท่ากับ 0.78 และ 0.41 องศาบริกซ์ มีค่า R และ SEP ของ MC เท่ากับ 0.81 และ 0.45% และค่าความแน่นเนื้อ มีค่า R และ SEP เท่ากับ 0.88 และ 2.0 ตามลำดับ สมการทำนายค่าที่ได้จากเทคนิค HSI มีความสามารถในการใช้ทำนายคุณภาพของมะม่วงได้

ElMasry และคณะ (2007) ศึกษาการใช้เทคนิค HSI ในช่วงความยาวคลื่น 400 - 1000 นาโนเมตร ในการตรวจสอบค่า MC, TSS และ pH ของสตรอว์เบอร์รี่ด้วยระบบการถ่ายภาพแบบสะท้อนกลับ จากการสร้างสมการทำนายค่าด้วยวิธี PLS ในช่วงความยาวคลื่น 400 - 1000 นาโนเมตร พบว่า สมการทำนายค่า MC, TSS และ pH มีค่า R เท่ากับ 0.90, 0.80 และ 0.87 และมีค่า SEP เท่ากับ 3.87%, 0.18 องศาบริกซ์ และ 0.13 ตามลำดับ จากนั้นได้มีนำสมการที่ดีที่สุดที่ได้จากวิธี PLS มาลดจำนวนข้อมูลสเปกตรัม โดยการเลือกความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับลักษณะคุณภาพที่ต้องการศึกษามากที่สุด และสร้างสมการหาความสัมพันธ์ด้วยเทคนิค MLR พบว่า ความแม่นยำในการสร้างสมการทำนายค่า MC, TSS และ pH มีค่า R เท่ากับ 0.87, 0.80 และ 0.92 และมีค่า SEP เท่ากับ 5.79%, 0.21 องศาบริกซ์ และ 0.09 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการสร้างสมการระหว่าง PLS และ MLR พบว่า การสร้างสมการด้วยวิธี MLR มีประสิทธิภาพมากกว่าในด้านของการลดจำนวนข้อมูลที่ไม่จำเป็นและลดอิทธิพลของการได้สมการที่มีความแม่นยำเกินจริง (overfitting) ในการสร้างสมการทำนายค่า

ตารางที่ 2 การใช้เทคนิค HSI ในการตรวจสอบคุณภาพของผลไม้

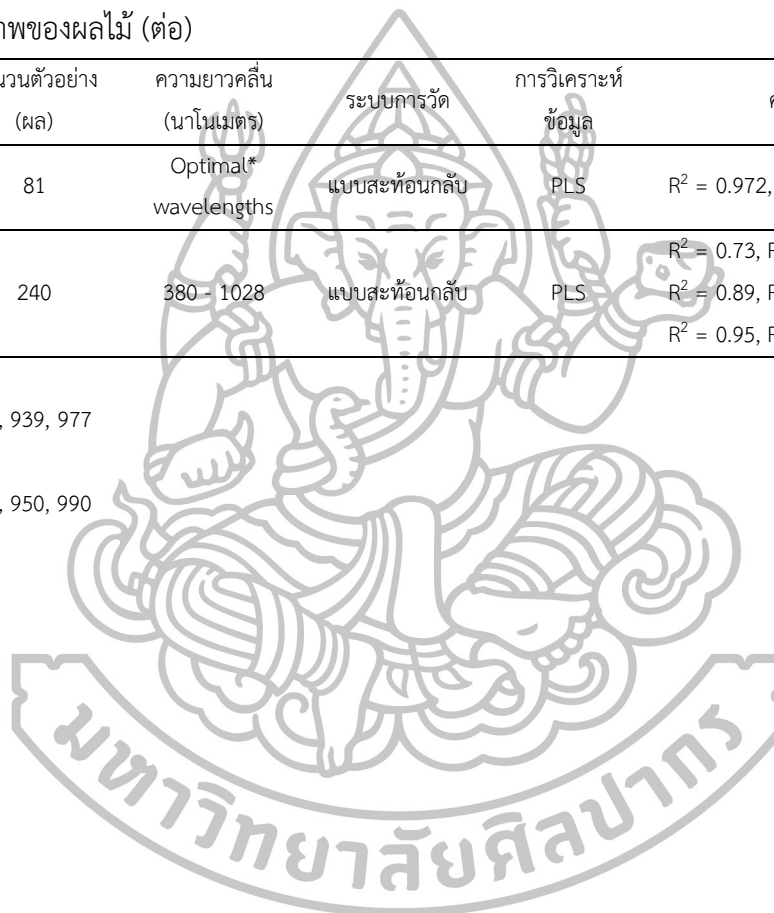
ผลไม้	ลักษณะคุณภาพ	จำนวนตัวอย่าง (ผล)	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระบบการวัด	การวิเคราะห์ข้อมูล	ความแม่นยำ	อ้างอิง
มะม่วง	ความแน่นเนื้อ	100	400 - 1000	แบบสะท้อนกลับ	PLS	R = 0.88, SEP = 2.00	Servakaranpalayam (2006)
	MC					R = 0.81, SEP = 0.45	
	TSS					R = 0.78, SEP = 0.41	
สตรอว์เบอร์รี่	MC	76	400 - 1000	แบบสะท้อนกลับ	PLS	R = 0.96, SEP = 3.87	ElMasry และคณะ (2007)
	TSS					R = 0.85, SEP = 0.18	
	pH					R = 0.87, SEP = 0.13	
	MC	76	Optimal* wavelengths	แบบสะท้อนกลับ	MLR	R = 0.91, SEP = 5.79	
	TSS					R = 0.80, SEP = 0.21	
	pH					R = 0.94, SEP = 0.09	
แอปเปิ้ลพันธุ์ Golden Delicious	ความแน่นเนื้อ	600	400-1000	แบบสะท้อนกลับ	PLS	R = 0.87, SEP = 5.9	
	SSC					R = 0.88, SEP = 0.7	
Jona gold	ความแน่นเนื้อ	928	400-1000	แบบสะท้อนกลับ	PLS	R = 0.95, SEP = 7.1	Mendoza และคณะ (2011)
	SSC					R = 0.78, SEP = 0.7	
Delicious	ความแน่นเนื้อ	1,191	400-1000	แบบสะท้อนกลับ	PLS	R = 0.84, SEP = 8.7	
	SSC					R = 0.66, SEP = 0.9	
	TSS					R ² = 0.85	
กล้วย	MC	270	400 - 1000	แบบสะท้อนกลับ	MLR	R ² = 0.87	Rajkumar และคณะ (2012)
	ความแน่นเนื้อ					R ² = 0.91	
บลูเบอร์รี่	ความแน่นเนื้อ	40	500 - 1000	แบบสะท้อนกลับ	PLS	R = 0.87, RMSEP = 0.23	Liava-Valenzuela และคณะ (2013)
	SSC					R = 0.79, RMSEP = 1.30	

ตารางที่ 2 การใช้เทคนิค HSI ในการตรวจสอบคุณภาพของผลไม้ (ต่อ)

ผลไม้	ลักษณะคุณภาพ	จำนวนตัวอย่าง (ผล)	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ระบบการวัด	การวิเคราะห์ ข้อมูล	ความแม่นยำ	อ้างอิง
มะม่วงแผ่นอบแห้ง	ความชื้น	81	Optimal* wavelengths	แบบสะท้อนกลับ	PLS	$R^2 = 0.972$, RMSEP = 4.611	Pu และ Sun (2015)
องุ่น	pH	240	380 - 1028	แบบสะท้อนกลับ	PLS	$R^2 = 0.73$, RMSE = 0.18	Chen และคณะ (2015)
	ปริมาณน้ำตาล					$R^2 = 0.89$, RMSE = 1.10	
	แอนโทไซยานิน					$R^2 = 0.95$, RMSE = 14.0	

Optimal* wavelengths

สตอร์เบอร์รี่	MC	= 480, 528, 608, 685, 753, 817, 939, 977
	TSS	= 421, 520, 581, 683, 847, 950
	pH	= 421, 521, 585, 646, 681, 840, 950, 990
มะม่วงแผ่นอบแห้ง	MC	= 908, 1076, 1153, 1405, 1706



จากการศึกษาของ Mendoza และคณะ (2011) ที่ทำการตรวจสอบความแน่นเนื้อและค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (soluble solid content, SSC) ของแอปเปิ้ล 3 สายพันธุ์ ได้แก่ Golden Delicious (GD), Jonagold (JG) และ Delicious (RD) ด้วยเทคนิค HSI ทำการถ่ายภาพในระบบสะท้อนกลับในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 500 – 1000 นาโนเมตร สร้างสมการทำนายค่าความแน่นเนื้อ และ SSC ด้วยเทคนิค PLS โดยสามารถทำนายค่าความแน่นเนื้อของแอปเปิ้ลพันธุ์ GD, JG และ RD มีค่า R เท่ากับ 0.87, 0.95 และ 0.84 มีค่า SEP เท่ากับ 5.9, 7.1 และ 8.1 นิวตัน ตามลำดับ และค่า SSC มีค่า R เท่ากับ 0.88, 0.78 และ 0.66 มีค่า SEP เท่ากับ 0.7, 0.7 และ 0.9 องศาบริกซ์ ตามลำดับ โดยสมการทำนายค่า SSC ของแอปเปิ้ลพันธุ์ RD มีความแม่นยำต่ำ

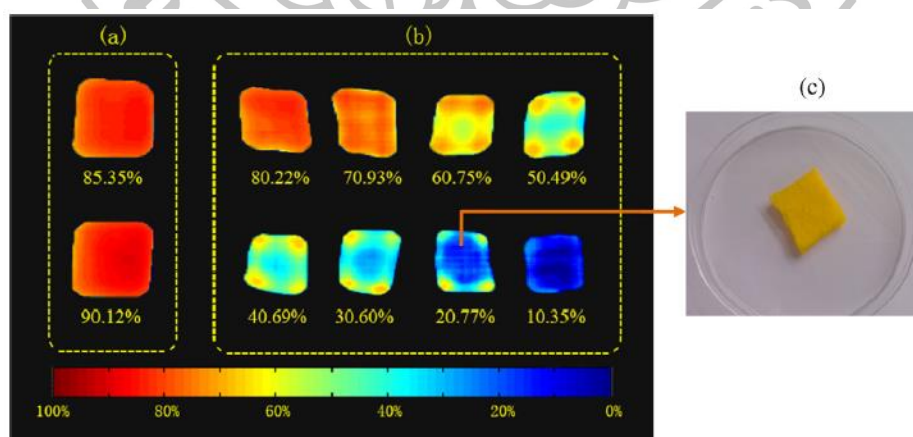
Rajkumar และคณะ (2012) ทำการตรวจสอบคุณภาพของกล้วย ได้แก่ TSS, MC และความแน่นเนื้อของกล้วยด้วยเทคนิค HSI ในช่วงความยาวคลื่น 400 -1000 นาโนเมตร สร้างสมการทำนายค่าด้วยวิธี MLR โดย สมการทำนายค่า TSS, MC และความแน่นเนื้อ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.85, 0.87 และ 0.91 ตามลำดับ

Liava-Valenzuela และคณะ (2013) ศึกษาการใช้เทคนิค HSI ในการตรวจสอบความแน่นเนื้อ และ SSC ของบลูเบอร์รี่ ทำการถ่ายภาพในช่วงความยาวคลื่น 500 -1000 นาโนเมตรด้วยระบบการถ่ายภาพแบบสะท้อนกลับ จากการสร้างสมการด้วยวิธี PLS ได้ค่า R และ RMSEP ของค่าความแน่นเนื้อเท่ากับ 0.869 และ 0.23 นิวตัน และค่า R และ RMSEP ของค่า SSC เท่ากับ 0.788 และ 1.30 องศาบริกซ์ ตามลำดับ จะเห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิค HSI ในการตรวจสอบความแน่นเนื้อ และ SSC ได้

Chen และคณะ (2015) ศึกษาการใช้เทคนิค HSI ในการตรวจสอบปริมาณแอนโทไซยานิน ปริมาณน้ำตาล และ pH ขององุ่น (port wine grape) ทำการถ่ายภาพแบบสะท้อนกลับในช่วงความยาวคลื่น 380 – 1028 นาโนเมตร สมการที่ได้จากวิธี PLS มีค่า R^2 และ RMSE (root mean square errors) ของปริมาณแอนโทไซยานิน เท่ากับ 0.95 และ 14 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่า R^2 และ RMSE ของปริมาณน้ำตาลเท่ากับ 0.89 และ 1.1 องศาบริกซ์ และค่า pH มีค่า R^2 และ RMSE เท่ากับ 0.73 และ 0.18 ตามลำดับ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เทคนิค HSI มีประสิทธิภาพการทำนายคุณภาพในองุ่น โดยเฉพาะปริมาณแอนโทไซยานิน และปริมาณน้ำตาล

จากการศึกษาของ Pu และ Sun (2015) มีการใช้เทคนิค HSI ในการศึกษาการกระจายตัวของ MC ในมะม่วงแผ่นอบแห้งที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ (microwave-vacuum drying, MVD) โดยมะม่วงพันธุ์ Tommy Atkins ถูกนำมาสไลด์จนมีขนาด 3x3 เซนติเมตร นำไปอบแห้งด้วย MVD และถ่ายภาพสเปกตรัมของมะม่วงแผ่นอบแห้งที่ 0, 3, 6, 9, 12, 15, 20, 25 และ 30 นาที ในระบบ reflectance ทำการวัดในช่วง visible-near infrared (Vis-NIR) ความยาวคลื่น 400 - 1000 นาโนเมตร และช่วง near infrared (NIR) ความยาวคลื่น 880 - 1720 นาโนเมตร และสร้างสมการ

ด้วยวิธี PLS โดย MC ในระหว่างการอบด้วย MVD จะเห็นว่าสมการที่ได้จากการถ่ายภาพในช่วงความยาวคลื่น 880 ถึง 1720 นาโนเมตร มีค่า R^2 และค่า RMSEP เท่ากับ 0.0.969 และ 4.796% ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าการถ่ายภาพในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 1000 นาโนเมตร มีค่า R^2 เท่ากับ 0.933 และยังมีค่า RMSEP เท่ากับ 7.109% เนื่องจากโมเลกุลของน้ำ (O-H group) มีคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีมากในช่วงความยาวคลื่น NIR อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการทำนายค่า MC ด้วยเทคนิค HSI ของมะม่วงแผ่นอบแห้งมีความแม่นยำสูงเมื่อทำการเลือกความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับความชื้น โดยสมการทำนายค่าที่ได้จากความยาวคลื่นที่ตำแหน่ง 908, 1076, 1153, 1405 และ 1706 นาโนเมตร มีความแม่นยำในการทำนายค่า MC มีค่า R^2 และค่า RMSEP เท่ากับ 0.972 และ 4.611 % ตามลำดับ การศึกษาการกระจายตัวของความชื้นของการอบแห้งด้วย MVD แสดงดังภาพที่ 12 แผนภาพการกระจายตัวของค่า MC ที่สร้างจากสมการ PLS ของสมการทำนายค่าที่ดีที่สุด โดยแผนภาพการกระจายตัวของปริมาณความชื้นในมะม่วงที่ไม่ผ่านการอบแห้งด้วย MVD แสดงดังภาพที่ 12(a) จะเห็นว่าแผนภาพมีสีแดง หมายถึงตัวอย่างมีปริมาณความชื้นสูง (>85%) มะม่วงแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วย MVD ที่ความชื้นต่างๆ แสดงดังภาพที่ 12(b) พบว่ามะม่วงแผ่นอบแห้งที่มีความชื้นเท่ากับ 80.22% เป็นสีแดง แต่มะม่วงอบแห้งที่มีความชื้นเท่ากับ 10.35% มีสีฟ้า แสดงให้เห็นว่า ความชื้นของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อสีของมะม่วงแผ่นอบแห้งเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีฟ้า ภาพที่ 12(c) แสดงภาพ RGB ที่ความชื้น 20.77% พบว่าไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยสายตา ดังนั้น HSI จึงเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง และสามารถใช้ในการทำนายปริมาณความชื้นของมะม่วงแผ่นอบแห้งระหว่างการอบแห้งด้วย MVD ได้



ภาพที่ 12 แผนภาพการกระจายตัวของปริมาณความชื้นในมะม่วงแผ่นอบแห้ง (a) มะม่วงแผ่นที่ไม่ผ่านการอบ (b) มะม่วงแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วย MVD ที่ความชื้นต่างๆ (c) ภาพ RGB ของมะม่วงแผ่นอบแห้งที่ความชื้น 20.77%

ที่มา: Pu และ Sun (2015)

จากงานวิจัยจะเห็นว่าเทคนิค HSI มีความสามารถในการตรวจสอบคุณภาพของผลไม้ชนิดต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณภาพด้านความแน่นเนื้อของผลไม้ ซึ่งมีความแม่นยำสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคุณภาพด้านอื่นๆ ในผลไม้ชนิดเดียวกัน

เทคนิคสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้สมบัติเชิงทัศนศาสตร์ (optical properties) ซึ่งเกี่ยวข้องกับแสงและการมองเห็นในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งไม่สามารถให้ข้อมูลการกระจายเชิงพื้นที่ (spatial distributions) คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์อาหาร จึงเป็นข้อจำกัดของเทคนิคสเปกโทรสโกปี ในขณะที่การตรวจสอบคุณภาพภายนอกของผลิตภัณฑ์อาหารสามารถใช้เทคนิคการถ่ายภาพได้ อย่างไรก็ตามเทคนิคการถ่ายภาพในช่วงความยาวคลื่นที่สายตามองเห็น (visible wavelengths) ไม่สามารถตรวจสอบตัวอย่างที่มีสีเหมือนหรือใกล้เคียงกัน ไม่สามารถแยกองค์ประกอบหรือทำนายค่าทางเคมี และไม่สามารถตรวจสอบข้อบกพร่องของตัวอย่างที่สายตาไม่สามารถมองเห็นได้ เทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัม (HSI) เป็นการนำความสามารถของเทคนิคสเปกโทรสโกปีกับเทคนิคการถ่ายภาพมารวมกัน เทคนิค HSI สามารถทำนายคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์อาหารในเชิงปริมาณและในขณะเดียวกันก็จะได้ข้อมูลการกระจายเชิงพื้นที่ด้วย ตารางที่ 3 แสดงความแตกต่างของเทคนิคสเปกโทรสโกปี เทคนิคการถ่ายภาพ และ HSI (Wu และ Sun, 2013)

ตารางที่ 3 ความแตกต่างของเทคนิคสเปกโทรสโกปี เทคนิคการถ่ายภาพ และ HSI

Features	Hyperspectral imaging	Spectroscopy	Imaging	Multispectral imaging
Spectral information	✓	✓	×	Limited
Spatial information	✓	×	✓	✓
Multi-constituent information	✓	✓	×	Limited
Detectability to objects with small size	✓	×	✓	✓
Flexibility of spectral extraction	✓	×	×	✓
Generation of quality-attribute distribution	✓	×	×	Limited

ที่มา: Wu และ Sun (2013)

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุประสงค์และการเตรียมตัวอย่าง

มะม่วงที่เลือกใช้ในการศึกษานี้คือ มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองดิบแก่ ขนาด 3 (น้ำหนัก 250-350 กรัมต่อผล) ที่ไม่ผ่านการอบไอน้ำจำนวน 188 ผล โดยรับมะม่วงมาจากบริษัท สวิฟท์ จำกัด จังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นมะม่วงที่เก็บเกี่ยวจากสวนในจังหวัดลพบุรี อุตรธานี พิษณุโลก และสระแก้ว รายละเอียดแหล่งที่มา ฤดูกาลเก็บเกี่ยวและสภาวะที่ใช้ในการบ่มให้สุกของมะม่วงสำหรับการศึกษาในแต่ละชุดการทดลองแสดงดังตารางที่ 4

มะม่วงถูกขนส่งด้วยรถยนต์จากบริษัท อำเภอกำแพงแสน ถึงห้องปฏิบัติการที่อำเภอนครปฐม ณ อุณหภูมิห้องใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นมะม่วงถูกนำมาทดสอบความสมบูรณ์ด้วยวิธีการลอย-จมน้ำ โดยเลือกมะม่วงที่จมน้ำ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ >1 แล้วนำไปแช่ในสารละลายกรดเปอร์ออกซีแอสติกที่ความเข้มข้น 200 ppm ในอัตราส่วนมะม่วงต่อสารละลายเท่ากับ 1:2 (น้ำหนักต่อปริมาตร) เพื่อลดเชื้อจุลินทรีย์ที่ผิวของมะม่วง สะเด็ดน้ำให้แห้ง ทำการบ่มมะม่วงในตะกร้าพลาสติกที่รองและคลุมด้วยกระดาษ แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง (29.7 ± 0.7 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ $66.3 \pm 4.4\%$) เป็นเวลา 7 วันหรือจนกว่าจะเน่าเสีย

ตารางที่ 4 แหล่งที่มา ฤดูกาลเก็บเกี่ยวและสภาวะในการบ่มของมะม่วงที่ใช้ในการศึกษา

ชุดการทดลองที่	แหล่งที่มา	ฤดูกาลเก็บเกี่ยว	สภาวะในการบ่ม		จำนวน (ผล)
			อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	
1	จ.ลพบุรี	กุมภาพันธ์ 2557	27.2 ± 0.2	64.9 ± 3.5	47
2	จ.อุตรธานี	มีนาคม 2557	29.5 ± 0.5	65.3 ± 4.2	48
3	จ.พิษณุโลก	เมษายน 2557	30.9 ± 0.5	66.7 ± 6.0	45
4	จ.สระแก้ว	พฤษภาคม 2557	31.3 ± 1.5	68.2 ± 3.9	48
		เฉลี่ย	29.7 ± 0.7	66.3 ± 4.4	รวม 188

3.2 สารเคมี

1. กรดเปอร์ออกซีแอซิติก (peroxyacetic acid) (ECOLAB, Thailand)
2. เมทานอล (methanol) เกรด AR (RCI Labscan Limited, Thailand)
3. เมทานอล (methanol) เกรด HPLC (RCI Labscan Limited, Thailand)
4. อะซิโตน (acetone) เกรด AR (RCI Labscan Limited, Thailand)
5. โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride) (Ajax Finechem Pty Ltd, Australia)
6. BHT (butylated hydroxytoluene), 99% (ACROS organics, Belgium)
7. โซเดียมซัลเฟส แอนไฮดรัส (sodium sulphate anhydrous) (CARLO ERBA Reagents S.A.S., Italy)
8. ไอโซโพรพานอล (propan-2-ol) เกรด HPLC (RCI Labscan Limited, Thailand)
9. อะซิโตนไนไตรล์ (acetonitrile) เกรด HPLC (RCI Labscan Limited, Thailand)
10. เฮกเซน (hexane) เกรด AR (RCI Labscan Limited, Thailand)
11. สารมาตรฐานเบต้าแคโรทีน (β -carotene, synthetic, Type II, $\geq 95\%$) เกรด HPLC (Sigma-Aldrich, Germany)
12. น้ำกลั่น (distilled water) (Vunique, Thailand)
13. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มัล (0.1 N sodium hydroxide solution) (Merck, Germany)

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (fourier transform near infrared (FT-NIR) spectroscopy, รุ่น MPA, Bruker, Germany)
2. ระบบการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัม (hyperspectral image) ประกอบไปด้วย
 - 2.1 กล้องถ่ายภาพสเปกตรัม (hyperspectral frame camera, Cubert GmbH, Germany)
 - 2.2 หลอดทังสเตนฮาโลเจน 50 วัตต์ (tungsten halogen lamp, Pro Lamp, ASD Inc. CO, USA)
 - 2.3 กระจกสะท้อนแสง (mirror)
3. เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (texture analyzer, รุ่น TA-XT2i, Stable Micro Systems, UK)

4. เครื่องวัดสี (HunterLab colorimeters, Colour Global Co., Reston Virginia, USA)
5. เครื่องโฮโมจีไนเซอร์ (homogenizer รุ่น Ultra Turrax T25 basic, IKA labortechnik, Co. Ltd., Germany)
6. เครื่องชั่งชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง (analytical balance รุ่น BP 211S Sartorius AG, Inc., Germany)
7. เครื่องชั่งชนิดหยาบ 2 ตำแหน่ง (balance, Sartorius AG, Inc., Germany)
8. ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (hot air oven, รุ่น FED53, Binder, Germany)
9. เวอร์เนียคาร์ลิเปอร์ (vernier caliper, รุ่น 11205-200, INSIZE 1205 series, UK)
10. พีเอชมิเตอร์ (pH meter, รุ่น pH M 210, Metro LAB, France)
11. เครื่องระเหยแบบหมุน (rotary evaporator, รุ่น RV 10, IKA labortechnik, Co. Ltd., Germany)
12. เครื่องวัดค่าความหวานแบบดิจิตอล (digital refractometer, รุ่น Pal-1, Atago, Japan)
13. เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวความดันสูง (high performance liquid chromatography, Shimadzu, Japan)
14. เครื่องเขยาสาร (vortex mixer รุ่น Vortex-Genie2, Scientific Industries, Inc., USA)
15. เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer, รุ่น Topolino, IKA labortechnik, Co. Ltd., Germany)
16. คอลัมน์ (column) C18 ชนิด reverse-phase ขนาด 10 มิลลิลิตร (150 x 4.6 มิลลิเมตร) (GL Sciences, Japan)
17. กรวยแยกสีชาขนาด 500 มิลลิลิตร (brown glass separatory funnel, 500 ml, รุ่น NS29,2/32, witeg, Germany)
18. ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump, รุ่น TC-501/v/, Sparmax, Taiwan)
19. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath, รุ่น WNB 14 SC, Memmert, Germany)
20. ตู้ควบคุมอุณหภูมิต่ำ (cool incubator) (Binder, KB, Germany)
21. กระดาษกรอง whatman เบอร์ 4 ขนาด 70 มิลลิเมตร (filter paper, circles 70 mm, whatman™, UK)
22. ซอฟต์แวร์ OPUS (เวอร์ชัน 7.2.139.1294, Bruker Germany Ltd.)
23. ซอฟต์แวร์ Cubert_Gui (Cubert GmbH, Germany)
24. ซอฟต์แวร์ Matlab (The MathWorks Inc., Mass, USA)
25. ซอฟต์แวร์ Hyper See (BurgerMetrics SIA, Riga, Latvia)

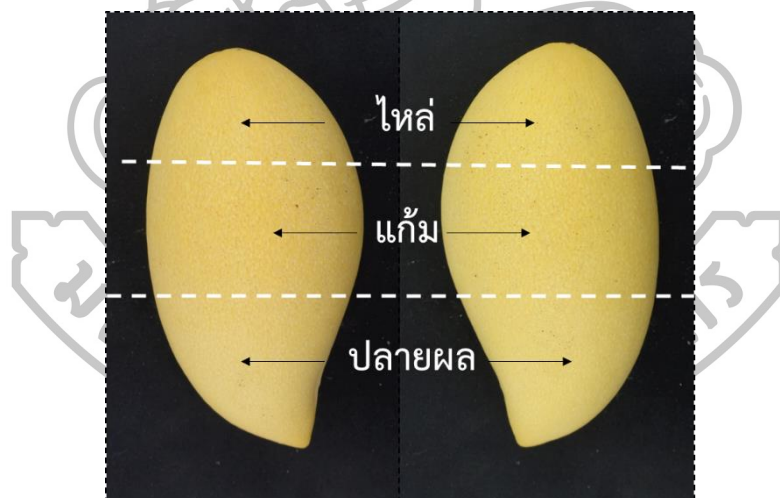
26. ซอฟต์แวร์ SPSS (เวอร์ชัน 18, SPSS Inc., USA)

27. ซอฟต์แวร์ Unscramble (CAMO Software AS, Oslo, Norway)

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการบ่มให้สุก

สำหรับแต่ละชุดการทดลอง (ตารางที่ 4) ทำการสุ่มมะม่วงจำนวน 6 ผลต่อวัน โดยสุ่มทุกวัน ระหว่างการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาตรวจสอบคุณภาพทางเคมีและกายภาพ โดยวิเคราะห์คุณภาพบนตัวอย่างผลมะม่วง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ที่บริเวณไหล่ผล (shoulder) แก้มผล (cheek) และปลายผล (tip) เพื่อทำการสุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและกายภาพด้านที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5



ภาพที่ 13 การแบ่งตำแหน่งของผลมะม่วงสำหรับการทดลอง

ตารางที่ 5 ตำแหน่งบนผลและชุดการทดลองที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพทางเคมีและกายภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

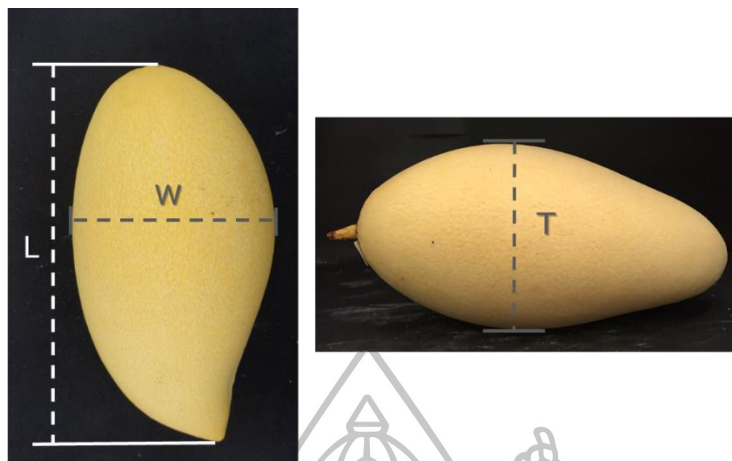
ลักษณะคุณภาพ	ชุดการทดลอง				ตำแหน่งบนผลมะม่วง		
	1	2	3	4	ไหล่ผล	แก้มผล	ปลายผล
สีเนื้อ สีเปลือก		✓	✓	✓	✓	✓	✓
ความแน่นเนื้อ	✓	✓	✓	✓		✓	
pH	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TSS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ปริมาณเบต้าแคโรทีน	✓	✓		✓	✓	✓	✓

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่า คุณภาพของมะม่วงที่ทำการศึกษา ได้แก่ สีเนื้อ สีเปลือก ความแน่นเนื้อ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solids, TSS) ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (titratable acidity, TA) ความเป็นกรดต่าง (pH) และปริมาณเบต้าแคโรทีน โดยเฉพาะค่าความแน่นเนื้อที่วัดค่าเฉพาะบริเวณแก้มผล สำหรับคุณภาพด้านอื่นๆจะศึกษาทั้ง 3 ตำแหน่งของผลมะม่วง

3.4.1.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของมะม่วงในระหว่างการบ่มให้สุก

3.4.1.1.1 การวัดขนาดและน้ำหนัก

ทำการวัดขนาดมะม่วงจำนวน 188 ผล โดยสุ่มมะม่วงจำนวน 6 ผลจากแต่ละวันที่บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วันหรือจนกว่าจะเน่าเสีย มาวัดความกว้าง (W) ความยาว (L) และความหนา (T) ของมะม่วงในหน่วยมิลลิเมตรด้วยเวอร์เนียคาร์ลิสเปอร์ (ภาพที่ 14) และบันทึกผล จากนั้น ชั่งน้ำหนักมะม่วงในหน่วยกรัมด้วยเครื่องชั่งชนิดหยาบ 2 ตำแหน่งแล้วบันทึกผล



ภาพที่ 14 การวัดค่าความกว้าง (W) ความยาว (L) และความหนา (T) ของมะม่วง

3.4.1.1.2 ความแน่นเนื้อ (Firmness)

ทำการวัดความแน่นเนื้อของมะม่วงจำนวน 188 ผล โดยสุ่มมะม่วงจำนวน 6 ผลต่อวันจากแต่ละวันที่บ่มที่อุณหภูมิต่ำ เป็นเวลา 7 วันหรือจนกว่าจะเน่าเสีย ทำการวัดความแน่นเนื้อของมะม่วงที่ยังไม่ผ่านการปอกเปลือกบริเวณจุดกึ่งกลางของตำแหน่งแก้มผลด้าน A ด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส โดยใช้หัววัดสแตนเลสรูปทรงกระบอก (stainless steel probe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัววัด 2 มิลลิเมตร ค่าความแน่นเนื้อที่ได้เป็นการวัดค่าแรงสูงสุดที่หัววัดกดทะลุผ่านเปลือกและเนื้อมะม่วงจำนวน 1 ครั้ง จากนั้นบันทึกค่าแรงกดสูงสุดในหน่วยนิวตัน (N) สถิติในการวัดมีรายละเอียดดังนี้ (Jha และคณะ, 2006)

โหมตการวัด คือ measure force in compression

ความเร็วก่อนการวัด (pre-test speed)	1.5 มิลลิเมตรต่อวินาที
ความเร็วในการวัด (test speed)	0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที
ความเร็วหลังการวัด (post-test speed)	10.0 มิลลิเมตรต่อวินาที
ระยะทางในการวัด (distance)	10.0 มิลลิเมตรต่อวินาที

3.4.1.1.3 ค่าสี (Color)

- สีเปลือก

ทำการวัดค่าสีเปลือกมะม่วงทั้งหมด 141 ผล จากมะม่วง 3 ชุดการทดลอง (ตารางที่ 5) โดยสุ่มมะม่วงจำนวน 6 ผลในแต่ละวันที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วันหรือจนกว่าจะเน่าเสีย วัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสีในระบบ CIE แสดงค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดงและเขียว (a^* , $-a^*$) ค่าความเป็นสีเหลืองและน้ำเงิน (b^* , $-b^*$) ซึ่ง D65 (noon daylight) เป็นโหมดที่ใช้ในการวัด ก่อนการวัดตัวอย่างทุกครั้ง ทำการสอบเทียบเครื่องวัดสี โดยการวัดค่าสีของแผ่นเซรามิกสีดำและขาวตามลำดับ และต้องมีค่า ΔE^* น้อยกว่า 0.07 จึงจะถือว่ามีความเที่ยงตรงในการวัด จากนั้นวัดค่าสีเปลือกของมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลตำแหน่งละ 3 ซ้ำ และบันทึกผลเป็นค่าสีเปลือกเฉลี่ย นำค่า L^* a^* และ b^* ที่ได้มาคำนวณหาค่าความเข้มของสี (C) และค่ามุมของสี ($^{\circ}h$) จากสมการดังต่อไปนี้

$$h^{\circ} = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (1)$$

$$c = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

- สีเนื้อ

หลังจากวัดสีเปลือกเสร็จแล้วทำการปอกเปลือกมะม่วงทั้งผล จากนั้นวัดค่าสีเนื้อของมะม่วงด้วยระบบการวัดเดียวกันกับการวัดสีเปลือกที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลตำแหน่งละ 3 ซ้ำ และบันทึกค่าสีเนื้อเฉลี่ย นำค่า L^* a^* และ b^* ที่ได้มาคำนวณหาค่า C และค่า $^{\circ}h$

3.4.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของมะม่วงในระหว่างการบ่มให้สุก

3.4.1.2.1 ความเป็นกรดต่าง (pH)

ทำการวัด pH มะม่วงจำนวน 188 ผล โดยสุ่มมะม่วงจำนวน 6 ผลจากแต่ละวันที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วันหรือจนกว่าจะเน่าเสีย โดยนำเนื้อมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลของด้าน A มาบ่มให้ละเอียดด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นนำหัววัดของเครื่องพีเอชมิเตอร์จุ่มลงในตัวอย่าง อ่านค่าพีเอชเมื่อตัวเลขหยุดนิ่ง และบันทึกผล วัดค่า pH ตำแหน่งผลละ 2 ซ้ำ

3.4.1.2.2 ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Titratable acidity, TA)

ทำการวัด TA มะม่วงจำนวน 188 ผล โดยสุ่มมะม่วงจำนวน 6 ผลจากแต่ละวันที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วันหรือจนกว่าจะเน่าเสีย นำมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลมาบ่มละเอียดด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ซึ่งมะม่วงบ่มละเอียดประมาณ 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตรด้วยเครื่องซึ่งชนิดหยาบ 2 ตำแหน่ง แล้วบันทึกค่าน้ำหนักที่แน่นอน เติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำตัวอย่างไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 นอร์มัล โดยระหว่างไทเทรตจะกวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสารละลายพร้อมกับวัดความเป็นกรดต่างด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์ จนกระทั่งสารละลายมีพีเอชเท่ากับ 8.1 บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไปทั้งหมด (AOAC, 1995) เพื่อนำไปคำนวณหาค่า TA ดังสมการที่ (3) วัดค่า TA ตำแหน่งผลละ 2 ซ้ำ

$$TA(\%) = \frac{ml(0.1N NaOH) \times 0.007 \times 100}{g(sample)} \quad (3)$$

เมื่อ 0.007 คือ citric acid equivalent

3.4.1.2.3 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solids, TSS)

ทำการวัดค่า TSS ของมะม่วงจำนวน 188 ผล โดยสุ่มมะม่วงจำนวน 6 ผล จากแต่ละวันที่บ่มที่อุณหภูมิตั้ง 7 วันหรือจนกว่าจะเน่าเสีย นำมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลมาปั่นละเอียดด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ซั่งมะม่วงปั่นละเอียด 2 กรัมและซั่งน้ำ กลั่น 2 กรัมใส่ลงหลอดทดลองด้วยเครื่องซั่งชนิดหยาบ 2 ตำแหน่ง นำตัวอย่างไปเขย่าให้เป็นเนื้อ เดียวกันด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำตัวอย่างไปต้มในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำตัวอย่างกรองผ่านสำลี นำสารละลายใส่ที่ได้มาวัด TSS ด้วยเครื่องวัดดัชนีหักเหแสง และบันทึกผล ทำการวัดค่า TSS ตำแหน่งผลละ 2 ซั่ง

3.4.1.2.4 ปริมาณเบต้าแคโรทีน (β -carotene content)

ทำการสกัดปริมาณเบต้าแคโรทีนของมะม่วงจำนวน 143 ผล จากมะม่วง 3 ชุดการทดลอง (ตารางที่ 5) โดยสุ่มมะม่วงจำนวน 6 ผลจากแต่ละวันที่บ่มที่ เป็นเวลา 7 วันหรือ จนกว่าจะเน่าเสีย นำมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลมาปั่นละเอียดด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ ซั่งตัวอย่างปั่นละเอียดประมาณ 5 กรัม ด้วยเครื่องซั่งชนิดหยาบ 2 ตำแหน่ง แล้วบันทึก น้ำหนักที่แน่นอน ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมนเมทานอลปริมาตร 40 มิลลิลิตร ปั่นผสมให้ เข้ากันด้วยเครื่องโฮโมจีไนเซอร์ นำสารละลายที่ได้มากรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 4 ด้วยชุดกรอง สารระบบสุญญากาศ ล้างกระดาษกรองด้วยเมทานอลจนกว่าจะหมดสีเหลือง นำสารสกัดสีเหลืองใส่ที่ ได้มาสกัดด้วยสารละลายผสมเฮกเซนและอะซิโตนอัตราส่วน 1:1 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ในกรวยแยก สีชา เขย่าและตั้งทิ้งไว้จนแยกชั้น ทำการเก็บสารสกัดส่วนบนในขวดรูปชมพู่แล้วเก็บในที่มืด นำ สารละลายส่วนล่างไปสกัดซ้ำด้วยสารละลายผสมเฮกเซนและอะซิโตนจนกว่าจะหมดสีเหลือง นำสาร สกัดส่วนบนที่ได้ทั้งหมดมาเติมน้ำปริมาตร 20 มิลลิลิตร เพื่อแยกอะซิโตนออกจากสารสกัด เขย่าแล้ว ตั้งทิ้งไว้จนแยกชั้น เก็บชั้นที่มีสีเหลืองและสกัดซ้ำด้วยน้ำอีกรั้ง จากนั้นนำสารละลายสีเหลืองที่ได้มา เติมนโซเดียมซัลเฟต แอนไฮไดรรัส และ BHT อย่างละ 2 กรัม แล้วนำไปประเหยสารละลายเฮกเซนด้วย เครื่องระเหยแบบหมุนเหวี่ยงจนแห้ง เก็บตัวอย่างในขวดสีชา โดยปรับปริมาตรด้วยไอโซโพรพานอล เป็น 10 มิลลิลิตร นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณ β -carotene ด้วยวิธี HPLC โดยใช้คอลัมน์ C18 ชนิด reverse-phase ขนาด 10 มิลลิลิตรเป็นเฟสหยุดนิ่ง และใช้เมทานอลต่ออะซิโตนในอัตราส่วน 7:3 เป็นเฟสเคลื่อนที่ด้วยอัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการฉีดตัวอย่างปริมาตร 20 ไมโครลิตร ตรวจวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ด้วย UV diode-array

detector ทำการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนที่ได้จากตัวอย่างกับสารมาตรฐานเบต้าแคโรทีน (β -carotene, synthetic, Type II, $\geq 95\%$) สร้างกราฟมาตรฐานเบต้าแคโรทีนเพื่อคำนวณปริมาณเบต้าแคโรทีนที่มีอยู่ในตัวอย่าง แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก (ดัดแปลงจาก Pott และคณะ, 2003) ทำการวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีนตำแหน่งผลละ 2 ซ้ำ

3.4.1.2.5 การคำนวณค่าดัชนีการสุก (Ripening index, RPI)

เนื่องจากคุณภาพของมะม่วงมีการเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการสุก เช่น สีเปลือก ความหวาน ความเปรี้ยว ลักษณะเนื้อสัมผัส ซึ่งคุณภาพในด้านใดด้านหนึ่งไม่สามารถกำหนดระดับการสุกได้ถูกต้องแม่นยำ จึงต้องมีการกำหนดเกณฑ์ที่ใช้การชี้วัดระดับการสุกของมะม่วง โดยค่า RPI เป็นค่าที่ใช้เป็นดัชนีชี้วัดระดับการสุกของมะม่วง

ทำการคำนวณค่า RPI ที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลของมะม่วงแต่ละผล ดังสมการที่ (4) ซึ่งบ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นเนื้อกับอัตราส่วนความหวานเปรี้ยว (TSS/TA) (Mahayothee และคณะ, 2007)

$$RPI = \ln \left(\frac{100 \times F \times TA}{TSS} \right) \quad (4)$$

เมื่อ	F	คือ ความแน่นเนื้อ (นิวตัน)
	TA	คือ ปริมาณกรดที่ไต่เตรท (กรัมซีตริกต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่าง)
	TSS	คือ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์)

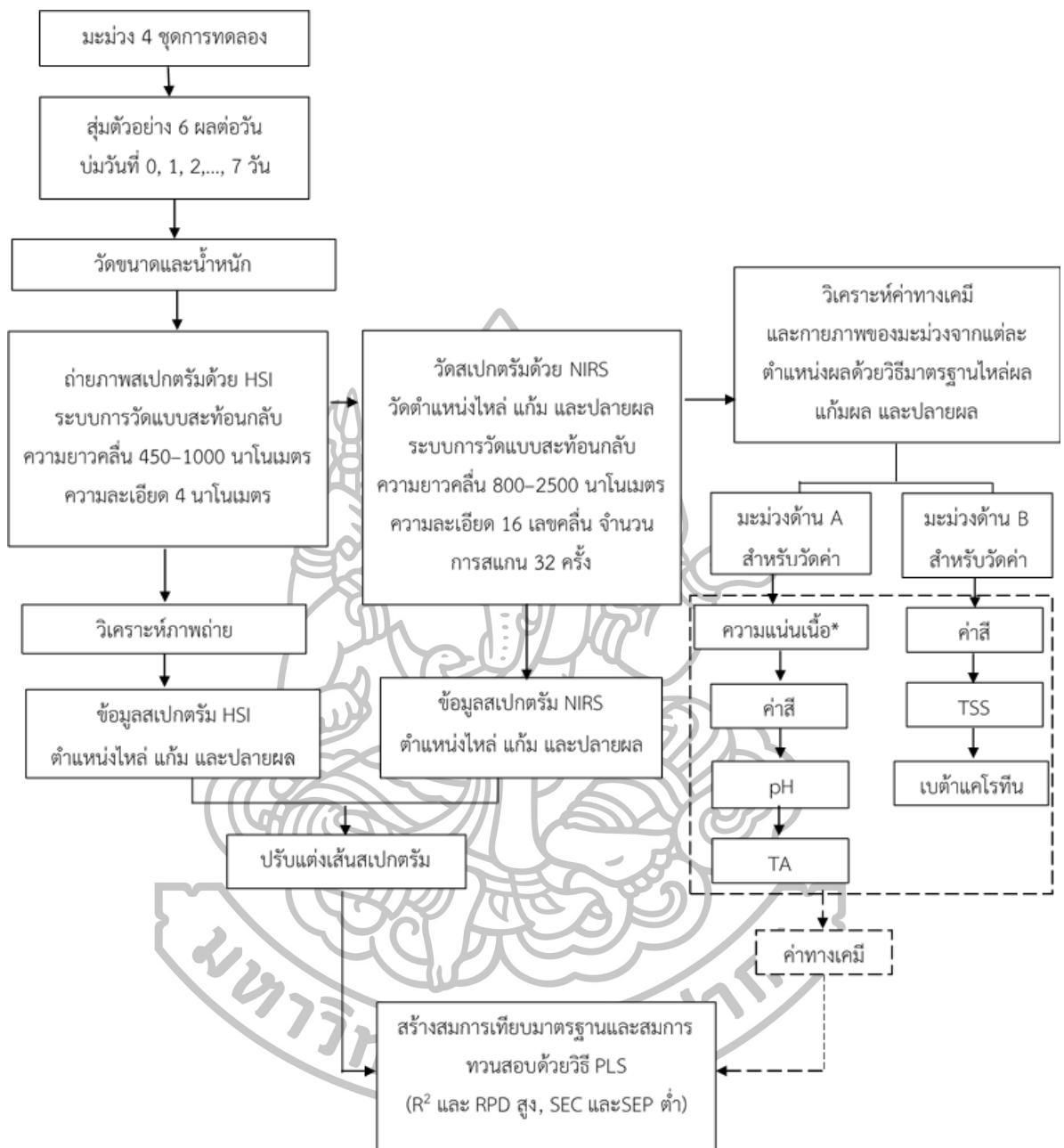
3.4.1.2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS ซึ่งเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่แต่ละตำแหน่งบนผลในระหว่างการบ่มให้สุก โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan เนื่องจากวัตถุประสงค์ที่รับมาทั้ง 4 ชุดการทดลองมีความแตกต่างกันของระยะเวลาและสถานที่ของการเก็บเกี่ยว มะม่วงแต่ละชุดการทดลองจึงถูกกำหนดให้เป็น block และวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (randomized completely block design, RCBD) และหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้วยวิธีสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน

3.4.2 การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการใช้เทคนิค NIRS และ HSI ในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

ขั้นตอนโดยทั่วไปในการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงด้วยเทคนิค NIRS และ HSI ทำโดยสุ่มมะม่วงทั้ง 4 ชุดการทดลอง จำนวน 188 ผล (ตารางที่ 4) จำนวน 6 ผลต่อวันเป็นเวลา 7 วันหรือจนกว่าจะเน่าเสียในระหว่างวันบ่มที่อุณหภูมิห้อง มาทำการถ่ายภาพสเปกตรัมด้วยเทคนิค HSI และวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS แล้วนำมะม่วงไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพด้วยวิธีมาตรฐาน (ข้อที่ 3.4.1.1.2, 3.4.1.2.1 – 3.4.1.2.5) นำค่าทางเคมีและข้อมูลสเปกตรัมที่ได้มาหาความสัมพันธ์เพื่อสร้างสมการเทียบมาตรฐาน และตรวจสอบประสิทธิภาพของเทคนิค NIRS และ HSI จากค่า R^2 และ RPD ของสมการทวนสอบที่ควรจะมีค่าสูง ค่า SEC, SEP และ bias ที่ต่ำ โดยขั้นตอนทั่วไปในการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการตรวจสอบคุณภาพด้วยเทคนิค NIRS และ HSI แสดงดังภาพที่ 15





ภาพที่ 15 ขั้นตอนทั่วไปในการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการตรวจสอบ

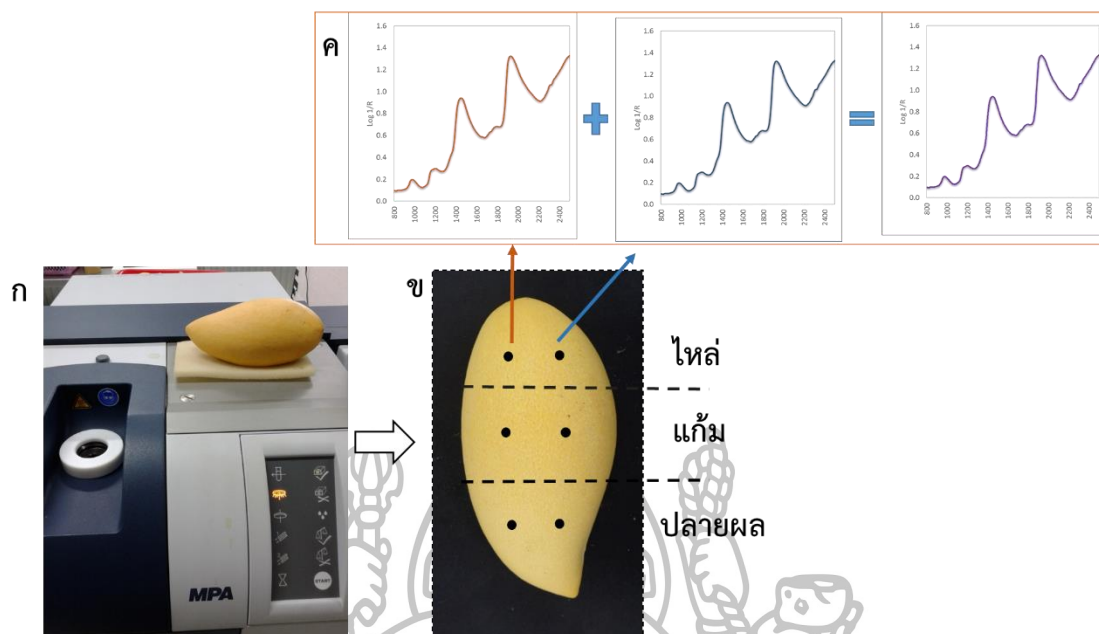
คุณภาพมะม่วงด้วยเทคนิค NIRS และ HSI

* วัดความแน่นเนื้อเฉพาะที่ตำแหน่งแก้มผล

3.4.2.1 การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการใช้เทคนิค NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

3.4.2.1.1 การวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS

ในการศึกษาทำการวัดสเปกตรัมด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Fourier transform near infrared (FT-NIR) spectroscopy) ร่วมกับซอฟต์แวร์ OPUS ที่ใช้ควบคุมการวัดสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 800 ถึง 2500 นาโนเมตร ด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (reflectance mode) ความละเอียดของการวัด 16 เลชคลื่น จำนวนการสแกน 32 ครั้ง ทำการวัดสเปกตรัมของมะม่วงจำนวน 188 ผล ที่มีระดับการสุกต่างๆ โดยสุ่มมะม่วงจำนวน 6 ผลต่อวันในระหว่างการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วันหรือจนกว่าจะเน่าเสียมาเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 25 นาที เพื่อควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่าง จากนั้นเปิดเครื่อง NIRS ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที ทำการวัด back ground ของเครื่อง NIRS ก่อนการวัดสเปกตรัมของตัวอย่าง ทำการวัดสเปกตรัมของมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ ผล แก้มผล และปลายผลของมะม่วงทั้ง 2 ด้าน (A และ B) (ภาพที่ 16 ก) โดยในแต่ละตำแหน่งบนผลจะวัดสเปกตรัม 2 ครั้ง จะได้เส้นสเปกตรัมดังแสดงในภาพที่ 16 (ข) จากนั้นทำการเฉลี่ยเส้นสเปกตรัมที่ได้จากการวัดในแต่ละตำแหน่ง จะได้เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยของมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ ผล แก้มผล ปลายผล และสร้างสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผล โดยทำการเฉลี่ยจากเส้นสเปกตรัมตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผล แสดงดังภาพที่ 16 (ค)



ภาพที่ 16 การวางตัวอย่างในการวัดเส้นสเปกตรัม (ก) ตำแหน่งบนผลมะม่วงการวัดสเปกตรัม (•) ด้วยเทคนิค NIRS (ข) และการเฉลี่ยเส้นสเปกตรัม (ค)

3.4.2.1.2 การสร้างสมการเทียบมาตรฐานจากเทคนิค NIRS

คุณภาพภายในที่นำมาสร้างสมการทำนายค่าด้วยเทคนิค NIRS ได้แก่ ความแน่นเนื้อ TSS, TA, pH, ปริมาณเบต้าแคโรทีนและ RPI และนำมาศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลของมะม่วงต่อการใช้เทคนิค NIRS ในการทำนายคุณภาพของมะม่วงในระหว่างการบ่มให้สุก ยกเว้นคุณภาพด้านความแน่นเนื้อ เนื่องจากทำการวิเคราะห์คุณภาพที่ตำแหน่งแก้มผลเท่านั้น

การสร้างสมการทำโดยการนำข้อมูลสเปกตรัมมาหาความสัมพันธ์กับค่าทางเคมีที่ได้จากวิธีมาตรฐานด้วยซอฟต์แวร์ OPUS เวอร์ชัน 7.2.139.1294 ซึ่งข้อมูลสเปกตรัมกับค่าทางเคมีที่ใช้สร้างสมการต้องเป็นข้อมูลจากตำแหน่งการวัดเดียวกัน เช่น สเปกตรัมที่วัดจากตำแหน่งไหล่ผลต้องถูกนำมาหาความสัมพันธ์กับค่าทางเคมีที่วัดได้จากตำแหน่งไหล่ผล โดยการสร้างสมการเทียบมาตรฐานด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (partial least square, PLS) ทดสอบสมการด้วยวิธีการทดสอบแบบภายนอก (test set) ทำโดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการ (calibration set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (validation set) ในอัตราส่วน 60 ต่อ 40 มีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมด้วยวิธีต่างๆ เช่น การทำอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (first derivative, D_1) อนุพันธ์อันดับสอง (second derivative, D_2) การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (multiplicative scatter correction, MSC) การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

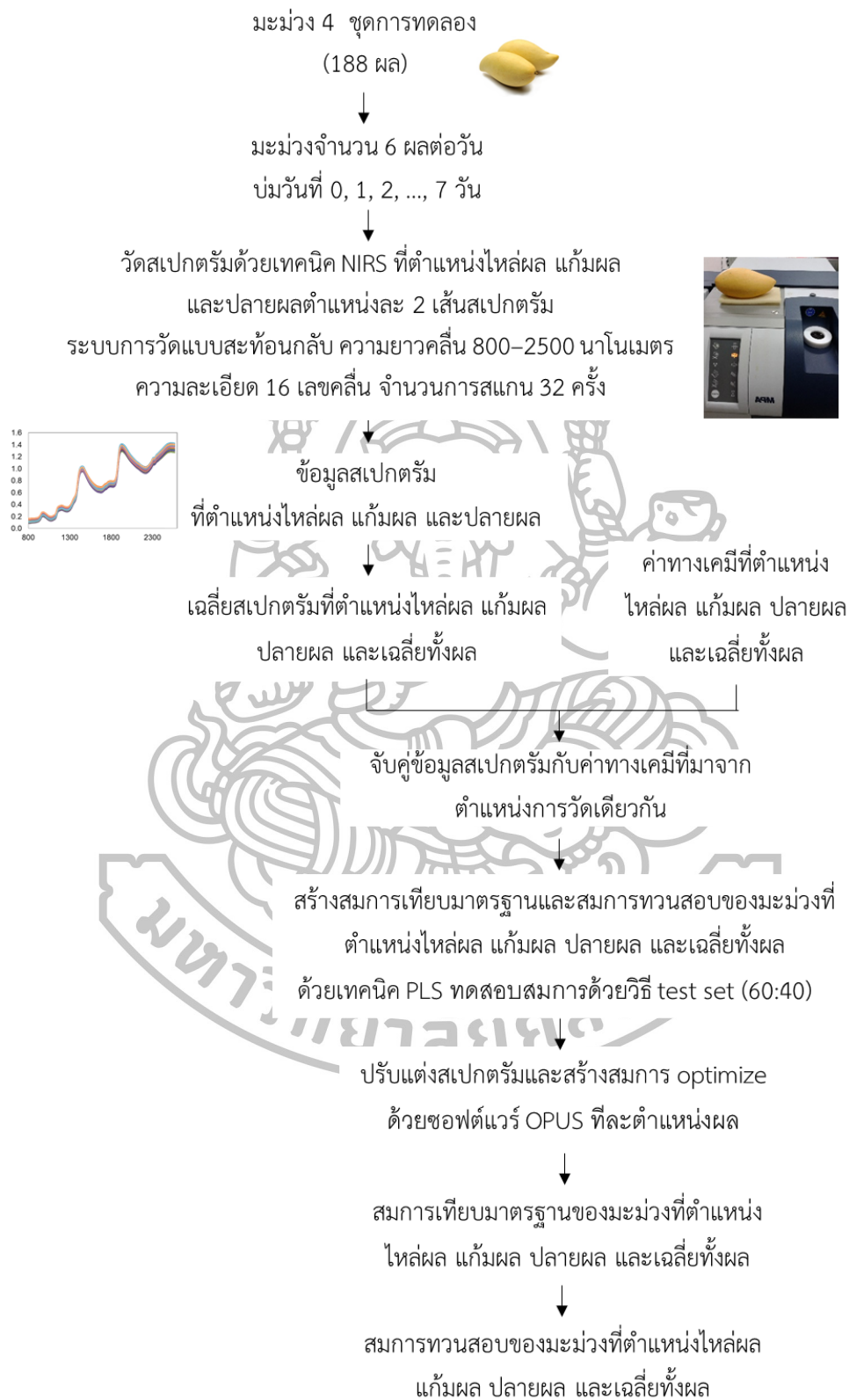
(standard normal variate, SNV) การปรับเรียบแบบซาวิตซกีโกเลย์ 17 จุด (17-point savitzky-golay smoothing) หรือการใช้ 2 เทคนิคพร้อมกัน สร้างสมการเทียบมาตรฐานและทวนสอบสมการจากการหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยฟังก์ชันอัตโนมัติ (optimize) จากซอฟต์แวร์ OPUS เวอร์ชัน 7.2.139.1294 การสร้างสมการด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้จะแสดงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2), bias, SEC (standard error of calibration), SEP (standard error of prediction), SEP และ RPD (ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP) ซึ่งค่าที่ได้สามารถคำนวณได้จากสมการในภาคผนวก ข โดยประสิทธิภาพของสมการจะพิจารณาจากสมการทวนสอบว่าค่า R^2 และ RPD มีค่าสูง มีค่า SEC, SEP และ bias ต่ำ ซึ่งค่า RPD สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) ขั้นตอนในการสร้างสมการทำนายคุณภาพของมะม่วงด้วยเทคนิค NIRS แสดงดังภาพที่ 17

$$RPD = \frac{SD_v}{SEP} \quad (5)$$

SD_v คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าทางเคมีของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทวนสอบ

SEP คือ standard error of prediction



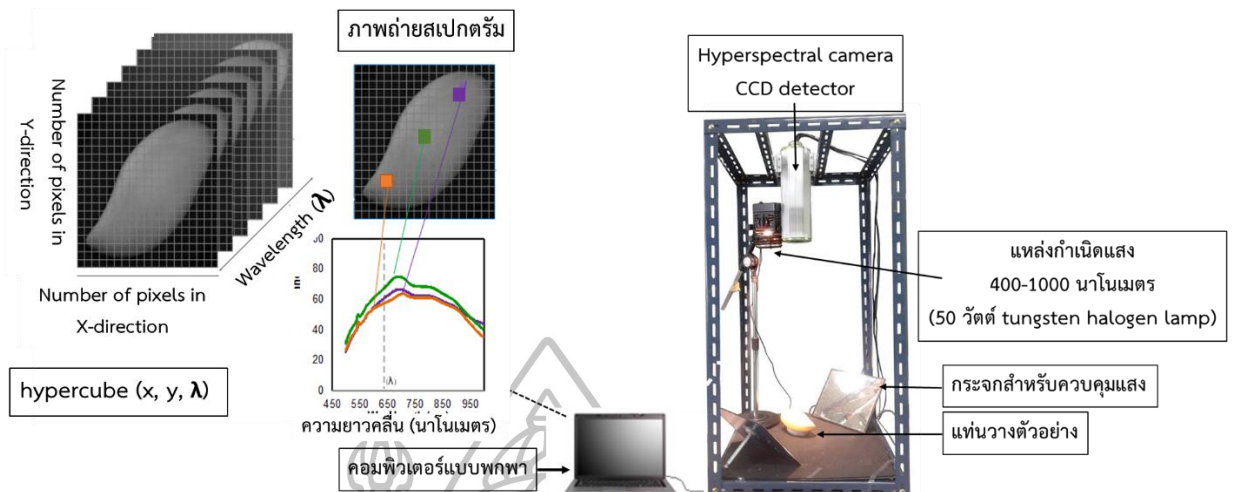


ภาพที่ 17 ขั้นตอนการสร้างสมการทำนายคุณภาพด้วยเทคนิค NIRS

3.4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการใช้เทคนิค HSI ในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

3.4.2.2.1 การถ่ายภาพสเปกตรัม

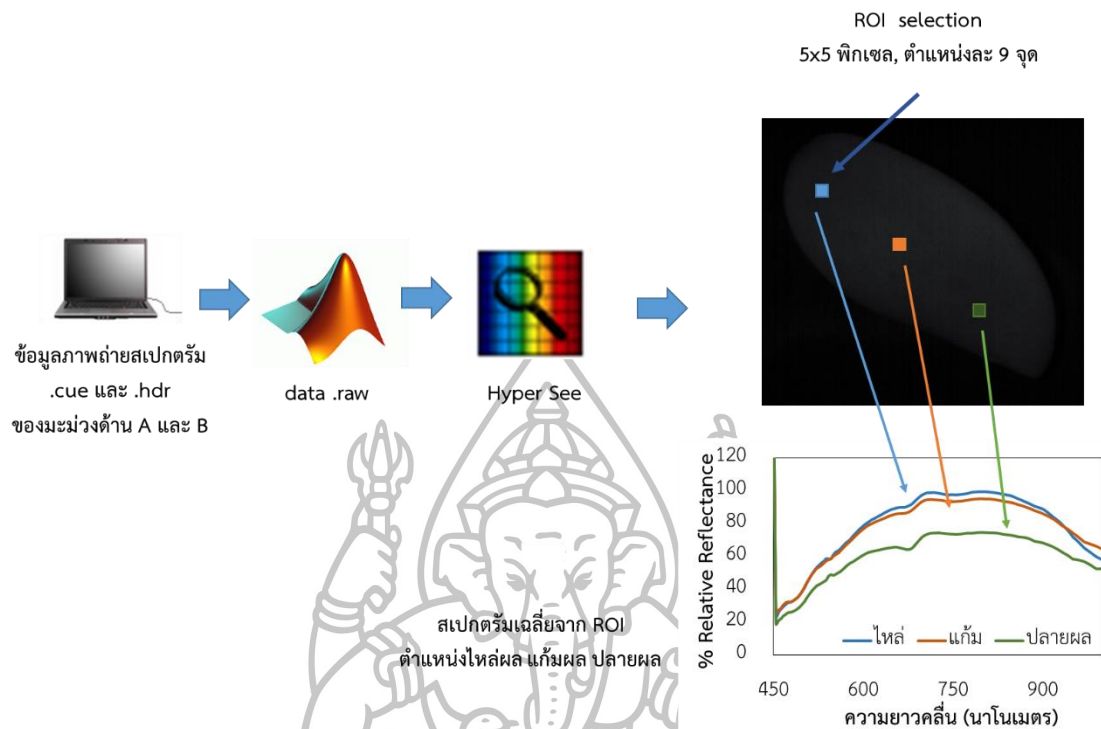
ระบบการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัมจะประกอบด้วย กล้องถ่ายภาพสเปกตรัม (hyperspectral frame camera) มีแหล่งกำเนิดแสงคือหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน 50 วัตต์ ที่สำหรับวางตัวอย่าง กระจกสำหรับควบคุมแสงวางทำมุม 120 องศา จำนวน 2 แผ่น และคอมพิวเตอร์แบบพกพาสำหรับควบคุมการถ่ายภาพ โดยเลนส์ของกล้องกับผิวของตัวอย่างมีระยะห่าง 70 เซนติเมตร (ภาพที่ 18) ทำการถ่ายภาพสเปกตรัมของมะม่วงจำนวน 188 ผล จากชุดการทดลองเดียวกันกับการศึกษาเทคนิค NIRS ทำการถ่ายภาพในห้องที่สว่าง ซึ่งก่อนการถ่ายภาพทำการเปิดไฟที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที เพื่อให้แหล่งกำเนิดแสงมีความเข้มแสงสม่ำเสมอ แล้วจึงทำการปรับเทียบเครื่องมือด้วยการเทียบมาตรฐานสีดำ โดยปิดเลนส์กล้องด้วยกระดาษแข็งสีดำแล้วถ่ายภาพ จากนั้นเทียบมาตรฐานสีขาว โดยการถ่ายภาพแผ่นผ้าใบสีขาวแล้วจึงทำการถ่ายภาพสเปกตรัมทั้ง 2 ด้านของผลมะม่วงด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 500 ถึง 1000 นาโนเมตร ความละเอียดของการถ่ายภาพ 4 นาโนเมตร ดังนั้นในการถ่ายภาพสเปกตรัม 1 ภาพ จะได้ข้อมูลสเปกตรัมทั้งหมด 138 ความยาวคลื่น โดยวางมะม่วงบนที่วางตัวอย่างให้อยู่ภายในเฟรมของกล้องถ่ายภาพ จากนั้นควบคุมการถ่ายภาพด้วยซอฟต์แวร์ Cubert_Gui ซึ่งภาพถ่ายสเปกตรัมที่ได้จะต้องมีค่าร้อยละการสะท้อนกลับอยู่ในช่วง 80 ถึง 100 ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในไฟล์ .cue .jpg และ .hdr มีขนาด 910 x 900 พิกเซล ซึ่งเป็นการถ่ายภาพแบบทั้งผล (Focal plane scanning image)



ภาพที่ 18 ระบบการถ่ายภาพด้วยเทคนิค HSI

3.4.2.2 การวิเคราะห์ภาพถ่ายสเปกตรัม

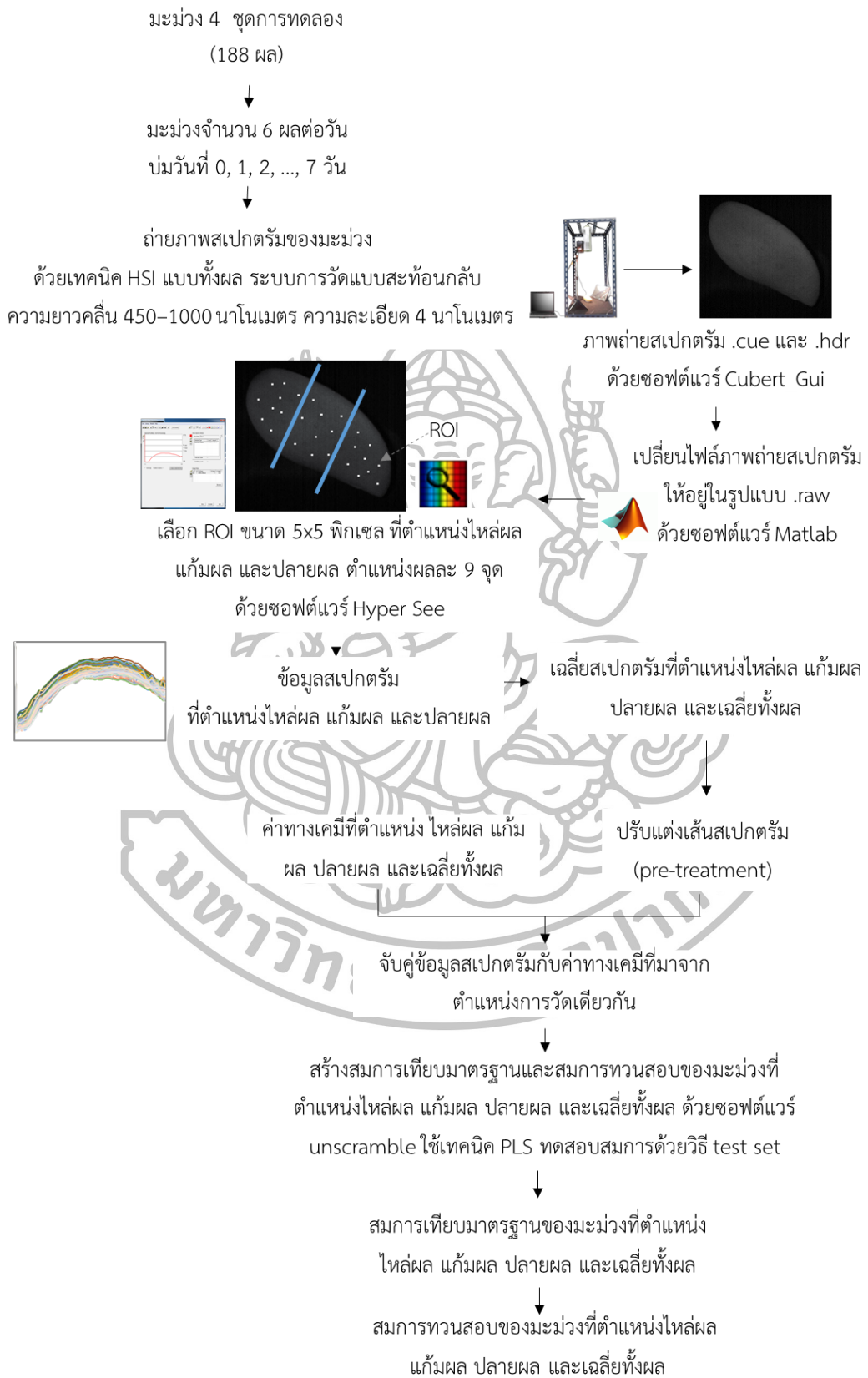
หลังจากถ่ายภาพสเปกตรัมต้องทำการบันทึกไฟล์ภาพถ่ายสเปกตรัมในรูปแบบ .cue และ .hdr จากซอฟต์แวร์ Cubert_Gui จากนั้นเปลี่ยนไฟล์ภาพถ่ายสเปกตรัมให้อยู่ในรูปแบบ .raw ด้วยซอฟต์แวร์ Matlab ซึ่งทำให้ภาพถ่ายเชิงสเปกตรัมสามารถเปิดภาพได้ในซอฟต์แวร์ Hyper See เพื่อทำการเลือกสเปกตรัมแบบสุ่มขนาด 5x5 พิกเซล (region of interest, ROI) ที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลของผลมะม่วง ทำการเลือก ROI โดยสุ่มเลือกที่แต่ละตำแหน่งบนผลมะม่วง ตำแหน่งผลละ 9 จุด ดังนั้นในแต่ละตำแหน่งบนผลมะม่วงจะมีค่า ROI ทั้งหมด 225 พิกเซล จากนั้นทำการเฉลี่ยเส้นสเปกตรัมที่ได้จากการสุ่มเลือก ROI จะได้เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยของมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล ปลายผล และสร้างสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผล โดยทำการเฉลี่ยจากเส้นสเปกตรัมตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผล (ภาพที่ 19)



ภาพที่ 19 การวิเคราะห์ภาพถ่ายเชิงสเปกตรัม

3.4.2.2.3 การสร้างสมการเทียบมาตรฐานจากเทคนิค HSI

คุณภาพภายในที่นำมาศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างสมการทำนายคุณภาพด้วยเทคนิค HSI ได้แก่ ความแน่นเนื้อ TSS, TA, pH, ปริมาณเบต้าแคโรทีนและ RPI นำสเปกตรัมมาสร้างสมการหาความสัมพันธ์กับค่าทางเคมีที่ได้จากวิธีมาตรฐานด้วยวิธี PLS ซึ่งข้อมูลสเปกตรัมกับค่าทางเคมีที่ใช้สร้างสมการต้องเป็นข้อมูลจากตำแหน่งการวัดเดียวกัน กำหนดอัตราส่วนของตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบเท่ากับร้อยละ 70 ต่อ 30 สร้างสมการด้วยวิธี test set ทำการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการทำ D_1 , D_2 , MSC, SNV การปรับเรียบแบบ Savitzky-Golay 17 จุด หรือการใช้ 2 เทคนิคพร้อมกันก่อนสร้างสมการ และสร้างสมการเทียบมาตรฐานด้วยซอฟต์แวร์ unscramble ในการศึกษาการสร้างสมการทำนายคุณภาพด้วยเทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัมจะแสดงค่า R^2 , RPD, SEC, SEP และ bias โดยทำการเลือกสมการที่มีความเหมาะสม ซึ่งพิจารณาจากสมการทวนสอบที่มีค่า R^2 และ RPD มีค่าสูง SEC, SEP และ bias ที่มีค่าต่ำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังแสดงในภาคผนวก ข ขั้นตอนในการสร้างสมการทำนายคุณภาพของมะม่วงด้วยเทคนิค HSI แสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ขั้นตอนการสร้างสมการทำนายคุณภาพด้วยเทคนิค HSI

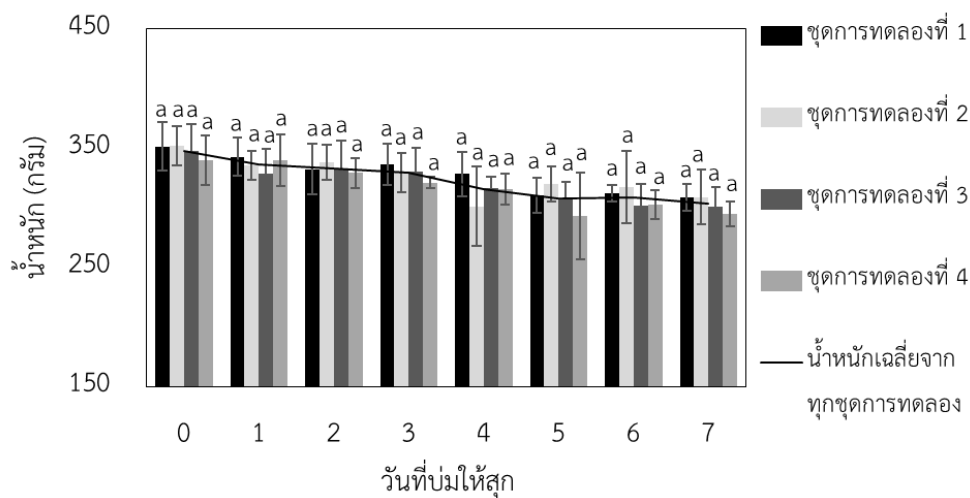
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การเปลี่ยนแปลงขนาด น้ำหนัก และความแน่นเนื้อของมะม่วงในระหว่างบ่มให้สุก

4.1.1 การเปลี่ยนแปลงขนาดและน้ำหนักของมะม่วงในระหว่างบ่มให้สุก

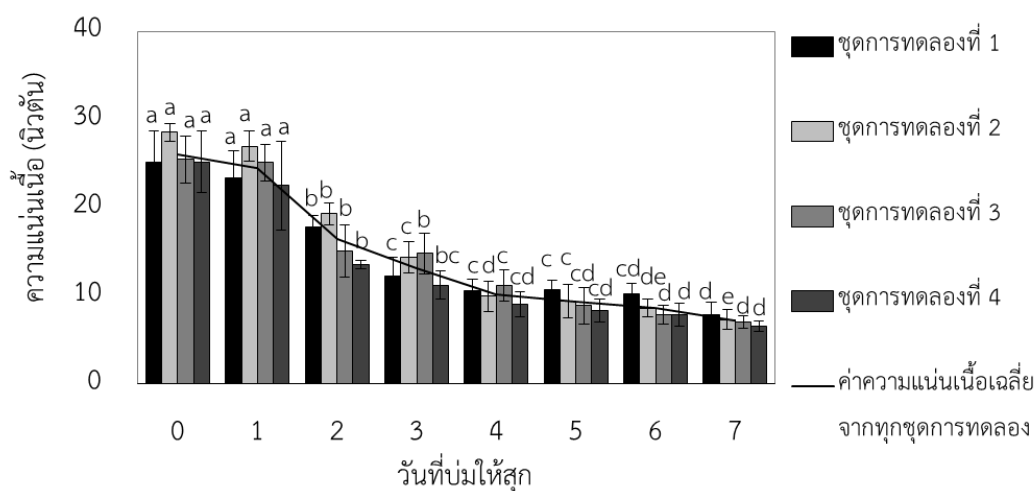
มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมีขนาดความยาว ความกว้าง และความหนาอยู่ในช่วง 137 – 150, 64 – 74 และ 41 – 54 มิลลิเมตร และน้ำหนักอยู่ในช่วง 293 – 352 กรัม การเปลี่ยนแปลงขนาด และน้ำหนักของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก พบว่าน้ำหนักเฉลี่ยของมะม่วงทั้ง 4 ชุดการทดลองมีค่าลดลงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในระหว่างการบ่มมะม่วงให้สุก (ภาพที่ 21) ในวันที่บ่มที่ 7 มะม่วงมีน้ำหนักเฉลี่ยลดลง -12.77 % เนื่องจากมะม่วงเป็นผลไม้ที่มีการหายใจภายหลังการเก็บเกี่ยว ออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาจะถูกรีดิวซ์ได้เป็นน้ำออกมาในกระบวนการหายใจ ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำไปในระหว่างการบ่ม (จริงแท้, 2546) และมะม่วงเป็นผลไม้ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ ปริมาณน้ำในผลไม้ช่วยเร่งการทำงานของเอนไซม์ในการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการหายใจ ส่งผลให้อัตราการหายใจสูงขึ้น การสูญเสียน้ำก็เพิ่มขึ้นด้วย (ฉันทลักษณ์, 2556) โดยการสูญเสียน้ำออกจากผลมะม่วงส่งผลให้โครงสร้างของมะม่วงเกิดการหดตัวทำให้มีน้ำหนัก และขนาดของผลมะม่วงลดลง (Jha และคณะ, 2006) ดังนั้น มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองจะมีการการสูญเสียน้ำหนัก และขนาดมากขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาเช่นเดียวกับการศึกษาของ วรณวรงค์ และคณะ (2555)



ภาพที่ 21 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในระหว่างวันที่บ่มให้สุก

4.1.2 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของมะม่วงในระหว่างบ่มให้สุก

ความแน่นเนื้อเฉลี่ยของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองทั้ง 4 ชุดการทดลอง มีค่าความแน่นเนื้อเฉลี่ยลดลงจาก 30.08 – 5.49 นิวตัน (ภาคผนวก ค) โดยเฉพาะในวันที่ 2 ของการบ่มให้สุก พบว่า ค่าความแน่นเนื้อลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในระหว่างวันที่บ่มให้สุกของการทดลองทั้ง 4 ชุด (ภาพที่ 22) โดยการลดลงของความแน่นเนื้อเกิดจากเพคตินที่เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ 2 ชนิด ได้แก่ polygalacturonase (PG) และ pectin esterase (PE) ทำให้โมเลกุลของเพคตินมีขนาดเล็กลง และมีความสามารถในการละลายน้ำมากขึ้น ส่งผลให้เนื้อเยื่อของเซลล์อ่อนนุ่มลงและยึดเกาะติดกันแบบหลวมๆ (สายชล, 2528) นอกจากนี้การสูญเสียน้ำผ่านช่องทางต่างๆ เช่น ปากใบ หรือเลนติเซล ก็สามารถทำให้ผลเหี่ยวและอ่อนนุ่มลงได้ (วาสนา, 2556) สอดคล้องกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองของ วรณวรารค์ และคณะ (2555) และ Rungpichayapichet และคณะ (2015)

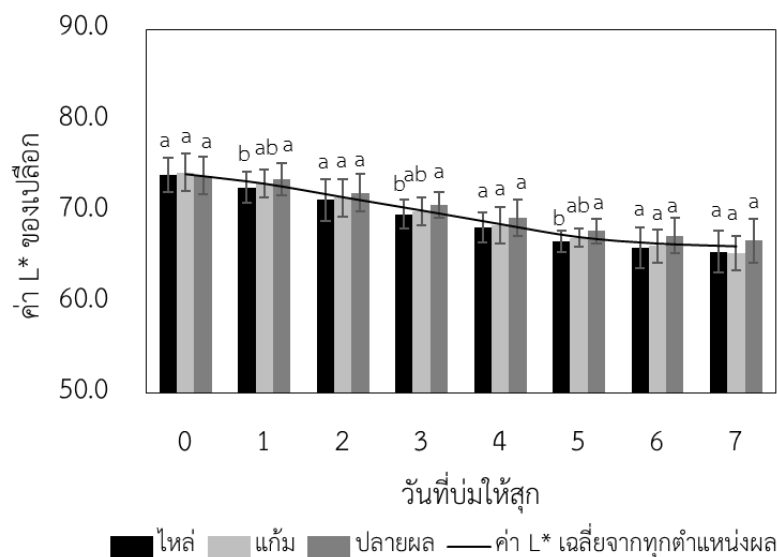


ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ในระหว่างการบ่มให้สุก ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในระหว่างวันที่บ่มให้สุก

4.2 อิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของมะม่วงในระหว่างบ่มให้สุก

4.2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าสีเปลือกในระหว่างบ่มให้สุก

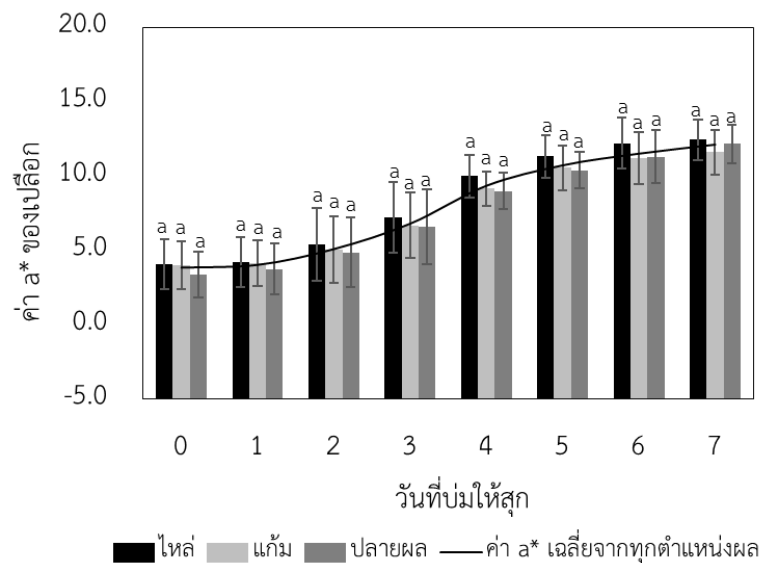
ค่าความสว่าง (L^*) ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลมีค่าลดลงจาก 79.87 – 60.30 ในระหว่างการบ่มให้สุก (ภาคผนวก ค) โดยมะม่วงจะมีสีเข้มขึ้นเมื่อ L^* มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับค่า L^* ของเปลือกมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผล พบว่า ตำแหน่งไหล่ผลผลมีค่า L^* เฉลี่ยน้อยสุด และมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งปลายผล (ภาพที่ 23) แสดงให้เห็นว่า เมื่อมะม่วงสุกเปลือกของมะม่วงมีสีเข้มขึ้นจากตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผล ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่า L^* ของเปลือกมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่ต่างกันในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน ยกเว้นในวันที่บ่มที่ 1, 3 และ 5 ที่มีค่า L^* ของเปลือกมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ผลและปลายผลแตกต่างกัน



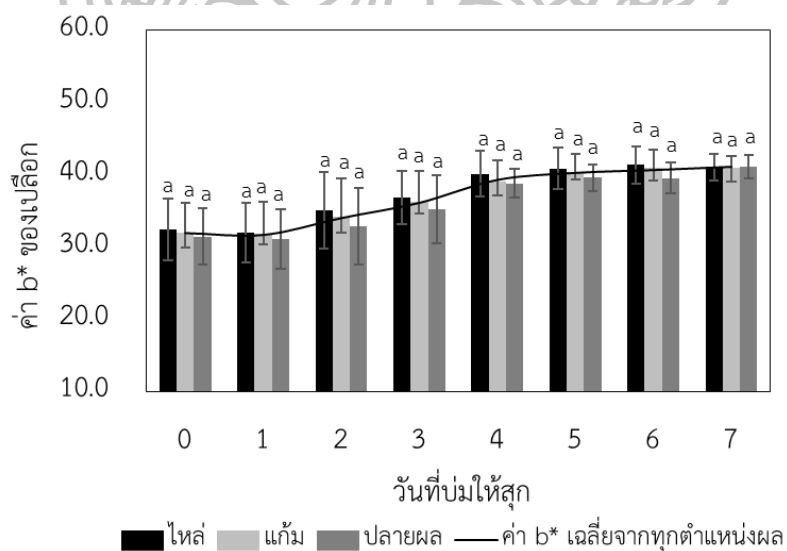
ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงค่า L* ของเปลือกมะม่วงที่ตำแหน่งไหล ผล แก้ม และปลายผลของมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผล มะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

ค่าความเป็นสีแดง-สีเขียว (a^*) และค่าความเป็นสีเขียว-เหลือง (b^*) ของเปลือกมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลมีค่าเพิ่มขึ้นในระหว่างการบ่มให้สุก ค่า a^* และ b^* เฉลี่ยของเปลือกมะม่วงมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ระหว่าง 0.44 – 15.89 (ภาพที่ 23) และ 20.46 – 47.14 (ภาพที่ 24) ตามลำดับ โดยการเพิ่มขึ้นของค่า a^* แสดงถึงการเปลี่ยนไปเป็นสีแดงของเปลือกมะม่วงในระหว่างการบ่มให้สุก และเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองเมื่อค่า b^* เพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า a^* และ b^* ของเปลือกมะม่วงในแต่ละตำแหน่งบนผลมะม่วงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน พบว่า ค่า a^* และ b^* ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ระหว่างตำแหน่งไหลผล แก้มผล และปลายผลของมะม่วงในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน โดยตำแหน่งที่มีค่า a^* และ b^* เฉลี่ยสูงสุด ได้แก่ ไหลผล แก้มผล และปลายผล ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า มะม่วงเริ่มมีการเปลี่ยนเป็นสีเหลืองส้มจากที่ตำแหน่งไหล ผล แก้มผล และปลายผลของมะม่วง



ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงค่า a* ของเปลือกมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผลของมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก
ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผล มะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

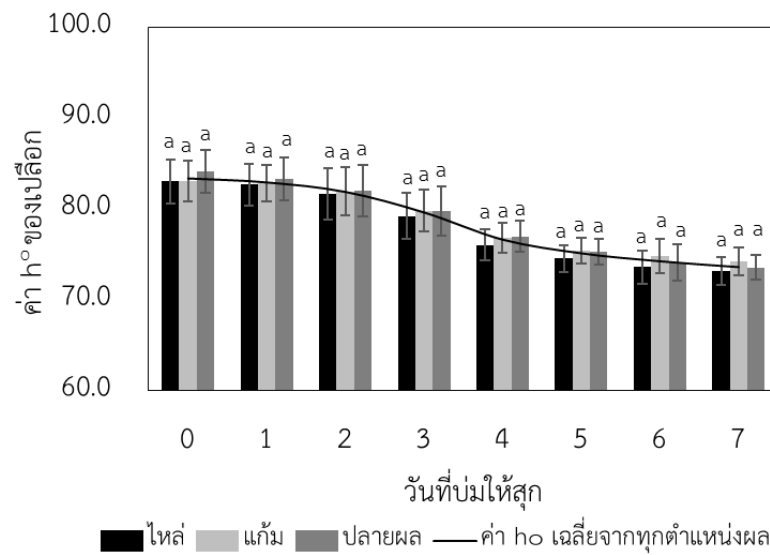


ภาพที่ 24 การเปลี่ยนแปลงค่า b* ของเปลือกมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผลของมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก
ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผล มะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

การเปลี่ยนแปลงค่า h° ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผล พบว่าค่า h° มีค่าลดลงจาก 88.93 เป็น 69.00 (ภาคผนวก ค) โดยการลดลงของค่า h° แสดงถึงการเปลี่ยนไปเป็นสีเหลืองส้มของเปลือกมะม่วงในระหว่างการบ่มให้สุก เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า h° ในแต่ละตำแหน่งบนผลมะม่วง พบว่า ตั้งแต่วันที่ 5 ของการบ่มมะม่วงให้สุก ค่า h° ของเปลือกมะม่วงมีค่ามากขึ้นที่ตำแหน่งแก้มผล (ภาพที่ 25) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในช่วงท้ายของการบ่มมีการเปลี่ยนสีเปลือกเป็นสีส้มที่ตำแหน่งแก้มผล อย่างไรก็ตาม ค่า h° ที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกันในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

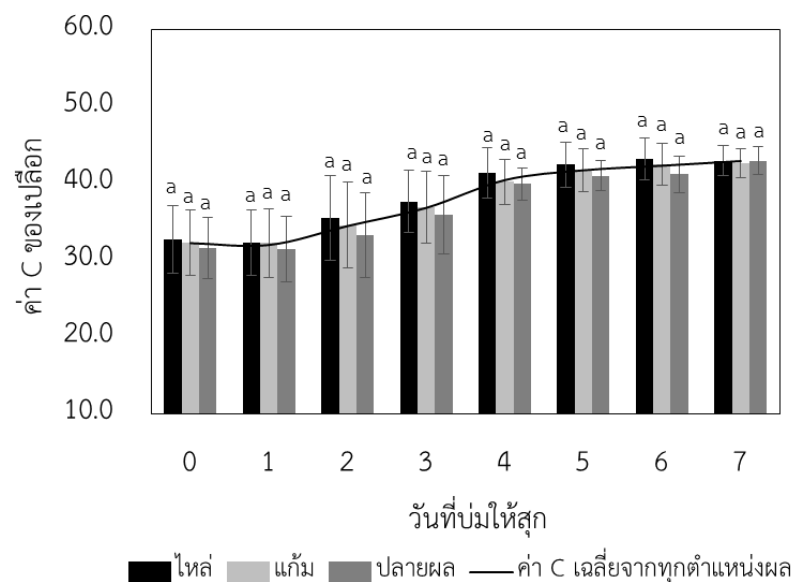
การเปลี่ยนแปลงค่า C ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 20.63 เป็น 49.25 (ภาคผนวก ค) เมื่อพิจารณาค่า C ในแต่ละตำแหน่งบนผลมะม่วง พบว่า ค่า C มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งไหล่ผลและมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่งปลายผล (ภาพที่ 26) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า C ที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกันในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

จากค่า L^* และ h° ที่มีค่าลดลง และการเพิ่มขึ้นของค่า a^* b^* และ C ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง แสดงให้เห็นการเปลี่ยนสีเปลือกของมะม่วงไปเป็นสีเหลืองส้มในระหว่างการบ่มให้สุก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Rungpichayapichet และคณะ (2015) โดยการเปลี่ยนเป็นสีเหลืองส้มของมะม่วงเกิดจากการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ ซึ่งมีสาเหตุจากการโมเลกุลการเกิดออกซิเดชัน การเปลี่ยนแปลง pH และการทำงานของเอนไซม์ เช่น chlorophyllases ในขณะที่เบต้าแคโรทีนที่มีอยู่เดิมเริ่มปรากฏให้เห็นชัดเจนขึ้น ทำให้เปลือกของมะม่วงมีสีเหลืองส้มเมื่อระดับการสุกมากขึ้น (Rathore และคณะ, 2007) และจากการเพิ่มขึ้นของค่า a^* และการลดลงของค่า h° พบว่าในช่วง 6 วันแรกของการบ่มให้สุก มะม่วงจะมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกไปเป็นสีเหลืองส้มมากที่สุดที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผล ตามลำดับ แต่หลังจากวันที่ 6 ของการบ่มให้สุกที่ตำแหน่งแก้มผลของมะม่วงจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองส้มน้อยที่สุด จากผลการศึกษา สรุปได้ว่า ตำแหน่งบนผลมะม่วงไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีเปลือกของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)



ภาพที่ 25 การเปลี่ยนแปลงค่า h° ของเปลือกมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผลของมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

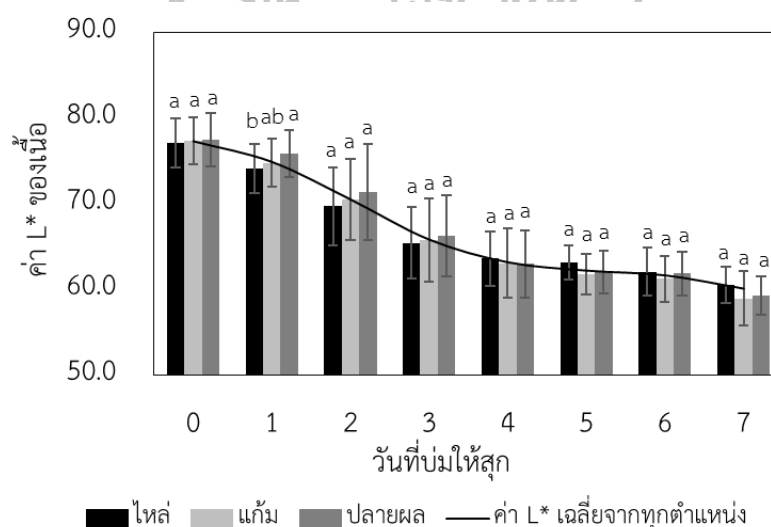


ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงค่า C ของเปลือกมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผลของมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

4.2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าสีเนื้อในระหว่างบ่มให้สุก

ค่า L^* ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลมีค่าลดลงจาก 83.44 เป็น 53.45 ในระหว่างการบ่มให้สุก (ภาคผนวก ค) โดยค่า L^* ของเปลือกที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน (ภาพที่ 27) เมื่อเปรียบเทียบค่า L^* ของเนื้อมะม่วงในแต่ละตำแหน่งบนผล พบว่า ในช่วงวันที่ 0 - 3 ของการบ่มให้สุก ตำแหน่งไหล่ผลที่ค่า L^* ของเนื้อมะม่วงน้อยที่สุด แต่เมื่อเข้าสู่วันที่ 5 ของการบ่ม สีเนื้อมะม่วงที่ตำแหน่งแก้มผลมีค่า L^* น้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าในช่วงท้ายของการบ่มให้สุก มะม่วงมีสีเข้มขึ้นที่ตำแหน่งแก้มผลมากกว่าตำแหน่งไหล่ผล และปลายผล ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่า L^* ของสีเนื้อเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งผลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกันในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

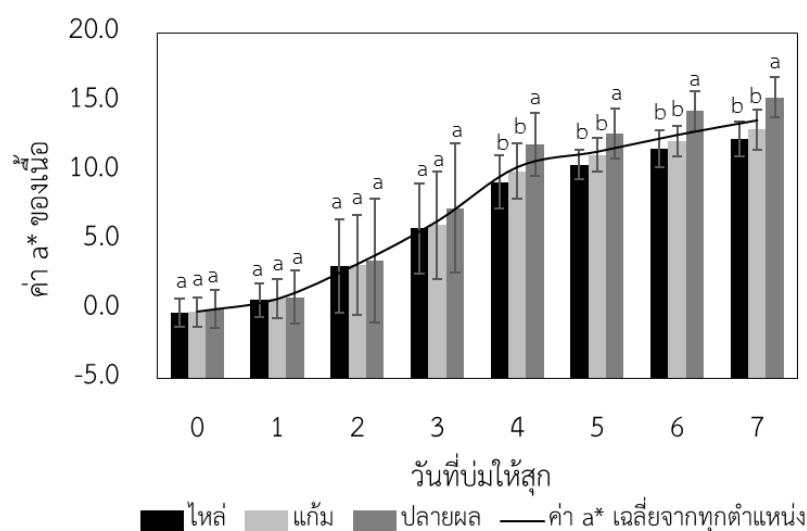


ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงค่า L^* ของเนื้อมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

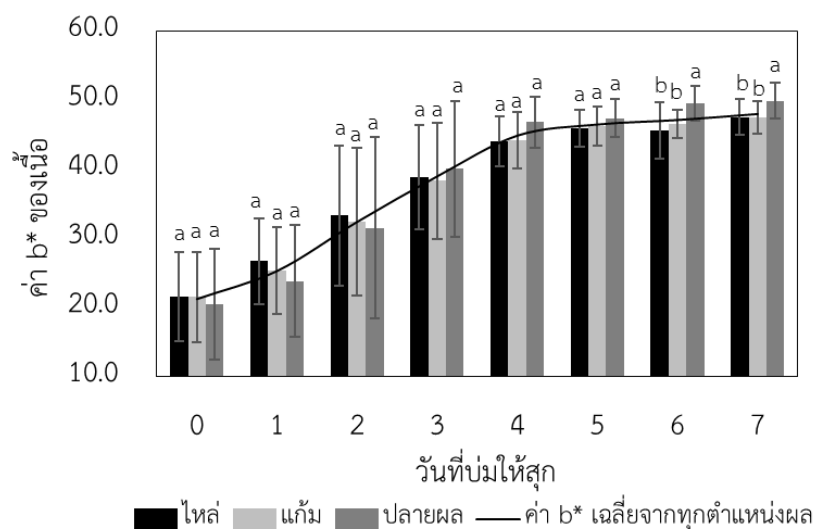
ในระหว่างการบ่มมะม่วงให้สุก พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่า a^* ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลเพิ่มสูงขึ้นจาก -1.54 เป็น 18.47 (ภาคผนวก ค) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่า a^* ของแต่ละตำแหน่งบนผลมะม่วง พบว่า ค่า a^* ที่ตำแหน่งปลายผลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับตำแหน่งไหล่ผลและแก้มผล ในระหว่างวันที่ 4 – 7 ของการบ่มให้สุก (ภาพที่ 28) โดยค่า a^* เฉลี่ยมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งปลายผล แก้มผล และไหล่ผล ตามลำดับ

ค่า b^* ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลเพิ่มสูงขึ้นจาก 8.88 เป็น 55.06 (ภาคผนวก ค) เมื่อเปรียบเทียบค่า b^* ในแต่ละตำแหน่งบนผลมะม่วง พบว่า ค่า b^* ที่ตำแหน่งปลายผลมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับตำแหน่งไหล่ผลและแก้มผล ในวันที่ 6 และ 7 ของการบ่มให้สุก (ภาพที่ 29)



ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลงค่า a^* ของเนื้อมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

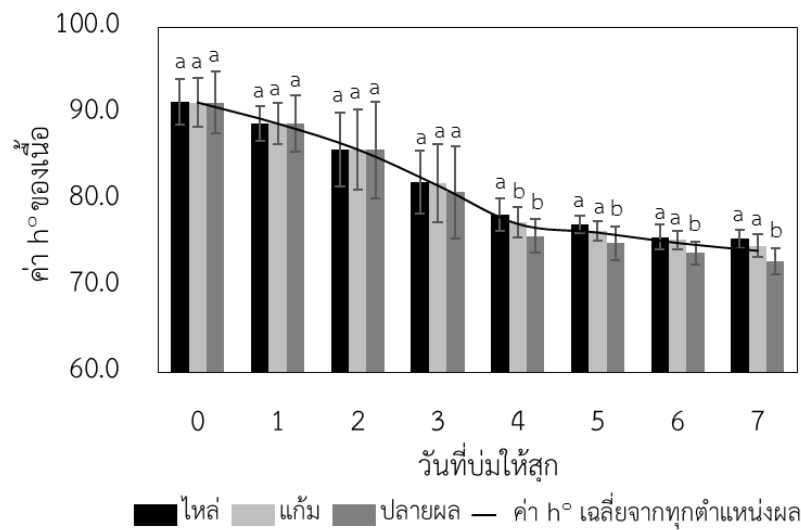
ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน



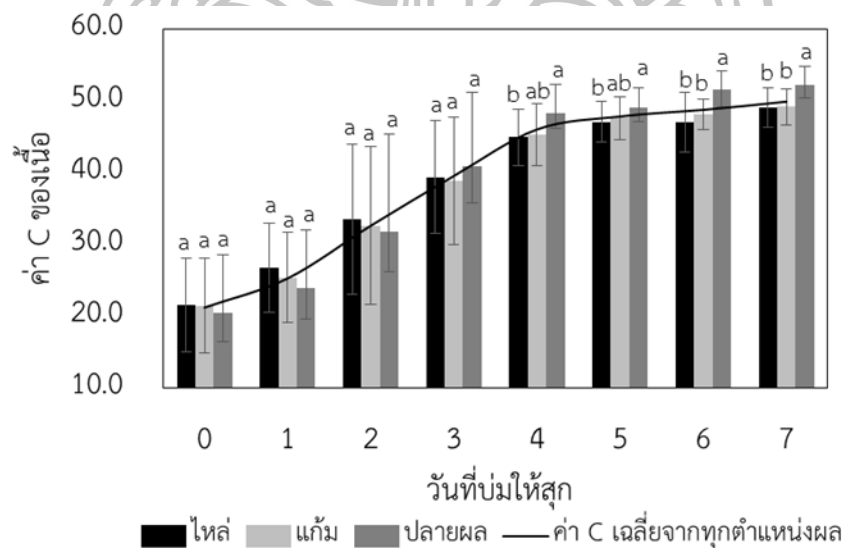
ภาพที่ 29 การเปลี่ยนแปลงค่า b^* ของเนื้อมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผลของมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผล มะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

การเปลี่ยนแปลงค่า h^o ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผล พบว่า ค่า h^o มีค่าลดลงจาก 97.11 เป็น 69.92 (ภาคผนวก ค) เมื่อพิจารณาจากค่า h^o ที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผล พบว่า ค่า h^o ที่ตำแหน่งปลายผลมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับตำแหน่งไหล่ผล ตั้งแต่วันที่ 4 ของการบ่มมะม่วง (ภาพที่ 30) แสดงให้เห็นว่า สีเนื้อมะม่วงที่ตำแหน่งปลายผลเปลี่ยนเป็นสีเหลืองส้มมากกว่าตำแหน่งไหล่ผล และแก้มผล ตามลำดับ

การเปลี่ยนแปลงค่า C ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผล พบว่า ค่า C มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 8.86 - 57.34 (ภาคผนวก ค) จากการเปรียบเทียบค่า C ของเนื้อมะม่วงในแต่ละตำแหน่งบนผล พบว่า ในระหว่างวันที่ 4 - 7 ของการบ่ม ค่าสีเนื้อของมะม่วงที่ตำแหน่งปลายผลมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับตำแหน่งไหล่ผล (ภาพที่ 31)



ภาพที่ 30 การเปลี่ยนแปลงค่า h° ของเนื้อมะม่วงที่ตำแหน่งโหล่ แก้ม และปลายผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก
ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน



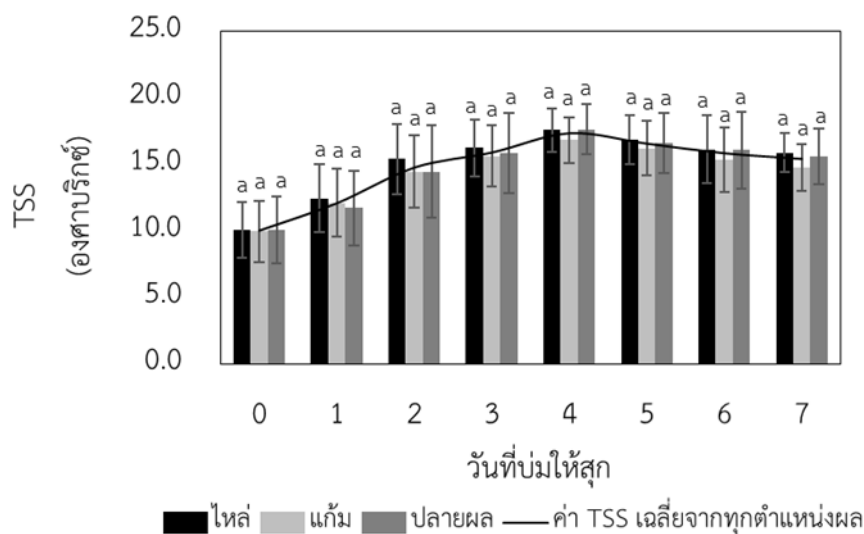
ภาพที่ 31 การเปลี่ยนแปลงค่า C ของเนื้อมะม่วงที่ตำแหน่งโหล่ แก้ม และปลายผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก
ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

เมื่อมะม่วงเข้าสู่กระบวนการสุกการเปลี่ยนแปลงค่าสีเนื้อเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าสีเปลือก โดยค่า L^* และ h° ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่า a^* b^* และ C มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Rungpichayapichet และคณะ (2015) การเพิ่มขึ้นของสีเหลืองส้มในเนื้อมะม่วงเกิดจากการสะสมของแคโรทีนอยด์ในผนังของผลชั้นกลาง (mesocarp) เมื่อมะม่วงเข้าสู่กระบวนการสุก (Vásquez-Caicedo และคณะ, 2006) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าสีเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองของตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลในระหว่างการเก็บรักษา พบว่าระหว่างวันที่ 4 - 7 ของการบ่มมะม่วงให้สุก มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างค่าสีเนื้อที่ตำแหน่งไหล่ผลและปลายผล ซึ่งพิจารณาจากค่า a^* , h° และค่า C มีการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกัน แสดงให้เห็นว่า มะม่วงมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสีเนื้อไปเป็นสีเหลืองส้มมากที่สุดที่ตำแหน่งปลายผล แก้มผล และไหล่ผล ตามลำดับ

4.2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในระหว่างบ่มให้สุก

การเปลี่ยนแปลงค่า TSS เฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก พบว่า ค่า TSS เฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10.0 เป็น 15.4 องศาบริกซ์ โดยวันที่ 4 ของการบ่มจะมีค่า TSS มากที่สุด หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อย โดยการเพิ่มขึ้นของค่า TSS ภายหลังการเก็บเกี่ยวเกิดจากการย่อยสลายแป้งไปเป็นน้ำตาล ทำให้มะม่วงมีค่า TSS มากขึ้น และน้ำตาลก็จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการหายใจของผลไม้ ซึ่งเกิดขึ้นตลอดเวลาและเกิดขึ้นเร็วกว่าการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล ทำให้น้ำตาลในผลไม้มีปริมาณลดลงในระดับการสุกที่มากขึ้น (Medlicott และ Thompson, 1985) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า TSS มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Rungpichayapichet และคณะ (2015)

การเปลี่ยนแปลงค่า TSS ที่ตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกันในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน (ภาพที่ 32) เมื่อเปรียบเทียบกับค่า TSS ของแต่ละตำแหน่งบนผลมะม่วง พบว่า ที่ตำแหน่งแก้มมีค่า TSS น้อยสุด เนื่องจากมะม่วงมีการผลิตฮอร์โมนพืช (phytohormones) ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในของมะม่วง เช่น เอทิลีน จากส่วนของเมล็ดมายังผิวชั้นนอก ซึ่งบริเวณแก้มผลมีความหนาของผลมะม่วงมากที่สุด ทำให้อัตราเร็วกระบวนการแพร่ฮอร์โมนพืชเกิดขึ้นช้ากว่าบริเวณอื่น ส่งผลให้ค่า TSS ที่แก้มผลมีค่าน้อยกว่าตำแหน่งอื่น (Nordey และคณะ, 2014) จากผลการศึกษา กล่าวได้ว่า ตำแหน่งบนผลมะม่วงไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า TSS ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง



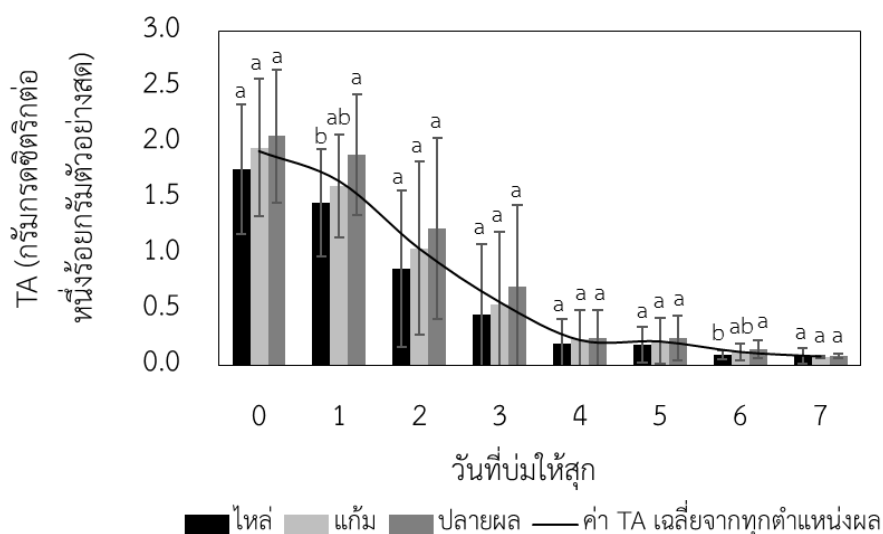
ภาพที่ 32 การเปลี่ยนแปลงค่า TSS ที่ตำแหน่งไลล์ แก้ม และปลายผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

4.2.4 ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้

เมื่อมะม่วงเข้าสู่กระบวนการสุกค่า TA ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่เฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลพบว่า ค่า TA เฉลี่ยลดลงจาก 1.93 เป็น 0.08 กรัมกรดซิตริกต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างสด ในระหว่างการบ่มให้สุก (ภาพที่ 33) เนื่องจากการเปลี่ยนกรดซิตริกเป็นน้ำตาล และถูกนำไปใช้ในการเป็นสารตั้งต้นในวัฏจักรเครบส์ โดยปริมาณกรดจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำตาล เมื่อมะม่วงเข้าสู่กระบวนการสุกปริมาณกรดจะลดลงและปริมาณน้ำตาลจะเพิ่มขึ้น (Baloch และ Bibi, 2012) ผลการศึกษาสอดคล้องกับ Rungpichayapichet และคณะ (2015)

การเปลี่ยนแปลงค่า TA ที่ตำแหน่งไลล์ แก้ม และปลายผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกันในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน พบค่า TA เฉลี่ยมากที่สุดที่ตำแหน่งปลายผล แก้ม และไลล์ ตามลำดับ เนื่องจากที่ตำแหน่งปลายผลมีระยะทางระหว่างเมล็ดถึงผิวชั้นนอกของมะม่วงน้อย ทำให้อัตราเร็วกระบวนการแพร่ฮอร์โมนพืชเกิดขึ้นเร็วกว่าบริเวณอื่น ส่งผลให้ค่า TA ที่ปลายผลมีค่าสูงกว่าตำแหน่งอื่น (Nordey และคณะ, 2014) ดังนั้น ตำแหน่งบนผลมะม่วงไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง TA ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

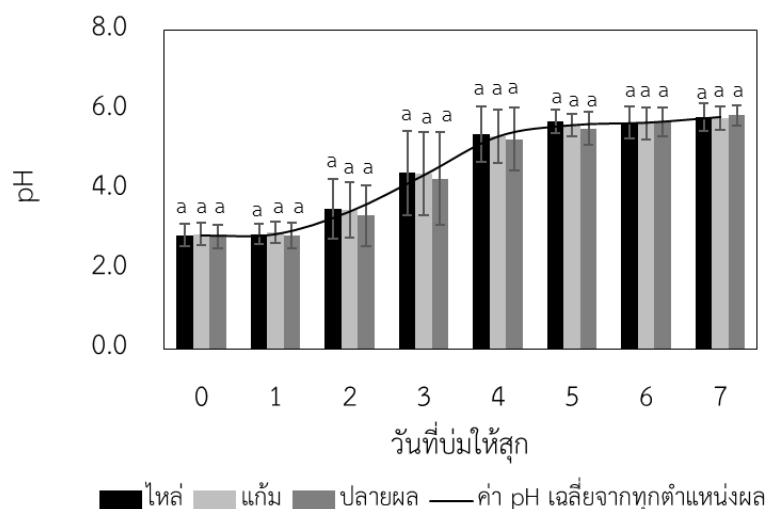


ภาพที่ 33 การเปลี่ยนแปลงค่า TA ที่ตำแหน่งโหล่ แก้ม และปลายผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก
 ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

4.2.5 ความเป็นกรดต่าง

จากปริมาณกรดซิทริกที่ลดลงส่งผลให้ค่า pH ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่เฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2.85 เป็น 5.83 ในระหว่างการบ่มให้สุก (ภาพที่ 34) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กันระหว่างค่า TA กับค่า pH เมื่อค่า TA ลดลงค่า pH จึงเพิ่มขึ้น

การเพิ่มขึ้นของค่า pH ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ตำแหน่งโหล่ แก้ม และปลายผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกันในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน โดยค่า pH เฉลี่ยมากที่สุดที่ตำแหน่งปลายผล แก้ม และโหล่ ตามลำดับ โดยตำแหน่งบนผลมะม่วงไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง pH ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง



ภาพที่ 34 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่ตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

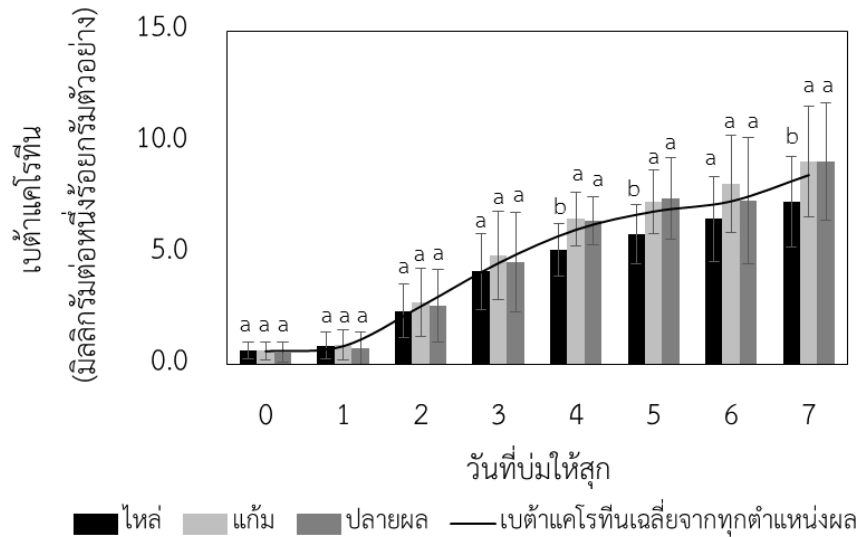
ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

4.2.6 ปริมาณเบต้าแคโรทีน

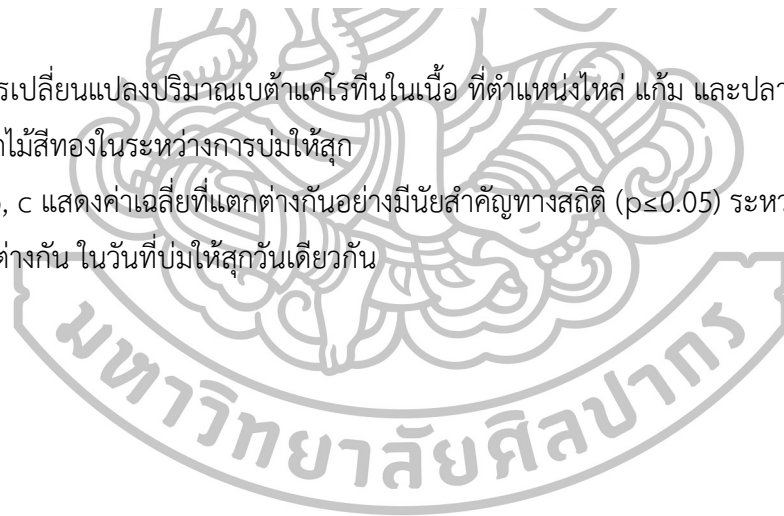
การเปลี่ยนแปลงปริมาณเบต้าแคโรทีนของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่เฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผล มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.60 เป็น 8.52 มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างแห้ง ในระหว่างการบ่มให้สุก (ภาพที่ 35) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Rungpichayapichet และคณะ (2015) รายงานว่า ปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการสุกมากขึ้น เนื่องจากในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุกมะม่วงมีการสร้างแคโรทีนอย์ในเนื้อเพิ่มขึ้น รวมไปถึงการสลายตัวของแป้งเป็นน้ำตาล การสูญเสียปริมาณกรด ซึ่งส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลและปริมาณเบต้าแคโรทีนเพิ่มขึ้น (Baloch และ Bibi, 2012)

การเปลี่ยนแปลงปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผล ในช่วงวันที่ 0 – 3 ของการบ่มให้สุก ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกันในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน แต่ในวันที่ 4, 5 และ 7 ของการบ่มให้สุก มีความแตกต่างของปริมาณเบต้าแคโรทีนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ของไหล่ผลกับตำแหน่งอื่นๆ บนผลมะม่วง แต่ที่ตำแหน่งแก้มกับปลายผลไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกันในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน โดยที่บริเวณแก้มผลมีปริมาณเบต้าแคโรทีนเฉลี่ยมากที่สุด และพบปริมาณเบต้าแคโรทีนน้อยที่ตำแหน่งไหล่ผล จากค่าสีเนื้อของ

มะม่วง ในระหว่างวันที่ 4 - 7 ของการบ่มมะม่วงให้สุกมีการเปลี่ยนแปลงค่า a^* b^* และ C ที่ตำแหน่งไหลผลและแก้วผลของเนื้อมะม่วงที่สอดคล้องกันกับปริมาณเบต้าแคโรทีน



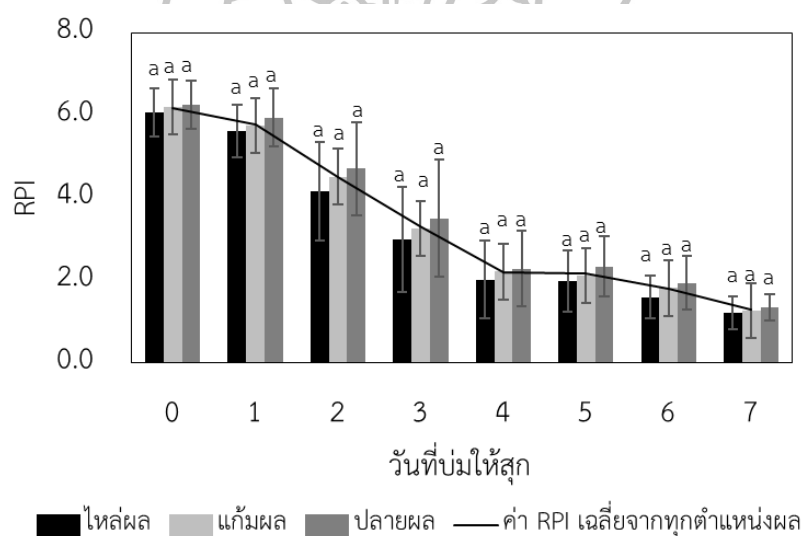
ภาพที่ 35 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเบต้าแคโรทีนในเนื้อ ที่ตำแหน่งไหล แก้ว และปลายผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน



4.2.7 ดัชนีการสุก

ค่า RPI มีความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นเนื้อกับ TSS/TA (Mahayothee และคณะ, 2007) โดยในมะม่วงดิบจะมีค่า RPI มาก และมะม่วงดิบจะมีค่า RPI น้อย จากการศึกษพบว่า เมื่อมะม่วงเข้าสู่กระบวนการสุกค่า RPI เฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลมีค่าลดลง -78.9% (ภาพที่ 36) เนื่องจากความแน่นเนื้อและค่า TA ของมะม่วงมีค่าลดลงแต่มีค่า TSS ที่เพิ่มขึ้น (สมการที่ 4)

เมื่อเปรียบเทียบค่า RPI ของแต่ละตำแหน่งบนผลมะม่วง พบว่า ค่า RPI ที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกันในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน โดยค่า RPI มีค่าน้อยสุดที่ตำแหน่งไหล่ผล และมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งปลายผล แสดงให้เห็นว่า มะม่วงมีการเปลี่ยนแปลงการสุกจากตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผล ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม จากผลการศึกษากล่าวได้ว่า ตำแหน่งบนผลมะม่วงไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง RPI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง



ภาพที่ 36 การเปลี่ยนแปลงค่า RPI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ระหว่างตำแหน่งผลมะม่วงที่แตกต่างกัน ในวันที่บ่มให้สุกวันเดียวกัน

4.3 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างกระบวนการสุกด้วยวิธีหสัมพันธ์ของเพียร์สัน

ค่าสหสัมพันธ์ของเพียร์สันเป็นแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ได้แก่ ความแน่นเนื้อ ค่าสีเปลือกและสีเนื้อ (L^* , a^* , b^* , h° และ C), TSS, TA, pH, RPI และปริมาณเบต้าแคโรทีน แสดงดังตารางที่ 6 ค่า RPI เป็นลักษณะคุณภาพที่มีความสำคัญในการแบ่งระดับการสุกของมะม่วง โดยค่า RPI สามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ของค่าความแน่นเนื้อ TSS และ TA แต่จากการทดลองนี้ยังพบว่า ค่า RPI มีความสัมพันธ์กับลักษณะคุณภาพด้านอื่นๆ ได้แก่ ค่า L^* , b^* , h° และ C ของเปลือกและเนื้อมะม่วง ค่า pH และปริมาณเบต้าแคโรทีน ดังนั้น ค่า RPI จึงสามารถใช้เป็นดัชนีในการบ่งชี้ระดับการสุกของมะม่วงได้ นอกจากนี้ยังพบว่า ลักษณะคุณภาพด้านความแน่นเนื้อมีความสัมพันธ์กับค่า TSS, L^* , h° และ C ของเนื้อมะม่วง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Cortes และคณะ (2016) ที่ได้กล่าวว่า ในการศึกษาลักษณะคุณภาพที่ใช้บ่งชี้ระดับการสุกของมะม่วงได้อาศัยความสัมพันธ์ของลักษณะคุณภาพด้านความแน่นเนื้อ TSS, L^* , h° และ C ของเนื้อมะม่วงในการตรวจวัดคุณภาพ จะเห็นได้ว่าในการสุกของมะม่วงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพไปพร้อมกัน ดังนั้น ดัชนีที่ใช้ในการบ่งชี้ระดับการสุกของมะม่วงจึงต้องมาจากลักษณะคุณภาพในหลายด้าน



ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างกระบวนการสุกด้วยวิธีหสัมพันธ์ของเพียร์สัน

	RPI	TSS	F	TA	pH	L* เปลือก	a* เปลือก	b* เปลือก	h° เปลือก	C* เปลือก	L* เนื้อ	a* เนื้อ	b* เนื้อ	h° เนื้อ	C* เนื้อ	เบต้า แคโรทีน
RPI	1															
TSS	-0.734**	1														
F	0.929**	-0.736**	1													
TA	0.945**	-0.763**	0.879**	1												
pH	-0.957**	0.695**	-0.893**	-0.902**	1											
L* เปลือก	0.845**	-0.611**	0.809**	0.783**	-0.871**	1										
a* เปลือก	-0.002	0.088	-0.005	-0.126	-0.064	0.064	1									
b* เปลือก	-0.696**	0.673**	-0.678**	-0.714**	0.760**	-0.638**	-0.056	1								
h° เปลือก	0.872**	-0.734**	0.829**	0.826**	-0.878**	0.751**	-0.082	-0.677**	1							
C* เปลือก	-0.772**	0.693**	-0.755**	-0.784**	0.819**	-0.681**	-0.030	0.899**	-0.743**	1						
L* เนื้อ	0.830**	-0.607**	0.802**	0.808**	-0.787**	0.723**	-0.006	-0.519**	0.737**	-0.594**	1					
a* เนื้อ	0.061	0.273**	-0.019	-0.107	-0.144	0.077	0.419**	0.030	-0.048	-0.035	-0.146	1				
b* เนื้อ	-0.893**	0.813**	-0.860**	0.926**	0.883**	-0.765**	0.089	0.699**	-0.808**	0.761**	-0.824**	0.186*	1			
h° เนื้อ	0.907**	-0.785**	0.870**	0.911**	-0.905**	0.805**	-0.082	-0.713**	0.835**	-0.786**	0.774**	0.121	-0.882**	1		
C* เนื้อ	-0.897**	0.798**	-0.864**	-0.919**	0.891**	-0.770**	0.031	0.713**	-0.812**	0.765**	-0.820**	0.151	0.971**	-0.869**	1	
เบต้า- แคโรทีน	-0.890**	0.620**	-0.879**	-0.810**	0.900**	-0.814**	-0.039	0.728**	-0.854**	0.786**	-0.805**	-0.306**	0.821**	-0.859**	0.855**	1

* มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)

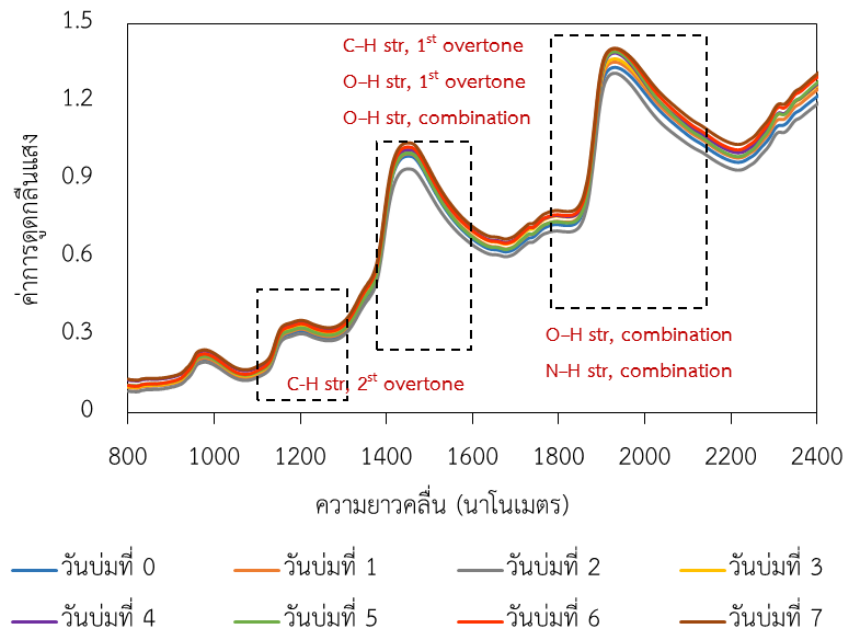
** มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ($p \leq 0.01$)

4.4 อิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อการใช้เทคนิค NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

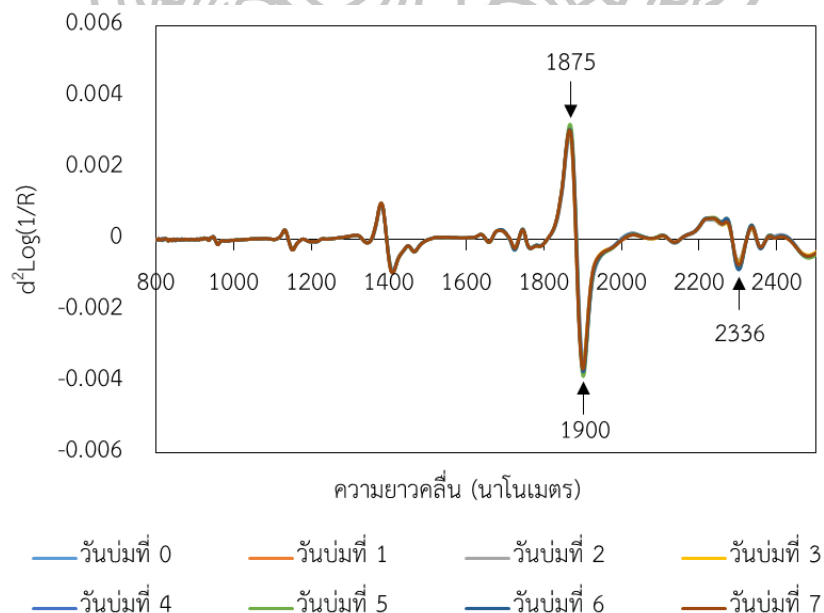
4.4.1 สเปกตรัม NIRS

ตัวอย่างข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลมะม่วงที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค NIRS ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังภาพที่ 37 พบว่า เส้นสเปกตรัมที่ได้จากวันบ่มที่ 0 - 7 มีลักษณะการดูดกลืนแสงที่คล้ายคลึงกัน โดยเส้นสเปกตรัมมีการดูดกลืนแสงที่ซ้อนทับกัน (overlapping) ทำให้เกิดพีกขนาดใหญ่ที่ครอบคลุมช่วงกว้าง (board band) ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 900 - 1050 นาโนเมตร ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นการดูดกลืนแสงของพันธะ O-H ภายในโมเลกุลของน้ำ และยังพบการดูดกลืนแสงของพันธะ C-H และ O-H ภายในโมเลกุลในช่วง 1100 - 1300, 1400 - 1600 และ 1900 - 2200 นาโนเมตร (Rungpichayapichet และคณะ, 2015) ซึ่งจะมีการสั่นแบบโอเวอร์โทนอันดับที่ 2 ของพันธะ C-H ในช่วงความยาวคลื่น 1100 - 1300 นาโนเมตร และเกิดโอเวอร์โทนอันดับที่ 1 ของพันธะ C-H, O-H และเกิดการสั่นแบบคอมบิเนชันของพันธะ O-H ภายในโมเลกุล ในช่วงความยาวคลื่น 1400 - 1600 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังเกิดการสั่นแบบคอมบิเนชันของพันธะ C-H, O-H ภายในโมเลกุล ในช่วงความยาวคลื่น 1900 - 2200 นาโนเมตร

เนื่องจากมะม่วงเป็นผลไม้ที่มีปริมาณน้ำสูง ทำให้พีกของน้ำอาจเกิดการซ้อนทับพีกที่เป็นองค์ประกอบสำคัญต่อการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองได้ ดังนั้นก่อนนำเส้นสเปกตรัมไปหาความสัมพันธ์กับค่าทางกายภาพและเคมีจะต้องมีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมด้วยวิธีต่างๆ ภาพที่ 38 แสดงตัวอย่างเส้นสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลมะม่วงที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสอง (D_2) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งสามารถแยกพีกที่ซ้อนทับกันออกมาได้ชัดเจนขึ้น เช่น ที่ความยาวคลื่น 1875 และ 1900 นาโนเมตร เกิดการสั่นแบบโอเวอร์โทนอันดับที่ 2 ของพันธะ C=O ภายในโมเลกุล และที่ความยาวคลื่น 2336 นาโนเมตร เกิดการสั่นแบบคอมบิเนชันของพันธะ C-H ภายในโมเลกุล ที่แสดงคุณสมบัติของโครงสร้างเซลลูโลส (Osborne และคณะ, 1993; Marques และคณะ, 2016 และ Sirisomboon และ Nawayon, 2016)

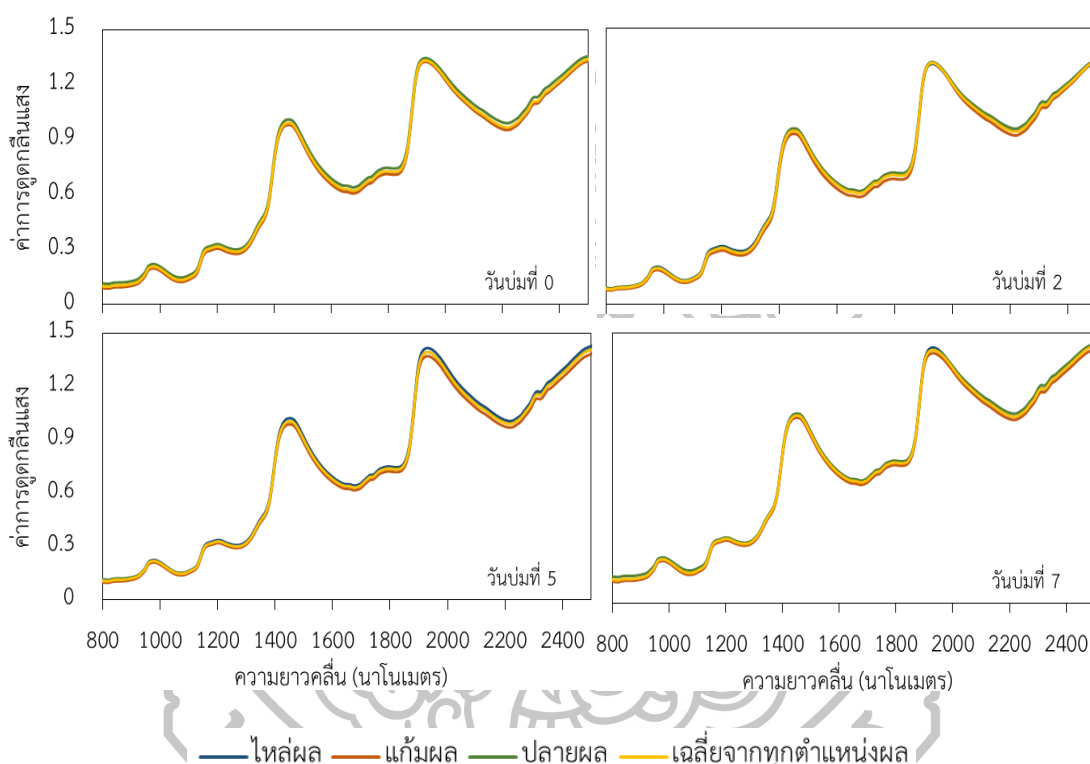


ภาพที่ 37 เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลมะม่วงที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค NIRS ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้อง (29.7 ± 0.7 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ $66.3 \pm 4.4\%$)



ภาพที่ 38 เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลมะม่วงที่ได้จากเทคนิค NIRS และปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสอง (D_2) ของมะม่วงในระหว่างการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้อง (29.7 ± 0.7 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ $66.3 \pm 4.4\%$)

ตัวอย่างข้อมูลสเปกตรัมที่ตำแหน่งไหล่ ไก้ม และเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลของมะม่วง น้ำดอกไม้สีใน วันบ่มที่ 0, 2, 5 และ 7 ที่อุณหภูมิต้อง แสดงดังภาพที่ 39 พบว่า เส้นสเปกตรัมที่ ตำแหน่งไหล่ ไก้ม ปลายผลและเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผล มีลักษณะการดูดกลืนแสงและตำแหน่งของ การเกิดพีคที่คล้ายกันของวันบ่มที่ 0, 2, 5 และ 7 ดังนั้น ตำแหน่งบนผลมะม่วงไม่มีอิทธิพลต่อการวัด สเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS



ภาพที่ 39 เส้นสเปกตรัมที่ตำแหน่งไหล่ผล ไก้มผล ปลายผล และเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลของมะม่วง ที่ได้จากเทคนิค NIRS ใน วันบ่มที่ 0, 2, 5 และ 7 ที่อุณหภูมิต้อง (29.7±0.7 องศาเซลเซียส และ ความชื้นสัมพัทธ์ 66.3±4.4%)

4.4.2 การทำนายค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค NIRS

การสร้างสมการทำนายค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองทั้งหมด 188 ผล แบ่งมะม่วงออกเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการ (cal) ต่อกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบสมการ (val) ในอัตราส่วน 60 ต่อ 40 ความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ใช้การสร้างสมการเทียบมาตรฐานมีค่าอยู่ในช่วง 5.49 - 30.08 นิวตัน และใช้ทดสอบสมการมีค่าอยู่ในช่วง 6.23 - 29.35 นิวตัน (ตารางที่ 7) ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานจะต้องมีค่าสูง-ต่ำสุด เพื่อให้ครอบคลุมค่าความแน่นเนื้อของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ

โดยสมการทำนายค่าความแน่นเนื้อสร้างมาจากการ optimize ข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยของตำแหน่งแก้มผลที่ปรับแต่งด้วยวิธี D_1 ร่วมกับ MSC (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด) ในช่วงความยาวคลื่น 1332 - 2174 นาโนเมตร กับค่าความแน่นเนื้อที่วัดด้วยเครื่องวัดทางประสาทสัมผัส พบว่า สมการที่ได้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.86 มีค่า SEP เท่ากับ 2.53 นิวตัน และมีค่า RPD เท่ากับ 2.70 (ตารางที่ 8) โดยค่า R^2 ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.82 - 0.90 หมายถึง สมการสามารถนำไปใช้ในการทำนายเพื่อการวิจัย และงานทั่วไป (William, 2007) สมการมีค่า RPD อยู่ในช่วง 2.5 - 3.0 หรือมีค่ามากกว่า 3.0 บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำนายที่ดีมากของสมการ (Nicolai และคณะ, 2007) ซึ่งการทดลองสอดคล้องกับ Schmilovitch และคณะ, (2000) ได้วิเคราะห์ความแน่นเนื้อด้วยเทคนิค NIRS ในมะม่วงพันธุ์ Tommy Atkins ทำการวัดสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1200 - 2400 นาโนเมตร ระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ สมการที่ได้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.8226 และมีค่า SEP เท่ากับ 17.14 นิวตัน นอกจากนี้ Marques และคณะ (2016) พบว่า การวัดความแน่นเนื้อด้วยเทคนิค NIRS ในช่วงความยาวคลื่น 950 - 1650 นาโนเมตร ระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ สมการที่ดีที่สุดมีค่า R^2 เท่ากับ 0.72 และมีค่า RMSEP เท่ากับ 12.2 นิวตัน

ภาพที่ 40 แสดงสัมประสิทธิ์การถดถอยแสดงความยาวคลื่นที่สำคัญ และใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานของค่าความแน่นเนื้อ โดยความยาวคลื่นในช่วง 1123 - 1851 นาโนเมตร มีความสัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงของน้ำ เพคติน คาร์โบไฮเดรต และโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์และผนังเซลล์ ซึ่งองค์ประกอบคาร์โบไฮเดรตเหล่านี้สามารถตรวจพบได้ในช่วงความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (Louw และ Theron, 2010 และ Rungpichayapichet และคณะ, 2015) นอกจากนี้ยังพบความยาวคลื่นของน้ำ (1450 และ 1950 นาโนเมตร) เบต้าแคโรทีน (1770 นาโนเมตร) และเซลลูโลส (1820 นาโนเมตร) เป็นต้น (Osborne และคณะ, 1993 และ Marques และคณะ, 2016) สำหรับภาพที่ 41 แสดงภาพการกระจายตัวของค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการวัดด้วยวิธีมาตรฐานกับการวิเคราะห์ด้วย NIRS ข้อมูลของทั้ง 2 ชุดการ

ทดลองมีการกระจายตัวเข้าใกล้เส้นเป้าหมาย (target line) บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำนายที่แม่นยำ

ตารางที่ 7 ค่าทางสถิติของความแน่นเนื้อ (นิวตัน) ที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

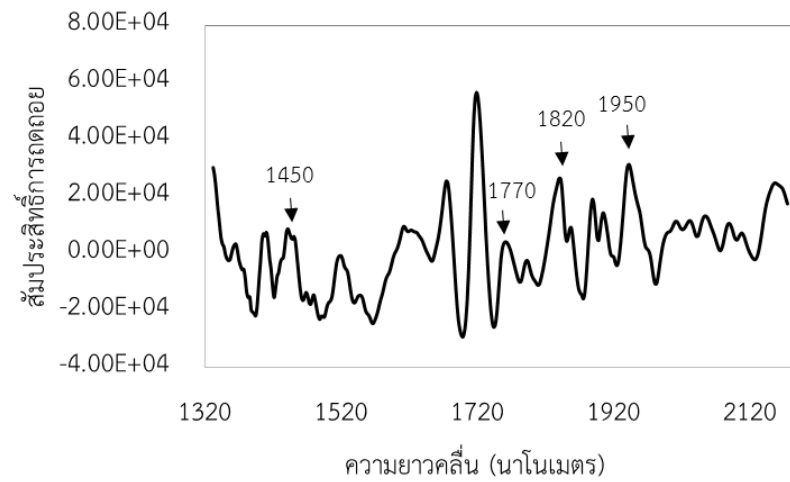
ลักษณะคุณภาพ	ตำแหน่งผล		สมการเทียบมาตรฐาน (60%)	สมการทวนสอบ (40%)
ความแน่นเนื้อ (นิวตัน)	แก้ม	จำนวนตัวอย่าง	114	74
		ค่าต่ำสุด	5.49	6.23
		ค่าสูงสุด	30.08	29.35
		ค่าเฉลี่ย	14.65	14.18
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.33	6.84

ตารางที่ 8 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม ความยาวคลื่น และค่าทางสถิติของความแน่นเนื้อที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

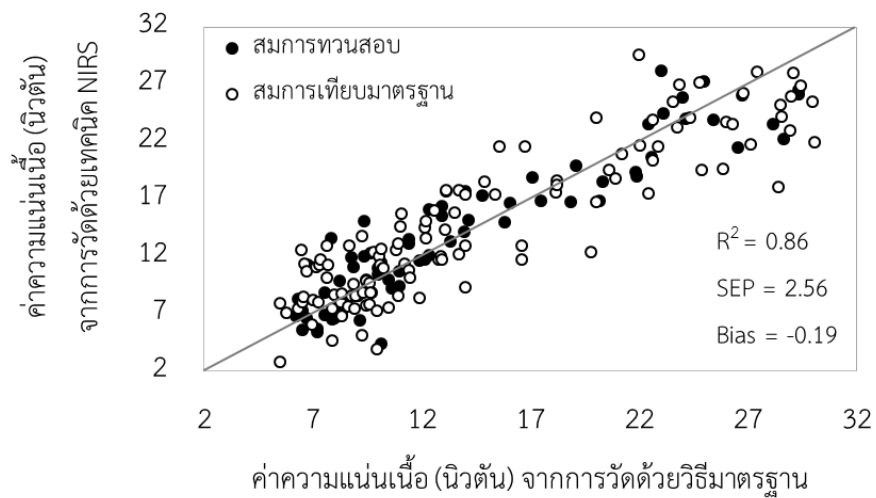
ตำแหน่งผล	ปรับแต่งสเปกตรัม	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
				R ²	SEC*	R ²	SEP*	Bias*	
แก้ม	D ₁ +MSC(17)	1332 - 2174	9	0.80	3.43	0.86	2.53	-0.19	2.70

LV: latent variable, R²: coefficients of determination, SEC: standard error of calibration, SEP: standard error of prediction, RPD: ratio of standard error of performance to standard to deviation, D₁: first derivative, MSC: multiplicative scatter correction, (17): number of left and right average point

* นิวตัน



ภาพที่ 40 สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่าความชื้นเนื้อที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D_1 ร่วมกับ MSC (ปรับรูปแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NIRS



ภาพที่ 41 การกระจายตัวของค่าความชื้นเนื้อที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS

4.4.3 การทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และความเป็นกรดต่างของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค NIRS

การสร้างสมการทำนายค่า TSS, TA และ pH ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองทั้งหมด 188 ผล แบ่งมะม่วงออกเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการทำนายค่าต่อกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทวนสอบสมการในอัตราส่วน 60 ต่อ 40 โดยมีรายละเอียดค่าทางสถิติที่ใช้ในการสร้างสมการแสดงดังตารางที่ 9

การศึกษาการใช้เทคนิค NIRS ในการทำนายค่า TSS ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล ปลายผล และเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผล พบว่า SEP เท่ากับ การสร้างสมการทำนายค่า TSS จากตำแหน่งแก้มผลมีความแม่นยำน้อยที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.8 และมีค่า SEP เท่ากับ 1.5 องศาบริกซ์ แต่อย่างไรก็ตาม R^2 ในช่วง 0.65 – 0.81 มีประสิทธิภาพในการนำไปใช้คัดเลือกหรือประมาณค่าเบื้องต้นได้ (William, 2007) โดยสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับการทำนายค่า TSS จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมกับค่าทางเคมีเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลมีความแม่นยำมากที่สุด โดยสมการเทียบมาตรฐานที่ได้ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D_1 ร่วมกับ SNV (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด) สร้างสมการในช่วงความยาวคลื่น 1063 - 1333 และ 1638 - 1836 นาโนเมตร ซึ่งสมการเทียบมาตรฐานมีค่า R^2 , SEP และ bias เท่ากับ 0.9, 1.1 องศา-บริกซ์ และ 0.1 องศาบริกซ์ โดยสมการที่มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.82 – 0.90 แสดงถึงการมีประสิทธิภาพในการใช้ตรวจสอบคุณภาพได้ (William, 2007) และมีค่า RPD เท่ากับ 2.9 (ตารางที่ 10) บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำนายที่มีความแม่นยำสูง (Nicolai และคณะ, 2007) โดยสมการที่ได้จากตำแหน่งการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลมีค่าแม่นยำมากที่สุด เนื่องจากการเฉลี่ยข้อมูลสเปกตรัมและค่าทางเคมีช่วยลดค่าความผิดพลาดของข้อมูลจากการวัดในแต่ละตำแหน่งบนผล และจากภาพที่ 42 จะเห็นได้ว่าสมการทำนายค่าที่ได้จากตำแหน่งการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลมีความแม่นยำในการทำนาย ซึ่งเห็นได้จากการเกาะกลุ่มกันของข้อมูลและมีค่าเข้าใกล้เส้นเป้าหมายมากกว่าสมการทำนายค่าที่ได้จากตำแหน่งอื่น (ภาพที่ 43 - 45) ในขณะที่สมการทำนายค่าที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลมีความแม่นยำน้อยที่สุด เนื่องจากค่า TSS ที่ตำแหน่งแก้มผลมีค่าต่ำและมีช่วงการกระจายตัวของข้อมูลกว่าตำแหน่งผลอื่นๆ การศึกษาซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khuriyati และคณะ (2004) ที่ได้ศึกษาความแม่นยำของตำแหน่งการวัดสเปกตรัมรอบผลมะเขือเทศทั้งหมด 6 ตำแหน่ง แล้วเปรียบเทียบความแม่นยำของการสร้างสมการทำนายระหว่าง สมการที่ได้จากแต่ละตำแหน่งทั้งหมด 6 ตำแหน่ง กับสมการที่ได้จากสเปกตรัมเฉลี่ย 2, 3 และ 6 ตำแหน่ง พบว่าสมการที่ได้จากการเฉลี่ยเส้นสเปกตรัมทั้งหมดมีความแม่นยำในการสร้างสมการทำนาย

ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากสมการทวนสอบของค่า TSS จากตำแหน่งการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผล แสดงดังภาพที่ 46 โดยความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์แบ่งออกเป็น 2 ช่วงความ

ยาวคลื่น คือ ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 1063 - 1333 นาโนเมตร โดยความยาวคลื่นในช่วงนี้มีค่าการดูดกลืนของน้ำตาลที่สำคัญเท่ากับ 1190 นาโนเมตร ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเกิดโอเวอร์โทนอันดับที่ 3 ของการสั่นภายในโมเลกุล C-H (Louw และ Theron, 2010) และในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 1100 - 1250 นาเมตร (Cortés และคณะ, 2016) และในช่วงที่ 2 มีความยาวคลื่นระหว่าง 1638 - 1836 นาโนเมตร ในช่วงความยาวคลื่นนี้มีค่าการดูดกลืนที่สำคัญได้แก่ 1718 และ 1790 นาโนเมตร ซึ่งมีความสัมพันธ์กับน้ำตาล (Oliveira และคณะ, 2014)



ตารางที่ 9 ค่าทางสถิติของค่า TSS, TA และ pH ที่ใช้การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

ลักษณะคุณภาพ	ตำแหน่ง ผล	กลุ่ม ตัวอย่าง	จำนวน ตัวอย่าง	ต่ำสุด - สูงสุด	ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
TSS (องศาบริกซ์)	ไหล่	cal	114	6.5 - 20.7	15.1 \pm 3.3	
		val	74	8.1 - 20.3	15.0 \pm 3.2	
	แก้ม	cal	114	7.6 - 20.4	14.4 \pm 3.2	
		val	74	8.1 - 19.4	14.4 \pm 3.0	
	ปลายผล	cal	114	6.9 - 21.9	14.7 \pm 3.7	
		val	74	7.7 - 20.4	14.7 \pm 3.4	
	เฉลี่ยทั้งผล	cal	114	6.5 - 20.7	15.1 \pm 3.3	
		val	74	8.1 - 20.3	14.9 \pm 3.1	
	TA (กรัมกรดซิตริกต่อ หนึ่งร้อยกรัม ตัวอย่างสด)	ไหล่	cal	114	0.04 - 2.73	0.66 \pm 0.77
			val	74	0.05 - 2.54	0.65 \pm 0.74
แก้ม		cal	114	0.04 - 3.03	0.74 \pm 0.84	
		val	74	0.05 - 2.86	0.72 \pm 0.79	
ปลายผล		cal	114	0.06 - 3.56	0.85 \pm 0.92	
		val	74	0.06 - 2.77	0.83 \pm 0.88	
เฉลี่ยทั้งผล		cal	114	0.05 - 3.10	0.76 \pm 0.84	
		val	74	0.06 - 2.45	0.68 \pm 0.75	
pH		ไหล่	cal	114	2.48 - 6.51	4.51 \pm 1.35
			val	74	2.55 - 6.24	4.54 \pm 1.32
	แก้ม	cal	114	2.48 - 6.28	4.49 \pm 1.31	
		val	74	2.58 - 6.13	4.50 \pm 1.30	
	ปลายผล	cal	114	2.41 - 6.36	4.43 \pm 1.37	
		val	74	2.49 - 6.17	4.45 \pm 1.36	
	เฉลี่ยทั้งผล	cal	114	2.46 - 6.30	4.47 \pm 1.34	
		val	74	2.53 - 6.14	4.47 \pm 1.32	

ตารางที่ 10 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม ความยาวคลื่น และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

ลักษณะคุณภาพ	ตำแหน่งผล	ปรับแต่ง สเปกตรัม	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
					R ²	SEC*	R ²	SEP*	Bias*	
TSS (องศาบริกซ์)	ไหล่	SNV	1063 - 1333 1638 - 1836	10	0.9	1.1	0.8	1.3	-0.0	2.5
	แก้ม	D ₁ (17)	1332 - 2174	9	0.8	1.5	0.8	1.5	0.3	2.1
	ปลายผล	D ₁ +SNV(17)	1063 - 1333 1638 - 1733	6	0.9	1.4	0.9	1.3	0.1	2.7
	เฉลี่ยทั้งผล	D ₁ +SNV(17)	1063 - 1333 1638 - 1836	8	0.9	1.3	0.9	1.1	0.1	2.9
TA (กรัมกรดซิตริก ต่อหนึ่งร้อยกรัม ตัวอย่างสด)	ไหล่	D ₂ (17)	1063 - 1183 1638 - 1836 2171 - 2356	6	0.80	0.34	0.80	0.33	-0.04	2.27
	แก้ม	D ₂ (17)	1332 - 1836 2171 - 2262	5	0.81	0.36	0.77	0.38	-0.06	2.10
	ปลายผล	D ₁ (17)	1063 - 2174	9	0.86	0.34	0.82	0.37	-0.00	2.37
	เฉลี่ยทั้งผล	D ₂ (17)	1063 - 1183 1638 - 2174	7	0.88	0.29	0.84	0.29	-0.04	2.54

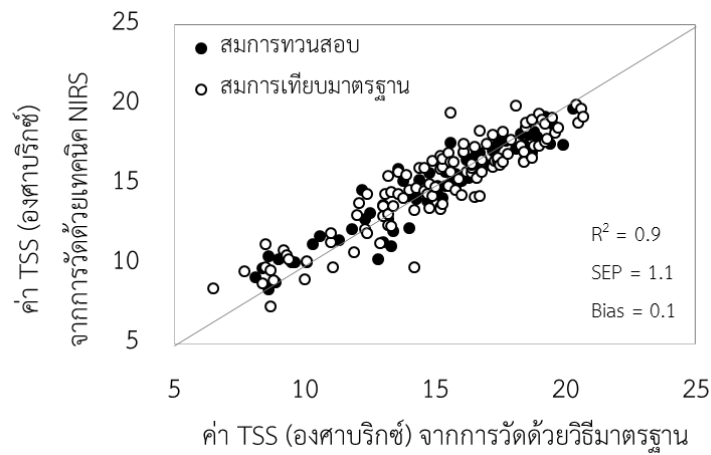
ลักษณะ คุณภาพ	ตำแหน่งผล	ปรับแต่ง สเปกตรัม	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
					R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
pH	ไหล่	D ₂ (17)	1063 – 2174	6	0.85	0.53	0.86	0.49	0.07	2.74
	แก้ม	D ₁ (17)	1063 - 1836	10	0.89	0.43	0.85	0.50	-0.07	2.64
	ปลายผล	D ₁ (17)	1063 - 1836	10	0.89	0.45	0.90	0.42	-0.10	3.11
	เฉลี่ยทั้งผล	D ₂ (17)	1063 – 1333 1638 - 1836	8	0.93	0.35	0.88	0.45	-0.01	2.93

LV: latent variable, R²: coefficients of determination, SEC: standard error of calibration, SEP: standard error of prediction, RPD: ratio of standard error of performance to standard to deviation, D₁: first derivative, D₂: second derivative, SNV: standard normal variate, (17): number of left and right average point

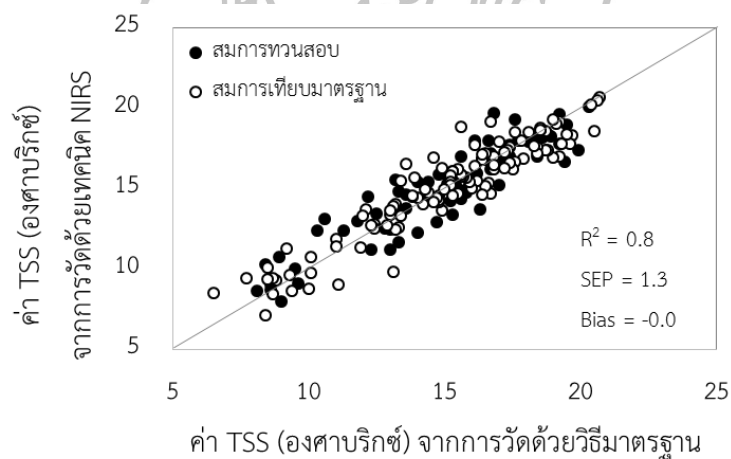
* TSS หน่วย องศาบริกซ์

* TA หน่วย กรัมกรดซิดริกต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างสด

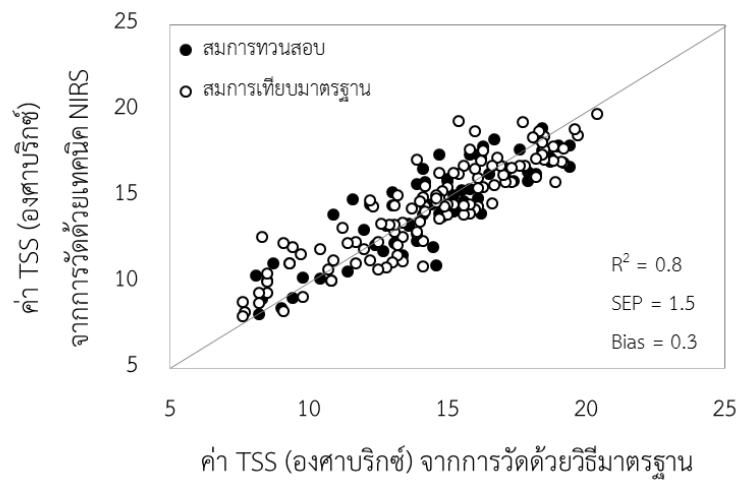




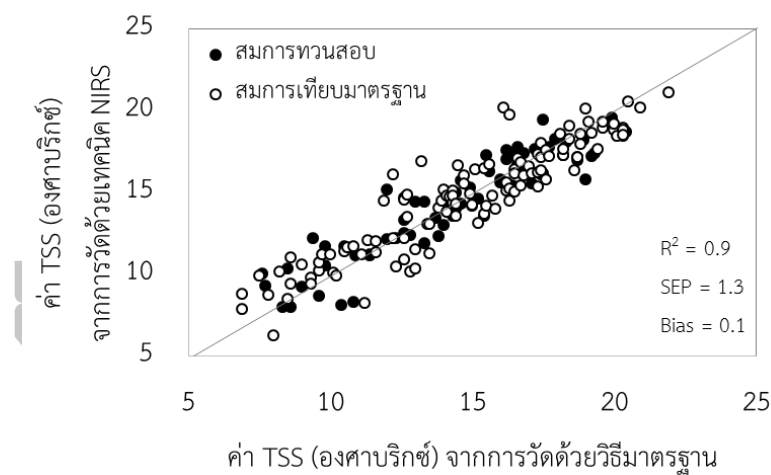
ภาพที่ 42 การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งหมดด้วยเทคนิค NIRS



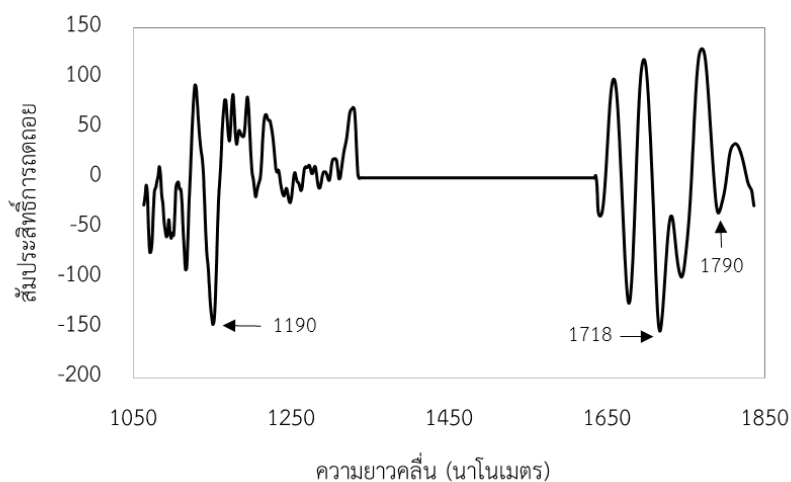
ภาพที่ 43 การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค NIRS



ภาพที่ 44 การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค NIRS



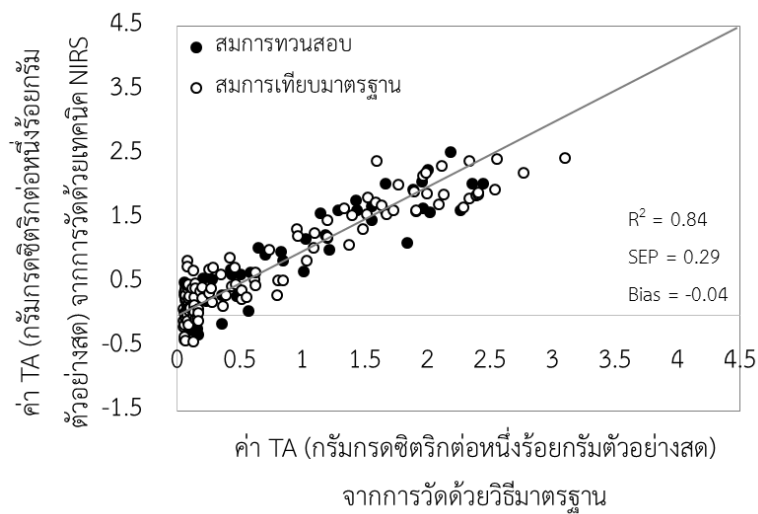
ภาพที่ 45 การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค NIRS



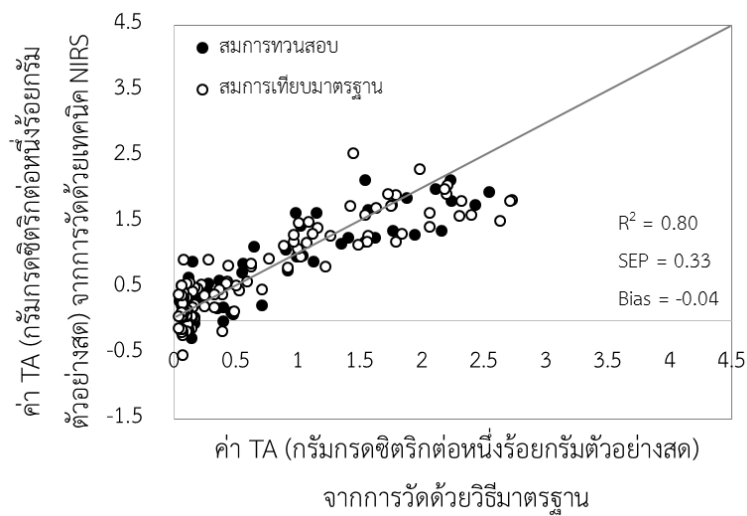
ภาพที่ 46 สัมประสิทธิ์การถดถอยค่า TSS ที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งหมดด้วยเทคนิค NIRS ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D_1 ร่วมกับ SNV (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด)

การศึกษการใช้เทคนิค NIRS ในการทำนายค่า TA ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ตำแหน่งไหลผล แก้มผล ปลายผล และเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผล พบว่า การสร้างสมการทำนายค่าจากข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งหมดมีความแม่นยำมากที่สุด โดยมีค่า R^2 สูงเท่ากับ 0.84 มีค่า SEP และ bias ต่ำเท่ากับ 0.29 กรัมกรดซิตริกต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างสด และ -0.04 กรัมกรดซิตริกต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างสด และมีค่า RPD เท่ากับ 2.54 (ตารางที่ 10) สมการทำนายค่าที่ได้ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D_2 (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด) สร้างสมการในช่วงความยาวคลื่น 1063 - 1183 และ 1638 - 2174 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบภาพการกระจายตัวของค่า TA ที่ได้จากสมการทำนายค่าในแต่ละตำแหน่งบนผลมะม่วง (ภาพที่ 47 - 50) เห็นได้ว่า การกระจายตัวของสมการทำนายค่าที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งหมดมีค่าเข้าใกล้เส้นเป้าหมาย ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการทำนายค่า TA ที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง และการสร้างสมการจากตำแหน่งการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งหมดให้ค่าที่มีความแม่นยำ เนื่องจากการเฉลี่ยข้อมูลสเปกตรัมและค่าทางเคมีช่วยลดค่าความผิดพลาดของข้อมูลจากการวัดในแต่ละตำแหน่งบนผล

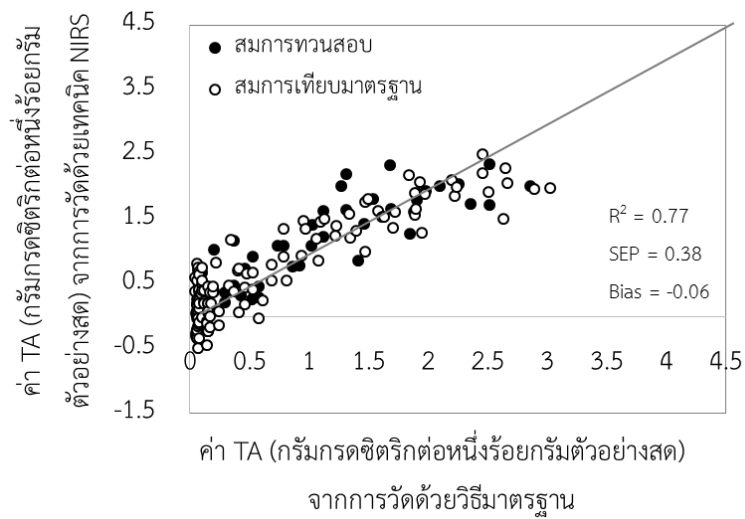
ซึ่งความยาวคลื่นช่วง 1063 - 1183 และ 1638 - 2174 นาโนเมตร มีความสัมพันธ์กับค่า TA แสดงดังภาพที่ 51 โดยปกติกรดอินทรีย์จะมีความสัมพันธ์กับการเกิดโอเวอร์โทนอันดับที่ 1, 2 และ 3 ของการสั่นภายในโมเลกุล O-H ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 800, 1000 และ 1445 นาโนเมตร แต่ความยาวคลื่นเหล่านี้ยังมีการซ้อนทับกันกับค่าการดูดกลืนของน้ำ นอกจากนี้การสั่นภายในโมเลกุล O-H ร่วมกับ C=O มีความสัมพันธ์กับกรดอินทรีย์ที่ความยาวคลื่น 1890 นาโนเมตรด้วย (Marques และคณะ, 2016)



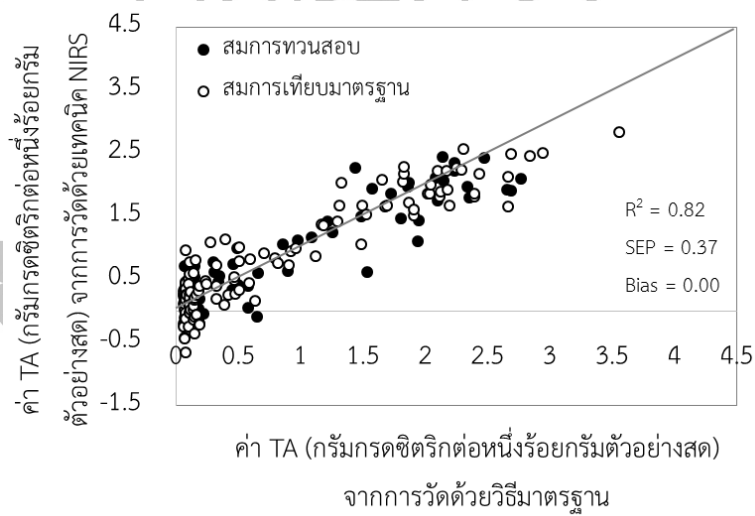
ภาพที่ 47 การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วยเทคนิค NIRS



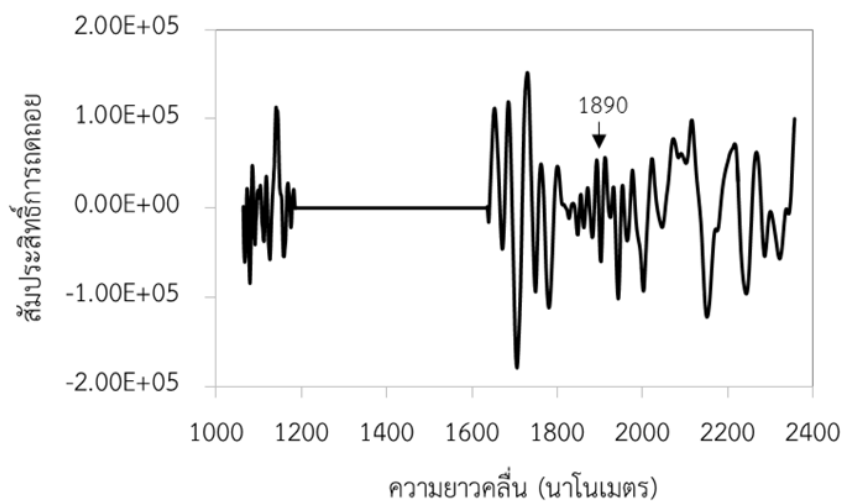
ภาพที่ 48 การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค NIRS



ภาพที่ 49 การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค NIRS



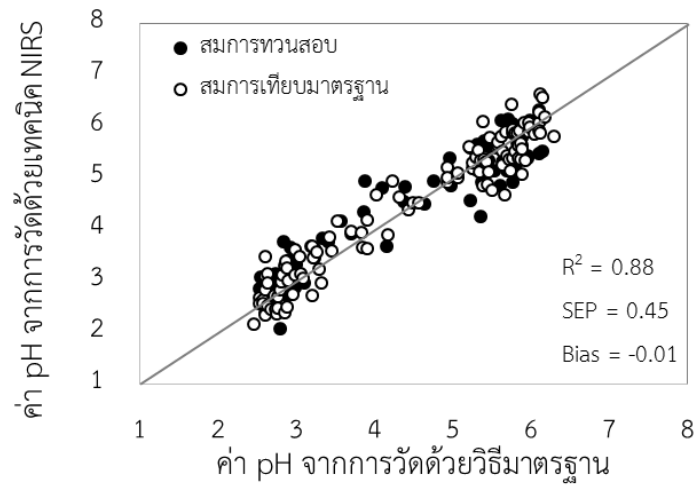
ภาพที่ 50 การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค NIRS



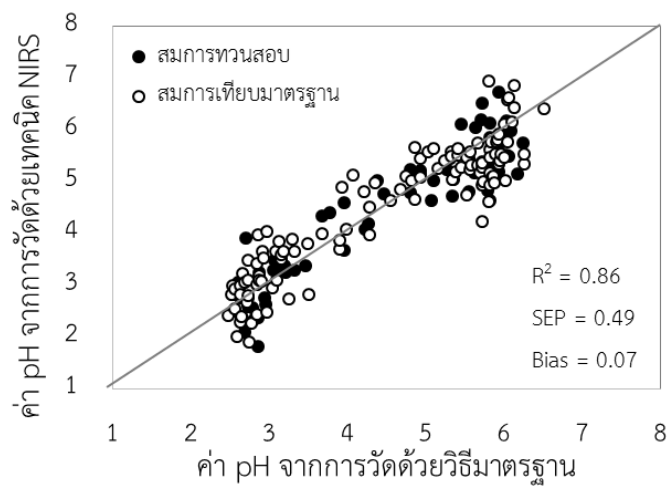
ภาพที่ 51 สัมประสิทธิ์การถดถอยจากสมการทวนสอบค่า TA ที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งหมด ด้วยเทคนิค NIRS ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D_2 (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด)

การศึกษาการใช้เทคนิค NIRS ในการทำนายค่า pH ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ตำแหน่ง ใหล่ผล แก้มผล ปลายผล และเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผล พบว่า การสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับการทำนายค่า pH มีความแม่นยำในทุกตำแหน่งผล (ใหล่ผล แก้มผล ปลายผล และเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผล) แต่สมการที่มีความแม่นยำที่สุดได้จากการสร้างสมการทำนายค่าที่ตำแหน่งปลายผล จะเห็นได้จากการกระจายตัวของค่า pH ที่ตำแหน่งปลายผลมีค่าเข้าใกล้เส้นเป้าหมาย ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการทำนายค่า pH ที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง และมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอของข้อมูล (ภาพที่ 52-55) โดยมีค่า R^2 สูงเท่ากับ 0.90 มีค่า SEP และ bias เท่ากับ 0.42 และ -0.10 และมีค่า RPD เท่ากับ 3.11 หากสมการทำนายค่าที่ได้มีค่า RPD มากกว่า 3 บ่งบอกถึงความสามารถของสมการในการทำนายค่าได้อย่างดีเยี่ยม ตารางที่ 10 (Nicolaï และคณะ, 2007) สมการทำนายค่าที่ได้ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D_1 (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด) สร้างสมการในช่วงความยาวคลื่น 1063 - 1836 นาโนเมตร

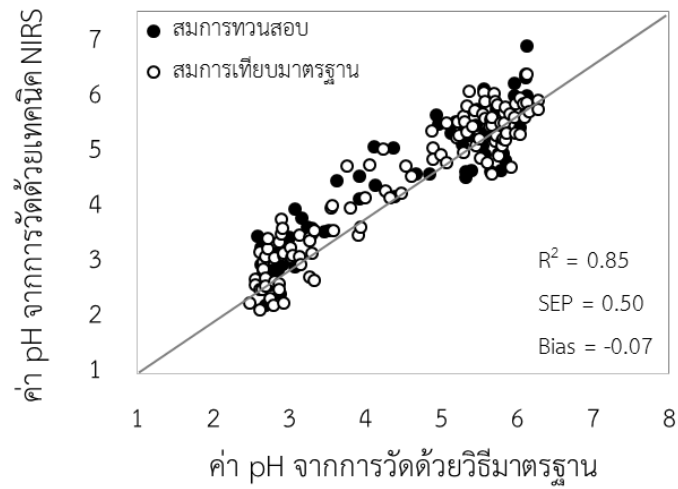
ความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่า pH แสดงดังภาพที่ 56 สัมประสิทธิ์การถดถอยสมการเทียบมาตรฐานของของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในช่วงความยาวคลื่น 1063 - 1836 นาโนเมตร มีความสัมพันธ์กับค่าการดูดกลืนของกรดอินทรีย์ที่ความยาวคลื่น 1445 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังพบค่าการดูดกลืนของน้ำที่ซ้อนทับกันอยู่ (Marques และคณะ, 2016) โดยความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า pH ที่วัดได้จากวิธีมาตรฐานกับค่าที่วิเคราะห์ได้จาก NIRS ของสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ตำแหน่งปลายผล



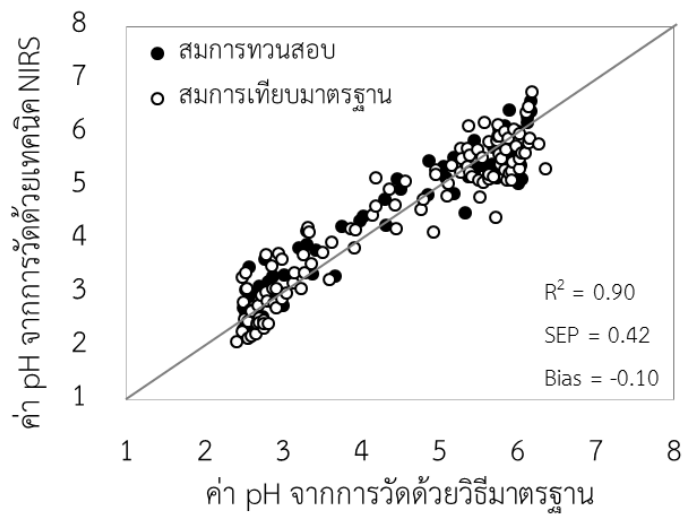
ภาพที่ 52 การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งหมดด้วยเทคนิค NIRS



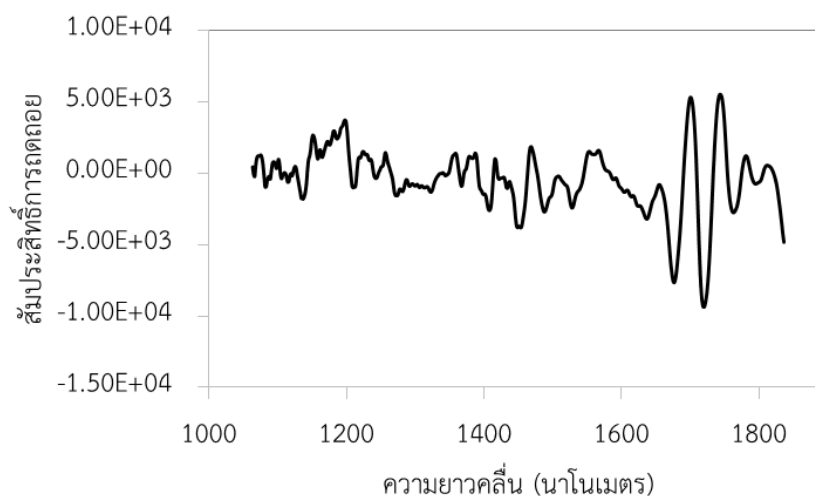
ภาพที่ 53 การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค NIRS



ภาพที่ 54 การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก่นผลด้วยเทคนิค NIRS



ภาพที่ 55 การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค NIRS



ภาพที่ 56 สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่า pH ที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค NIRS ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D_1 (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลีย 17 จุด)

4.4.4 การทำนายค่าดัชนีการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค NIRS

การสร้างสมการทำนายค่า RPI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองทั้งหมด 188 ผล แบ่งมะม่วงออกเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการทำนายต่อกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบสมการในอัตราส่วน 60 ต่อ 40 โดยมีรายละเอียดค่าทางสถิติที่ใช้ในการสร้างสมการแสดงดังตารางที่ 11

สมการทำนายค่า RPI สร้างมาจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมเฉลี่ยที่วัดจากด้าน A, B และเฉลี่ยจากด้าน AB กับค่า RPI ที่ได้จากการคำนวณ จากตารางที่ 12 จะเห็นว่า สมการทำนายค่า RPI จากทุกด้านของผลมีความแม่นยำในการทำนายค่า แต่สมการที่ได้จากสเปกตรัมด้าน A มีความแม่นยำในการทำนายค่า RPI มากที่สุด โดยมีค่า R^2 , SEP และ bias เท่ากับ 0.9, 0.6 และ 0.1 และมีค่า RPD เท่ากับ 3.2 สมการมีประสิทธิภาพในการนำไปใช้ในการตรวจสอบคุณภาพได้ เนื่องจากในการศึกษานี้คำนวณค่า RPI จากความสัมพันธ์ของค่าความแน่นเนื้อและค่าอัตราส่วน TSS/TA ซึ่งค่าความแน่นเนื้อและค่า TA ได้มาจากการวัดในด้าน A ของผลมะม่วงทำให้ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากด้าน A ของผลมะม่วงมีความสัมพันธ์ในการทำนายค่า RPI สูงกว่าด้าน B และเฉลี่ยจากด้าน AB ภาพที่ 57 – 59 แสดงการกระจายตัวของค่า RPI ที่มีค่าเข้าใกล้เส้นเป้าหมาย และมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอของข้อมูล

เนื่องจากค่า RPI เป็นค่าความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นเนื้อ TSS และ TA ความยาวคลื่นสำคัญที่พบจึงอยู่ในช่วงของค่าการดูดของน้ำโปรตีน คาร์โบไฮเดรต กรดอินทรีย์ แพคติน (1123 -

1851 นาโนเมตร) และน้ำตาล (1190 และ 1790 นาโนเมตร) แสดงดังภาพที่ 60 (Louw และ Theron, 2010 และ Rungpichayapichet และคณะ, 2015)

ตารางที่ 11 ค่าทางสถิติของค่า RPI ที่ใช้การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

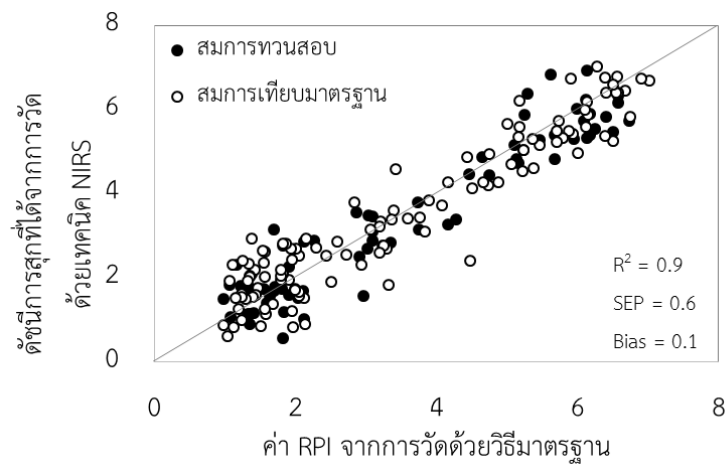
ลักษณะคุณภาพ	ตำแหน่งผล	กลุ่มตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง	ต่ำสุด - สูงสุด	ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
RPI	เฉลี่ยด้าน A	cal	115	0.8 - 7.0	3.5 \pm 1.9
		val	73	1.0 - 6.7	3.4 \pm 1.9
	เฉลี่ยด้าน B	cal	115	0.8 - 7.0	3.5 \pm 1.9
		val	73	1.0 - 6.7	3.4 \pm 1.9
	เฉลี่ยด้าน A และ B	cal	115	0.8 - 7.0	3.5 \pm 1.9
		val	73	1.0 - 6.7	3.4 \pm 1.9



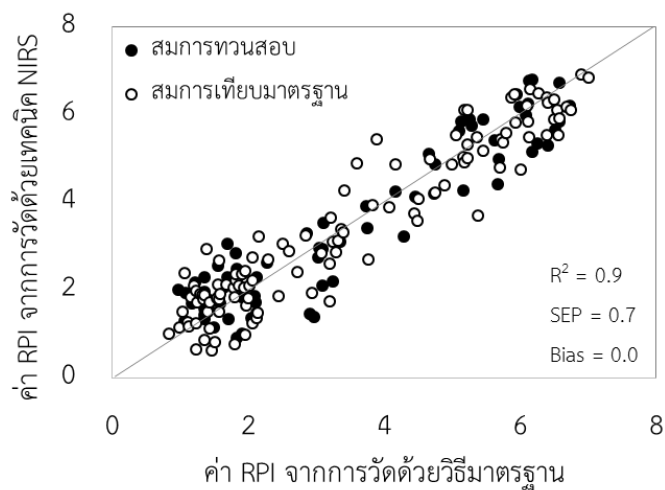
ตารางที่ 12 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม ความยาวคลื่น และค่าทางสถิติของค่า RPI ที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

ลักษณะคุณภาพ	ตำแหน่งผล	ปรับแต่ง สเปกตรัม	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
					R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
RPI	เฉลี่ยด้าน A	D ₁ (17)	1063 - 1836	9	0.9	0.6	0.9	0.6	0.1	3.2
			2171 - 2262							
	เฉลี่ยด้าน B	D ₂ (17)	1182 - 1333	9	0.9	0.6	0.9	0.7	0.0	2.8
	เฉลี่ยด้าน A และ B	D ₁ +MSC(17)	1638 - 1733 2171 - 2356	10	0.9	0.7	0.9	0.6	0.1	3.1

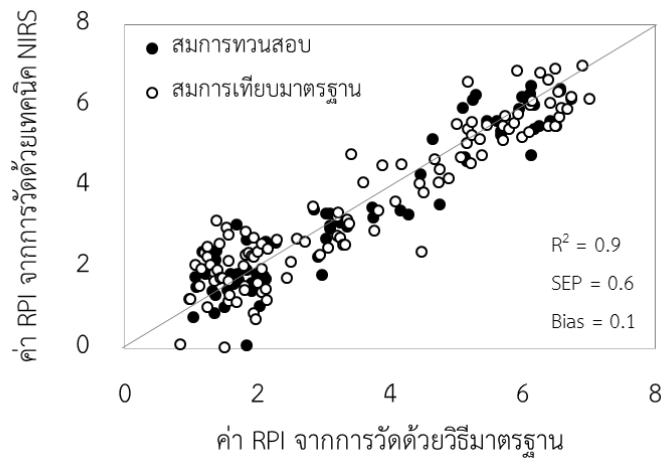
LV: latent variable, R²: coefficients of determination, SEC: standard error of calibration, SEP: standard error of prediction, RPD: ratio of standard error of performance to standard deviation, D₁: first derivative, D₂: second derivative, MSC: multiplicative scatter correction, (17): number of left and right average point



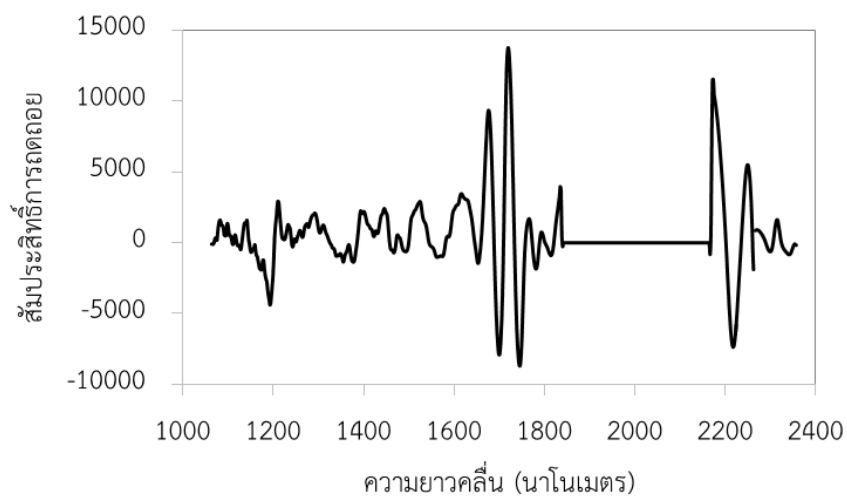
ภาพที่ 57 กราฟการกระจายตัวของ RPI ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยเส้นสเปกตรัมที่วัดจากด้าน A ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค NIRS



ภาพที่ 58 กราฟการกระจายตัวของ RPI ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยเส้นสเปกตรัมที่วัดจากด้าน B ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค NIRS



ภาพที่ 59 กราฟการกระจายตัวของ RPI ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยเส้นสเปกตรัมเฉลี่ยที่วัดจากด้าน A และ B ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค NIRS



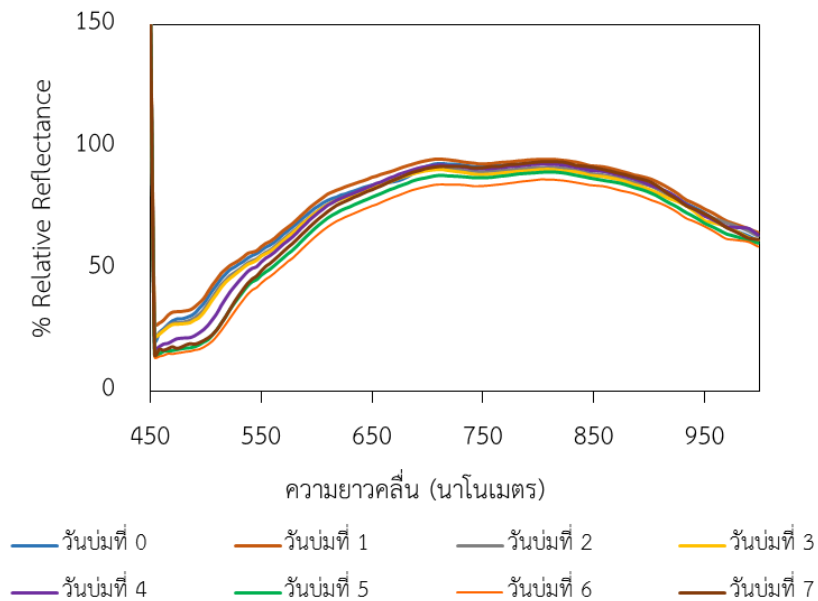
ภาพที่ 60 สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่า RPI ที่ได้จากด้าน A ของผลมะม่วงด้วยเทคนิค NIRS ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D_1 (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด)

4.5 อิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อการใช้เทคนิค HSI ในการทำนายคุณภาพภายในของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระหว่างกระบวนการสุก

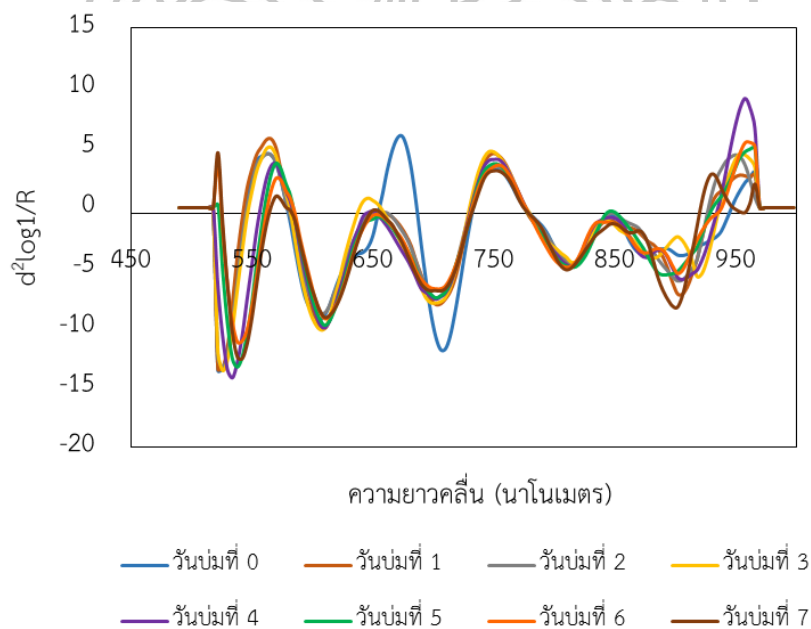
4.5.1 สเปกตรัม HSI

ตัวอย่างข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลมะม่วงที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค HSI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังภาพที่ 61 พบว่า เส้นสเปกตรัมของมะม่วงในวันบ่มที่ 0 – 7 มีลักษณะของค่าร้อยละการสะท้อนกลับที่คล้ายกัน (% relative reflectance) โดยในช่วงความยาวคลื่นของการมองเห็น (450 – 700 นาโนเมตร) และความยาวคลื่น NIR ในช่วงคลื่นสั้น (850 -1000 นาโนเมตร) มีค่าร้อยละการสะท้อนกลับต่ำ ซึ่งลักษณะของสเปกตรัมดังกล่าวนี้คล้ายกับสเปกตรัมในการศึกษาของ Servakaranpalayam (2006) ที่ได้รายงานว่าสเปกตรัมของมะม่วงที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค HSI โดยจะมีค่าร้อยละการสะท้อนกลับที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากองค์ประกอบที่แตกต่างกันภายในมะม่วง

สเปกตรัมที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค HSI เกิดการซ้อนทับกันของพีคขนาดใหญ่มีผลต่อการบดบังพีคสำคัญที่ต้องการศึกษา จึงได้มีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมก่อนการนำไปวิเคราะห์คุณภาพเส้นสเปกตรัมที่ได้จาก HSI ที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสอง (D_2) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองแสดงดังภาพที่ 62 ซึ่งทำให้สามารถแยกพีคที่ซ้อนทับกันออกมาได้ชัดเจนขึ้น พบพีคที่สำคัญ เช่น แอนโทไซยานิน (550 นาโนเมตร) (Nordey และคณะ, 2014) คลอโรฟิลล์ (680 นาโนเมตร) น้ำตาล (840 นาโนเมตร) และน้ำ (760 และ 970 นาโนเมตร) (ElMasry และคณะ, 2007)

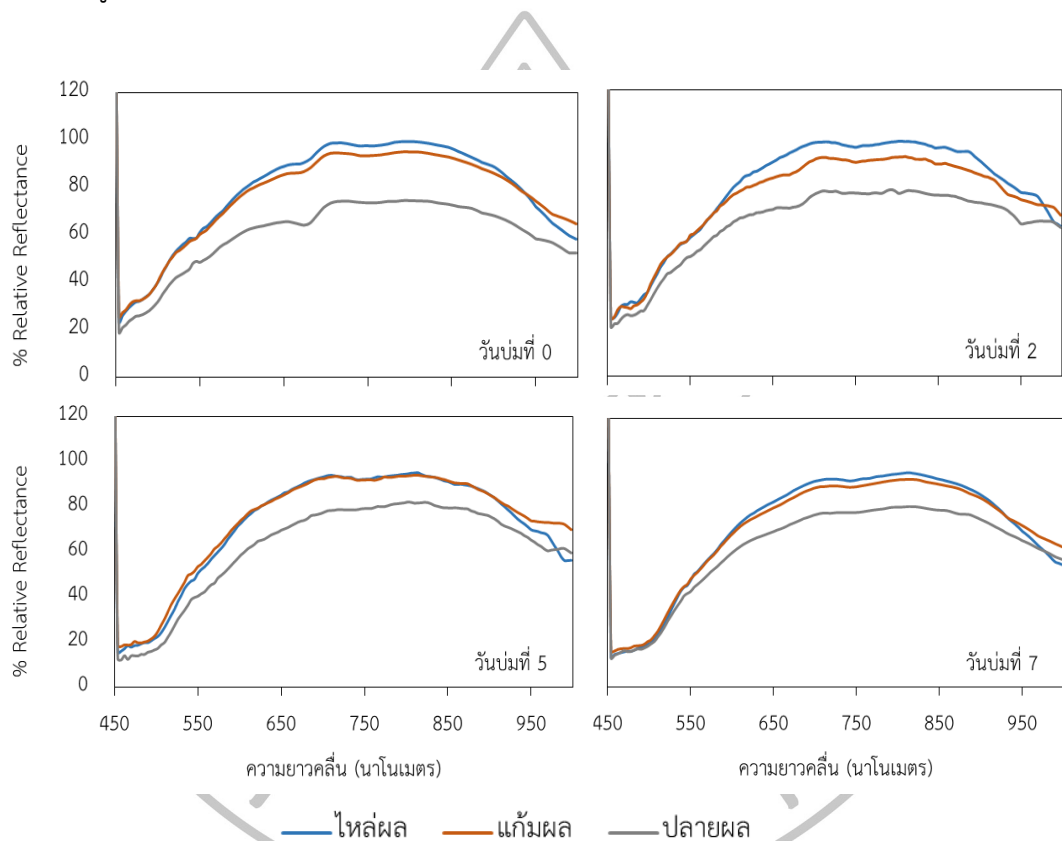


ภาพที่ 61 เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลมะม่วงที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค HSI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้อง (29.7 ± 0.7 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ $66.3 \pm 4.4\%$)



ภาพที่ 62 เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลมะม่วงที่ได้จากเทคนิค HSI และปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสอง (D_2) ของมะม่วงในระหว่างการบ่มให้สุกที่อุณหภูมิห้อง (29.7 ± 0.7 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ $66.3 \pm 4.4\%$)

ตัวอย่างข้อมูลสเปกตรัมที่ตำแหน่งไหล่ ไก้ม และเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลของมะม่วง น้ำดอกไม้สีใน วันบ่มที่ 0, 2, 5 และ 7 ที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังภาพที่ 63 พบว่า เส้นสเปกตรัมที่ ตำแหน่งไหล่ ไก้ม ปลายผลและเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผล มีลักษณะของค่าร้อยละการสะท้อนกลับ คล้ายกัน และมีค่าร้อยละการสะท้อนกลับต่ำสุดที่ตำแหน่งปลายผล ลักษณะสเปกตรัมที่ได้มีความ สอดคล้องกับการทดลองของ Yuwanboon, 2014 ดังนั้น ในการถ่ายภาพสเปกตรัมด้วยเทคนิค HSI ทำให้ได้ข้อมูลเส้นสเปกตรัมที่แตกต่างกันของแต่ละตำแหน่งบนผลมะม่วง



ภาพที่ 63 เส้นสเปกตรัมที่ตำแหน่งไหล่ผล ไก้มผล ปลายผล และเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลของมะม่วง ที่ได้จากเทคนิค HSI ใน วันบ่มที่ 0, 2, 5 และ 7 ที่อุณหภูมิห้อง (29.7 ± 0.7 องศาเซลเซียส และ ความชื้นสัมพัทธ์ $66.3 \pm 4.4\%$)

4.5.2 การทำนายค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค HSI

การสร้างสมการทำนายค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองทั้งหมด 188 ผล แบ่งมะม่วงออกเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการต่อกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบสมการในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 ความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ใช้การสร้างสมการเทียบมาตรฐานมีค่าอยู่ในช่วง 5.49 - 30.09 นิวตัน และใช้ทดสอบสมการมีค่าอยู่ในช่วง 5.78 - 29.43 นิวตัน โดยมีรายละเอียดค่าทางสถิติที่ใช้ในการสร้างสมการแสดงดังตารางที่ 13

สมการเทียบมาตรฐานที่ใช้ในการทำนายค่าความแน่นเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง มีค่า R^2 , SEP และ bias เท่ากับ 0.86, 2.69 นิวตัน และ 0.47 นิวตัน และมีค่า RPD เท่ากับ 2.67 ตามลำดับ (ตารางที่ 14) สมการสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบคุณภาพได้ โดยสมการที่ได้ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV ร่วมกับ D_2 (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ 17 จุด) สมการทำนายค่าความแน่นเนื้อด้วยเทคนิค HSI มีความแม่นยำในการทำนายค่า จะเห็นได้จากการกระจายตัวของค่าความแน่นเนื้อที่มีค่าเข้าใกล้เส้นเป้าหมาย ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการทำนายค่าความแน่นเนื้อที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ข้อมูลมีการกระจายตัวเข้าใกล้เส้นเป้าหมาย (ภาพที่ 64) จากการศึกษาเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Servakaranpalayam (2006) ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากสมการทดสอบของค่าความแน่นเนื้อแสดงดังภาพที่ 65 ที่ขนาดใหญที่พบอยู่ในช่วงความยาวคลื่นของแคโรทีนอยด์ (ความยาวคลื่น 449, 456 และ 479 นาโนเมตร) (Nordey และคณะ, 2014) และค่าการดูดกลืนแสงของค่าความแน่นเนื้อและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดจะพบที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 525, 633, 672, 709, 760, 925 และ 984 นาโนเมตร (Rajkumar และคณะ, 2012)

ตารางที่ 13 ค่าทางสถิติของความแน่นเนื้อที่ใช้การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

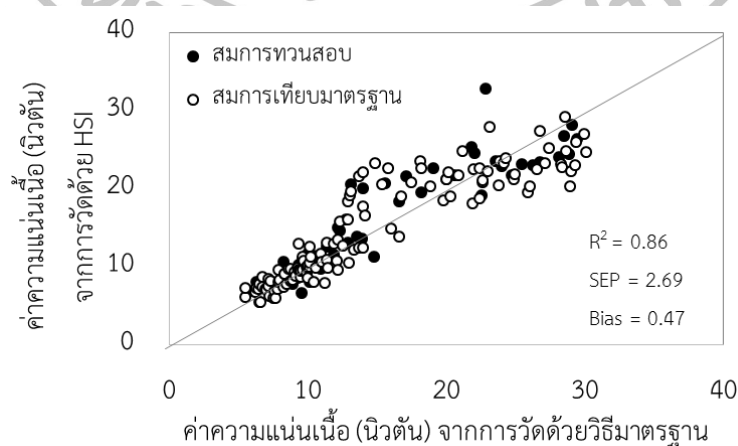
ลักษณะคุณภาพ	ตำแหน่งผล	สมการเทียบมาตรฐาน (70%)	สมการทวนสอบ (30%)	
ความแน่นเนื้อ (นิวตัน)	จำนวนตัวอย่าง	126	62	
	แก้ว	ค่าต่ำสุด	5.49	5.78
		ค่าสูงสุด	30.09	29.43
		ค่าเฉลี่ย	14.63	14.60
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.29	7.20

ตารางที่ 14 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของความแน่นเนื้อที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

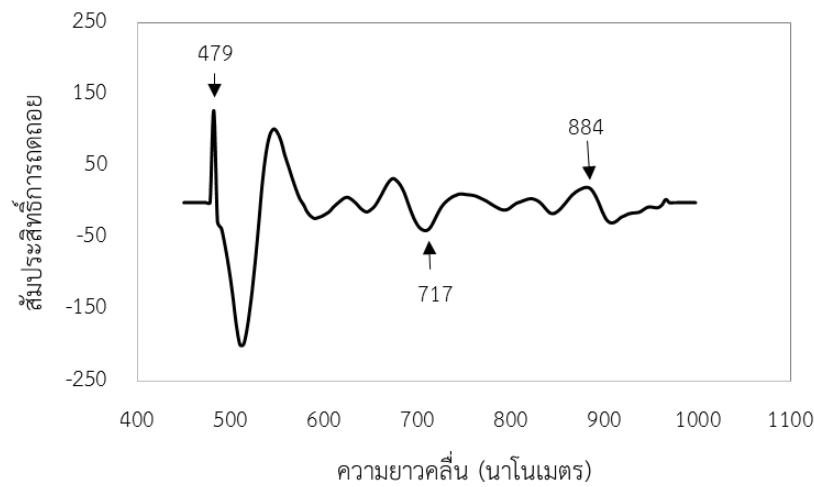
ลักษณะคุณภาพ	ปรับแต่ง สเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
			R ²	SEC*	R ²	SEP*	Bias*	
ความแน่นเนื้อ	SNV+D ₂ (17)	2	0.83	2.99	0.86	2.69	0.47	2.67

LV: latent variable, R²: coefficients of determination, SEC: standard error of calibration, SEP: standard error of prediction, RPD: ratio of standard error of performance to standard to deviation, SNV: standard normal variate, D₂: second derivative, (17): number of left and right average point

* นิวตัน



ภาพที่ 64 การกระจายตัวของค่าความแน่นเนื้อที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI



ภาพที่ 65 สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่าความแน่นเนื้อด้วยเทคนิค HSI ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D_2 ร่วมกับ SNV (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลีย 17 จุด)

4.5.3 การทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และความเป็นกรดต่างของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค HSI

การสร้างสมการทำนายค่า TSS, TA และ pH ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองทั้งหมด 188 ผล แบ่งมะม่วงออกเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการต่อกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทวนสอบสมการในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 โดยมีรายละเอียดค่าทางสถิติที่ใช้ในการสร้างสมการแสดงดังตารางที่ 15

การสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับการทำนายค่า TSS ที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล ปลายผล และเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผล พบว่า ประสิทธิภาพในการสร้างสมการทำนายค่า TSS ของแต่ละตำแหน่งบนผลมะม่วงด้วยเทคนิค HSI มีความแม่นยำน้อย โดยมีค่า R^2 และ SEP อยู่ในช่วง 0.5 - 0.6 และ 2.1 - 2.2 องศาบริกซ์ โดยค่า R^2 ในช่วง 0.5 - 6.4 มีประสิทธิภาพในการแบ่งกลุ่มได้เบื้องต้น (William, 2007) และมีค่า RPD อยู่ในช่วง 1.4 - 1.6 (ตารางที่ 16) ซึ่งค่า RPD ที่มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 - 2.0 แสดงถึง สมการมีความสามารถในการแยกค่าสูงต่ำของค่าคุณภาพที่ต้องการทำนายได้เท่านั้น (Nicolai และคณะ, 2007) จากการกระจายตัวของค่า TSS ของแต่ละตำแหน่งบนผล (ภาพที่ 66 - 69) จะเห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวออกจากเส้นเป้าหมาย แสดงถึงประสิทธิภาพการทำนายค่าของสมการที่ต่ำ เช่นเดียวกับจากการศึกษาของ Yuwanbun (2014) พบว่า มีค่า R^2 , SEP และ RPD เท่ากับ 0.68, 1.54 องศาบริกซ์ และ 1.76 ตามลำดับ จากภาพที่ 70 โดยความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่า TSS ได้แก่ 514, 626, 715, 853, 916 และ 950 นาโนเมตร

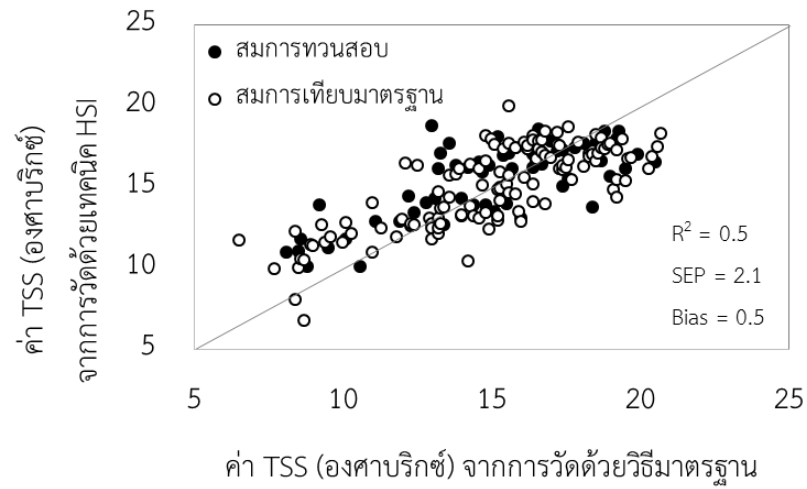
ตารางที่ 15 ค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ใช้การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

ลักษณะคุณภาพ	ตำแหน่ง ผล	กลุ่ม ตัวอย่าง	จำนวน ตัวอย่าง	ต่ำสุด - สูงสุด	ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	
TSS (องศาบริกซ์)	ไหล่	cal	126	6.5 - 20.7	15.0 \pm 3.3	
		val	62	8.1 - 20.5	15.1 \pm 3.1	
	แก้ม	cal	126	7.6 - 20.4	14.4 \pm 3.1	
		val	62	7.7 - 19.6	14.4 \pm 3.1	
	ปลายผล	cal	126	6.9 - 21.9	14.7 \pm 3.6	
		val	62	7.5 - 20.5	14.7 \pm 3.5	
	เฉลี่ยทั้งผล	cal	126	6.5 - 20.7	15.0 \pm 3.2	
		val	62	8.1 - 20.5	15.1 \pm 3.1	
	TA (กรัมกรดซิตริก ต่อหนึ่งร้อยกรัม ตัวอย่างสด)	ไหล่	cal	126	0.04 - 2.73	0.66 \pm 0.76
			val	62	0.44 - 2.63	0.65 \pm 0.75
		แก้ม	cal	126	0.04 - 3.03	0.74 \pm 0.83
			val	62	0.05 - 2.86	0.74 \pm 0.82
ปลายผล		cal	126	0.06 - 3.56	0.85 \pm 0.91	
		val	62	0.06 - 2.85	0.83 \pm 0.89	
เฉลี่ยทั้งผล		cal	126	0.05 - 3.10	0.75 \pm 0.83	
		val	62	0.05 - 2.56	0.74 \pm 0.80	
pH		ไหล่	cal	126	2.48 - 6.51	4.51 \pm 1.34
			val	62	2.53 - 6.26	4.51 \pm 1.34
		แก้ม	cal	126	2.48 - 6.28	4.49 \pm 1.31
			val	62	2.55 - 6.16	4.49 \pm 1.30
	ปลายผล	cal	126	2.41 - 6.36	4.43 \pm 1.37	
		val	62	2.48 - 6.19	4.43 \pm 1.36	
	เฉลี่ยทั้งผล	cal	126	2.46 - 6.30	4.47 \pm 1.33	
		val	62	2.53 - 6.15	4.47 \pm 1.33	

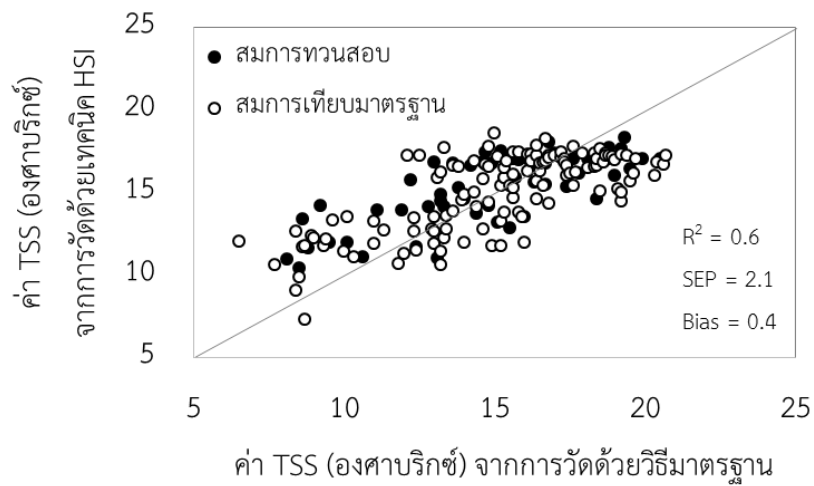
ตารางที่ 16 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS, TA และ pH ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ลักษณะคุณภาพ	ตำแหน่งผล	ปรับแต่งสเปกตรัม	สมการเทียบมาตรฐาน			สมการทวนสอบ			RPD
			LV	R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
TSS (องศาบริกซ์)	ไหล่	MSC+S(17)	3	0.5	2.1	0.6	2.1	0.4	1.5
	แก้ม	S(17)	8	0.7	1.7	0.5	2.1	0.6	1.4
	ปลายผล	D ₂ (17)	8	0.7	2.0	0.6	2.2	0.6	1.6
	เฉลี่ยทั้งผล	MSC+S(17)	5	0.6	2.0	0.5	2.1	0.5	1.5
TA (กรัมกรดซิตริก ต่อหนึ่งร้อยกรัม ตัวอย่างสด)	ไหล่	MSC+D ₂ (17)	2	0.80	0.33	0.84	0.30	0.00	2.50
	แก้ม	MSC	7	0.88	0.29	0.81	0.36	-0.05	2.28
	ปลายผล	SNV+D ₂ (17)	2	0.84	0.37	0.85	0.35	-0.00	2.54
	เฉลี่ยทั้งผล	SNV	6	0.89	0.28	0.88	0.29	0.03	2.76
pH	ไหล่	SNV+D ₂ (17)	4	0.90	0.43	0.90	0.43	0.06	3.12
	แก้ม	สเปกตรัมที่ไม่ผ่าน การปรับแต่ง	5	0.90	0.42	0.91	0.37	0.13	3.51
	ปลายผล	SNV	5	0.92	0.39	0.87	0.49	0.06	2.77
	เฉลี่ยทั้งผล	สเปกตรัมที่ไม่ผ่าน การปรับแต่ง	8	0.94	0.33	0.92	0.38	-0.02	3.50

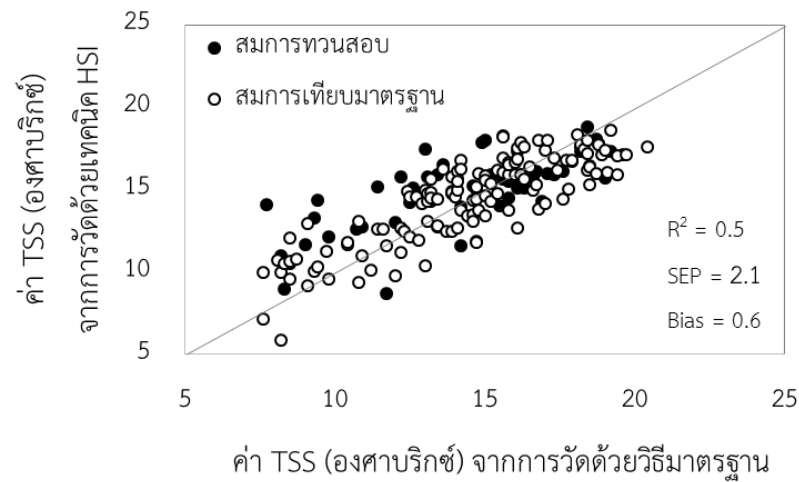
LV: latent variable, R²: coefficients of determination, SEC: standard error of calibration, SEP: standard error of prediction, RPD: ratio of standard error of performance to standard to deviation, D₂: second derivative, MSC: multiplicative scatter correction, SNV: standard normal variate, (S): Savitzky-Golay smooth, (17): number of left and right average point



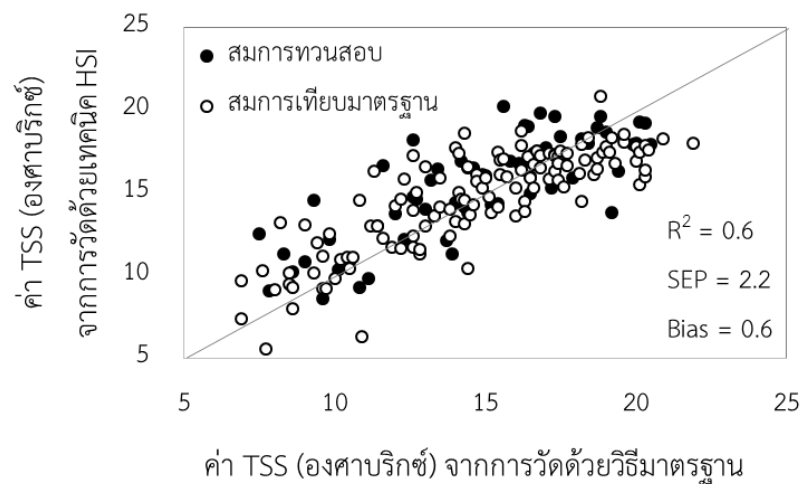
ภาพที่ 66 การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งหมดด้วยเทคนิค HSI



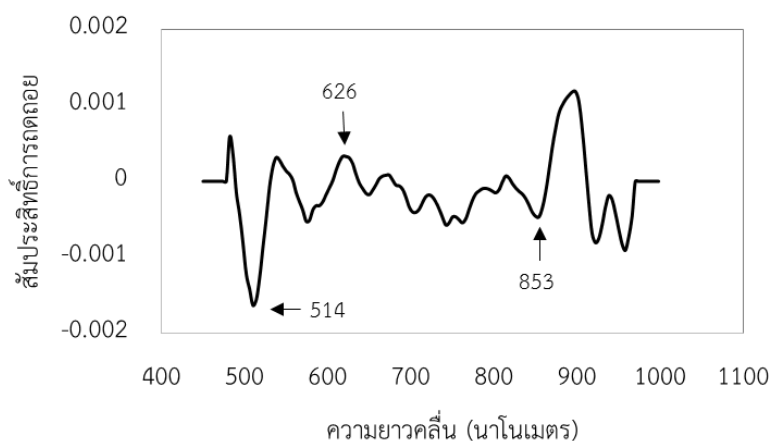
ภาพที่ 67 การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค HSI



ภาพที่ 68 การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค HSI

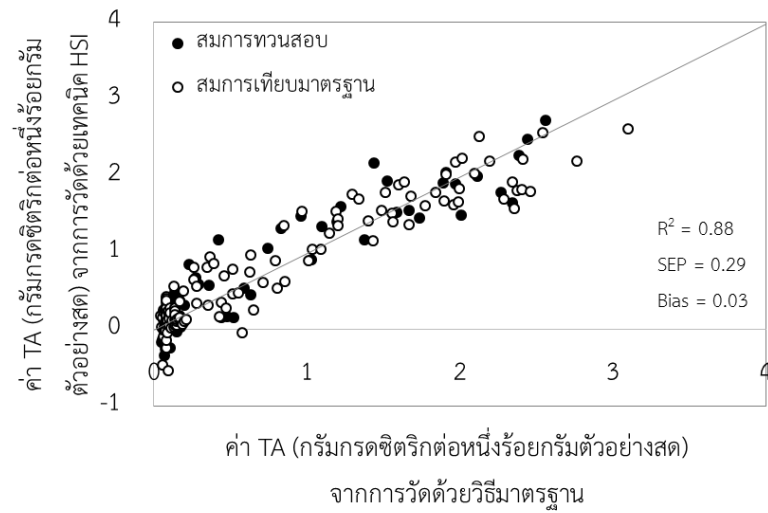


ภาพที่ 69 การกระจายตัวของค่า TSS จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค HSI

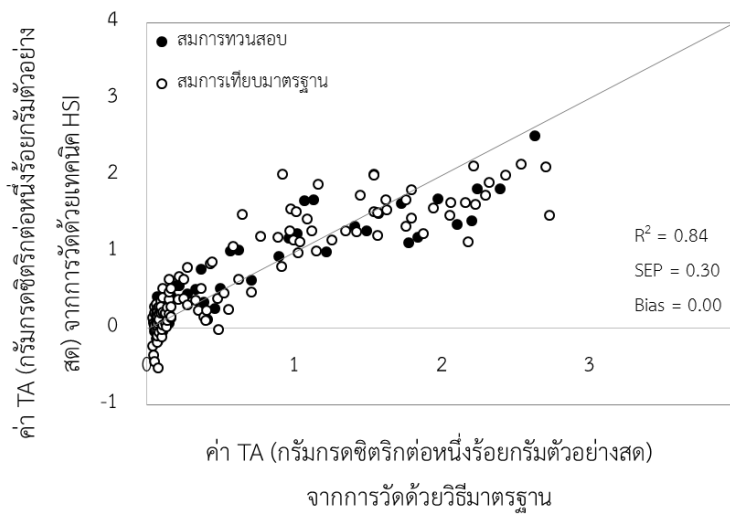


ภาพที่ 70 สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่า TSS ที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค HSI ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี D_2 (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลีย 17 จุด)

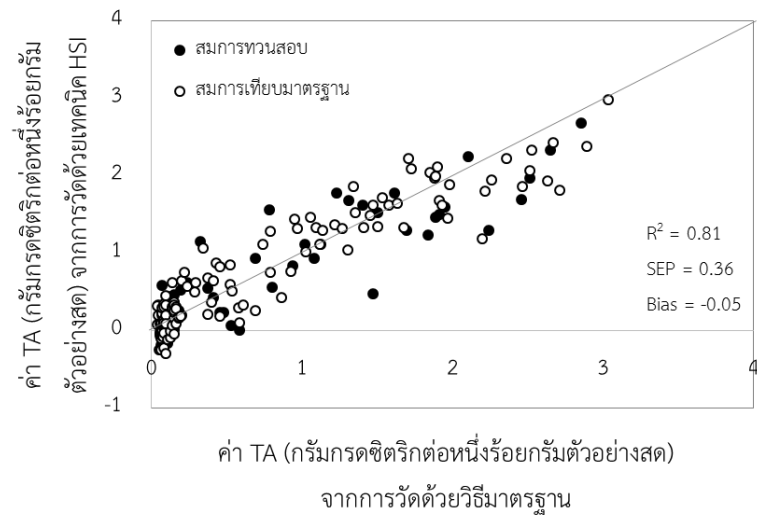
การสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับทำนายค่า TA ที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล ปลายผล และเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผล มีความแม่นยำในการทำนายค่าที่ดี แต่สมการที่มีความแม่นยำมากที่สุดได้จากการสร้างสมการทำนายค่าเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลมะม่วง สมการที่ได้มีการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV มีค่า R^2 , SEP และ bias เท่ากับ 0.88, 0.29 กรัมกรดซิตริกต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างสด และ 0.03 กรัมกรดซิตริกต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างสด และมีค่า RPD เท่ากับ 2.76 (ดังตารางที่ 16) สมการทำนายค่ามีประสิทธิภาพสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบคุณภาพได้เมื่อพิจารณาจากการกระจายตัวของค่า TA ของแต่ละตำแหน่งผล (ภาพที่ 71 - 74) จะเห็นว่ากระจายตัวของค่า TA ที่ได้จากการสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลมีค่าเข้าใกล้เส้นเป้าหมาย ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการทำนายค่า TA ที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง นอกจากนี้ การเฉลี่ยข้อมูลสเปกตรัมและค่าทางเคมีช่วยลดค่าความผิดพลาดของข้อมูลจากการวัดในแต่ละตำแหน่งบนผล โดยความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณกรด แสดงดังภาพที่ 75 จะพบพีคที่สำคัญ ได้แก่ 430, 520, 600, 615, 760, 875, 925, 945 และ 990 นาโนเมตร (He และคณะ, 2014)



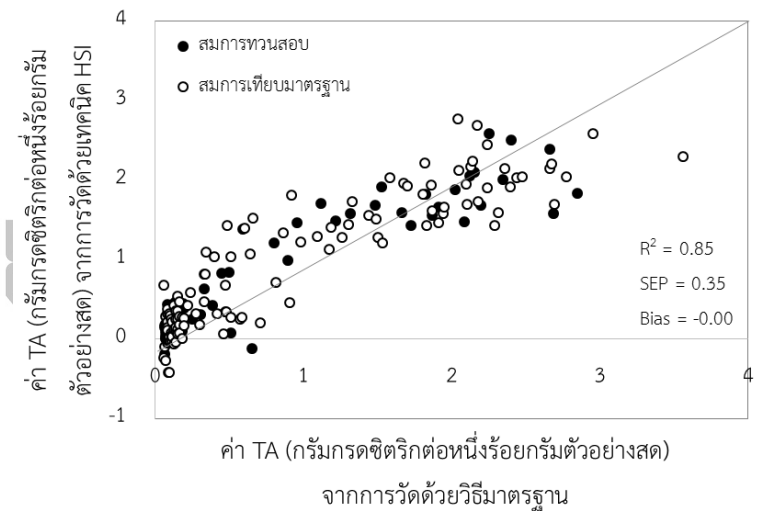
ภาพที่ 71 การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งหมดด้วยเทคนิค HSI



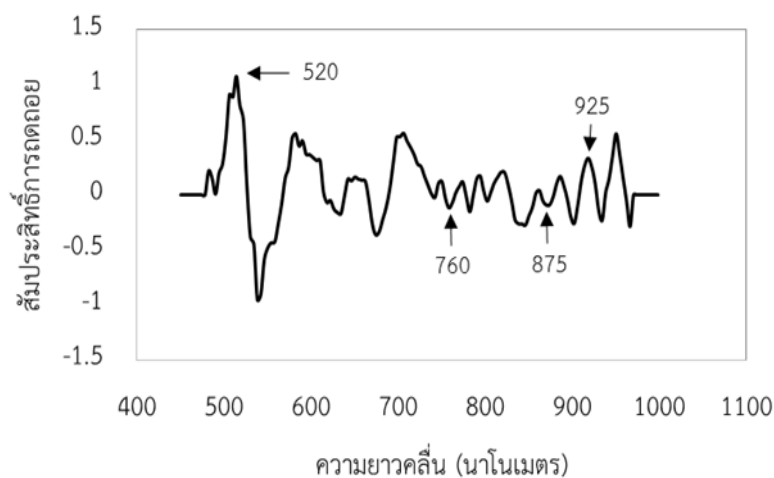
ภาพที่ 72 การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค HSI



ภาพที่ 73 การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค HSI



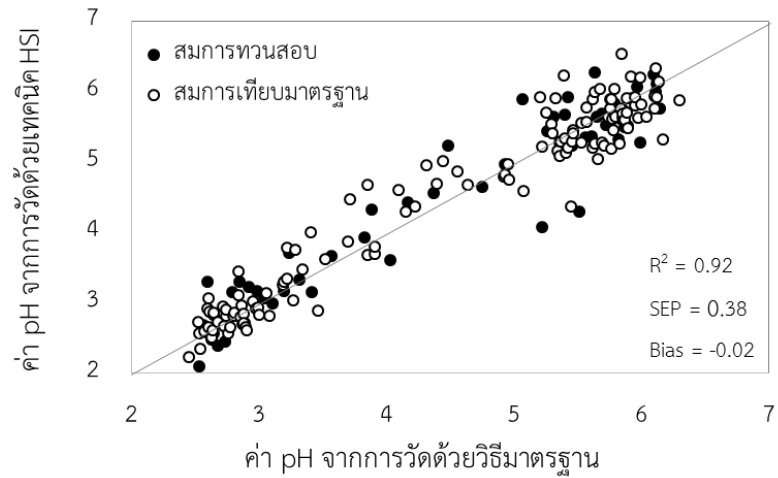
ภาพที่ 74 การกระจายตัวของค่า TA จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค HSI



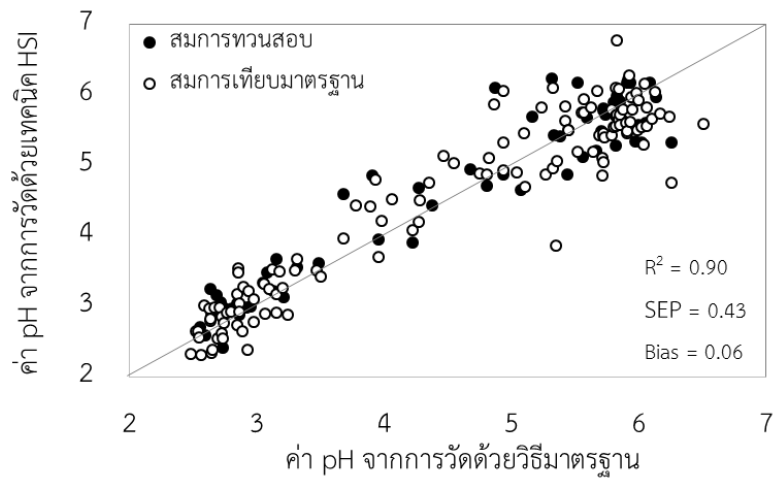
ภาพที่ 75 สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่า TA ที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งหมดด้วยเทคนิค HSI ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV

จากการสร้างสมการ pH ในตำแหน่งไหลผล แก้มผล ปลายผล และเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผลมะม่วง ได้สมการที่มีความแม่นยำสูง แต่จะเห็นว่าสมการทำนายค่าที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลและสมการที่ได้จากการเฉลี่ยทุกตำแหน่งบนผลมะม่วงมีค่าความแม่นยำใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 , SEP และ RPD แต่อย่างไรก็ตามค่า bias ที่ได้จากสมการทำนายค่าที่ตำแหน่งแก้มผลมีค่าสูง ดังนั้นการสร้างสมการจากสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลจึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ทำนายค่า pH ของมะม่วง โดยมีค่า R^2 , SEP, bias และ RPI เท่ากับ 0.92, 0.38, -0.02 และ 3.50 ตามลำดับ เนื่องจากที่ไม่ต้องมีการปรับแต่งสเปกตรัม และมีค่า SEP และ bias ต่ำ และ RPD สูงกว่าสมการที่ได้จากตำแหน่งผลอื่นๆ (ตารางที่ 16) นอกจากนี้การกระจายตัวของค่า pH ที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลยังมีค่าเข้าใกล้เส้นเป้าหมายและมีข้อมูลที่เกาะกลุ่มกันมากกว่าตำแหน่งผลอื่นๆ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการทำนายค่าที่ดี (ภาพที่ 76 -79) โดยสมการทำนายค่า pH ที่ได้ มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.92 – 0.96 แสดงถึงความสามารถของสมการในการนำไปใช้ประจักษ์ภาพได้ (William, 2007)

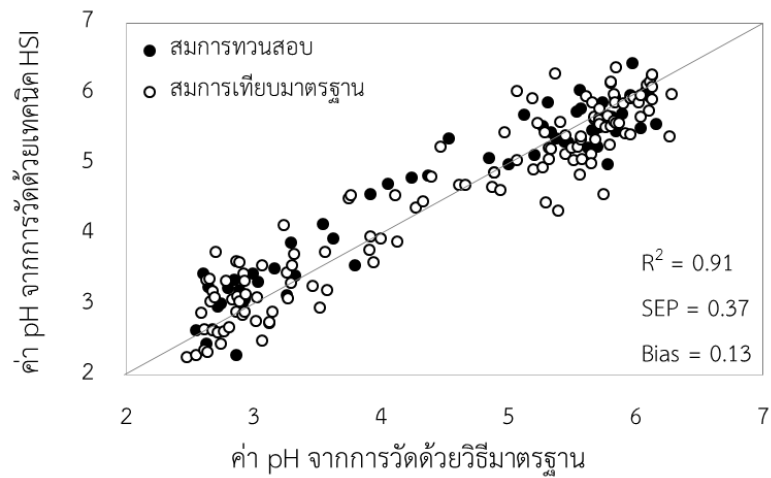
สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐานของค่า pH ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค HSI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ไม่ผ่านการปรับแต่งเส้นสเปกตรัม (ภาพที่ 80) พบพิกัดห้วงคลื่นขนาดใหญ่ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตร ซึ่งเป็นพิกัดที่มีความสำคัญต่อค่า pH (He และคณะ, 2014)



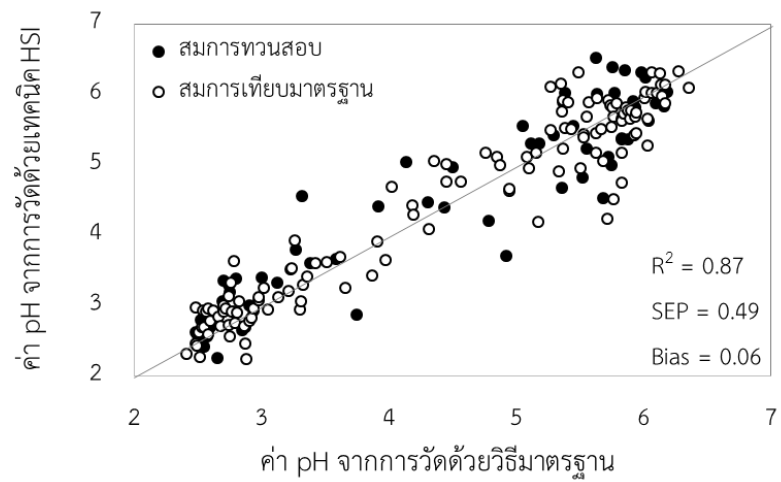
ภาพที่ 76 การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วยเทคนิค HSI



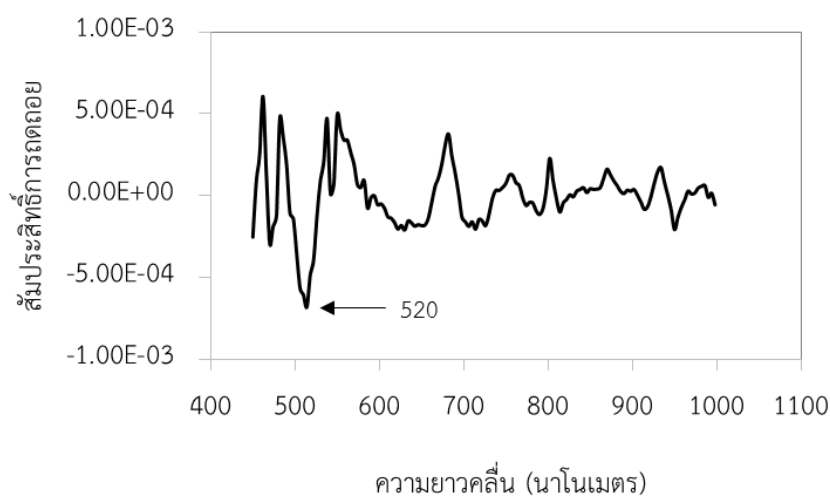
ภาพที่ 77 การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค HSI



ภาพที่ 78 การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก้วผลด้วยเทคนิค HSI



ภาพที่ 79 การกระจายตัวของค่า pH จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค HSI



ภาพที่ 80 สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่า pH ที่ได้จากการเฉลี่ยสเปกตรัมทุกตำแหน่งผลด้วยเทคนิค HSI ที่ไม่ผ่านการปรับแต่งเส้นสเปกตรัม

4.5.4 การทำนายค่าดัชนีการสุกของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค HSI

การสร้างสมการทำนายค่า RPI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองทั้งหมด 188 ผล แบ่งมะม่วงออกเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการทำนายค่า RPI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองทั้งหมด 188 ผล แบ่งมะม่วงออกเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการทำนายค่า RPI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองทั้งหมด 188 ผล แบ่งมะม่วงออกเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการทำนายค่า RPI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองทั้งหมด 188 ผล แบ่งมะม่วงออกเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการทำนายค่า RPI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองทั้งหมด 188 ผล

สมการทำนายค่า RPI สร้างมาจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมเฉลี่ยที่วัดจากด้าน A, B และเฉลี่ยจากด้าน A และ B กับค่า RPI ที่ได้จากการคำนวณ จากตารางที่ 18 จะเห็นว่า สมการทำนายค่า RPI จากทุกด้านของผลมีความแม่นยำในการทำนายค่า แต่สมการทำนายค่า RPI จากด้าน A และ B มีความแม่นยำในการทำนายค่า RPI มากที่สุด โดยสมการทำนายค่า RPI ได้ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV มีค่า R^2 , SEP และ bias เท่ากับ 0.92, 0.53 และ -0.01 และมีค่า RPD เท่ากับ 3.62 ซึ่งสมการทำนายค่า RPI ที่ได้มีความแม่นยำสูง สามารถใช้ในการนำไปใช้ประโยชน์ได้ อย่างไรก็ตาม สมการทำนายค่า RPI ที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลมีความแม่นยำในการทำนายค่า RPI ที่ดี ด้วย เนื่องจากมีค่า RPD สูง (RPD มากกว่า 3.0) และ SEP ต่ำ เห็นได้จากการกระจายตัวของค่า RPI ที่มีค่าเข้าใกล้เส้นเป้าหมาย ข้อมูลเกาะกลุ่มกันในช่วงกว้างและสม่ำเสมอ (ภาพที่ 81 - 83) ดังนั้น ตำแหน่งของผลมะม่วงที่ใช้ในการวัดสเปกตรัมไม่มีอิทธิพลต่อความแม่นยำในการทำนายค่า RPI โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถดถอยกับความยาวคลื่นที่วิเคราะห์ด้วย HSI ของค่า RPI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง แสดงดังจากภาพที่ 84 โดยสัมประสิทธิ์การถดถอยแสดงความยาวคลื่นสำคัญ

ที่มีความสัมพันธ์กับความแน่นเนื้อและ TSS มีค่า 525, 633, 672, 709, 760, 925 และ 984 นาโนเมตร (Rajkumar และคณะ, 2012)

ตารางที่ 17 ค่าทางสถิติของ RPI ที่ใช้การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

ลักษณะคุณภาพ	ตำแหน่งผล	กลุ่มตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง	ต่ำสุด - สูงสุด	ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
RPI	เฉลี่ยด้าน A	cal	126	0.8 - 7.0	3.5 ± 2.0
		val	62	0.1 - 6.7	3.4 ± 1.9
	เฉลี่ยด้าน B	cal	126	0.8 - 7.0	3.5 ± 2.0
		val	62	1.0 - 6.7	3.4 ± 1.9
	เฉลี่ยด้าน A และ B	cal	126	0.8 - 7.0	3.5 ± 2.0
		val	62	1.0 - 6.7	3.4 ± 1.9

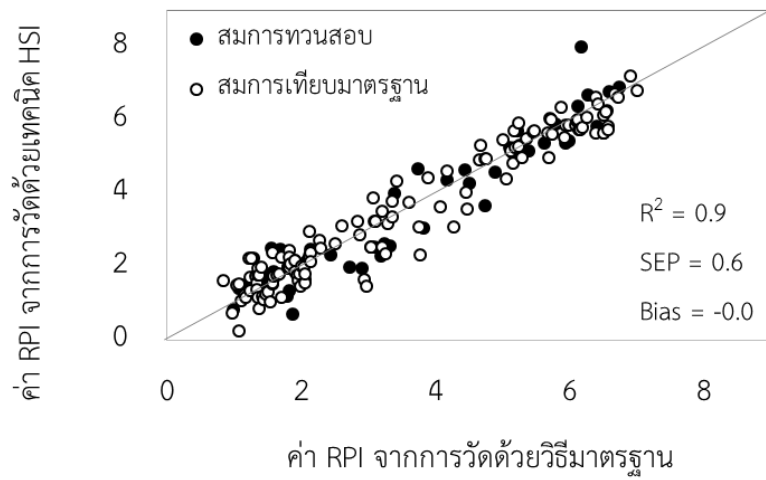


ตารางที่ 18 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า RPI ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐาน และสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

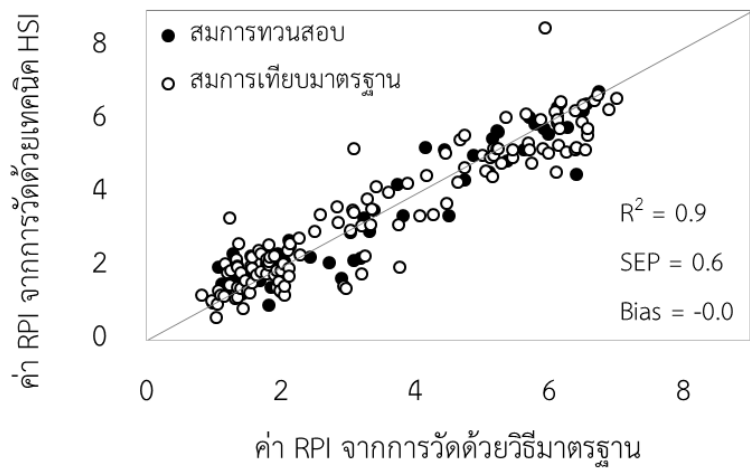
ลักษณะคุณภาพ	ตำแหน่งผล	ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
				R ²	SEC*	R ²	SEP*	Bias*	
RPI	เฉลี่ยด้าน A	SNV	7	0.9	0.5	0.9	0.6	-0.0	3.5
	เฉลี่ยด้าน B	SNV+ D ₁ (17)	2	0.9	0.7	0.9	0.6	-0.0	3.4
	เฉลี่ยด้าน A และ B	SNV	6	0.9	0.5	0.9	0.5	-0.0	3.7

LV: latent variable, R²: coefficients of determination, SEC: standard error of calibration, SEP: standard error of prediction, RPD: ratio of standard error of performance to standard to deviation, SNV: standard normal variate, D₁: first derivative, (17): number of left and right average point

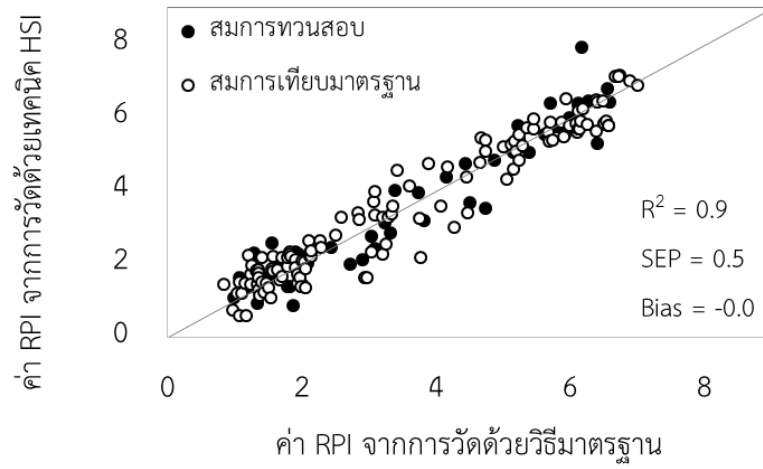




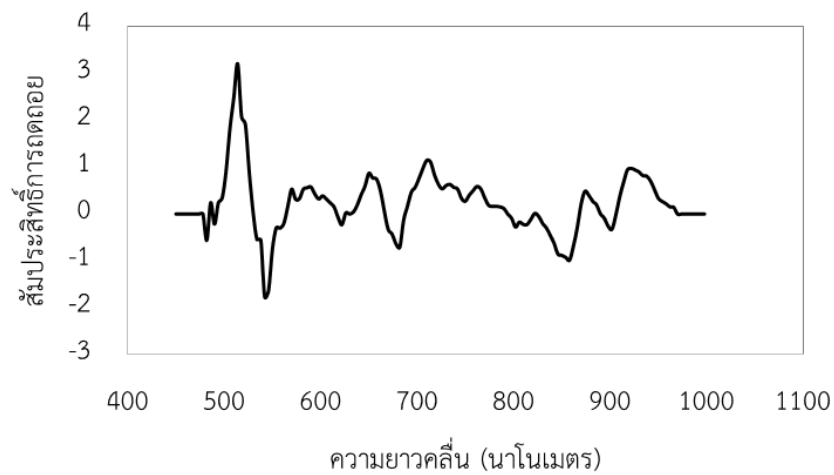
ภาพที่ 81 กราฟการกระจายตัวของ RPI ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยเส้นสเปกตรัมที่วัดจากด้าน A ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค HSI



ภาพที่ 82 กราฟการกระจายตัวของ RPI ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยเส้นสเปกตรัมที่วัดจากด้าน B ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค HSI



ภาพที่ 83 กราฟการกระจายตัวของ RPI ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยเส้นสเปกตรัมที่วัดจากด้าน A และ B ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค HSI



ภาพที่ 84 สัมประสิทธิ์การถดถอยของค่า RPI ที่ได้จากสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วยเทคนิค HSI ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV

4.6 การทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค NIRS และ HSI

4.6.1 การทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค NIRS

การสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับการทำนายค่าเบต้าแคโรทีนจากมะม่วง 188 ผล แบ่งกลุ่มตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการต่อกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทวนสอบสมการอัตราส่วน 60: 40 ตารางที่ 19 แสดงรายละเอียดค่าทางสถิติที่ใช้ในการสร้างสมการทำนายค่าด้วยเทคนิค NIRS

จากการใช้เทคนิค NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพของเบต้าแคโรทีน พบว่า สมการทำนายค่าที่ได้จากสเปกตรัมและค่าเบต้าแคโรทีนเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผลมีความแม่นยำในการทำนายค่ามากที่สุด เนื่องจากการเฉลี่ยข้อมูลสเปกตรัมและค่าทางเคมีจะช่วงลดความผิดพลาดของข้อมูลได้ในแต่ละตำแหน่งการวัดบนผลมะม่วง โดยสมการมีค่า R^2 สูงและ SEP มีค่าต่ำ เท่ากับ 0.90 และ 1.02 มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างแห้ง มีค่า bias เท่ากับ -0.02 มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างแห้ง และมีค่า RPD และ 3.10 สมการมีความสามารถในการทำนายค่าได้อย่างดีเยี่ยม (ตารางที่ 20) จาก การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งผล พบว่ามีการกระจายตัวของข้อมูล เข้าใกล้เส้นเป้าหมาย ไม่กระจายตัวออกห่างจากเส้นเป้าหมายเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการกระจายตัวของตำแหน่งผลอื่นๆ (ภาพที่ 85 - 88) สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการเทียบมาตรฐาน แสดงดัง ภาพที่ 89 มีรายงานว่า การดูดกลืนแสงที่มีความสัมพันธ์กับเบต้าแคโรทีน มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 1235, 1770, 2176 2336 และ 2376 นาโนเมตร (Chen และคณะ, 2009) ดังนั้นในการตรวจสอบปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง ต้องทำการวัดสเปกตรัมและค่าทางเคมีจากทั้ง ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผลของมะม่วง เพื่อความแม่นยำในการทำนายค่า

ตารางที่ 19 ค่าทางสถิติของปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ใช้การสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS และ HSI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

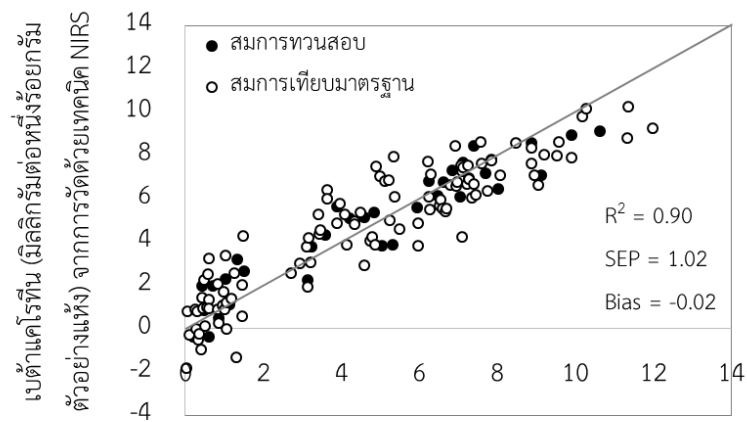
เทคนิค	ตำแหน่งผล	กลุ่มตัวอย่าง	จำนวน ตัวอย่าง	ต่ำสุด - สูงสุด	ค่าเฉลี่ย \pm ส่วน เบี่ยงเบนมาตรฐาน
NIRS	ไทล์	cal	85	0.04 - 10.22	3.66 \pm 2.95
		val	58	0.90 - 9.68	4.74 \pm 2.34
	แก้ม	cal	85	0.02 - 12.92	4.31 \pm 3.69
		val	58	1.11 - 12.16	6.26 \pm 2.66
	ปลายผล	cal	85	0.00 - 13.11	3.94 \pm 3.61
		val	58	1.36 - 12.35	6.36 \pm 2.68
	เฉลี่ยทั้งผล	cal	85	0.02 - 12.00	4.66 \pm 3.23
		val	58	0.19 - 10.63	4.62 \pm 3.16
HSI	ไทล์	cal	96	0.04 - 10.22	4.03 \pm 2.78
		val	47	0.08 - 10.02	4.22 \pm 2.75
	แก้ม	cal	96	0.02 - 12.92	4.11 \pm 3.50
		val	47	0.11 - 12.41	5.01 \pm 3.06
	ปลายผล	cal	96	0.00 - 13.11	4.81 \pm 3.24
		val	47	1.11 - 12.41	5.69 \pm 2.42
	เฉลี่ยทั้งผล	cal	96	0.02 - 12.00	4.56 \pm 3.50
		val	47	0.12 - 10.41	4.60 \pm 3.40

ตารางที่ 20 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของปริมาณเบต้าแคโรทีนของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ใช้สร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค NIRS และ HSI

เทคนิค	ตำแหน่งผล	ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
				R ²	SEC*	R ²	SEP*	Bias*	
NIRS	ไหล่	SNV	10	0.85	1.13	0.77	1.11	0.02	2.10
	แก้ม	SNV	10	0.81	1.60	0.68	1.51	0.10	1.76
	ปลายผล	MSC	7	0.87	1.29	0.62	1.66	0.32	1.65
	เฉลี่ยทั้งผล	SNV	8	0.84	1.29	0.90	1.02	-0.02	3.10
HSI	ไหล่	SNV+D ₂ (17)	4	0.79	1.26	0.83	1.14	-0.13	2.41
	แก้ม	D ₂ (17)	2	0.84	1.41	0.82	1.46	-0.20	2.34
	ปลายผล	SNV	6	0.82	1.52	0.82	1.48	-0.06	2.36
	เฉลี่ยทั้งผล	SNV+ D ₁ (17)	6	0.85	1.25	0.88	1.11	0.03	2.85

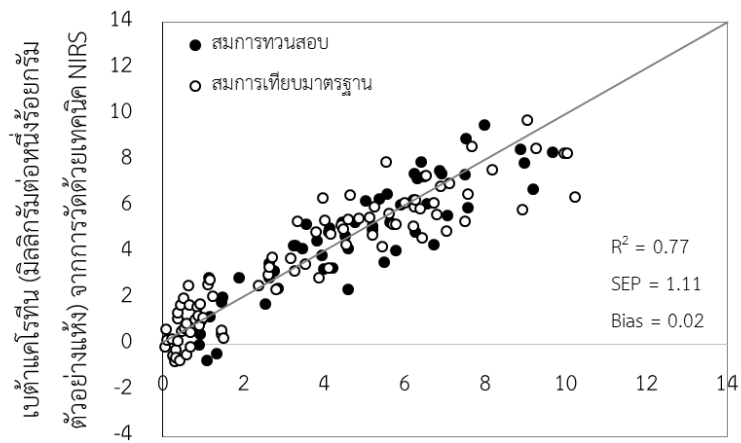
* LV: latent variable, R²: coefficients of determination, SEC: standard error of calibration, SEP: standard error of prediction, RPD: ratio of standard error of performance to standard deviation, SNV: standard normal variate, MSC: multiplicative scatter correction, D₁: first derivative, D₂: second derivative, (17): number of left and right average point

* หน่วย มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างแห้ง



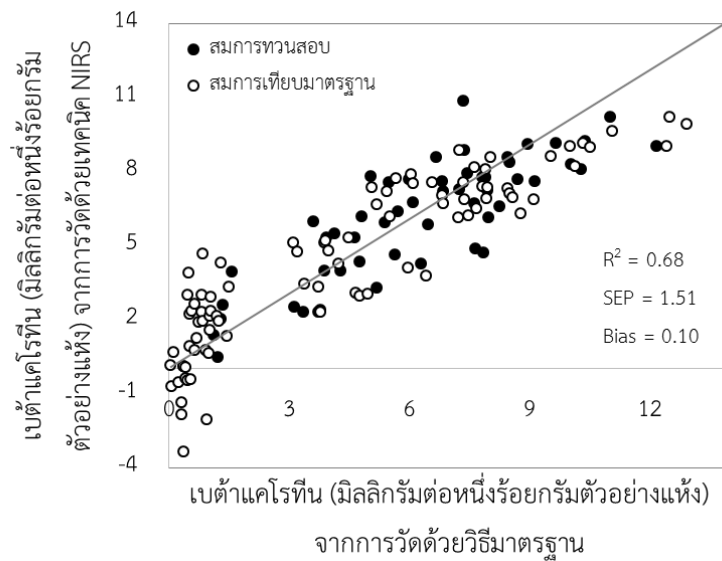
เบต้าแคโรทีน (มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างแห้ง)
จากการวัดด้วยวิธีมาตรฐาน

ภาพที่ 85 การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งหมดด้วยเทคนิค NIRS

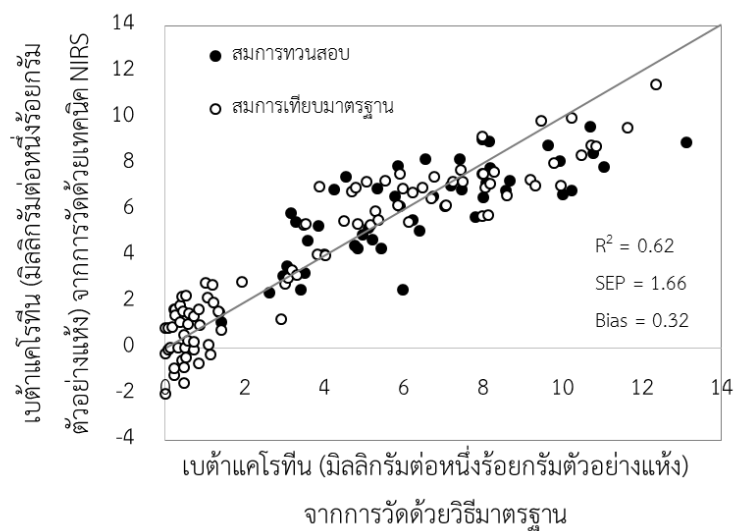


เบต้าแคโรทีน (มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างแห้ง)
จากการวัดด้วยวิธีมาตรฐาน

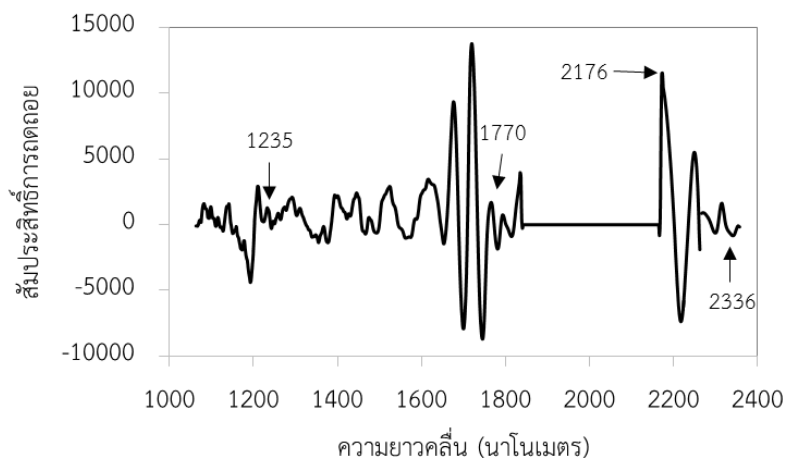
ภาพที่ 86 การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค NIRS



ภาพที่ 87 การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค NIRS



ภาพที่ 88 การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค NIRS



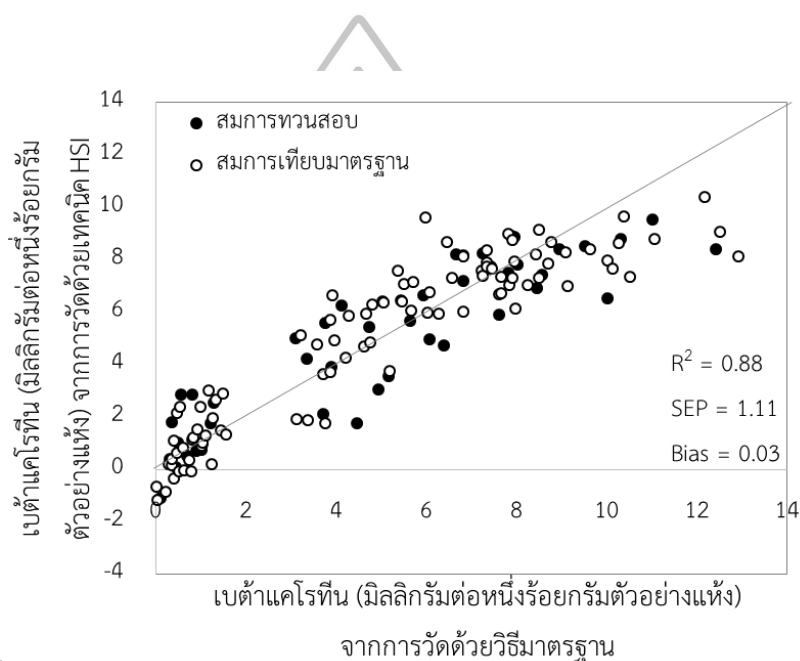
ภาพที่ 89 สัมประสิทธิ์การถดถอยของปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ได้จากการเฉลี่ยสเปกตรัมทั้งหมดด้วยเทคนิค NIRS ที่ปรับสเปกตรัมด้วยวิธี SNV

4.6.2 การทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเทคนิค HSI

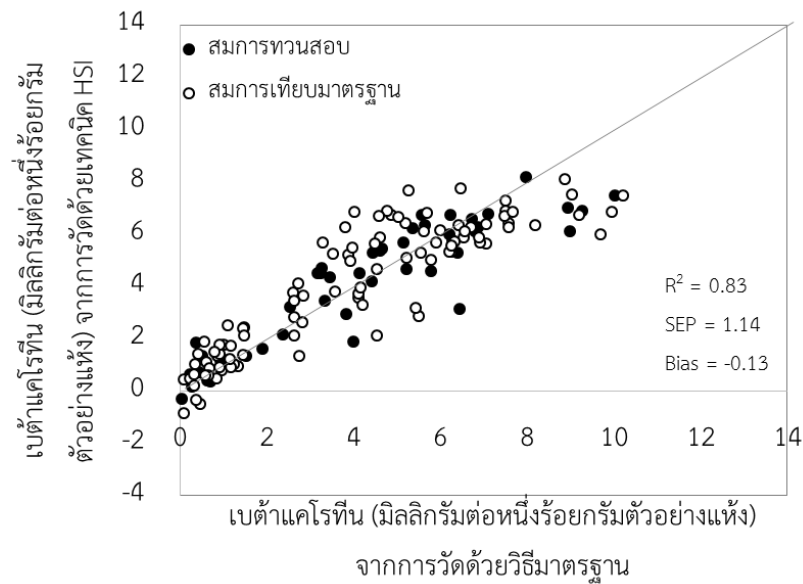
การสร้างสมการเทียบมาตรฐานสำหรับการทำนายค่าเบต้าแคโรทีนจากมะม่วง 188 ผล แบ่งกลุ่มตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการต่อกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบสมการอัตราส่วน 70:30 ตารางที่ 19 แสดงรายละเอียดค่าทางสถิติที่ใช้ในการสร้างสมการทำนายค่าด้วยเทคนิค HSI

สมการเทียบมาตรฐานสำหรับทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากเทคนิค HSI มีความแม่นยำในทุกตำแหน่งบนผลมะม่วง (ไหล่ผล แก้มผล ปลายผล และฉีกจากทุกตำแหน่งผล) แต่สมการทำนายได้ดีที่สุดมาจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมและค่าทางเคมีเฉลี่ยทั้งผล โดยมีค่า R^2 และ SEP เท่ากับ 0.88 และ 1.11 มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างแห้ง มีค่า bias และ RPD เท่ากับ 2.85 มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างแห้ง และ 2.85 ตามลำดับ (ตารางที่ 20) ซึ่งสมการมีประสิทธิภาพในการทำนายค่าสูง เนื่องจากเทคนิค HSI มีการถ่ายภาพในช่วงการดูดกลืนแสงที่มองเห็น (visible light) ซึ่งทำให้สามารถตรวจสอบสารรงควัตถุในมะม่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการศึกษาของ Nordey และคณะ (2014) ที่กล่าวไว้ว่า ในช่วงความยาวคลื่น 400 – 800 นาโนเมตรสามารถทำนายปริมาณแอนโทไซยานิน และคลอโรฟิลล์ในเปลือกของมะม่วงได้อย่างแม่นยำ เมื่อพิจารณาจากการกระจายตัวของข้อมูล พบว่า เบต้าแคโรทีนฉีกจากทุกตำแหน่งผล มีการกระจายตัวของข้อมูลเข้าใกล้เส้นเป้าหมายมากกว่าตำแหน่งอื่นๆบนผล (ภาพที่ 90 - 93)

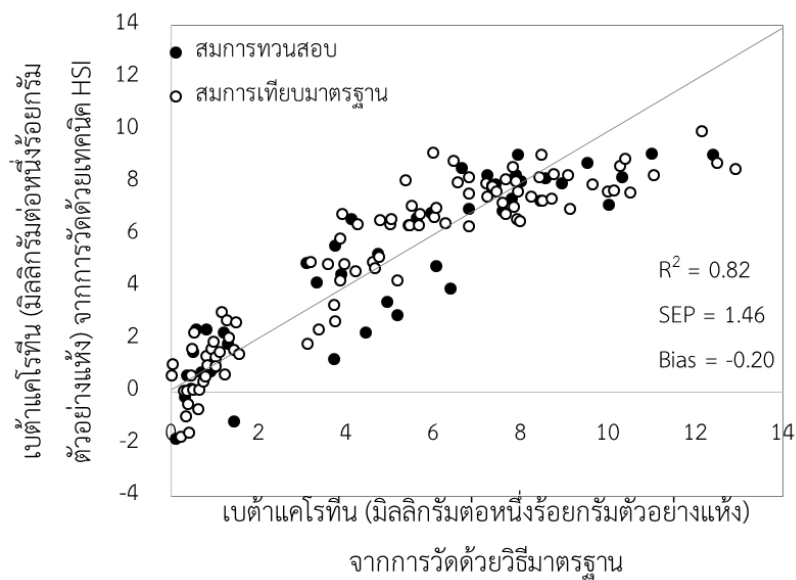
โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถดถอยกับความยาวคลื่นที่วิเคราะห์ด้วย HSI ของปริมาณเบต้าแคโรทีนของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง แสดงดังจากภาพที่ 94 จะเห็นว่าพบพีคขนาดใหญ่ในช่วงการดูดกลืนแสงที่มองเห็นได้ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 480 550 และ 700 นาโนเมตร ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแคโรทีนอยด์ และยังพบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 535 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นของแอนโทไซยานิน (Nordey และคณะ, 2014; Yi และคณะ, 2014 และ Yang และคณะ, 2015)



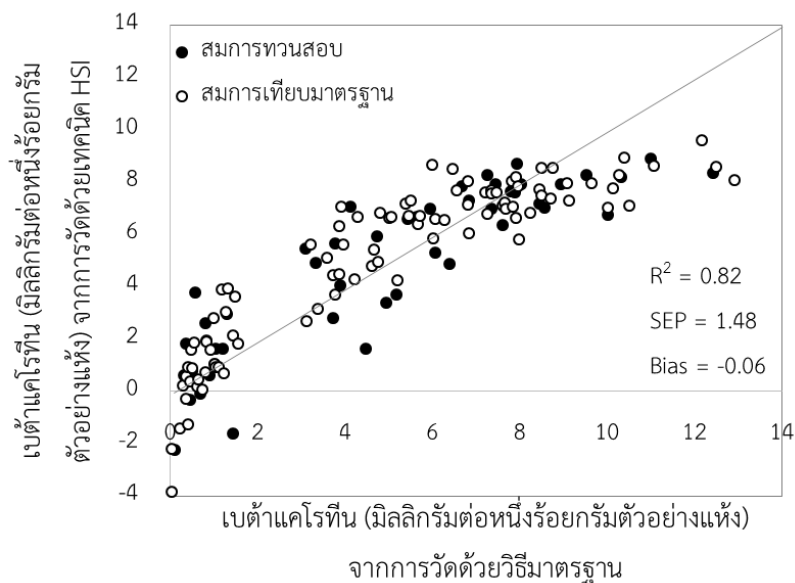
ภาพที่ 90 การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากการวัดสเปกตรัมเฉลี่ยทั้งผลด้วยเทคนิค HSI



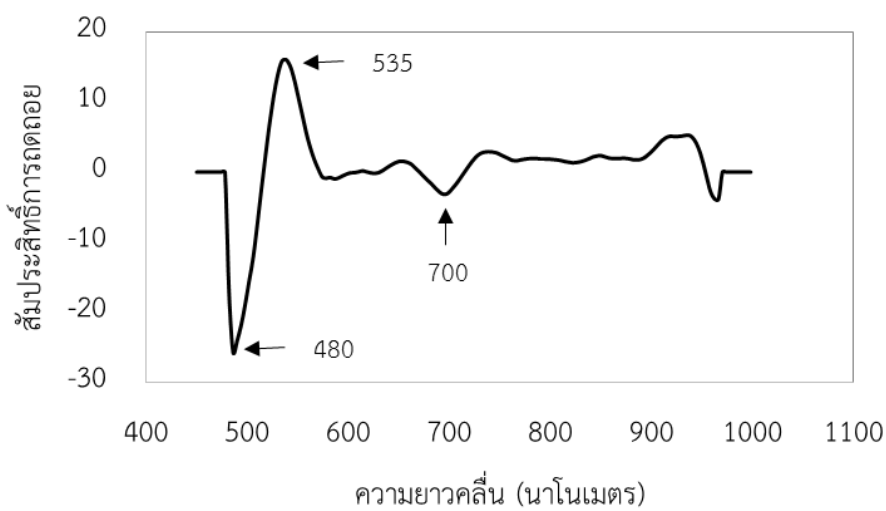
ภาพที่ 91 การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งไหล่ผลด้วยเทคนิค HSI



ภาพที่ 92 การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งแก้มผลด้วยเทคนิค HSI



ภาพที่ 93 การกระจายตัวของปริมาณเบต้าแคโรทีนจากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบที่ได้จากตำแหน่งปลายผลด้วยเทคนิค HSI



ภาพที่ 94 สัมประสิทธิ์การลดถอยของปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ได้จากการเฉลี่ยสเปกตรัมทั้งหมดด้วยเทคนิค HSI ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV ร่วมกับ D_1 (ปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกลีย์ 17 จุด)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของมะม่วงในระหว่างบ่มให้สุก พบว่า TSS, pH, ปริมาณเบต้าแคโรทีน ค่า a^* , b^* และ C ของทั้งเปลือกและเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมีค่าสูงขึ้น แต่ความแน่นเนื้อ TA, RPI, ค่า L^* และ $^{\circ}h$ ของทั้งเปลือกและเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมีค่าลดลง

อิทธิพลของตำแหน่งการวัดบนผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของมะม่วง พบว่า มะม่วงมีค่า TSS เฉลี่ยสูงสุดที่ตำแหน่งไหล่ ปลายผล และแก้ม ตามลำดับ ในขณะที่ค่า TA เฉลี่ยมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งปลายผล แก้ม และไหล่ ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับค่า pH ที่เพิ่มขึ้น และมีปริมาณเบต้าแคโรทีนเฉลี่ยสูงที่ตำแหน่งแก้ม ปลายผล และไหล่ ตามลำดับ จากค่า RPI พบว่า มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองไม่มีการสุกจากตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผล ตามลำดับ

จากการศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพของเทคนิค NIRS ในการตรวจสอบคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง พบว่า สมการทำนายค่า TSS, TA และปริมาณเบต้าแคโรทีน มีความแม่นยำเมื่อสร้างสมการจากสเปกตรัมเฉลี่ยจากทั้งผล ส่วนสมการทำนายค่า pH มีความแม่นยำที่ตำแหน่งปลายผล และสมการทำนาย RPI มีความแม่นยำมากที่สุดจากการสร้างสมการทำนายด้วยสเปกตรัมเฉลี่ยด้าน A ของผลมะม่วง

ตำแหน่งการเลือกสเปกตรัมและค่าทางเคมีบนผลมะม่วงมีอิทธิพลต่อการตรวจสอบคุณภาพด้วยเทคนิค HSI พบว่า โดยสมการทำนายค่า TSS ที่ได้มีประสิทธิภาพในการแบ่งกลุ่มได้เบื้องต้นในทุกตำแหน่งผลมะม่วง การสร้างสมการจากสเปกตรัมและค่าทางเคมีเฉลี่ยทั้งผลมีค่าแม่นยำสูงในการทำนายค่า TA, pH และปริมาณเบต้าแคโรทีน และสมการทำนาย RPI มีความแม่นยำมากที่สุดจากการสร้างสมการทำนายด้วยสเปกตรัมเฉลี่ยด้าน A และ B ของผลมะม่วง

ดังนั้น ตำแหน่งบนผลมะม่วงมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของเทคนิค NIRS และ HSI ในการตรวจสอบคุณภาพภายในและปริมาณเบต้าแคโรทีนของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

เอกสารอ้างอิง

- จิ่งแท้ ศิริพานิช. (2546). สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. พิมพ์ครั้งที่ 6. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. 396 หน้า.
- ฉันทลักษณ์ ตียายน. (2556). “การหายใจของผล.” ใน มะม่วง-การผลิตและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, 110. ธวัชชัย รัตน์ชเลศ, วิลาวัลย์ คำปวน และธีรนุช เจริญกิจ, บรรณาธิการ. เชียงใหม่: ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว.
- เบญจวรรณ ชูติชูเดช (2556). “สรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยว.” ใน มะม่วง-การผลิตและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, 35-43. ธวัชชัย รัตน์ชเลศ, วิลาวัลย์ คำปวน และธีรนุช เจริญกิจ, บรรณาธิการ. เชียงใหม่: ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว.
- มนู โป้สมบูรณ์ และธวัชชัย รัตน์ชเลศ. (2556). “พันธุ์มะม่วงการค้าของประเทศไทย.” ใน มะม่วง-การผลิตและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, 173. ธวัชชัย รัตน์ชเลศ, วิลาวัลย์ คำปวน และธีรนุช เจริญกิจ, บรรณาธิการ. เชียงใหม่: ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว.
- ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, งานวิจัยครบวงจรด้านมะม่วงของศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, เข้าถึงเมื่อ 13 พฤษภาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.phtnet.org/phtic-research/view-cat.asp?catID=1>
- ศุมาพร เกษมสำราญ. ม.ป.ป. “หลักการพื้นฐานของสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้.” ใน เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้ในอุตสาหกรรมเกษตร, ม.ป.ท.
- รณฤทธิ ฤทธิธรม. (2559). “Technical terms in NIR.” เอกสารประกอบการสอนรายวิชา 01212543 สเปกโตรสโกปีอินฟราเรด. คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรรณวรงค์ พัฒนะโพธิ์, เจนธิรา ไทยกรณ์ และอุษาวดี ชนสุต. (2555). “การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองและเชื่อมรรถระหว่างการเก็บรักษา” ว.วิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 43 ฉบับที่ 3 (กันยายน-ธันวาคม): 485-489.

วิจิตรา แต่งปรก. (2556) “คุณค่าทางอาหาร.” ใน มะม่วง-การผลิตและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, 47-56. ธวัชชัย รัตน์ชเลศ, วิลาวลัย คำปวน และธีรนุช เจริญกิจ, บรรณาธิการ. เชียงใหม่: ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว.

วาสนา พิทักษ์พล. (2556). “การผลิตเอทิลีนของผล.” ใน มะม่วง-การผลิตและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, 119-136. ธวัชชัย รัตน์ชเลศ, วิลาวลัย คำปวน และธีรนุช เจริญกิจ, บรรณาธิการ. เชียงใหม่: ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว.

สายชล เกตุษา. (2528). สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมแห่งชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม. 89 หน้า.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, ระบบแสดงข้อมูลทางสถิติ เรื่อง สถิติการส่งออก (Export) มะม่วงสด, เข้าถึงเมื่อ 16 มิถุนายน 2559, เข้าถึงได้จาก http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php

สุภาวรรณ วงศ์คำจันทร์. (2556). “การจัดจำแนกมะม่วง.” ใน มะม่วง-การผลิตและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, ธวัชชัย รัตน์ชเลศ, วิลาวลัย คำปวน และธีรนุช เจริญกิจ, บรรณาธิการ (เชียงใหม่: ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, 2556), 1-16.

อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล. ม.ป.ป. “การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์.” ใน เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้ในอุตสาหกรรมเกษตร, ม.ป.ท.

AOAC. 1995. Association of Official Analytical Chemistry. Washington, D. C. Association of Official Analytical Chemistry, Inc.

Baloch, M. K. and Bibi, F. (2012). Effect of harvesting and storage conditions on the post harvest quality and shelf life of mango (*Mangifera indica* L.) fruit. South African Journal of Botany. (83); 109–116.

Bapat, V. A., Trivedi, P. K., Ghosh, A., Sane, V. A., Ganapathi, T. R., and Nath, P. (2010). Ripening of fleshy fruit: Molecular insight and the role of ethylene. Biotechnology Advances. (28); 94–107.

- Castrillo, M., Kruger, N. J. b. and Whatley, F.R. (1992). Sucrose metabolism in mango fruit during ripening. *Plant Science*. (84); 45-51.
- Chen, X., Wu, J., Zhou, S., Yang, Y., Ni, X., Yang, J., Zhu, Z. and Shi, C. (2009). Application of near-infrared reflectance spectroscopy to evaluate the lutein and b-carotene in Chinese kale. *Journal of Food Composition and Analysis*. (22); 148–153.
- Chen, S., Zhang, F., Ning, J., Liu, X., Zhang, Z. and Yang, Shuqin. (2015). Predicting the anthocyanin content of wine grapes by NIR hyperspectral imaging. *Food Chemistry*. (172); 788–793.
- Cortés, V., Ortiz, C., Aleixos, N., Blasco, J., Cubero, S. and Talens, P. (2016). A new internal quality index for mango and its prediction by external visible and near-infrared reflection spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*. (118); 148–158.
- ElMasry, G., Wang, N., ElSayed, A. and Ngadi, M. (2007). Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry. *Journal of Food Engineering*. (81); 98–107.
- FAOSTAT, 2015. ProdSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. เข้าถึงเมื่อ 9 ตุลาคม 2558, เข้าถึงได้จาก <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
- Giuliano, G., Tavazza, R., Diretto, G., Beyer, P. and Taylor, M. A. (2008). Metabolic engineering of carotenoid biosynthesis in plants. *Trends in Biotechnology*. (26); 139-145.
- He, H. J., Wu, D. and Sun, D. W. (2014). Rapid and non-destructive determination of drip loss and pH distribution in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets using visible and near-infrared (Vis–NIR) hyperspectral imaging. *Food Chemistry*. (156); 394–401.

- He, H. J. and Sun, D. W. (2015). Hyperspectral imaging technology for rapid detection of various microbial contaminants in agricultural and food products. *Trends in Food Science & Technology*. (46); 99-109.
- Ibarra-Garza, I. P., Ramos-Parra, P. A., Hernández-Brenes, C. and Jacobo-Velázquez, D. A. (2015). Effects of postharvest ripening on the nutraceutical and physicochemical properties of mango (*Mangifera indica* L. cv Keitt). *Postharvest Biology and Technology*. (103); 45–54.
- Jha, S. N., Kingsly, A. R. P. and Chopra, S. (2006). Physical and mechanical properties of mango during growth and storage for determination of maturity. *Journal of Food Engineering*. (72); 73–76.
- Jha, S. N., Jaiswal, P., Narsaiah, K., Gupta, M., Bhardwaj, R. and Singh, A. K. (2012). Nondestructive prediction of sweetness of intact mango using near infrared spectroscopy. *Scientia Horticulturae*. (138); 171–175.
- Jha, S. N., Narsaiah, K., Jaiswal, P., Bhardwaj, R., Gupta, M., Kumar, R. and Sharma, R. (2014). Nondestructive prediction of maturity of mango using near infrared Spectroscopy. *Journal of Food Engineering*. (124); 152–157.
- Ketsa, S., Chidtragool, S., Klein, J. D. and Lurie, S. (1999). Ethylene synthesis in mango fruit following heat treatment. *Postharvest Biology and Technology*. (15) 65–72.
- Khuriyati, N., Matsuoka, T. and Kawano, S. (2004). Precise near infrared spectral acquisition of intact tomatoes in interactance mode. *Journal of Near infrared spectroscopy*. (12); 391-395.
- Leiva-Valenzuela, G. A., Lu, R. and Aguilera, J. M. (2013). Prediction of firmness and soluble solids content of blueberries using hyperspectral reflectance imaging. *Journal of Food Engineering*. (115); 91–98.

- Léchaudel, M., Lopez-Lauri, F., Vidal, V., Sallanon, H. and Joasc, J. (2013). Response of the physiological parameters of mango fruit (transpiration, water relations and antioxidant system) to its light and temperature environment. *Journal of Plant Physiology*. (170); 567–576.
- Ledeker, C. N., Suwonsichon, S., Chambers, D. H. and Adhikari, K. (2014). Comparison of sensory attributes in fresh mangoes and heat-treated mango purées prepared from Thai cultivars. *Food Science and Technology*. (56); 138-144.
- Liu, F. X., Fu, S. F., Bi, X. F., Chen, F., Liao, X. J., Hu, X. S. and Wu, J. H. (2013). Physico-chemical and antioxidant properties of four mango (*Mangifera indica* L.) cultivars in China. *Food Chemistry*. (138); 396–405.
- Liu, K., Wang, X. and Young, M. (2014). Effect of bentonite/potassium sorbate coatings on the quality of mangos in storage at ambient temperature. *Journal of Food Engineering*. (137); 16–22.
- Louw, E. and Theron, K. I. (2010). Robust prediction models for quality parameters in Japanese plums (*Prunus salicina* L.) using NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*. (58); 176–184.
- Lqbal, A., Sun, D.W. and Allen, P. (2014). An overview on principle, techniques and application of hyperspectral imaging with special reference to ham quality evaluation and control. *Food Control*. (46); 242-254.
- Mahayothee, B., Leitenberger, M., Neidhart, S., Mühlbauer, W. and Carle, R. (2002). “Non-destructive determination of fruit maturity of Thai mango cultivars by near infrared spectroscopy”. In *Proceeding of an International Symposium Sustaining Food Security and Managing Natural Resources in Southeast Asia. Challenges for the 21st Century*, January 8-11, 2002, Chiang Mai, Thailand.
- Mahayothee, B., Neidhart, S., Carle, R. and Mühlbauer W. (2007). Effects of variety, ripening condition and ripening stage on the quality of sulphite-free dried mango slices. *European Food Research Technology*. (225); 723–732.

- Mariani, N. C. T., Teixeira, G. H. A., Lima, K. M. G., Morgenstern, T. B., Nardini, V. and Júnior, L. C. C. (2015). NIRS and iSPA-PLS for predicting total anthocyanin content in jaboticaba Fruit. *Food Chemistry*. (174); 643–648.
- Marques, E. J. N., de Freitas, S. T. and Pimentel, M. F. (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.
- Medlicott, A. P. and Thompson, A. K. (1985). Analysis of sugars and organic acids in ripening mango fruits (*Mangifera indica* L. var Keitt) by high performance liquid chromatography. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. (36); 561-566.
- Mercadante, A. Z. and Rodriguez-Amaya, D. B. (1998). Effects of ripening, cultivar differences and processing on the carotenoid composition of mango. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. (46); 128-130.
- Mendoza, F., Lu, R., Ariana, D., Cen, H. and Bailey, B. (2011). Integrated spectral and image analysis of hyperspectral scattering data for prediction of apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology*. (62); 149–160.
- Mitcham, E. J. and McDonald, R. E. (1993). Respiration rate, internal atmosphere, and ethanol and acetaldehyde accumulation in heat-treated mango fruit. *Biology and Technology*. (3); 77-86.
- Nambia, V. E., Thangavel, K. and Jesudasb, D. M. (2015). Scientific classification of ripening period and development of colour grade chart for Indian mangoes (*Mangifera indica* L.) using multivariate cluster analysis. *Scientia Horticulturae*. (19); 90–98.

- Nicolaï, B. M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K. I. and Lammertyn, J. (2007). Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biology and Technology*. (46); 99–118.
- Nordey, T., Joasb, J., Davrieux, F. and Génard, M. (2014). Non-destructive prediction of color and pigment contents in mango peel. *Scientia Horticulturae*. (171); 37–44.
- Nordey, T., Léchaudel, M., Génard, M. and Joas, J. (2014). Spatial and temporal variations in mango colour, acidity, and sweetness in relation to temperature and ethylene gradients within the fruit. *Journal of Plant Physiology*. (171); 1555–1563.
- Nordey, T., Léchaudel, M., Génard, M. and Joas, J. (2016). Factors affecting ethylene and carbon dioxide concentrations during ripening: Incidence on final dry matter, total soluble solids content and acidity of mango fruit. *Journal of Plant Physiology*. (196–197); 70–78.
- Oliveira, G. A., Castilhos, F., Renard, C. M. G. C. and Bureau, S. (2014). Comparison of NIR and MIR spectroscopic methods for determination of individual sugars, organic acids and carotenoids in passion fruit. *Food Research International*. (60); 154–162.
- Osborne, B. G. (1981). Principles and practice of near infra-red (NIR) reflectance analysis. *Journal of Food Technology*. (16); 13-19.
- Osborne, B. G. (2006). Near-infrared spectroscopy in food analysis. (online) Accessed on 16 January 2016. Available from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470027318.a1018/abstract?userIsAuthenticated=false&deniedAccessCustomisedMessage=>

- Padda, M. S., do Amaranteb, C. V. T., Garcias, R. M., Slaughterd, D. C. and Mitchama, E. J. (2011). Methods to analyze physico-chemical changes during mango ripening: A multivariate approach. *Postharvest Biology and Technology*. (62); 267–274.
- Palafox-Carlos, H., Yahia, E., Islas-Osuna, M. A., Gutierrez-Martinez, P., Robles-Sánchez, M. and González-Aguilar, G. A. (2012). Effect of ripeness stage of mango fruit (*Mangifera indica* L., cv. Ataulfo) on physiological parameters and antioxidant activity. *Scientia Horticulturae*. (135); 7–13.
- Pott, I., Marx, M., Neidhart, S., Mu-Hlbauer, W. and Carle R. (2003). Quantitative Determination of β -Carotene Stereoisomers in Fresh, Dried, and Solar-Dried Mangoes (*Mangifera indica* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. (51); 4527-4531.
- Pénicaud, C., Achir, N., Dhuique-Mayer, C., Dornier, M. and Bohuon, Ph. (2011). Degradation of β -carotene during fruit and vegetable processing or storage: reaction mechanisms and kinetic aspects: a review. *Cambridge Journals*. (66); 417–440.
- Pu, Y. Y. and Sun, D. W. (2015). Vis–NIR hyperspectral imaging in visualizing moisture distribution of mango slices during microwave-vacuum drying. *Food Chemistry*. (188); 271–278.
- Rajkumar, P., Wang, N., Elmasry, G., Raghavan, G.S.V. and Garipey, Y. (2012). Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*. (108); 194–200.
- Rathore, H, A., Masud, T., Sammi, S. and Soomro, A. H. (2007). Effect of storage on physico-chemical composition and sensory properties of mango (*Mangifera indica* L.) variety Dosehari. *Journal of Nutrition*. (2); 143-148.

- Reich, G. (2005). Near-infrared spectroscopy and imaging: Basic principles and pharmaceutical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*. (57); 1109–1143.
- Rungpichayapichet, P., Mahayothee, B., Khuwijitjaru, P., Nagle, M. and Müller J. (2015). Non-destructive determination of b-carotene content in mango by near-infrared spectroscopy compared with colorimetric measurements. *Journal of Food Composition and Analysis*. (38); 32–41.
- Rungpichayapichet, P., Mahayothee, B., Nagle, M., Khuwijitjaru, Pramote and Müller, Joachim. (2016). Robust NIRS models for non-destructive prediction of postharvest fruit ripeness and quality in mango. *Postharvest Biology and Technology*. (111); 31–40.
- Saranwong, S., Sornsrivichai, J. and Kawano, Sumio. (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); 137–145.
- Schmilovitch, Z., Mizrach, A., Hoffman, A., Egozi, H., and Fuchs, Y. (2000). Determination of mango physiological indices by near-infrared spectrometry. *Postharvest Biology and Technology*. (19); 245–252.
- Servakaranpalayam, S.S. (2006). Potential applications of hyperspectral imaging for the determination of total soluble solids, water content and firmness in mango. Master dissertation. Department of Bioresource Engineering, Macdonald campus, McGill University. pp. 1-70.
- Subramanian, A. and Rodriguez-Saona, L. (2009). *Spectroscopy infrared spectroscopy for food quality analysis and control* (1sted). Elsevier Inc.
- Sirisomboon, P and Nawayon, J. (2016). Evaluation of total solids of curry soup containing coconut milk by near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. (24), 191–198.

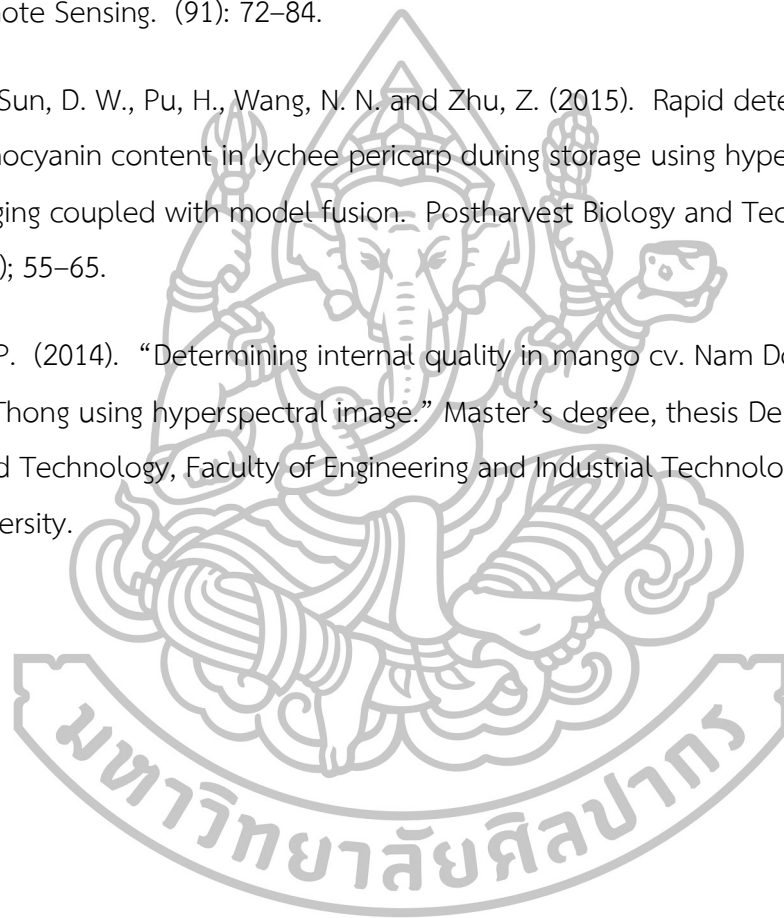
- Ueda, M., Sasaki, K., Utsunomiya, Naoki., Inaba, Kazunari. and Shimabayashi, Y. (2000). Changes in physical and chemical properties during maturation of mango fruit (*Mangifera indica* L. 'Irwin') cultured in a plastic greenhouse. *Journal of Food Technology*. (4); 299–305.
- Vásquez-Caicedo, A. L., Sruamstri, P., Carle, R. and Neidhart, S. (2005). Accumulation of all-*trans*- β -carotene and its 9-*cis* and 13-*cis* stereoisomers during postharvest ripening of nine Thai mango cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. (53); 4827-4835
- Vásquez-Caicedo, A. L., Heller, A., Neidhart, S. and Carle, R. (2006). Chromoplast morphology and β -carotene accumulation during postharvest ripening of mango cv. 'Tommy Atkins'. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. (54); 5769-5776.
- Von Elbe, J. H. and Schwartz, S. J. (1996). *Food Chemistry*. (3rded). New York: Marcel Dekker.
- Williams, P. (2007). "Grains and seeds." In *near-infrared spectroscopy in food science and technology*. 165-217. Edited by Ozaki, Y., McClure, W.F. and Christy, A.A. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc.
- Wongmetha, O., Ke, L. S. and Liang, Y. S. (2015). The changes in physical, biochemical, physiological characteristics and enzyme activities of mango cv. Jinhwang during fruit growth and development. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*. (72-73); 7–12.
- Wu, D. and Sun, D. W. (2013). Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: Part I: Fundamentals. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. (19); 1–14.

Yashoda, H, M., Prabha, T,N. and Tharanathan, R. N. (2007). Mango ripening – Role of carbohydrases in tissue softening. *Food Chemistry*. (102); 691–698.

Yi, Q., Jiapaer, G., Chen, J., Bao, A. and Wang, F. (2014). Different units of measurement of carotenoids estimation in cotton using hyperspectral indices and partial least square regression. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. (91): 72–84.

Yang, Y. C., Sun, D. W., Pu, H., Wang, N. N. and Zhu, Z. (2015). Rapid detection of anthocyanin content in lychee pericarp during storage using hyperspectral imaging coupled with model fusion. *Postharvest Biology and Technology*. (103); 55–65.

Yuwanbun P. (2014). “Determining internal quality in mango cv. Nam Dok Mai Sai Thong using hyperspectral image.” Master’s degree, thesis Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn university.





ภาคผนวก



การวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมี

1. การวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีนด้วยวิธี HPLC

การวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีนด้วยวิธี HPLC

เครื่อง high pressure liquid chromatography (HPLC) (Shimadzu, Japan)

ตรวจวัดด้วย Ultraviolet detector (UV detector)

Pump: LC20AD

Oven: CTO-10Asvp

Diode array detector: SPD-M20A

สภาวะที่ใช้วิเคราะห์

Mobile phase : เมทานอลต่ออะซิโตนไตรล์ (7:3) เกรด HPLC (RCI Labscan Limited, Thailand)

Flow rate : 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที

Injection volume : 20 ไมโครลิตร

Detector : UV diode-array detector ตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร

Column : คอลัมน์ C18 ชนิด reverse-phase ขนาด 10 มิลลิลิตร (150 x 4.6 มิลลิเมตร) (GL Sciences, Japan)

การเตรียมสารมาตรฐาน

เตรียม stock solution ที่ความเข้มข้น 50 ppm โดยใช้สารมาตรฐานเบต้าแคโรทีน (β -carotene, synthetic, Type II, $\geq 95\%$) เกรด HPLC (Sigma-Aldrich, USA) ปริมาณ 5 มิลลิกรัม ละลายในสารละลายเฮกเซนปริมาณ 50 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร สามารถเตรียมสารมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้จาก stock solution ได้ตามสมการดังนี้

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (1)$$

เมื่อ C_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายก่อนเจือจาง (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

C_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายหลังเจือจาง (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

V_1 คือ ปริมาตรของสารละลายก่อนเจือจาง (มิลลิลิตร)

V_2 คือ ปริมาตรของสารละลายหลังเจือจาง (มิลลิลิตร)

คำนวณหาปริมาณเบต้าแคโรทีน โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานเบต้าแคโรทีน และรายงานปริมาณเบต้าแคโรทีนเป็นร้อยละน้ำหนักแห้ง

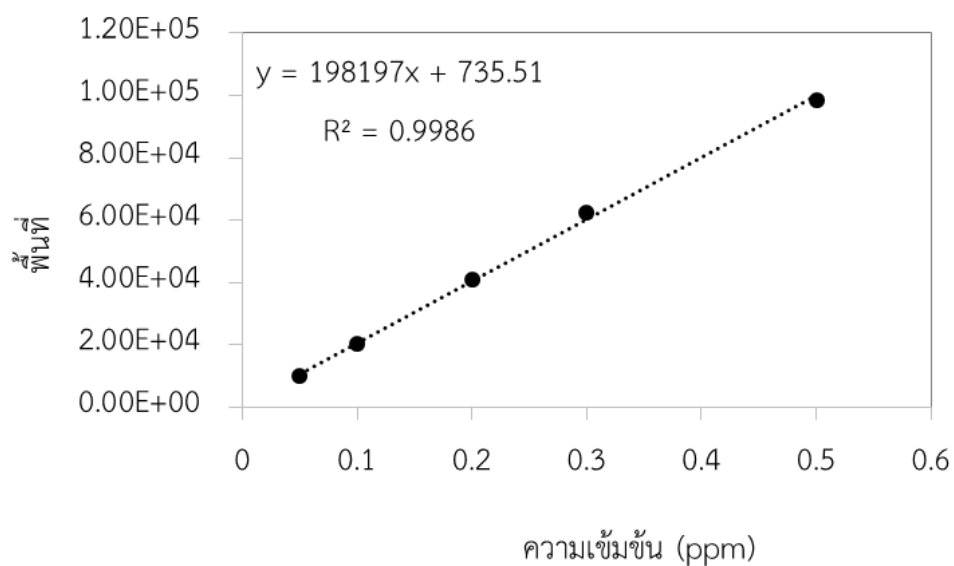
$$MC_{db} = \frac{W_i - W_f}{W_f} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ MC_{db} คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้ง

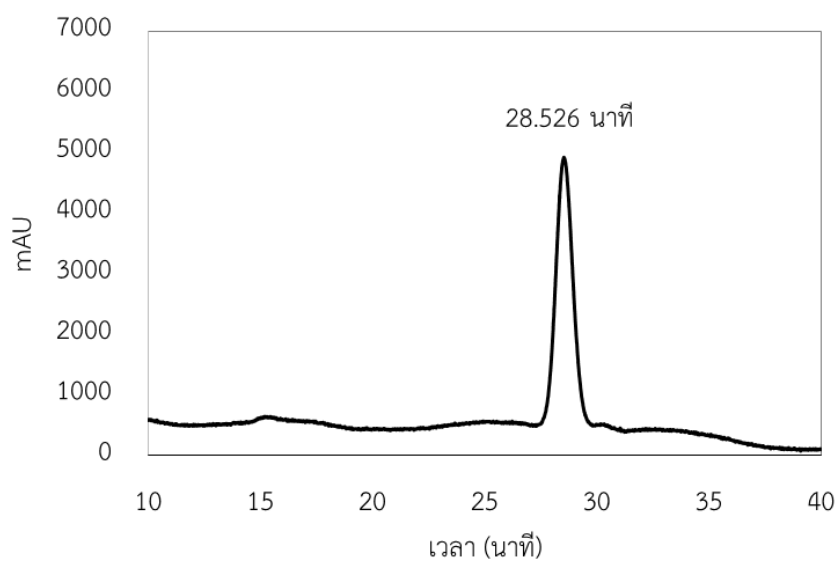
W_i คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบแห้ง

W_f คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบแห้ง

กราฟมาตรฐานเบต้าแคโรทีน



ภาพที่ 95 กราฟมาตรฐานสำหรับคำนวณปริมาณเบต้าแคโรทีน



ภาพที่ 96 โครมาโทแกรมของสารมาตรฐานเบต้าแคโรทีนที่ความเข้มข้น 1 ppm





สูตรที่ใช้คำนวณค่าทางสถิติด้วยของเทคนิค NIRS และ HSI

- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R)

$$R = \left[\frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

- ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R²)

$$R^2 = \left[\frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \right] \quad (8)$$

- Standard error of calibration, SEC

$$SEC = \left[\frac{\sum d_i^2}{(n_c - p - 1)} \right]^{1/2} \quad (9)$$

- Standard error of prediction, SEP

$$SEP = \left[\frac{\sum (d_i - bias)^2}{n_v - 1} \right]^{1/2} \quad (10)$$

- Bias

$$Bias = \bar{d} = \left(\frac{\sum d_i}{n_v} \right) = \frac{\sum (\hat{y} - y_i)}{n_v} \quad (11)$$

- Ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP, RPD

$$RPD = \frac{SD_v}{SEP} \quad (12)$$

เมื่อ	y_i	คือ	ค่าทางกายภาพหรือเคมีที่ได้จากการวัดด้วยวิธีมาตรฐาน
	\hat{y}	คือ	ค่าทางกายภาพหรือเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการทำนาย
	\bar{y}	คือ	ค่าเฉลี่ยของค่าทางกายภาพหรือเคมี
	d_i	คือ	ค่าความแตกต่างระหว่างค่าทางกายภาพหรือเคมีที่ได้จากการวัดด้วยวิธีมาตรฐานกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการทำนาย
	n_c	คือ	จำนวนตัวอย่างในชุดข้อมูลสำหรับสร้างสมการเทียบมาตรฐาน
	n_v	คือ	จำนวนตัวอย่างในชุดข้อมูลสำหรับสร้างสมการทดสอบ
	p	คือ	จำนวนตัวแปรที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน





ภาคผนวก ค

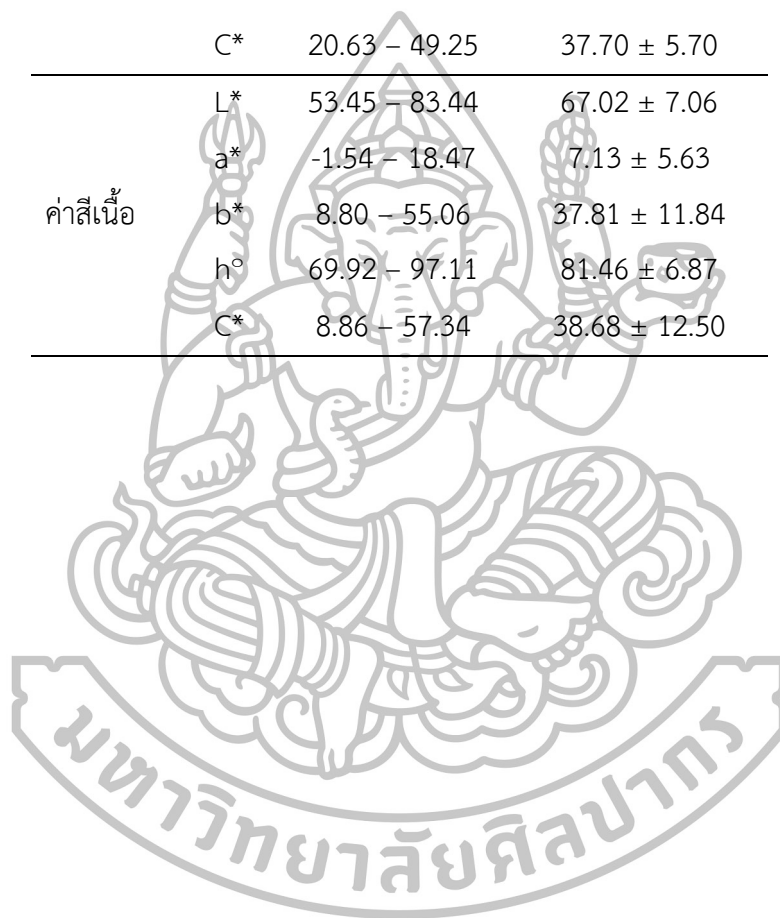
มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 21 ขนาดและน้ำหนักของมะม่วงในระหว่างการบ่มให้สุก

ชุดการ ทดลอง	ระยะเวลา บ่ม (วัน)	แหล่งที่มา	น้ำหนัก (กรัม)	ขนาด (มิลลิเมตร)		
				ความยาว	ความกว้าง	ความหนา
1 (47 ผล)	0	ลพบุรี	351.48±20.50	143.75±3.53	74.50±1.57	54.17±1.30
	1		342.58±16.06	144.64±6.90	69.01±1.97	50.08±2.62
	2		332.41±21.24	143.16±4.07	68.42±1.25	49.88±2.04
	3		336.22±17.41	147.60±4.85	68.32±1.93	46.96±1.55
	4		328.28±18.89	138.35±4.98	67.96±2.40	46.92±0.96
	5		310.31±14.75	146.50±7.30	67.91±3.16	47.26±2.54
	6		312.14±6.97	141.79±5.66	67.72±1.91	43.40±1.36
	7		308.76±11.14	145.95±6.23	67.85±1.73	48.30±5.94
2 (48 ผล)	0	อุดรธานี	352.06±16.76	150.29±4.79	69.79±1.90	50.56±1.65
	1		335.62±11.95	148.16±4.63	68.75±4.31	49.93±2.87
	2		338.33±14.73	144.37±6.94	67.95±8.11	49.65±1.53
	3		329.45±16.15	143.70±6.30	69.83±2.99	50.16±2.01
	4		301.31±33.75	141.70±4.86	70.50±2.41	49.50±0.93
	5		319.93±14.36	147.78±4.11	66.85±2.17	44.61±2.73
	6		317.55±30.21	148.35±4.60	67.66±2.66	46.06±1.71
	7		309.05±22.84	145.37±7.90	68.00±2.40	46.16±2.05
3 (45 ผล)	0	พิษณุโลก	347.84±22.69	142.62±7.61	74.04±2.72	52.20±1.71
	1		328.77±20.86	144.78±5.63	68.68±0.77	44.36±2.21
	2		333.06±23.20	149.54±5.75	70.04±3.11	49.25±2.27
	3		330.44±19.89	144.67±7.85	70.90±2.85	47.71±4.39
	4		316.86±8.98	139.73±6.85	68.22±2.51	46.71±2.38
	5		306.89±15.20	145.01±6.12	66.89±1.50	43.38±1.88
	6		301.93±18.29	144.96±4.73	64.05±1.79	41.23±2.38
	7		300.65±16.48	147.77±8.98	65.55±3.27	43.25±1.91
4 (48)	0	สระแก้ว	339.81±21.09	140.31±5.24	67.09±2.21	51.28±1.18
	1		339.90±21.37	142.79±4.55	67.49±2.28	49.00±3.77
	2		329.21±12.39	137.37±5.70	67.34±1.65	47.66±1.51
	3		321.24±4.88	137.18±5.77	67.19±1.20	47.75±1.59
	4		315.70±12.77	138.20±6.09	65.99±1.64	47.99±1.59
	5		293.21±36.34	138.28±7.80	65.19±2.23	45.05±1.71
	6		302.46±11.98	138.09±2.82	64.54±2.63	44.01±2.12
	7		295.13±10.36	141.77±6.38	64.02±1.16	45.16±1.32

ตารางที่ 22 ค่าสีเปลือกและสีเนื้อของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองเฉลี่ยทุกชุดการทดลอง

พารามิเตอร์	Min - Max	Average \pm SD	
L*	60.30 - 79.87	69.70 \pm 3.42	
a*	0.44 - 15.89	7.82 \pm 3.16	
ค่าสีเปลือก	b*	20.46 - 47.14	36.78 \pm 5.18
	h ^o	69.00 - 88.93	78.55 \pm 4.27
	C*	20.63 - 49.25	37.70 \pm 5.70
	L*	53.45 - 83.44	67.02 \pm 7.06
ค่าสีเนื้อ	a*	-1.54 - 18.47	7.13 \pm 5.63
	b*	8.80 - 55.06	37.81 \pm 11.84
	h ^o	69.92 - 97.11	81.46 \pm 6.87
	C*	8.86 - 57.34	38.68 \pm 12.50



ตารางที่ 23 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

พารามิเตอร์	ตำแหน่งผล	ต่ำสุด - สูงสุด	ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ความแน่นเนื้อ (นิวตัน)	แก้ม	5.49 – 30.08	14.62 \pm 7.24
	ไหล่	6.5 – 20.7	15.0 \pm 3.2
TSS ($^{\circ}$ Brix)	แก้ม	7.6 – 20.4	14.4 \pm 3.1
	ปลายผล	6.9 – 21.9	14.7 \pm 3.6
	เฉลี่ยทั้งผล	7.5 – 21.0	14.7 \pm 3.2
	ไหล่	0.04 – 2.73	0.65 \pm 0.76
TA (g citric acid/ 100 g sample)	แก้ม	0.04 – 3.03	0.74 \pm 0.83
	ปลายผล	0.06 – 3.56	0.84 \pm 0.90
	เฉลี่ยทั้งผล	0.05 – 3.10	0.75 \pm 0.82
	ไหล่	2.48 – 6.51	4.51 \pm 1.34
pH	แก้ม	2.48 – 6.28	4.49 \pm 1.30
	ปลายผล	2.41 – 10.22	4.10 \pm 2.76
	เฉลี่ยทั้งผล	2.46 – 6.30	4.47 \pm 1.33
	ไหล่	0.04 – 10.22	4.10 \pm 2.76
β -carotene (mg/100g sample)	แก้ม	0.02 – 12.92	5.01 \pm 3.46
	ปลายผล	0.00 – 13.11	4.84 \pm 3.54
	เฉลี่ยทั้งผล	0.02 – 12.00	4.65 \pm 3.20

ตารางที่ 24 ค่าสีเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

วันบ่ม	L*	a*	b*	h°	C
0	74.10±1.49 ^a	3.83±1.25 ^f	31.93±2.49 ^c	83.37±1.88 ^a	32.19±2.58 ^c
1	73.05±1.50 ^a	4.02±1.24 ^{ef}	31.67±2.09 ^c	82.93±1.88 ^{ab}	31.95±2.17 ^c
2	71.56±1.56 ^b	5.09±1.11 ^e	34.01±2.66 ^b	81.88±1.49 ^b	34.43±2.75 ^{bc}
3	70.11±1.24 ^c	6.79±1.18 ^d	36.12±2.39 ^b	79.62±1.44 ^c	36.78±2.51 ^b
4	68.61±1.49 ^d	9.34±1.09 ^c	39.29±2.40 ^a	76.63±1.43 ^d	40.40±2.43 ^a
5	67.18±1.12 ^e	10.72±1.01 ^b	40.26±1.65 ^a	75.13±1.28 ^e	41.68±1.69 ^a
6	66.47±1.76 ^{ef}	11.50±1.28 ^{ab}	40.65±1.82 ^a	74.25±1.67 ^{ef}	42.27±1.85 ^a
7	66.16±1.73 ^f	12.11±1.20 ^a	41.11±1.33 ^a	73.61±1.44 ^f	42.87±1.42 ^a

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในระหว่างการบ่มให้สุก

ตารางที่ 25 ค่าสีเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างการบ่มให้สุก

วันบ่ม	L*	a*	b*	h°	C
0	77.29±1.66 ^a	-0.15±0.69 ^f	21.19±4.04 ^d	91.29±1.89 ^a	21.22±4.05 ^d
1	74.87±2.30 ^b	0.77±1.05 ^f	25.25±5.27 ^d	88.84±1.93 ^b	25.29±5.31 ^d
2	70.49±2.40 ^c	3.28±1.48 ^e	32.35±4.97 ^c	85.84±2.22 ^c	32.62±5.07 ^c
3	65.80±3.73 ^d	6.39±2.58 ^d	38.94±6.03 ^b	81.67±3.13 ^d	39.55±6.28 ^b
4	63.15±2.33 ^e	10.30±1.95 ^c	44.83±2.93 ^a	77.22±1.82 ^e	46.03±3.23 ^a
5	62.18±1.80 ^e	11.41±1.54 ^{bc}	46.44±2.43 ^a	76.22±1.50 ^{ef}	47.84±2.59 ^a
6	61.63±1.95 ^{ef}	12.63±1.64 ^{ab}	47.08±3.15 ^a	75.01±1.30 ^f	48.76±3.38 ^a
7	60.08±1.91 ^f	13.68±1.61 ^a	47.96±2.46 ^a	74.11±1.35 ^f	49.89±2.69 ^a

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในระหว่างการบ่มให้สุก

ตารางที่ 26 ค่าทางเคมีและกายภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในแต่ละวันบ่ม

วันบ่ม	ความแน่นเนื้อ (นิวตัน)	TSS (องศาบริกซ์)	TA (กรัมกรดซิตริกต่อ หนึ่งร้อยกรัมตัวอย่าง)	pH	เบต้าแคโรทีน (มิลลิกรัมต่อหนึ่ง ร้อยกรัมตัวอย่างแห้ง)	RPI
0	26.06±1.21 ^a	10.0±2.3 ^e	1.93±0.6 ^a	2.8±0.3 ^e	0.6±0.4 ^e	6.19±0.41 ^a
1	24.47±1.47 ^b	12.1±2.6 ^d	1.66±0.4 ^b	2.9±0.3 ^e	0.8±0.7 ^e	5.78±0.53 ^a
2	16.44±1.07 ^c	14.7±2.9 ^c	1.05±0.8 ^c	3.4±0.7 ^d	2.6±1.4 ^d	4.50±0.42 ^b
3	13.15±0.34 ^d	15.9±2.4 ^{bc}	0.57±0.6 ^d	4.4±1.1 ^c	4.6±1.9 ^c	3.30±0.66 ^c
4	10.19±0.23 ^e	17.3±1.7 ^a	0.23±0.2 ^e	5.3±0.7 ^b	6.1±1.1 ^{bc}	2.19±0.32 ^d
5	9.33±0.47 ^f	16.6±2.0 ^{ab}	0.22±0.2 ^e	5.6±0.3 ^{ab}	6.9±1.5 ^{ab}	2.16±0.39 ^d
6	8.65±0.13 ^f	15.8±2.6 ^{bc}	0.12±0.1 ^e	5.7±0.3 ^{ab}	7.3±2.1 ^{ab}	1.81±0.29 ^d
7	7.19±0.36 ^g	15.4±1.6 ^{bc}	0.08±0.0 ^e	5.8±0.3 ^a	8.5±2.1 ^a	1.31±0.23 ^e

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในระหว่างการบ่มให้สุก

ตารางที่ 27 ค่า L* ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่แต่ละตำแหน่งของผลในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก

วันบ่ม	ไหล่	แก้ม	ปลายผล
0	74.04±1.87 ^a	74.25±2.06 ^a	73.94±2.07 ^a
1	72.61±1.69 ^b	73.04±1.55 ^{ab}	73.51±1.73 ^a
2	71.24±2.28 ^a	71.47±2.09 ^a	72.02±2.05 ^a
3	69.66±1.60 ^b	70.01±1.56 ^{ab}	70.69±1.42 ^a
4	68.22±1.66 ^a	68.41±2.00 ^a	69.31±1.99 ^a
5	66.66±1.20 ^b	67.09±0.99 ^{ab}	67.81±1.40 ^a
6	66.00±2.20 ^a	66.20±1.83 ^a	67.34±1.90 ^a
7	65.53±2.29 ^a	65.45±1.88 ^a	66.79±2.43 ^a

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในระหว่างตำแหน่งผล

ตารางที่ 28 ค่า a* ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่แต่ละตำแหน่งของผลในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก

วันบ่ม	ไหล่	แก้ม	ปลายผล
0	4.08±1.69 ^a	4.00±1.61 ^a	3.34±1.56 ^a
1	4.20±1.69 ^a	4.10±1.54 ^a	3.73±1.70 ^a
2	5.37±2.44 ^a	5.06±2.22 ^a	4.85±2.35 ^a
3	7.20±2.36 ^a	6.67±2.19 ^a	6.57±2.50 ^a
4	9.99±1.43 ^a	9.15±1.16 ^a	8.99±1.22 ^a
5	11.31±1.41 ^a	10.54±1.49 ^a	10.38±1.25 ^a
6	12.20±1.70 ^a	11.18±1.73 ^a	11.28±1.77 ^a
7	12.44±1.36 ^a	11.59±1.49 ^a	12.15±1.30 ^a

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในระหว่างตำแหน่งผล

ตารางที่ 29 ค่า b* ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่แต่ละตำแหน่งของผลในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก

วันบ่ม	ไหล่	แก้ม	ปลายผล
0	32.39±4.30 ^a	31.98±4.16 ^a	31.40±3.88 ^a
1	31.93±4.13 ^a	31.89±4.31 ^a	31.08±4.13 ^a
2	35.03±5.27 ^a	34.13±5.36 ^a	32.82±5.31 ^a
3	36.85±3.68 ^a	36.22±4.37 ^a	35.24±4.75 ^a
4	40.13±3.18 ^a	39.08±2.89 ^a	38.82±2.05 ^a
5	40.87±2.82 ^a	40.31±2.53 ^a	39.57±1.84 ^a
6	41.32±2.55 ^a	40.95±2.53 ^a	39.52±2.13 ^a
7	41.05±1.86 ^a	40.94±1.71 ^a	41.15±1.63 ^a

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในระหว่างตำแหน่งผล

ตารางที่ 30 ค่า h° ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่แต่ละตำแหน่งของผลในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก

วันบ่ม	ไหล่	แก้ม	ปลายผล
0	83.04±2.43 ^a	83.09±2.22 ^a	84.11±2.35 ^a
1	82.67±2.33 ^a	82.84±2.06 ^a	83.35±2.37 ^a
2	81.68±2.84 ^a	81.93±2.63 ^a	82.02±2.82 ^a
3	79.19±2.55 ^a	79.82±2.31 ^a	79.76±2.70 ^a
4	76.04±1.67 ^a	76.81±1.60 ^a	76.97±1.71 ^a
5	74.55±1.49 ^a	75.39±1.45 ^a	75.32±1.40 ^a
6	73.58±1.81 ^a	74.77±1.89 ^a	74.12±2.03 ^a
7	73.16±1.56 ^a	74.23±1.58 ^a	73.57±1.40 ^a

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในระหว่างตำแหน่งผล

ตารางที่ 31 ค่า C ของเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่แต่ละตำแหน่งของผลในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก

วันบ่ม	ไหล่	แก้ม	ปลายผล
0	32.67±4.42 ^a	32.25±4.29 ^a	31.61±3.98 ^a
1	32.23±4.26 ^a	32.17±4.43 ^a	31.33±4.27 ^a
2	35.48±5.55 ^a	34.53±5.60 ^a	33.22±5.58 ^a
3	37.58±4.04 ^a	36.85±4.67 ^a	35.88±5.10 ^a
4	41.37±3.28 ^a	40.15±2.91 ^a	39.86±2.08 ^a
5	42.42±2.95 ^a	41.68±2.74 ^a	40.93±1.98 ^a
6	43.11±2.74 ^a	42.47±2.73 ^a	41.12±2.36 ^a
7	42.91±1.98 ^a	42.56±1.93 ^a	42.92±1.79 ^a

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในระหว่างตำแหน่งผล

ตารางที่ 32 แสดงค่า L* ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก

วันบ่ม	ไหล	แก้ม	ปลายผล
0	77.09±2.87 ^a	77.33±2.79 ^a	77.43±3.16 ^a
1	74.13±2.87 ^a	74.76±2.83 ^{ab}	75.78±2.74 ^a
2	69.70±4.53 ^a	70.46±4.77 ^a	71.33±5.65 ^a
3	65.40±4.17 ^a	65.77±4.87 ^a	66.25±4.76 ^a
4	63.59±3.20 ^a	63.02±4.05 ^a	62.95±3.93 ^a
5	63.10±2.01 ^a	61.69±2.38 ^a	62.00±2.44 ^a
6	62.04±2.84 ^a	61.21±2.66 ^a	61.84±2.53 ^a
7	60.51±2.15 ^a	58.93±3.14 ^a	59.26±2.20 ^a

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในระหว่างตำแหน่งผล

ตารางที่ 33 แสดงค่า a* ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก

วันบ่ม	ไหล	แก้ม	ปลายผล
0	-0.23±1.03 ^a	-0.19±1.05 ^a	0.00±1.38 ^a
1	0.69±1.22 ^a	0.74±1.41 ^a	0.88±1.92 ^a
2	3.14±3.40 ^a	3.19±3.62 ^a	3.56±4.47 ^a
3	5.87±3.26 ^a	6.10±3.88 ^a	7.33±4.65 ^a
4	9.20±1.94 ^b	9.97±2.00 ^b	11.92±2.26 ^a
5	10.48±1.10 ^b	11.18±1.22 ^b	12.70±1.79 ^a
6	11.59±1.35 ^b	12.18±1.10 ^b	14.33±1.41 ^a
7	12.34±1.24 ^b	13.01±1.47 ^b	15.32±1.46 ^a

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในระหว่างตำแหน่งผล

ตารางที่ 34 แสดงค่า b^* ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก

วันบ่ม	ไหล่	แก้ม	ปลายผล
0	21.54±6.49 ^a	21.44±6.55 ^a	20.45±8.06 ^a
1	26.64±6.17 ^a	25.30±6.22 ^a	23.79±8.11 ^a
2	33.27±10.16 ^a	32.34±10.68 ^a	31.45±13.09 ^a
3	38.83±7.52 ^a	38.28±8.44 ^a	40.02±9.84 ^a
4	43.99±3.67 ^a	44.14±4.08 ^a	46.78±3.66 ^a
5	45.86±2.72 ^a	46.23±2.18 ^a	47.33±2.74 ^a
6	45.54±4.08 ^b	46.52±1.98 ^b	49.47±2.52 ^a
7	47.51±2.59 ^b	47.39±2.35 ^b	49.86±2.65 ^a

ตารางที่ 35 แสดงค่า h^o ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก

วันบ่ม	ไหล่	แก้ม	ปลายผล
0	91.33±2.68 ^a	91.27±2.81 ^a	91.26±3.57 ^a
1	88.88±2.01 ^a	88.80±2.37 ^a	88.86±3.25 ^a
2	85.86±4.27 ^a	85.85±4.63 ^a	85.81±5.60 ^a
3	82.09±3.65 ^a	81.92±4.57 ^a	80.89±5.35 ^a
4	78.32±1.87 ^a	77.41±1.81 ^b	75.82±1.91 ^b
5	77.14±1.01 ^a	76.42±1.14 ^a	75.00±1.93 ^b
6	75.69±1.40 ^a	75.33±1.09 ^a	73.86±1.30 ^b
7	75.46±1.07 ^a	74.67±1.35 ^a	72.91±1.52 ^b

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในระหว่างตำแหน่งผล

ตารางที่ 36 แสดงค่า C ของเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก

วันบ่ม	ไหล่	แก้ม	ปลายผล
0	21.57±6.49 ^a	21.47±6.55 ^a	20.49±8.08 ^a
1	26.67±6.21 ^a	25.34±6.28 ^a	23.84±8.21 ^a
2	33.50±10.43 ^a	32.59±10.98 ^a	31.79±13.50 ^a
3	39.34±7.87 ^a	38.86±8.86 ^a	40.81±10.40 ^a
4	44.96±3.92 ^b	45.27±4.36 ^{ab}	48.30±4.02 ^a
5	47.05±2.82 ^b	47.57±2.91 ^{ab}	49.03±2.85 ^a
6	47.01±4.15 ^b	48.10±2.07 ^b	51.52±2.65 ^a
7	49.09±2.72 ^b	49.15±2.51 ^b	52.18±2.68 ^a

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในระหว่างตำแหน่งผล

ตารางที่ 37 ค่า TSS (องศาบริกซ์) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก

วันบ่ม	ไหล่	แก้ม	ปลายผล
0	10.1±2.1 ^a	9.9±2.3 ^a	10.0±2.5 ^a
1	12.4±2.6 ^a	12.1±2.6 ^a	11.7±2.8 ^a
2	15.4±2.6 ^a	14.4±2.7 ^a	14.4±3.5 ^a
3	16.2±2.1 ^a	15.6±2.3 ^a	15.8±3.0 ^a
4	17.6±1.6 ^a	16.8±1.7 ^a	17.6±1.9 ^a
5	16.9±1.8 ^a	16.2±2.1 ^a	16.6±2.3 ^a
6	16.1±2.6 ^a	15.3±2.4 ^a	16.1±2.9 ^a
7	15.9±1.5 ^a	14.8±1.8 ^a	15.6±2.1 ^a

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในระหว่างตำแหน่งผล

ตารางที่ 38 ค่า TA (กรัมกรดซิตริกต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่าง) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก

วันบ่ม	ไหล	แก้ม	ปลายผล
0	1.76±0.6 ^a	1.96±0.6 ^a	2.06±0.6 ^a
1	1.46±0.5 ^b	1.61±0.5 ^{ab}	1.90±0.5 ^a
2	0.87±0.7 ^a	1.05±0.8 ^a	1.23±0.8 ^a
3	0.46±0.6 ^a	0.55±0.7 ^a	0.71±0.7 ^a
4	0.20±0.2 ^a	0.24±0.3 ^a	0.25±0.3 ^a
5	0.19±0.2 ^a	0.22±0.2 ^a	0.25±0.2 ^a
6	0.10±0.0 ^b	0.12±0.1 ^a	0.15±0.1 ^a
7	0.09±0.1 ^a	0.07±0.0 ^a	0.09±0.0 ^a

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในระหว่างตำแหน่งผล

ตารางที่ 39 ค่า pH ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก

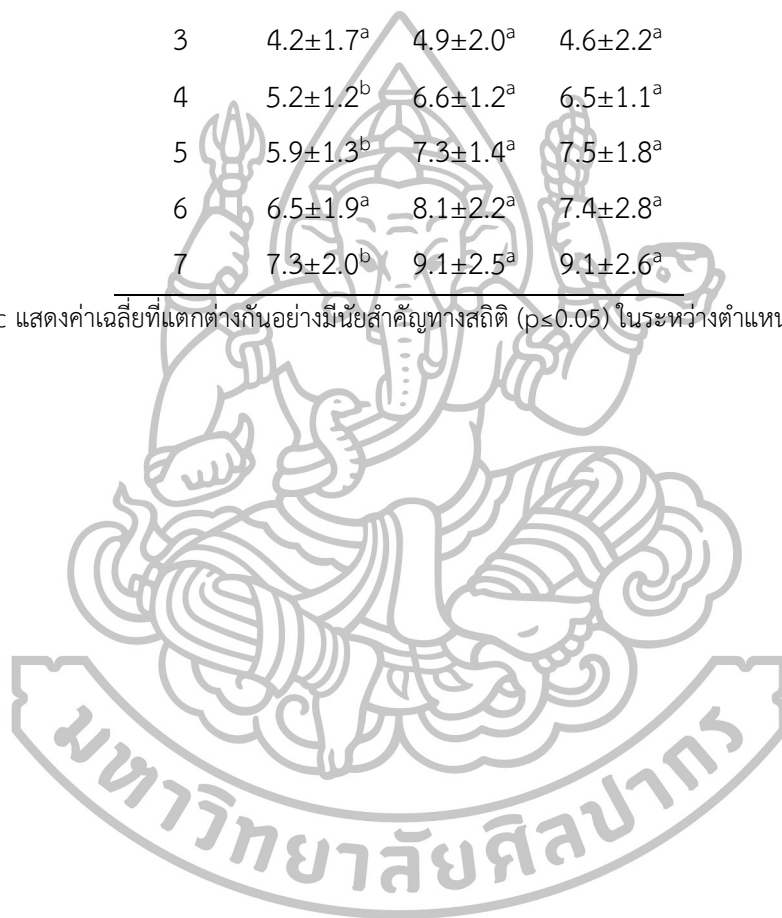
วันบ่ม	ไหล	แก้ม	ปลายผล
0	2.9±0.3 ^a	2.9±0.3 ^a	2.8±0.3 ^a
1	2.9±0.3 ^a	2.9±0.3 ^a	2.8±0.3 ^a
2	3.5±0.8 ^a	3.5±0.7 ^a	3.3±0.8 ^a
3	4.4±1.1 ^a	4.4±1.0 ^a	4.3±1.2 ^a
4	5.4±0.7 ^a	5.3±0.7 ^a	5.3±0.8 ^a
5	5.7±0.3 ^a	5.6±0.3 ^a	5.5±0.4 ^a
6	5.7±0.4 ^a	5.7±0.4 ^a	5.7±0.4 ^a
7	5.8±0.3 ^a	5.8±0.3 ^a	5.9±0.2 ^a

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในระหว่างตำแหน่งผล

ตารางที่ 40 ค่าปริมาณเบต้าแคโรทีน (มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างแห้ง) ของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองในระหว่างเข้าสู่กระบวนการสุก

วันบ่ม	ไหล่	แก้ม	ปลายผล
0	0.6±0.4 ^a	0.6±0.4 ^a	0.6±0.5 ^a
1	0.8±0.6 ^a	0.9±0.7 ^a	0.8±0.7 ^a
2	2.4±1.2 ^a	2.8±1.5 ^a	2.7±1.6 ^a
3	4.2±1.7 ^a	4.9±2.0 ^a	4.6±2.2 ^a
4	5.2±1.2 ^b	6.6±1.2 ^a	6.5±1.1 ^a
5	5.9±1.3 ^b	7.3±1.4 ^a	7.5±1.8 ^a
6	6.5±1.9 ^a	8.1±2.2 ^a	7.4±2.8 ^a
7	7.3±2.0 ^b	9.1±2.5 ^a	9.1±2.6 ^a

ตัวอักษร a, b, c แสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในระหว่างตำแหน่งผล





ตารางที่ 41 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของความแน่นอนเนื้อที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	4	0.83	3.03	0.85	2.81	0.13	2.56
S(17)	4	0.80	3.28	0.86	2.73	0.17	2.64
D ₁ (17)	2	0.81	3.17	0.85	2.75	0.05	2.61
D ₂ (17)	2	0.84	2.88	0.84	2.88	0.44	2.50
SNV	3	0.84	2.94	0.84	2.87	0.13	2.51
SNV+S(17)	3	0.78	3.43	0.84	2.91	0.12	2.47
SNV+ D ₁ (17)	2	0.82	3.12	0.83	2.95	0.07	2.44
SNV+D ₂ (17)	2	0.83	2.99	0.86	2.69	0.47	2.67
MSC	3	0.84	2.95	0.84	2.89	0.14	2.49
MSC+S(17)	3	0.79	3.37	0.84	2.88	0.16	2.51
MSC+D ₁ (17)	2	0.81	3.15	0.83	3.00	0.07	2.40
MSC+D ₂ (17)	2	0.83	3.01	0.85	2.73	0.47	2.64

ตารางที่ 42 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ตำแหน่งไหล่ผลของมะม่วง
น้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	4	0.56	2.15	0.51	2.15	0.39	1.46
S(17)	5	0.56	2.14	0.54	2.09	0.42	1.50
D ₁ (17)	1	0.51	2.27	0.51	2.13	0.54	1.47
D ₂ (17)	1	0.55	2.19	0.53	2.12	0.30	1.48
SNV	3	0.56	2.16	0.54	2.08	0.45	1.50
SNV+S(17)	3	0.58	2.10	0.53	2.12	0.36	1.48
SNV+ D ₁ (17)	3	0.58	2.10	0.53	2.12	0.36	1.48
SNV+D ₂ (17)	1	0.55	2.19	0.52	2.15	0.32	1.46
MSC	3	0.56	2.16	0.52	2.13	0.40	1.47
MSC+S(17)	3	0.53	2.12	0.55	2.07	0.40	1.51
MSC+D ₁ (17)	3	0.57	2.14	0.54	2.09	0.38	1.50
MSC+D ₂ (17)	1	0.54	2.20	0.52	2.15	0.22	1.46

ตารางที่ 43 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ตำแหน่งแก้มผลของมะม่วง น้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	1	0.52	2.18	0.40	2.28	0.67	1.35
S(17)	8	0.71	1.68	0.48	2.14	0.59	1.44
D ₁ (17)	2	0.57	2.06	0.43	2.22	0.65	1.39
D ₂ (17)	3	0.62	1.93	0.46	2.23	0.35	1.38
SNV	4	0.63	1.91	0.44	2.23	0.57	1.38
SNV+S(17)	4	0.62	1.93	0.45	2.20	0.60	1.40
SNV+ D ₁ (17)	3	0.63	1.90	0.43	2.26	0.52	1.36
SNV+D ₂ (17)	4	0.65	1.86	0.46	2.20	0.50	1.40
MSC	5	0.68	1.78	0.43	2.24	0.62	1.38
MSC+S(17)	4	0.65	1.85	0.45	2.20	0.56	1.40
MSC+D ₁ (17)	3	0.61	1.96	0.42	2.28	0.52	1.35
MSC+D ₂ (17)	4	0.64	1.88	0.47	2.20	0.48	1.40



ตารางที่ 44 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS ที่ตำแหน่งปลายผลของมะม่วง
น้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	3	0.58	2.46	0.49	2.50	0.22	1.41
S(17)	3	0.53	2.48	0.49	2.50	0.26	1.41
D ₁ (17)	2	0.51	2.55	0.52	2.43	0.29	1.45
D ₂ (17)	8	0.68	2.04	0.58	2.20	0.64	1.60
SNV	2	0.47	2.63	0.55	2.36	0.07	1.49
SNV+S(17)	2	0.46	2.67	0.54	2.38	0.06	1.48
SNV+ D ₁ (17)	3	0.57	2.37	0.55	2.33	0.36	1.51
SNV+D ₂ (17)	8	0.64	2.17	0.58	2.36	0.35	1.56
MSC	3	0.51	2.54	0.55	2.35	0.27	1.50
MSC+S(17)	4	0.55	2.44	0.55	2.34	0.30	1.50
MSC+D ₁ (17)	3	0.56	2.39	0.55	2.32	0.35	1.52
MSC+D ₂ (17)	2	0.56	2.41	0.54	2.37	0.29	1.49



ตารางที่ 45 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TSS เฉลี่ยจากทั้งผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	4	0.59	2.09	0.49	2.16	0.55	1.45
S(17)	5	0.58	2.10	0.47	2.19	0.58	1.43
D ₁ (17)	4	0.61	2.02	0.48	2.22	0.47	1.41
D ₂ (17)	2	0.61	2.02	0.49	2.21	0.37	1.41
SNV	3	0.57	2.13	0.47	2.21	0.54	1.41
SNV+S(17)	3	0.56	2.15	0.48	2.21	0.51	1.41
SNV+ D ₁ (17)	3	0.60	2.05	0.49	2.17	0.48	1.44
SNV+D ₂ (17)	3	0.62	2.01	0.47	2.21	0.59	1.41
MSC	3	0.58	2.09	0.46	2.21	0.67	1.41
MSC+S(17)	5	0.61	2.02	0.52	2.11	0.48	1.48
MSC+D ₁ (17)	3	0.60	2.06	0.50	2.15	0.50	1.46
MSC+D ₂ (17)	3	0.61	2.01	0.47	2.21	0.60	1.41



ตารางที่ 46 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TA ที่ตำแหน่งไหล่ผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	4	0.81	0.33	0.80	0.33	0.00	2.27
S(17)	3	0.79	0.35	0.81	0.32	-0.02	2.34
D ₁ (17)	2	0.77	0.37	0.81	0.32	-0.01	2.34
D ₂ (17)	2	0.79	0.35	0.83	0.31	0.01	2.42
SNV	2	0.76	0.37	0.77	0.36	-0.02	2.08
SNV+S(17)	4	0.82	0.32	0.83	0.31	0.03	2.42
SNV+ D ₁ (17)	2	0.79	0.35	0.82	0.31	-0.00	2.42
SNV+D ₂ (17)	2	0.80	0.34	0.84	0.30	0.01	2.50
MSC	3	0.80	0.35	0.83	0.30	0.03	2.50
MSC+S(17)	4	0.76	0.37	0.79	0.34	0.01	2.21
MSC+D ₁ (17)	2	0.79	0.35	0.82	0.31	-0.00	2.42
MSC+D ₂ (17)	2	0.80	0.33	0.84	0.30	0.00	2.50



ตารางที่ 47 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TA ที่ตำแหน่งแก้มผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	6	0.84	0.33	0.77	0.39	-0.05	2.10
S(17)	6	0.83	0.35	0.77	0.39	-0.06	2.10
D ₁ (17)	5	0.83	0.35	0.78	0.38	-0.05	2.16
D ₂ (17)	1	0.76	0.41	0.73	0.42	-0.01	1.95
SNV	6	0.88	0.29	0.78	0.38	-0.03	2.16
SNV+S(17)	4	0.78	0.39	0.74	0.42	-0.02	1.95
SNV+ D ₁ (17)	5	0.84	0.33	0.77	0.39	-0.03	2.10
SNV+D ₂ (17)	1	0.74	0.43	0.72	0.42	-0.01	1.95
MSC	7	0.88	0.29	0.81	0.36	-0.05	2.28
MSC+S(17)	4	0.81	0.36	0.75	0.41	-0.01	2.00
MSC+D ₁ (17)	5	0.84	0.33	0.77	0.40	-0.03	2.05
MSC+D ₂ (17)	1	0.73	0.43	0.73	0.42	-0.01	1.95



ตารางที่ 48 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TA ที่ตำแหน่งปลายผลมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	4	0.86	0.34	0.81	0.38	-0.02	2.34
S(17)	4	0.85	0.35	0.82	0.38	-0.02	2.34
D ₁ (17)	2	0.82	0.39	0.82	0.38	-0.00	2.34
D ₂ (17)	2	0.85	0.35	0.83	0.36	0.01	2.47
SNV	4	0.84	0.36	0.83	0.37	-0.02	2.41
SNV+S(17)	4	0.82	0.39	0.82	0.37	-0.02	2.41
SNV+ D ₁ (17)	3	0.86	0.34	0.83	0.37	-0.02	2.41
SNV+D ₂ (17)	2	0.84	0.37	0.85	0.35	-0.00	2.54
MSC	4	0.85	0.35	0.84	0.36	0.03	2.47
MSC+S(17)	4	0.82	0.39	0.82	0.38	-0.01	2.34
MSC+D ₁ (17)	3	0.86	0.34	0.83	0.37	-0.02	2.41
MSC+D ₂ (17)	2	0.83	0.37	0.85	0.35	-0.01	2.54



ตารางที่ 49 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า TA เฉลี่ยจากทั้งผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่าน							
การปรับแต่ง	5	0.88	0.30	0.83	0.33	0.03	2.42
S(17)	4	0.85	0.32	0.82	0.33	0.04	2.42
D ₁ (17)	5	0.87	0.30	0.85	0.30	0.04	2.66
D ₂ (17)	3	0.86	0.31	0.86	0.30	0.05	2.66
SNV	6	0.89	0.28	0.88	0.29	0.03	2.76
SNV+S(17)	6	0.87	0.29	0.86	0.30	0.02	2.66
SNV+ D ₁ (17)	4	0.87	0.29	0.85	0.31	0.04	2.58
SNV+D ₂ (17)	3	0.86	0.31	0.86	0.30	0.05	2.66
MSC	6	0.90	0.26	0.86	0.30	0.02	2.66
MSC+S(17)	6	0.87	0.29	0.86	0.30	0.02	2.66
MSC+D ₁ (17)	4	0.87	0.29	0.85	0.31	0.04	2.58
MSC+D ₂ (17)	3	0.86	0.31	0.86	0.30	0.05	2.66



ตารางที่ 50 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า pH ที่ตำแหน่งไหล่ผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	5	0.90	0.43	0.89	0.44	0.10	3.05
S(17)	3	0.86	0.50	0.87	0.48	0.10	2.79
D ₁ (17)	2	0.88	0.46	0.89	0.45	0.04	2.98
D ₂ (17)	1	0.88	0.46	0.88	0.46	0.04	2.91
SNV	5	0.90	0.42	0.88	0.46	0.03	2.91
SNV+S(17)	5	0.90	0.43	0.87	0.47	0.07	2.85
SNV+ D ₁ (17)	2	0.88	0.47	0.89	0.44	0.04	3.05
SNV+D ₂ (17)	4	0.90	0.43	0.90	0.43	0.06	3.12
MSC	3	0.87	0.49	0.88	0.47	0.05	2.85
MSC+S(17)	5	0.90	0.43	0.87	0.49	0.06	2.73
MSC+D ₁ (17)	2	0.88	0.47	0.89	0.44	0.04	3.05
MSC+D ₂ (17)	4	0.90	0.43	0.89	0.43	0.06	3.11



ตารางที่ 51 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า pH ที่ตำแหน่งแก้มผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	5	0.90	0.42	0.91	0.37	0.13	3.51
S(17)	5	0.88	0.46	0.89	0.41	0.14	3.17
D ₁ (17)	5	0.90	0.42	0.91	0.38	0.11	3.42
D ₂ (17)	4	0.90	0.40	0.90	0.40	0.10	3.25
SNV	6	0.92	0.38	0.91	0.38	0.07	3.42
SNV+S(17)	6	0.90	0.42	0.90	0.41	0.10	3.17
SNV+ D ₁ (17)	4	0.89	0.43	0.90	0.39	0.11	3.33
SNV+D ₂ (17)	5	0.91	0.39	0.91	0.39	0.07	3.33
MSC	5	0.90	0.42	0.90	0.39	0.11	3.33
MSC+S(17)	6	0.90	0.42	0.90	0.41	0.10	3.17
MSC+D ₁ (17)	4	0.89	0.43	0.90	0.40	0.11	3.25
MSC+D ₂ (17)	2	0.89	0.44	0.88	0.44	0.12	2.95



ตารางที่ 52 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า pH ที่ตำแหน่งปลายผลของมะม่วง
น้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	5	0.91	0.42	0.83	0.56	0.07	2.43
S(17)	5	0.89	0.44	0.85	0.52	0.04	2.62
D ₁ (17)	3	0.89	0.45	0.83	0.56	0.08	2.43
D ₂ (17)	2	0.89	0.45	0.82	0.58	0.06	2.34
SNV	5	0.92	0.39	0.87	0.49	0.06	2.77
SNV+S(17)	5	0.91	0.42	0.84	0.54	0.08	2.52
SNV+ D ₁ (17)	2	0.86	0.51	0.85	0.53	0.05	2.56
SNV+D ₂ (17)	2	0.88	0.47	0.82	0.57	0.05	2.39
MSC	7	0.93	0.36	0.86	0.51	0.08	2.67
MSC+S(17)	6	0.92	0.38	0.84	0.53	0.10	2.57
MSC+D ₁ (17)	2	0.86	0.52	0.84	0.54	0.05	2.52
MSC+D ₂ (17)	2	0.88	0.48	0.82	0.57	0.05	2.39



ตารางที่ 53 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า pH เฉลี่ยจากทั้งผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	8	0.94	0.33	0.92	0.38	-0.02	3.50
S(17)	7	0.92	0.37	0.91	0.40	-0.00	3.33
D ₁ (17)	5	0.92	0.37	0.90	0.42	-0.01	3.17
D ₂ (17)	3	0.92	0.38	0.90	0.43	0.01	3.09
SNV	5	0.92	0.37	0.91	0.40	-0.03	3.33
SNV+S(17)	6	0.92	0.38	0.90	0.42	-0.02	3.17
SNV+ D ₁ (17)	4	0.92	0.39	0.88	0.45	-0.01	2.96
SNV+D ₂ (17)	4	0.92	0.38	0.90	0.43	0.00	3.09
MSC	7	0.93	0.35	0.91	0.39	-0.03	3.41
MSC+S(17)	6	0.92	0.38	0.90	0.42	-0.01	3.17
MSC+D ₁ (17)	4	0.91	0.39	0.88	0.45	-0.01	2.96
MSC+D ₂ (17)	4	0.92	0.38	0.90	0.43	0.00	3.09



ตารางที่ 54 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ตำแหน่งไหล่ผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		96		47			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	7	0.81	1.21	0.82	1.15	-0.11	2.39
S(17)	6	0.80	1.24	0.82	1.16	-0.17	2.37
D ₁ (17)	3	0.79	1.28	0.81	1.18	-0.16	2.33
D ₂ (17)	5	0.81	1.21	0.84	1.08	-0.12	2.55
SNV	4	0.78	1.31	0.80	1.22	-0.11	2.25
SNV+S(17)	6	0.80	1.24	0.82	1.15	-0.15	2.39
SNV+ D ₁ (17)	3	0.78	1.30	0.81	1.21	-0.08	2.27
SNV+D ₂ (17)	4	0.79	1.26	0.83	1.14	-0.13	2.41
MSC	4	0.77	1.33	0.81	1.19	-0.16	2.31
MSC+S(17)	4	0.76	1.35	0.79	1.24	-0.17	2.22
MSC+D ₁ (17)	3	0.78	1.30	0.81	1.20	-0.10	2.29
MSC+D ₂ (17)	4	0.79	1.27	0.82	1.14	-0.14	2.41



ตารางที่ 55 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ตำแหน่งแก้มผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		96		47			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	4	0.82	1.49	0.79	1.55	0.13	2.21
S(17)	6	0.85	1.37	0.78	1.60	0.08	2.14
D ₁ (17)	2	0.83	1.45	0.75	1.70	0.06	2.01
D ₂ (17)	2	0.84	1.41	0.82	1.46	-0.20	2.34
SNV	3	0.80	1.57	0.77	1.64	-0.17	2.09
SNV+S(17)	4	0.83	1.43	0.76	1.68	0.02	2.04
SNV+ D ₁ (17)	2	0.84	1.38	0.77	1.63	-0.26	2.10
SNV+D ₂ (17)	6	0.87	1.26	0.79	1.56	-0.20	2.19
MSC	6	0.86	1.30	0.77	1.65	-0.13	2.07
MSC+S(17)	3	0.78	1.66	0.75	1.70	-0.12	2.01
MSC+D ₁ (17)	2	0.84	1.39	0.70	1.85	-0.32	1.85
MSC+D ₂ (17)	6	0.87	1.26	0.79	1.55	-0.24	2.21



ตารางที่ 56 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของปริมาณเบต้าแคโรทีนที่ตำแหน่งปลายผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		96		47			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	3	0.75	1.81	0.76	1.67	-0.31	2.10
S(17)	6	0.82	1.54	0.82	1.49	-0.11	2.35
D ₁ (17)	7	0.83	1.46	0.80	1.55	-0.12	2.26
D ₂ (17)	4	0.82	1.53	0.74	1.77	-0.10	1.98
SNV	6	0.82	1.52	0.82	1.48	-0.06	2.36
SNV+S(17)	6	0.81	1.57	0.81	1.54	-0.04	2.27
SNV+ D ₁ (17)	3	0.81	1.56	0.79	1.60	-0.19	2.19
SNV+D ₂ (17)	6	0.84	1.43	0.66	2.02	0.02	1.73
MSC	5	0.81	1.55	0.81	1.53	-0.03	2.29
MSC+S(17)	9	0.84	1.43	0.79	1.60	-0.19	2.19
MSC+D ₁ (17)	6	0.82	1.51	0.81	1.54	-0.08	2.27
MSC+D ₂ (17)	7	0.85	1.40	0.78	1.62	0.02	2.16



ตารางที่ 57 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของปริมาณเบต้าแคโรทีนเฉลี่ยจากทั้งผลของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองได้จากการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิค HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		96		74			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับแต่ง	5	0.85	1.25	0.87	1.13	0.14	2.80
S(17)	5	0.85	1.25	0.87	1.13	0.13	2.80
D ₁ (17)	2	0.82	1.38	0.83	1.29	0.01	2.45
D ₂ (17)	3	0.84	1.28	0.85	1.21	0.07	2.61
SNV	4	0.84	1.30	0.85	1.21	0.08	2.61
SNV+S(17)	4	0.82	1.36	0.86	1.18	0.10	2.68
SNV+ D ₁ (17)	6	0.85	1.25	0.88	1.11	0.03	2.85
SNV+D ₂ (17)	6	0.86	1.20	0.76	1.53	0.30	2.07
MSC	4	0.84	1.31	0.86	1.20	0.05	2.63
MSC+S(17)	6	0.84	1.27	0.86	1.19	0.06	2.66
MSC+D ₁ (17)	7	0.85	1.24	0.87	1.12	0.05	2.82
MSC+D ₂ (17)	6	0.86	1.20	0.82	1.32	0.24	2.39



ตารางที่ 58 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า RPI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ใช้
สเปกตรัมด้าน A ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิคการ HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่าน การปรับแต่ง	4	0.90	0.63	0.90	0.61	-0.03	3.15
S(17)	4	0.88	0.68	0.81	0.63	-0.07	3.05
D ₁ (17)	2	0.87	0.71	0.90	0.61	0.08	3.15
D ₂ (17)	2	0.91	0.57	0.88	0.66	0.07	2.91
SNV	7	0.94	0.49	0.92	0.55	-0.02	3.49
SNV+S(17)	4	0.89	0.64	0.89	0.64	0.05	3.00
SNV+ D ₁ (17)	2	0.89	0.63	0.89	0.64	0.08	3.00
SNV+D ₂ (17)	2	0.90	0.61	0.88	0.67	0.07	2.87
MSC	3	0.92	0.56	0.89	0.62	0.10	3.10
MSC+S(17)	4	0.89	0.65	0.89	0.64	0.07	3.00
MSC+D ₁ (17)	2	0.89	0.64	0.89	0.65	0.08	2.95
MSC+D ₂ (17)	2	0.90	0.62	0.87	0.68	0.07	2.82



ตารางที่ 59 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า RPI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ใช้
สเปกตรัมด้าน B ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิคการ HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่าน							
การปรับแต่ง	4	0.87	0.71	0.87	0.69	-0.10	2.78
S(17)	5	0.90	0.62	0.90	0.63	-0.04	3.05
D ₁ (17)	2	0.84	0.77	0.87	0.69	0.03	2.78
D ₂ (17)	1	0.87	0.69	0.87	0.69	0.02	2.78
SNV	4	0.90	0.60	0.90	0.62	0.06	3.10
SNV+S(17)	5	0.91	0.60	0.91	0.58	0.03	3.31
SNV+ D ₁ (17)	2	0.87	0.71	0.91	0.57	-0.00	3.37
SNV+D ₂ (17)	2	0.94	0.64	0.89	0.64	0.05	3.00
MSC	5	0.91	0.60	0.88	0.66	0.06	2.91
MSC+S(17)	5	0.90	0.60	0.90	0.59	0.01	3.25
MSC+D ₁ (17)	2	0.85	0.76	0.91	0.58	-0.01	3.31
MSC+D ₂ (17)	2	0.89	0.64	0.89	0.64	0.05	3.00



ตารางที่ 60 วิธีปรับแต่งสเปกตรัม และค่าทางสถิติของค่า RPI ในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ใช้
สเปกตรัมด้าน A และ B ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบด้วยเทคนิคการ HSI

ปรับแต่งสเปกตรัม	LV	สมการเทียบมาตรฐาน		สมการทวนสอบ			RPD
		R ²	SEC	R ²	SEP	Bias	
จำนวนตัวอย่าง		126		62			
สเปกตรัมที่ไม่ผ่าน การปรับแต่ง	4	0.90	0.63	0.90	0.60	-0.07	3.20
S(17)	4	0.89	0.64	0.90	0.60	-0.08	3.20
D ₁ (17)	2	0.87	0.70	0.90	0.61	0.06	3.15
D ₂ (17)	2	0.91	0.58	0.89	0.63	0.05	3.05
SNV	6	0.93	0.51	0.92	0.53	-0.01	3.62
SNV+S(17)	6	0.93	0.53	0.92	0.53	-0.01	3.62
SNV+ D ₁ (17)	2	0.89	0.64	0.92	0.56	0.04	3.43
SNV+D ₂ (17)	2	0.90	0.60	0.89	0.63	0.07	3.05
MSC	3	0.86	0.72	0.91	0.59	-0.02	3.25
MSC+S(17)	5	0.92	0.55	0.91	0.56	0.01	3.43
MSC+D ₁ (17)	2	0.89	0.65	0.91	0.56	0.03	3.43
MSC+D ₂ (17)	2	0.90	0.61	0.89	0.63	0.07	3.05





ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล นางสาวนิมิตรา ไชยรัตน์โชติ
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 356 หมู่ 10 ตำบลอุ้มทอง อำเภอบัวทอง จังหวัดสุพรรณบุรี 72160
โทรศัพท์ 094 – 2564962

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2550 – 2553 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
พ.ศ.2556 – ปัจจุบัน กำลังศึกษาต่อปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

การนำเสนอผลงาน

- นำเสนอผลงานในหัวข้อเรื่อง “การใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ และเทคนิคภาพถ่ายสเปกตรัมในการติดตามคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง” ในการประชุมวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 12 วันที่ 16 - 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2557 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่ (บรรยาย)
- นำเสนอผลงานในหัวข้อเรื่อง “อิทธิพลของตำแหน่งการวัดบนผลมะม่วงต่อความแม่นยำในการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ด้วยเทคนิค-สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้” ในการประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 5 เรื่อง “การศึกษาเชิงสร้างสรรค์” วันที่ 16 - 17 กรกฎาคม พ.ศ.2558 ณ ศูนย์มานุษยวิทยาสิรินธร (องค์การมหาชน) ตลิ่งชัน กรุงเทพมหานคร (บรรยาย)