

การตรวจสอบความสุกของส้มโอบนต้นด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ย โดยวิธีหาค่าเฉลี่ย ด้วย
เทคนิค Near Infrared Spectroscopy

NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF PUMMSLO
(KAO NUMPUNG VARIETY) MATURITY BY NEAR INFRARED
SPECTROSCOPIC TECHNIQUE

จรูญพงศ์ เทียมประทีป

CHAROONPONG THEAMPRADEEP

วิทยานิพนธ์ที่เป็นส่วนหนึ่งของงานที่ดำเนินการโดยกรมส่งเสริมการเกษตร
สาขาวิชาสัตวศาสตร์

สัตวศาสตร์

ฉบับที่ 100/2552

พ.ศ. 2552

KMUTL - 2009 - UM - M - 100 - 049

การตรวจสอบความบิรูรณ์ของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง โดยวิธีแบบไม่ทำลาย ด้วย
เทคนิค Near Infrared Spectroscopy

NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF PUMMELO
(KAO NUMPUNG VARIETY) MATURITY BY NEAR INFRARED
SPECTROSCOPIC TECHNIQUE



จรูญพงศ์ เทียมประทีป
CHAROONPONG THEAMPRATEEP

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 105136
วันเดือนปี..... 16 พ.ย. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2552

KMITL-2009-EN-M-100-049

**NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF PUMMELO
(KAO NUMPUNG VARIETY) MATURITY BY NEAR INFRARED
SPECTROSCOPIC TECHNIQUE**

CHAROONPONG THEAMPRATEEP

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

2009

KMITL-2009-EN-M-100-049

COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งโดยวิธีแบบไม่ทำลาย ด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy

Thesis Title Nondestructive Evaluation of Pummelo (Kao Numpung Variety) Maturity by near Infrared Spectroscopic Technique

นักศึกษา นายจรูญพงศ์ เทียมประทีป

รหัสประจำตัว 49061253

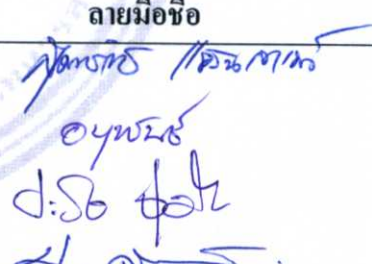
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.ศุมาพร เกษมสำราญ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-100-049

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.สุตาภัทร	แคว้นเขาเม็ง	
รศ.ดร.อนุพันธ์	เทอดวงศ์วรกุล	
ดร.ประสันต์	ชุ่มใจหาญ	
รศ.ดร.ปานมนัส	ศิริสมบูรณ์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 11.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้ง โดยวิธีแบบไม่ทำลาย ด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy
นักศึกษา	นายจรูญพงศ์ เทียมประทีป
รหัสประจำตัว	49061253
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ปานมนัส ศิริสมบุญ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้ง โดยวิธีแบบไม่ทำลาย ด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 633-961 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง FQA NIR GUN ในการตรวจวัดสเปกตรัมจากผิวผลและเนื้อส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้ง ที่ 5 อายุการเก็บเกี่ยว ได้แก่ 180 190 200 210 และ 220 วันหลังจากดอกบาน นอกจากนี้ยังทำนายสมบัติทางกายภาพ และชีวเคมีจากผล และเนื้อส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้งเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกันพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต น้ำหนัก และปริมาตรของผลส้มโอ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการเก็บเกี่ยว แต่ค่าความหนาแน่นของผลส้มโอมีค่อนข้างคงที่ ส่วนการเปลี่ยนแปลงของสีผิวผลส้มโอ ค่า L^* หรือความสว่างเพิ่มขึ้น ค่า a^* มีสีเขียวจางลง และ b^* มีสีเหลืองเพิ่มขึ้น ส่วนการตรวจวัดเนื้อส้มโอแบบ Puncture test เฉพาะตรงจุดที่ตรวจวัด พบว่าค่า Initial firmness Average firmness Strength of membrane และ Penetrating energy in Albedo มีแนวโน้มลดลง ต่างกับค่า Bioyield distance Rupture distance Bioyield force Toughness และ Penetrating energy in flesh มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า Rupture force, Penetrating force in Albedo และ Penetrating force in flesh มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ส่วนการตรวจวัดเนื้อส้มโอแบบ Plate Compression test ค่า Initial firmness และ Average firmness มีแนวโน้มค่อยๆลดลง ตามอายุการเก็บเกี่ยว ต่างกับค่า Energy absorption และ Deformation ratio มีแนวโน้มค่อยๆเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า Degree of elasticity และ Relaxation ratio มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย การวิเคราะห์ภาพถ่ายของเปลือกส้มโอค่า Percentage of area of oil gland และ Average area of one oil gland มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ Density of oil glands มีแนวโน้มค่อยๆลดลง

การวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและชีวเคมีของเนื้อส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้งตามอายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ พบผลดังต่อไปนี้ เนื้อส้มโอมีสีชมพูค่อยๆเข้มขึ้นตามอายุการเก็บเกี่ยวโดยค่า L^*

หรือความสว่างลดลง ค่า a^* มีสีแดงเพิ่มขึ้น และ b^* มีสีเหลืองจางลง ส่วนการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสโดยการทดสอบแบบ Puncture test พบว่า Initial firmness, Max force, Average force และ Toughness มีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีค่าลดลงในช่วง 4 อายุการเก็บเกี่ยวแรก และเพิ่มขึ้นในช่วงอายุการเก็บเกี่ยวที่ 5 ส่วนปริมาณกรดมีค่าลดลงตามอายุการเก็บเกี่ยว

จากการสังเกตสเปกตรัมที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว พบว่า สเปกตรัมของผิวผลส้มโอมีความยาวคลื่นที่มีการดูดซับคลื่นมากที่สุดที่ 970 นาโนเมตร และหลังจากจัดการสเปกตรัมด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สองพบช่วงคลื่นที่มีการดูดซับคลื่นมากที่สุดที่ 960-965 นาโนเมตร ส่วนลักษณะสเปกตรัมของเนื้อผลส้มโอมีช่วงคลื่นที่มีการดูดซับคลื่นมากที่สุดได้แก่ 680 และ 970 นาโนเมตร และหลังจากจัดการสเปกตรัม ด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สองพบช่วงคลื่นที่มีการดูดซับคลื่นมากที่สุดได้แก่ 652 738 832 956 และ 990 nm

จากผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Near Infrared Spectroscopy) พบว่าในการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวด้วยสเปกตรัมผิวเปลือกส้มโอที่ความยาวคลื่น 633-961 นาโนเมตร ให้ผลดีกว่าช่วง 400-700 นาโนเมตร และควรใช้แบบจำลองทุกอายุการเก็บเกี่ยวที่ความยาวคลื่น 633-961 นาโนเมตร ในการคัดแยก โดยใช้วิธี SIMCA ในการคัดแยกกลุ่มเดียวกันกับแบบจำลอง ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงกว่า 98.33 % และวิธี PLS-DA ในการคัดแยกต่างกลุ่มกันกับแบบจำลอง ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสูงกว่า 100 %

ผลการสร้างสมการทำนายค่าความสัมพันธ์ ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับเปอร์เซ็นต์พื้นที่ผิวของต่อมน้ำมัน ค่าความหนาแน่นของต่อมน้ำมัน ค่าปริมาณกรดที่ใดเดรทได้ แรงที่แทงทะลุเยื่อหุ้มเนื้อ ค่าแรงที่แทงทะลุเยื่อหุ้มเนื้อเฉลี่ย และค่าความเหนียวของเยื่อหุ้มเนื้อนอกพบว่าวิธีการทำนายที่ใช้ไม่สามารถทำนายได้แม่นยำ ($r = (-0.05)-0.70$) ส่วนการทำนายค่าของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ พบว่าแบบจำลองที่พัฒนามาจากสเปกตรัมของ Multiplicative Scatter Correction (MSC) สามารถใช้ประมาณค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ได้ โดย ได้ค่า $r=0.87$ SEP=0.35 และ Bias=-0.051

Thesis	Nondestructive Evaluation of Pummelo (Kao Numpung Variety) Maturity By Near Infrared Spectroscopic Technique.
Student	Mr. Charoonpong Theamprateep
Student ID	49061253
Degree	Master of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Panmanas Sirisomboon

ABSTRACT

The objective of this research was to study the possibility of nondestructive evaluation of pummelo (Kao Numpung Variety) maturity by near infrared spectroscopic technique at wavelength between 633-961 nanometers by an instrument FQA NIR GUN using spectra from peel of intact fruit and from fresh cut of pummeloes at 5 different maturity of 180, 190, 200, 210 and 220 days after flower blooming. In addition, the determination of physical and biochemical properties of intact fruits and fresh cut were predicted with the comparison of the values from reference laboratory.

From the study of physical properties of intact pummeloes, the results showed that the geometric mean diameter, weight and volume of pummeloes increased with maturities, but the density remained the same. For the color of fruit peel, the L^* increased, a^* which indicated green color decreased and b^* which indicated yellow color increased. The results from puncture test, which indicates the textural properties at specific point, showed that initial firmness, average firmness, strength of membrane which covered flesh and penetrating energy in albedo decreased with maturities and bioyield distance, rupture distance, penetrating energy in flesh and toughness increased, while rupture force, penetrating force in albedo, and penetrating force in flesh had a little change. The results from plate compression test, which indicates the response of whole fruit, showed that initial firmness and average firmness decreased with maturities and energy absorption and deformation ratio increased while degree of elasticity and relaxation ratio had a little change. The results from an analysis of peel image showed that the percentage of area of oil gland and average area of one oil gland increased with maturities, but the density of oil glands tended to decrease.

The determination of physical and biochemical properties of flesh of kao numpung pummelo at different maturities showed the following: The pummelo flesh increased the intensity of pink with maturities, L^* increased, a^* increased and b^* decreased with maturities. The results from puncture test showed that, initial firmness, max force, average force and toughness tended to decrease. The soluble solids decreased in the first four maturities and increased in the final maturity while the titratable acidity decreased with maturities

The raw spectra of intact pummelo at 5 different maturities showed the peak at 970 nanometer and the second derivative spectra showed the same peak around 960-965 nanometers. The raw spectra of flesh of pummelo showed the peaks at 680 and 970 nanometers and the second derivative spectra revealed more peaks at 652, 738, 832, 956 and 990 nanometers.

The results of maturity classification by near infrared spectroscopy indicated that using of spectra at 633-961 nanometers gave a better result than at 400-700 nanometers. It recommended to use every maturity models developed from spectra at 633-961 nanometers in classification by SIMCA for self-prediction which provide the percentage of correctness of 98.33 and PLS-DA for other group prediction which provide the percentage of correctness of 100

The calibration models, which related the absorbance variables to dependent variables, the percentage of area of oil gland, density of oil gland, titratable acidity, max force, average force and toughness, could not accurately predict those dependent variables ($r = (-0.05)-0.70$). However, the model developed from multiplicative scatter correction (MSC) could fairly predict the soluble solids $r=0.87$ $SEP=0.35$ and $Bias=-0.051$

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.ดร. ปานมนัส สิริสมบูรณ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์, ดร. สุมาพร เกษมสำราญ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ่งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสองท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือ ตลอดจนข้อมูล และหนังสือต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จรูญพงศ์ เทียมประทีป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูปภาพ.....	X
คำศัพท์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สัมไอ.....	5
2.2 ดัชนีความบริสุทธิ์แบบต่างๆ.....	9
2.3 คุณสมบัติเชิงแสงของผลผลิตการการเกษตร.....	13
2.4 หลักการพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้.....	16
2.5 หลักการพื้นฐานของเครื่อง Near Infrared Spectroscopy.....	17
2.6 การแปลงข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ (Pretreatment of spectral data).....	19
2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลจาก Near Infrared spectral.....	23
2.8 เทอมที่จำเป็นในการประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของโมเดล.....	27
2.9 การแบ่งกลุ่มด้วยสมบัติการดูดกลืนแสง.....	35
2.10 ประโยชน์ของเทคนิค NIR.....	36
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	38
3.1 การเตรียมผลส้มโอสำหรับศึกษา.....	38
3.2 การศึกษาตรวจสอบสมบัติภายนอกของผลส้มโอ.....	39
3.3 การศึกษาตรวจสอบสมบัติภายในของเนื้อส้มโอ.....	45
3.4 การศึกษาวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	50
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	53
4.1 ผลการตรวจวัดสมบัติของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง.....	53
4.2 ผลการตรวจสมบัติทางกายภาพและชีวเคมีของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง.....	63
4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม.....	66
4.4 ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง.....	72
4.5 ผลการทำนายสมบัติภายนอกและภายในที่มีการเปลี่ยนแปลงตาม อายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง.....	85
บทที่ 5 สรุปและเสนอแนะ.....	103
5.1 สรุปผลการตรวจวัดสมบัติของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง.....	103
5.2 สรุปผลการตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ และชีวเคมีของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง.....	104
5.3 สรุปผลการวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม.....	104
5.4 สรุปผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัม.....	105
5.5 สรุปผลการสร้างสมการทำนายค่าการเปลี่ยนแปลงตามอายุการเก็บเกี่ยวของ ส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง.....	105
5.6 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัย.....	106
บรรณานุกรม.....	107
ภาคผนวก.....	112
ภาคผนวก ก. การตรวจวัดสมบัติของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง.....	113
ภาคผนวก ข. การตรวจสมบัติทางกายภาพ และชีวเคมีของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง.....	139

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค. การคำนวณค่า Texture.....	149
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	153
ประวัติผู้เขียน.....	166

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	6
2.2	8
2.3	13
2.4	17
2.5	19
2.6	28
2.7	29
2.8	30
2.9	34
4.1	74
4.2	75
4.3	78
4.4	79
4.5	82
4.6	83
4.7	85
4.8	88
4.9	94
4.10	100

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแสงสว่างและผลไม้.....	14
2.2 ตำแหน่งที่สัมพันธ์กัน สำหรับการวัดแบบสะท้อนกลับ.....	15
2.3 ตำแหน่งที่สัมพันธ์กัน สำหรับการวัดแบบทะลุผ่าน.....	15
2.4 ตำแหน่งที่สัมพันธ์กัน สำหรับการวัดแบบส่งผ่านส่วนหนึ่งของตัวอย่าง.....	16
2.5 การกระทำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารต่างๆ.....	18
2.6 ขนาด Segment และ Gap ที่กำหนดในสเปกตรัมเพื่อคำนวณ Derivative.....	20
2.7 สเปกตรัม และ Second derivative ของสเปกตรัม.....	22
2.8 NIR สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect ก่อนการปรับแก้ด้วย MSC.....	22
2.9 NIR สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect หลังการปรับแก้ด้วย MSC.....	23
2.10 ตัวอย่างของประเภทความชัน.....	31
3.1 การผูกแตก และผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งสำหรับการทดลอง.....	38
3.2 ขั้นตอนต่างๆ ในการทดลอง.....	38
3.3 กำหนดตำแหน่งที่ตรวจวัด และการตรวจวัดด้วยเครื่อง FQA NIR GUN.....	39
3.4 การวัดขนาด และการชั่งน้ำหนักผลส้มโอ.....	40
3.5 การวัดสีผิวส้มโอด้วยเครื่องวัดสี แบบ Spectrophotometer.....	41
3.6 การตรวจวัดปริมาตร และความหนาแน่นของผลส้มโอ.....	42
3.7 การตรวจแบบ Puncture Test และแบบ Plate Compression Test.....	44
3.8 ลักษณะเปลือก และการถ่ายภาพต่อมน้ำมันที่ผิวของผลส้มโอ.....	45
3.9 การปอกส้มโอ และการจัดวาง.....	45
3.10 การตรวจวัดเนื้อส้มโอด้วยเครื่อง FQA NIR GUN.....	46
3.11 การวัดสีของเนื้อส้มโอด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab.....	47
3.12 การวัดเนื้อสัมผัสของเนื้อส้มโอแบบ Puncture Test.....	48
3.13 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอ.....	48
3.14 การวัดหาปริมาณกรดในน้ำส้มโอ.....	50
4.1 การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต.....	54
4.2 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก และปริมาตรของผลส้มโอ.....	54
4.3 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของผลส้มโอ.....	55
4.4 การเปลี่ยนแปลงสีผิวผลส้มโอ.....	55

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.5 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อเฉพาะตรงจุดที่ทดลอง.....	56
4.6 การเปลี่ยนแปลงระยะทางการยุบของเปลือกเฉพาะตรงจุด.....	57
4.7 การเปลี่ยนแปลงแรงที่ใช้ในการกดแทงทะลุผลส้มโอเฉพาะตรงจุด.....	58
4.8 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ในการแทงทะลุผลส้มโอเฉพาะตรงจุด.....	59
4.9 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อ และการดูดซับพลังงานของผลส้มโอ.....	60
4.10 การเปลี่ยนแปลงค่าระดับความยืดหยุ่นและอัตราส่วนการคลายเครียดของผลส้มโอ.....	60
4.11 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการเปลี่ยนรูปร่างของผลส้มโอ.....	61
4.12 การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์พื้นที่ และความหนาแน่นของต่อมน้ำมันในพื้นที่ผิวเปลือก.....	62
4.13 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ต่อมน้ำมันของผิวเปลือกส้มโอ.....	62
4.14 การเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อส้มโอตามอายุการเก็บเกี่ยว.....	63
4.15 การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของเนื้อส้มโอตามอายุการเก็บเกี่ยว.....	64
4.16 การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของเนื้อส้มโอตามอายุการเก็บเกี่ยว (ต่อ).....	64
4.17 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอตามอายุการเก็บเกี่ยว.....	65
4.18 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดที่ไคเตรทได้ของน้ำส้มโอตามอายุการเก็บเกี่ยว.....	65
4.19 สเปกตรัมดั้งเดิมของผิวผลส้มโอ.....	67
4.20 สเปกตรัมที่ได้จาก Savizky-Golay second differentiation ที่ derivative..... segment 10 nm ของผิวผลส้มโอ	67
4.21 สเปกตรัมที่ได้จาก Savizky-Golay second differentiation ที่ derivative..... segment 20 nm ของผิวผลส้มโอ	68
4.22 สเปกตรัมดั้งเดิมของเนื้อส้มโอห่อหุ้มฟิล์ม.....	69
4.23 สเปกตรัมที่ได้จาก Savizky-Golay second differentiation ที่ derivative..... segment 10 nm ของเนื้อส้มโอห่อหุ้มฟิล์ม	70
4.24 สเปกตรัมที่ได้จาก Savizky-Golay second differentiation ที่ derivative..... segment 20 nm ของเนื้อส้มโอห่อหุ้มฟิล์ม	70
4.25 สเปกตรัมดั้งเดิมของเนื้อส้มโอ.....	71
4.26 สเปกตรัมที่ได้จาก Savizky-Golay second differentiation ที่ derivative..... segment 10 nm ของเนื้อส้มโอ	71

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.27	สเปกตรัมที่ได้จาก Savizky-Golay second differentiation ที่ derivative.....72
	segment 20 nm ของเนื้อส้มโอ
4.28	ความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้กับค่าที่ทำนาย (a) ของความหนาแน่น.....89
	ของต่อมน้ำมัน และ (b) ของเปอร์เซ็นต์พื้นผิวต่อมน้ำมัน
4.29	ค่า regression coefficient (a) ของความหนาแน่นของต่อมน้ำมัน และ.....90
	(b) ของเปอร์เซ็นต์พื้นผิวต่อมน้ำมัน
4.30	ค่า X-loading (a) ของความหนาแน่นของต่อมน้ำมัน.....91
	และ (b) ของเปอร์เซ็นต์พื้นผิวต่อมน้ำมัน
4.31	ความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้กับค่าที่ทำนาย.....95
	(a) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และ (b) ปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้
4.32	ค่า regression coefficient (a) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้.....96
	และ (b) ของปริมาณกรดที่ละลายได้
4.33	ค่า X-loading (a) ของปริมาณของแข็งที่ละลายได้.....97
	และ (b) ปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้
4.34	ความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้กับค่าที่ทำนาย.....101
	(a) ของแรงที่แทงทะลุเยื่อหุ้มเนื้อ และ (b) แรงที่แทงทะลุเยื่อหุ้มเนื้อ เฉลี่ย
4.35	ความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้กับค่าที่ทำนาย.....102
	(c)ความเหนียวของเยื่อหุ้มเนื้อ

คำศัพท์	ความหมาย
Geometric mean diameter : GMD	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต
Day after flower blooming	วันหลังจากดอกบาน
Physical properties	สมบัติทางกายภาพ
Puncture test	การตรวจวัดการรับแรงเฉพาะตรงจุดที่ตรวจวัด
Initial firmness	ความแน่นเนื้อเริ่มต้นเมื่อเริ่มรับแรง
Average firmness	ความแน่นเนื้อเฉลี่ยตั้งแต่เริ่มรับแรงจนถึงก่อนเปลือกทะลุ
Bioyield distance	ระยะทางชีวกลาจากจากการเริ่มต้นกดจนถึงจุดที่เซลล์ได้เปลือกแตกแต่เปลือกยังไม่ทะลุ
Rupture distance	ระยะทางที่กลีบเมื่อเปลือกแตก
Bioyield force	แรงที่ทำให้เกิดจุดชีวกลาหรือจุดที่เซลล์ได้ผิวแตก
Rupture force	แรงต้านทานการแทงทะลุเปลือก
Penetrating force in Albedo	แรงเฉลี่ยที่ใช้ในการแทงส่วนของเปลือกชั้นในสีขาวที่อยู่ระหว่างเปลือกชั้นนอกกับเยื่อหุ้มเนื้อ
Strength of membrane	ความเหนียวของเยื่อหุ้มเนื้อ
Penetrating force in flesh	แรงที่ใช้ในการแทงทะลุเนื้อ
Toughness	ความเหนียวของเปลือกชั้นนอก
Penetrating energy in Albedo	พลังงานที่ใช้ในการแทงผ่านเปลือกชั้นใน
Penetrating energy in flesh	พลังงานที่ใช้ในการแทงทะลุเนื้อ
Plate Compression test	การตรวจวัดการรับแรงของผล ไม้ทั้งผล
Energy absorption	พลังงานที่ผล ไม้ดูดซับเพื่อทำให้เกิดการเสียรูป
Degree of elasticity	ระดับความยืดหยุ่น
Relaxation ratio	อัตราส่วนการคลายเครียด
Deformation ratio	อัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง
Percentage of Area of oil gland	เปอร์เซ็นต์พื้นที่ต่อมน้ำมันต่อพื้นที่ผิว
Density of oil gland	ความหนาแน่นของต่อมน้ำมันหรือจำนวนต่อมน้ำมันต่อพื้นที่
Area of oil glands	พื้นที่ผิวต่อมน้ำมันบนผิวเปลือกส้มโอ
Soluble solid	ปริมาณของแข็งที่ละลายได้
Titatable acid	ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้

เกี่ยวข้องตามความต้องการของตลาดเพื่อให้ได้ราคาสูง แต่ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวอาจยังไม่สุกแก่หรืออาจจะสุกแก่มากเกินไป จนทำให้คุณภาพของส้มโอในการส่งออกไม่ดีเท่าที่ควร และส่วนใหญ่ยังมีปัญหาขาดแคลนเทคโนโลยีในการผลิตและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ทำให้ผลผลิตที่ได้ไม่ตรงกับมาตรฐานการส่งออก (กรมศุลกากร, 2549)

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเกษตรกรไม่สามารถเก็บเกี่ยวผลได้ตรงตามที่ต้องการทั้งหมด ต้องเกิดความผิดพลาดในการเก็บเกี่ยว โดยมีผลอ่อนหรือผลแก่เกินไปปะปนมาแน่นอน ซึ่งจะทำให้คุณภาพไม่ดีขึ้นไม่ได้ หรือหากถึงมือผู้บริโภคจะทำให้ถูกปฏิเสธในครั้งต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าเป็นสินค้าส่งออก ดังนั้นการคัดความบริสุทธิ์ (ความสุกแก่) ก่อนนำออกขายจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง แต่การใช้แรงงานคนก็ต้องการแรงงานที่มีความเชี่ยวชาญและต้องมีจำนวนมาก จึงจะทำงานเสร็จทันเวลาและผิดพลาดน้อย แต่ก็ไม่สามารถบอกคุณภาพภายใน เช่น ความหวาน หรือความเป็นกรด หรืออัตราส่วนความหวานต่อความเป็นกรด หรือเนื้อสัมผัส (Texture) ได้ ทำให้ต้องสุ่มผลส้มโอไปตรวจสอบคุณภาพโดยวิธีทำลายที่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญมาก ปัจจุบันมีหน่วยงานของรัฐเป็นผู้รับผิดชอบ ทำให้ต้องใช้เวลานาน และค่าใช้จ่ายที่สูง จึงทำให้มีผลส้มโอบางส่วนเสียหายระหว่างรอผลการตรวจคุณภาพเพื่อเป็นใบรับรองสำหรับการส่งออก

จากปัญหาดังกล่าว การตรวจคุณภาพวิธีแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด สเปกโตรสโคปีจึงมีความสำคัญ โดยในปัจจุบันการศึกษาเทคนิคดังกล่าวมาใช้ตรวจคุณภาพของผลไม้ต่างๆ ได้หลายชนิด เช่น ส้ม Florida (Miller and Zude-Sasse, 2004) แก้วมังกร (อาทิตย์ พวงสมบัติ, 2549) และชมพู (วัลย์พร เตียประสิทธิ์, 2548) เป็นต้น ซึ่งในต่างประเทศเทคนิคดังกล่าวเป็นที่ยอมรับกันมาหลายสิบปีแล้ว เช่น ในประเทศ ญี่ปุ่น เกาหลี เวียดนาม และกลุ่มสหภาพยุโรป เป็นต้น ดังนั้นการประเมินความบริสุทธิ์ของผลส้มโอโดยวิธีแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด สเปกโตรสโคปี โดยผู้วิจัยคาดว่าสามารถตรวจสอบความบริสุทธิ์ (ความสุกแก่) และคุณภาพภายใน (ความหวาน หรือความเป็นกรด เนื้อสัมผัส) ของส้มโอได้ ซึ่งทำให้เกษตรกรหรือผู้ส่งออกมั่นใจในคุณภาพของผลผลิตหรือสินค้าของตนได้ และสามารถขายได้ราคาดี เพิ่มรายได้ให้มากขึ้น ส่งผลให้สามารถแข่งขันกับผู้ผลิตรายอื่นในตลาดโลกได้ และผู้บริโภคก็มั่นใจว่าสินค้าที่ซื้อมามีคุณภาพดีแน่นอน ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนอกจากจะทำให้เศรษฐกิจของประเทศโดยรวมดีขึ้นแล้ว ยังนำประโยชน์สู่เกษตรกรซึ่งเป็นระดับฐานรากของประเทศ ตลอดจนยังเป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีใหม่สำหรับการเกษตรของไทย ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวนับวันยังมีราคาถูกลง เนื่องจากเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์มีราคาต่ำลง โดยการตรวจสอบเป็นแบบไม่ทำลาย ทำให้ตัวอย่างยังคงสามารถนำไปจำหน่ายได้ ทำงานได้รวดเร็ว ใช้แรงงานคนน้อย ไม่ต้องการความชำนาญพิเศษ และเป็นการตรวจคุณภาพที่มีระดับสูงสุด คือสามารถตรวจได้ทุกผล จึงเป็นการส่งเสริมสินค้าเกษตรให้มีการผลิตสำหรับการส่งออกเพิ่มขึ้นอีกทางหนึ่ง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาการแบ่งกลุ่มความบริสุทธิ์ของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง โดยวิธีไม่ทำลายด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพทั้งภายนอก และภายในของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่ระยะความบริสุทธิ์ต่างๆ โดยวิธีไม่ทำลาย ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี
3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและชีวเคมีของเนื้อส้มโอพร้อมบริโภคนในถาดหุ้มด้วยฟิล์มโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. สมบัติภายใน และภายนอกของผลส้มโอและเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งมีความสัมพันธ์กับสมบัติของสเปกตรัมช่วงคลื่นแสงที่มองเห็นได้ และช่วงเนียร์อินฟราเรด (600-1100 นาโนเมตร)
2. สมบัติของสเปกตรัมช่วงคลื่นแสงที่มองเห็นได้ และช่วงเนียร์อินฟราเรด (600-1100 นาโนเมตร) ของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ที่มีความแตกต่าง และสามารถใช้ในการแบ่งกลุ่มความบริสุทธิ์ของส้มโอได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่ระยะความบริสุทธิ์ต่างๆ 5 ช่วงอายุ และนำมาตรวจสอบคุณภาพภายใน ได้แก่ สีเนื้อ เนื้อสัมผัสของเนื้อ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และ ปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้ ส่วนภายนอกผลส้มโอ ได้แก่ พื้นที่ต่อม้ำมัน ความหนาแน่นต่อม้ำมัน และเปอร์เซ็นต์พื้นที่ต่อม้ำมันที่ผิวเปลือก สีผิวเปลือก เนื้อสัมผัสของผล ขนาด น้ำหนัก ปริมาตร และ ความหนาแน่นเนื้อของผลส้มโอ และการตรวจวัดสมบัติเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเครื่อง Near Infrared Spectrometer ที่มีการทำงานแบบ Reflectance ที่ช่วงคลื่น 600-1100 นาโนเมตร ที่ภายนอกผลส้มโอ และที่เนื้อส้มโอพร้อมบริโภคนในถาดที่หุ้มด้วยฟิล์ม (PVC)

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. การสุ่มตัวอย่างผลส้มโอจากสวน 5 ครั้ง ที่ระยะบริบูรณ์หลังคอกบาน 180, 190, 200, 210 และ 220 วัน โดยที่ระยะ 200 วัน เป็นอายุการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมเชิงการค้า
2. การตรวจสอบคุณภาพเชิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงแสงที่มองเห็น และ ช่วงเนียร์ฟราเรด (Near Infrared) ของผลส้มโอ ในช่วงคลื่น 600-1100 นาโนเมตร
3. การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของผลส้มโอ เช่น ขนาด น้ำหนัก สีผิว พื้นที่ต่อม้ำมันที่ยังความหนาแน่นของต่อม้ำมันที่ผิว เปอร์เซ็นต์พื้นที่ต่อม้ำมันที่ผิว ปริมาตร ความหนาแน่นเนื้อของผล และเนื้อสัมผัส

4. การตรวจสอบสมบัติเชิงกลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงแสงที่มองเห็น และ ช่วงเนียร์ฟราเรดของผลส้มโอ เนื้อส้มโอ และเนื้อส้มโอที่บรรจุในถาดโพลีเอทิลีน (PE) และ โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC)
5. การตรวจสอบคุณสมบัติภายใน เช่น สีเนื้อ เนื้อสัมผัส ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และ ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้
6. การสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของเนื้อส้มโอ กับสมบัติภายในของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง
7. การสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผลส้มโอ กับคุณภาพภายนอก ของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง
8. ใช้เทคนิค Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) และ Partial Least Square Discriminate Analysis (PLS-DA) เพื่อแบ่งกลุ่มของสเปกตรัมของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งตามอายุการเก็บเกี่ยวต่าง
9. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ส้มโอ

ส้มโอ (Pummelo) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Citrus maxima Merr.* อยู่ในวงศ์ RUTACEAE (มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ วิทยาเขตนครศรีธรรมราช, 2549) หรือ *C. grandis* (L.) Osbeck มีชื่อสามัญเรียกว่า pummelo หรือ shaddock เชื่อว่าส้มโอมีถิ่นกำเนิดในบริเวณคาบสมุทรมาลาโย รวมทั้งประเทศไทย และหมู่เกาะอินเดียตะวันออก เช่นเดียวกับพืชในสกุล Citrus และสกุลอื่นที่อยู่ในกลุ่มของส้มอีกหลายชนิด แล้วแพร่กระจายไปสู่อินเดียและจีนตอนใต้ (รวี เสฐฐักดิ์, 2523)

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ เป็นไม้ผลยืนต้นขนาดกลาง ลำต้นสีน้ำตาล มีการแตกกิ่งก้านสาขาเป็นพุ่ม และมีหนามเล็กๆ มีเรือนยอดสูงประมาณ 3-4 เมตร ใบมีขนาดใหญ่ รูป ovate-oblong จนถึง elliptic ยาว 4-6 นิ้ว ใบด้านบนสีเขียวเป็นมัน ด้านล่างสีเขียวอ่อน และมีขนอ่อนนุ่ม petiole มีใบค่อนข้างกว้าง ขอบใบเรียบหรือมีหยักเล็กน้อย ออกดอกที่ปลายกิ่งเป็นช่อแบบ axillary raceme จำนวน 10-20 ดอก บางครั้งออกเป็นดอกเดี่ยวๆ ก้านดอกยาว (รวี เสฐฐักดิ์, 2523) ผลส้มจัดเป็นผลแบบ berry ชนิด hesperidium ซึ่งเจริญมาจากส่วนของรังไข่โดยตรง มีจำนวนประมาณ 10 carpel (กลีบ) เชื่อมติดกันเป็นวงกลมล้อมรอบแกนกลาง (central axis) ส่วนของผนังรังไข่จะเปลี่ยนไปเป็น pericarp ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 ชั้น คือ exocarp มีชื่อเรียกพิเศษว่า flavedo มี oil gland อยู่เป็นจำนวนมาก mesocarp มีชื่อเรียกพิเศษว่า albedo และ endocarp จัดเป็นชั้นในสุดของ pericarp คือ carpel membrane ของกลีบผล เซลล์ผนังด้านในของชั้นนี้เมื่อมีการพัฒนาของผล จะมีการแบ่งเซลล์และขยายตัวออกกลายเป็น juice sac (กึ่ง) ทำหน้าที่เก็บสะสมน้ำตาล กรด และสารอาหารต่างๆ (คมจันทร์ สรวงจันทร์, 2548)

2.1.2 พันธุ์ส้มโอ การแบ่งอาจแบ่งกลุ่มพันธุ์ตามลักษณะการค้า ได้แก่ พันธุ์การค้าหลัก มี 6 พันธุ์ คือ ขาวพวง ขาวแป้น ขาวทองดี ขาวน้ำผึ้ง ขาวใหญ่ และขาวหอม ส่วนพันธุ์การค้าเฉพาะแห่งมี 6 พันธุ์ คือ ปัตตาเวีย ขาวแดงขาว ขาวแก้ว กรุ่น ท่าข่อย และบางขุนนนท์ (รักบ้านเกิด, 2549) ส่วนส้มโอที่ส่งออกและเป็นที่นิยมของตลาดต่างประเทศมีอยู่ 3 พันธุ์คือ พันธุ์ขาวหอม ขาวน้ำผึ้ง และขาวใหญ่ (ม.ป.น., 2549) โดยเฉพาะส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง ที่มีลักษณะผลใหญ่ ทรงผลกลมไม่มีจุก ก้นผลเรียบถึงเว้าเล็กน้อย ผิวมีสีเขียวเข้ม ต่อมาน้ำมันที่ผิวมีขนาดใหญ่ขึ้นเวลาจับที่ผิวจะรู้สึกแข็ง ส่วนเปลือกค่อนข้างหนา กึ่งลอกผนังกลีบออกได้ง่าย กึ่งมีสีเหลืองอ่อนถึงชมพูอ่อน ขนาดใหญ่เบียดกันแน่น เนื้อมีลักษณะแห้ง กรอบ รสออกหวานอมเปรี้ยว เมล็ดจำนวนน้อย ถ้าเป็นช่วงนอกฤดูจะไม่มีเมล็ด เป็นพันธุ์ที่ให้ผลผลิตทั้งปี ปลูกมากในเขตอำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม โดยกำลังเป็นที่นิยมของผู้บริโภคในปัจจุบัน แต่พื้นที่ปลูกยังมีน้อย ราคาจึงค่อนข้างสูง (กัลปพฤกษ์ ติละวัฒน์, 2534)

2.1.3 การปลูกส้มโอ สภาพพื้นที่ที่เหมาะสมคือ ในดินที่ระบายน้ำได้ดี มีค่า pH ประมาณ 5.5-6.6 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 1500-2000 มิลลิเมตร/ปี อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 25-30 องศาเซลเซียส โดยนิยมปลูกที่ระยะปลูก 6X6 เมตร ในช่วงต้นฤดูฝน เพื่อให้ต้นส้มโอตั้งตัวได้เร็ว จากนั้นดูแลรักษาด้วยการให้น้ำ 3-5 วัน/ครั้ง กำจัดวัชพืช และบำรุงด้วยปุ๋ยอินทรีย์ กับปุ๋ยวิทยาศาสตร์ 3-4 ครั้ง/ปีแล้วแต่ช่วงของการเจริญเติบโต ควรมีการตัดแต่งกิ่งกระโคง และกิ่งที่มีการทำลายของโรคแมลงออก หลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้ว จะทำให้มีทรงพุ่มที่ดี ออกดอกกระจายสม่ำเสมอ และยังช่วยลดการระบาดของศัตรูพืช เนื่องจากทำลายกิ่งที่มีโรค (ตลาดไท, 2549) สามารถปลูกได้ดีในดินเกือบทุกชนิดที่ระบายน้ำได้ดี ซึ่งปัจจุบันสามารถปลูกได้ทุกภาคของประเทศ โดยจะเริ่มให้ผลผลิตหลังจากการปลูกด้วยกิ่งตอนประมาณในปีที่ 4 ซึ่งจะให้ผลผลิตไม่ต่ำกว่า 15 ปี สามารถเก็บเกี่ยวผลแก่ได้ระหว่าง 240-250 วัน หลังจากดอกบาน ซึ่งจะอยู่ในช่วงปลายเดือนสิงหาคม-ตุลาคม สรุปดังตารางที่ 2.1 (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2549)

ตารางที่ 2.1 ปฏิทินการปฏิบัติดูแลและรักษาสวนส้มโอ

ช่วงเดือน	กิจกรรมในการปฏิบัติ
มกราคม-มีนาคม	ดูแลขอดอกที่เริ่มบานติดผลต้องให้น้ำสม่ำเสมอและฉีดยาป้องกันแมลง
เมษายน	เริ่มตัดแต่งผลอ่อนกำจัดวัชพืชและใส่ปุ๋ยคอกร่วมกับปุ๋ยสูตร 15-15-15
พฤษภาคม-มิถุนายน	ดูแลผลหลังจากตัดแต่ง โดยฉีดยาป้องกันและกำจัดแมลง
กรกฎาคม	ดูแลบำรุงผลโดยการใส่ปุ๋ยสูตร 13-13-21
สิงหาคม-ตุลาคม	งดให้น้ำ 1 สัปดาห์ ก่อนเริ่มเก็บเกี่ยวผลผลิต และใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15
พฤศจิกายน	ตัดแต่งกิ่ง ดูแลโดยการฉีดยาป้องกันโรคและกำจัดแมลง
ธันวาคม	เริ่มสร้างตาดอก ดูแลโดยให้น้ำปกติ และใส่ปุ๋ยสูตร 8-24-24

ที่มา : กรมส่งเสริมการเกษตร, 2549

2.1.4 การเก็บเกี่ยวผลส้มโอ การเก็บเกี่ยวผลส้มโอในปัจจุบันต้องสังเกตลักษณะผลคือ ผิวเปลือกจะเริ่มเปลี่ยนสีจากสีเขียวเข้มเป็นสีเขียวอมเหลือง และต่อมน้ำมันบริเวณก้นผลจะขยายใหญ่ห่างกันมากขึ้น (ตลาดไท, 2549) ซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์ ถึงแม้ผลของส้มโอจะมีเปลือกหนาห่อหุ้มอยู่ก็ต้องระมัดระวังไม่ให้ผลกระทบกระเทือนมากเพราะเนื้อของผลส้มโอมีน้ำเป็นส่วนประกอบหลักอาจจะทำให้ผลเกิดความเสียหายได้ (รักบ้านเกิด, 2549) โดยหลังการเก็บเกี่ยวผลส้มโอต้องคัดแบ่งขนาดผล และแยกผลที่มีตำหนิออก คือ ผลที่มีรอยช้ำและบาดแผลจากการเก็บเกี่ยว หรือผลที่มีการทำลายของโรคและแมลงออก แล้วทำความสะอาดผลโดยการล้างน้ำหรือใช้ผ้าสะอาดชุบน้ำแล้วเช็ดให้ทั่วทั้งผลเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและรอยคราบสารเคมีออกให้หมด หลังจาก

นั้นจึงให้แห้ง และถ้ามีการเคลือบผิวส้มโอด้วยไข ก็จะทำให้ผลส้มโอมีผิวสวยขึ้น และยังช่วยให้ขีดอายุของผลส้มโอได้นานขึ้น สภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผลส้มโอคือ ใช้อุณหภูมิประมาณ 13-15 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 90 % ทำให้ส้มโอคงสภาพคืออยู่ได้ประมาณ 2 เดือน ถ้าผลส้มโอที่มีการเคลือบไขสามารถเก็บในอุณหภูมิปกติได้ประมาณ 1 เดือน (ตลาดไท, 2549) จึงทำให้สามารถขนส่งผลส้มโอไปจำหน่ายในต่างประเทศได้

2.1.5 ประโยชน์ของส้มโอ ส้มโอเป็นผลไม้ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เกือบทุกส่วน ซึ่งในส่วนของเนื้อที่มีองค์ประกอบหลักคือน้ำ โดยกองอาหาร กรมอนามัยได้วิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารจากเนื้อส้มโอ 100 กรัม จะมีส่วนประกอบของ น้ำ 81 กรัม ค่าความร้อน 61 kcal ไขมัน 0.2 กรัม คาร์โบไฮเดรต 17.8 กรัม เยื่อใย 0.6 กรัม โปรตีน 0.5 กรัม แคลเซียม 0.21 กรัม ฟอสฟอรัส 0.18 กรัม เหล็ก 0.05 กรัม ไบโตามินเอ 10 หน่วย ไบโตามินบี1 0.002 กรัม ไบโตามินบี2 0.001 กรัม และไบโตามินซี 0.58 กรัม (รักบ้านเกิด, 2549) ส่วนเปลือกสามารถนำมาเชื่อมเป็นขนมหวานจนทำให้เป็นของฝากขึ้นชื่อของจังหวัดเพชรบุรีแล้ว ใบและผิวเปลือกยังมีสรรพคุณเป็นยาสมุนไพรอีกด้วย (มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา วิทยาลัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช, 2549)

2.1.6 มาตรฐานการผลิตส้มโอของประเทศไทย มาตรฐานสินค้าเกษตรที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จำแนกออกเป็นระดับแตกต่างกัน ได้แก่ มาตรฐานระดับบุคคล ระดับกลุ่ม ระดับประเทศ จนถึงมาตรฐานระหว่างประเทศ ในปัจจุบันประเทศไทยมีมาตรฐานสินค้าเกษตรระดับประเทศ ซึ่งดำเนินการโดยกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้แก่ มาตรฐานลำไย สับปะรดสำหรับโรงงานกล้วยไม้ ทุเรียน ข้าวหอมมะลิ เงาะ มะม่วง มังคุด ลิ้นจี่ ส้มเปลือกอ่อน ส้มโอ เป็นต้น การควบคุมคุณภาพเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาสินค้าเกษตรให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยการผลิตทางการเกษตรที่ถูกต้องและเหมาะสม (Good Agricultural Practice : GAP) เป็นแนวทางปฏิบัติงานในระบบการผลิตเพื่อให้ได้คุณภาพเป็นที่ยอมรับ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะมีความปลอดภัยทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค และไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีองค์ประกอบหลักๆ ได้แก่ การจัดการดิน การจัดการน้ำ การผลิตพืช การป้องกันกำจัดศัตรูพืช การเก็บเกี่ยว การแปรรูประดับฟาร์ม การเก็บรักษาผลผลิต การจัดการของเสีย สุวีติภาพ สุขภาพ และความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน รวมทั้งการอนุรักษ์ความหลากหลายของพันธุ์สัตว์ พันธุ์พืชและสภาพภูมิประเทศ (ชวนพิศ อรุณรังสิกุล, 2549) ซึ่งการผลิตส้มโอส่งออกจำเป็นต้องได้รับมาตรฐานการผลิต ใบรับรองแหล่งผลิตพืช (GAP) ในโครงการความปลอดภัยอาหาร (Food Safety) ด้านพืชจากกรมวิชาการเกษตรจึงจะสามารถส่งผลผลิตออกจำหน่ายต่างประเทศได้ และมีเกษตรกรอีกหลายรายทั้งรายเก่าและรายใหม่ที่กำลังปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้มาตรฐาน โดยกำหนดเกณฑ์ของส้มโอต้องเป็นผลส้มโอสดตัดขั้วขีดผล เนื้อแน่น มีขนาดรูปรอง(ตารางที่ 2.2) สี และรสชาติตรงตามพันธุ์ ไม่มีรอยดำหนิที่ชัดเจน ปลอดภัยจากศัตรูพืชและสารเคมี ไม่มีกลิ่น และรสชาติไม่ผิดปกติ (ทิพวรรณ ลิ้มงูร, 2546) ซึ่งต้องผ่านการเก็บเกี่ยวตามกระบวนการเก็บเกี่ยวขณะที่ผลสุกแก่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น

เพราะไม่เน่าเสียง่ายและเป็นคุณภาพที่ผู้บริโภคยอมรับได้ และมีประมาณความหวานไม่น้อยกว่า 8 องศาบริกซ์ แต่มีบ่อยครั้งที่เกษตรกรเก็บเกี่ยวที่ผลสุกแก่ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ทำให้รสชาติไม่ดี ส่งผลให้ไม่เป็นที่ยอมรับของตลาดจนต้องส่งคืนกลับประเทศ จึงทำให้เกษตรกรขาดทุน (วิทยา บัวเจริญ, 2546)

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดเรื่องขนาดตามมาตรฐานส้มโอส่งออก

ขนาด	น้ำหนัก(กรัม)	เส้นผ่านศูนย์กลาง(มม.)	เส้นรอบวง(นิ้ว)
1	>1700	156-170	>20
2	1501-1700	148-162	19.1-20
3	1301-1500	140-154	18.1-19
4	1101-1300	132-146	17.1-18
5	901-1100	123-138	16.1-17
6	700-900	116-129	14.1-16
7	<700	<112	<14

ที่มา:ทิพวรรณ ลิ้มงูร, 2546

2.1.8 ปัญหาในการผลิตส้มโอ ปัจจุบันการผลิตส้มโอส่งออกมักประสบปัญหาการทำลายของแมลงศัตรูพืชจำพวก ผีเสื้อมวนหวาน แมลงวันทองและหนอนเจาะผลที่เข้าดูดกินน้ำหวานผลสุก หรือที่ความสุกแก่ประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ จนก่อให้เกิดความเสียหายมากทั้งด้านปริมาณและคุณภาพแล้ว ปัญหาสำคัญคือ การเก็บเกี่ยวผลส้มโอตามความต้องการของตลาดกำหนดให้ต้องมีความสุกแก่ 70 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น และความหวานต้องมากกว่า 8 องศาบริกซ์ (วิทยา บัวเจริญ, 2546) ซึ่งในสภาพจริงการประมาณอายุในการเก็บเกี่ยวเพื่อให้ความสุกแก่ที่ต่อนั้นค่อนข้างลำบาก และส้มโอเป็นผลไม้ตระกูลส้มที่มีคุณสมบัติเฉพาะคือบ่มไม่สุก โดยปัจจุบันในการเก็บเกี่ยวผลส้มโอเกษตรกรต้องอาศัยความชำนาญในการสังเกตสีผิว ต่อมน้ำมัน ขนาด และการนับวันหลังจากดอกบาน ซึ่งยังไม่มีความแน่นอนมากนัก หรือบางครั้งเก็บเกี่ยวตามความต้องการของตลาดเพื่อให้ได้ราคาสูง แต่ผลผลิตที่เก็บเกี่ยวอาจยังไม่สุกแก่หรืออาจจะสุกแก่มากเกินไปจนทำให้คุณภาพของส้มโอในการส่งออกไม่ดีเท่าที่ควร และส่วนใหญ่ยังมีปัญหาขาดแคลนเทคโนโลยีในการผลิตและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ทำให้ผลผลิตที่ได้ไม่ตรงกับมาตรฐานการส่งออก (ตลาดไท, 2549)

2.2 ดัชนีความบริบูรณ์แบบต่างๆ (จริงแท้ ศิริพานิช, 2541)

ดัชนีความบริบูรณ์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายวิธี แต่ไม่มีวิธีใดที่มีสมบัติครบถ้วนตามที่ได้กล่าวถึงในตอนต้น โดยทั่วไปเกษตรกรใช้ดัชนีหลายอย่างประกอบการตัดสินใจในการเก็บเกี่ยว ซึ่งทำให้การเก็บเกี่ยวได้ถูกต้องตามความบริบูรณ์ของผลผลิตมากขึ้น วิธีต่างๆนี้สามารถแยกได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆ 4 กลุ่ม ดังนี้

2.2.1 การนับระยะเวลา ในการเจริญของพืช (หรือส่วนของพืช) ชนิดหนึ่งๆมักใช้เวลาใกล้เคียงกัน การนับเวลาจากจุดใดจุดหนึ่งของการเจริญของพืชหรือส่วนของพืชจึงนำมาใช้เป็นดัชนีความบริบูรณ์ได้ ข้อดีสำหรับวิธีนี้คือ สามารถคาดคะเนล่วงหน้าได้นานว่าจะเก็บเกี่ยวเมื่อไร อย่างไรก็ตามการเจริญเติบโตของพืชยังขึ้นกับอุณหภูมิและสภาพแวดล้อมเป็นอันมาก ช่วงที่มีอากาศเย็นการเจริญเติบโตได้ช้ากว่าช่วงที่อากาศร้อน ดังนั้นในแต่ละฤดูกาลปลูกอายุเก็บเกี่ยวจึงอาจแตกต่างกันได้มาก

2.2.2 การวัดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ในระหว่างการเจริญเติบโตของพืชมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหลายอย่างที่ยังบอกถึงความบริบูรณ์ได้ดังนี้

2.2.2.1 สี การเปลี่ยนแปลงของผลไม้เป็นดัชนีความบริบูรณ์ตามธรรมชาติที่เห็นได้ชัดเจนที่สุด และใช้เป็นดัชนีในการเก็บเกี่ยวอย่างแพร่หลาย แต่ส่วนใหญ่การเปลี่ยนสีของผลไม้มักเกิดขึ้นเมื่อผลไม้เริ่มเข้าสู่กระบวนการสุกแล้วและมีอายุการเก็บรักษาสั้น สีจึงเป็นดัชนีที่เหมาะสมกับผลไม้ที่ใช้บริโภคใกล้กับแหล่งปลูกเท่านั้น หากผลไม้ต้องถูกส่งไปขายในตลาดไกลออกไปอาจต้องใช้ดัชนีอื่นๆแทน ผลไม้หลายอย่างไม่สามารถเก็บเกี่ยวก่อนการเปลี่ยนสีได้ เช่น มังคุด เงาะ และสตรอเบอรี่ การใช้สีเป็นดัชนีจึงเป็นวิธีการที่ดีที่สุด แต่สำหรับผลไม้ประเภท non-climacteric บางชนิด เช่น ส้ม และสับปะรด การเปลี่ยนสีขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมด้วยในช่วงอากาศเย็นการเปลี่ยนสีจากเขียวเป็นเหลืองเกิดขึ้นได้เร็วกว่าในช่วงอากาศร้อน ดังนั้นการใช้สีเป็นดัชนีจึงต้องปรับเปลี่ยนไปตามฤดูกาลด้วย ในผลไม้บางชนิดการเปลี่ยนสีในระยะที่เหมาะสมกับการเก็บเกี่ยวอาจไม่ชัดเจนทำให้การเก็บเกี่ยวผิดพลาดได้ง่าย ซึ่งผลไม้บางชนิดเมื่อผลมีการเปลี่ยนแปลงสีก่อนที่สีผิวจะเปลี่ยนแปลงดังนั้นจึงใช้การเปลี่ยนสีของเนื้อเป็นดัชนีความบริบูรณ์ได้เช่นกัน จึงมีการทำแผ่นสีมาตรฐานขึ้นไว้ใช้เปรียบเทียบ ซึ่งทำให้การเก็บเกี่ยวหรือการตรวจสอบความบริบูรณ์ทำได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

2.2.2.2 รูปร่าง ผลไม้หลายอย่างมีรูปร่างลักษณะเปลี่ยนไประหว่างการเจริญเติบโต เช่น กกล้วย เมื่อยังเล็กกรอบผิวผลจะมองเห็นเป็นเหลี่ยม 4-5 เหลี่ยมชัดเจน เหลี่ยมนี้จะค่อยๆหายไปจนกระทั่งเมื่อผลมีความบริบูรณ์เต็มที่ผลจึงมีลักษณะกลมมน แต่ระยะนี้ผลเริ่มสุกและอาจปริแตกไม่สามารถส่งขายยังตลาดที่มีระยะทางขนส่งไกลได้ ้วยที่สามารถเก็บเกี่ยว และเหมาะกับการส่งออกคือ เมื่อผลกล้วยมีเหลี่ยมลดลงเหลือ 3 เหลี่ยม ผลทุเรียนมีลักษณะภายนอกหลายอย่างที่ใช้เป็นข้อสังเกตหรือดัชนีความบริบูรณ์ได้ เช่น ปลิงที่ขั้วผลปองพองออกจากเดิม และที่โคนหนามมี

จุดสีน้ำตาลเกิดขึ้น ส่วนส้มโอที่บริบูรณ์แล้ว บริเวณปลายผลหรือก้นผล จะพบต่อมน้ำมันแยกห่างออกจากกัน นอกจากนั้นผลไม้หลายชนิด มีความนวลมากขึ้นที่ผิวและเห็นได้ชัดเจนเมื่อผลบริบูรณ์ จึงใช้เป็นดัชนีความบริบูรณ์ได้อีกอย่างหนึ่ง

2.2.2.3 ขนาด สำหรับผลไม้ ขนาดเป็นดัชนีที่ไม่ดีนักเพราะขนาดของผลขึ้นกับความสมบูรณ์ของดินและปริมาณการติดผล และไม่ว่าผลเล็กหรือผลใหญ่ต่างก็ใช้เวลาในการเจริญเติบโตจนถึงวัยบริบูรณ์ใกล้เคียงกัน ขนาดมักใช้เป็นดัชนีในผักหลายชนิด เช่น หน่อไม้ฝรั่ง และข้าวโพดฝักอ่อน โดยทั่วไปขนาดที่เหมาะสมต้องไม่เล็กเกินไปจนทำให้ผลผลิตที่ได้ต่ำ และไม่ใหญ่เกินไปจนทำให้คุณภาพในการบริโภคเลวลง เช่น ปริมาณเส้นใยสูง ไม่เหมาะกับการรับประทาน

2.2.2.4 ความหนาแน่น ในผักประเภทที่ห่อหุ้ม เช่น กะหล่ำปลี ความหนาแน่นของหัวซึ่งใช้มือบีบสัมผัสได้เป็นดัชนีที่บอกเวลาเก็บเกี่ยวได้ดี กะหล่ำปลีที่เพิ่งเริ่มห่อหุ้ม หัวจะหลวม ใช้มือบีบให้ยุบลงได้ง่าย ส่วนห่อมานานแล้วมีน้ำหนักมากมักแน่นแข็งบีบไม่ลง ในผลไม้ส่วนใหญ่เมื่อยังอ่อนเนื้อแข็งมาก แต่เมื่อใกล้ความบริบูรณ์เนื้อเริ่มอ่อนตัวลง และอ่อนตัวลงมากเมื่อผลสุก ในเขตอบอุ่นเกษตรกรใช้วิธีวัดความแน่นของเนื้อผลแอปเปิลและสาลี่เพื่อเป็นดัชนีบอกเวลาเก็บเกี่ยวที่ได้ผลดี

2.2.2.5 การหลุดร่วงออกจากต้น ผลไม้หลายอย่างเมื่อถึงวัยบริบูรณ์มีการสร้างเนื้อเยื่อพิเศษขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างผลกับกิ่ง เนื้อเยื่อบริเวณนี้มักบอบบาง ยึดเกาะกันอย่างหลวมๆ ทำให้ผลหลุดออกจากกิ่งได้ง่ายเมื่อมีแรงภายนอกผลัดกัน เรียกเนื้อเยื่อนี้ว่า abscission tissue หรือ abscission layer ผลไม้บางชนิดมีการพัฒนาของ abscission layer ที่สามารถมองเห็นได้ชัด เช่น ในแคนตาลูปเมื่อมีความบริบูรณ์แล้ว abscission layer ถูกสร้างขึ้นได้ชั่วผล ผลัดกันให้ผลหลุดออกจากเถาสามารถมองเห็นได้ชัดเจน การเก็บเกี่ยวทำได้ง่าย รอยแผลที่เกิดขึ้นเป็นระเบียบเรียบร้อยไม่ฉีกขาด แต่หากเก็บเกี่ยวก่อนหน้านั้นนอกจากคุณภาพในการบริโภคจะไม่ดีแล้ว อาจเกิดรอยฉีกขาดของเนื้อเยื่อบริเวณรอยต่อนี้

2.2.2.6 ปริมาณน้ำกั้น ระหว่างการเจริญเติบโตของผลไม้ นอกจากการสะสมอาหารในรูปแป้งและน้ำตาลแล้ว ปริมาณน้ำในแควคิวโอล ก็เพิ่มขึ้นตามอายุของผลไม้เห็นได้ชัดในผลไม้ประเภทส้มเมื่อเล็กๆ จะคั้นน้ำไม่ได้เลย แต่เมื่ออายุมากขึ้นปริมาณน้ำที่คั้นได้จะมีมากขึ้น ทั้งนี้จากปริมาณน้ำสะสมในเซลล์จะมากขึ้นแล้ว ผนังเซลล์ของเนื้อผลไม้ยังอ่อนตัวทำให้คั้นน้ำได้มากขึ้น

2.2.2.7 ความถ่วงจำเพาะ การเจริญเติบโตของผลไม้มักเริ่มต้นด้วยการขยายขนาดของเซลล์ จนถึงระยะหนึ่งจึงเริ่มมีการสะสมอาหารในรูปแบบต่างๆ เช่น น้ำตาลและแป้ง ซึ่งถูกลำเลียงมาสะสมในผลมากขึ้น น้ำหนักแห้งของผลสูงขึ้น ทำให้ความถ่วงจำเพาะของผลสูงขึ้น และใช้เป็นดัชนีความบริบูรณ์ได้ เช่น มะม่วงน้ำดอกไม้เมื่อยังอ่อนความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 0.9-1.0

แต่เมื่อถึงวัยบริบูรณ์ความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 1.03-1.03 ถ้านำไปลอยน้ำ พบว่าผลที่ยังอ่อนลอย น้ำส่วนผลที่บริบูรณ์แล้วจม น้ำ ผลที่มีความบริบูรณ์มาก ค่าความถ่วงจำเพาะจะสูงขึ้น ผลเหล่านี้จมน้ำ ในน้ำเกลือความเข้มข้นต่างกันตามวัยของผล ผลที่เหมาะสมสำหรับการส่งออกควรจมน้ำแต่ลอย ในน้ำเกลือความเข้มข้น 2.5%

2.2.3 การจัดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

2.2.3.1 แป้ง ผลไม้หลายชนิดสะสมอาหารในรูปของแป้งเช่นเดียวกับในพืชหัว เช่น มันฝรั่ง และมันเทศ ปริมาณแป้งที่สะสมจึงเป็นดัชนีของความบริบูรณ์ได้ เช่น ในมันฝรั่งใช้ ปริมาณแป้งเป็นดัชนีความบริบูรณ์และใช้วัดคุณภาพของมันฝรั่งในการซื้อขายด้วย ส่วนในผลไม้ หลังจากการสะสมแป้ง แป้งมักถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อผลใกล้วัยบริบูรณ์ ดังนั้น การใช้แป้งเป็นดัชนีในผลไม้จึงใช้วิธีตรวจสอบดูปริมาณแป้งลดลงเพียงพอหรือยัง การวัดปริมาณ แป้งอย่างง่ายทำได้โดยการเลื่อนเปลือกผลไม้ออกให้เห็นเนื้อแล้วบด I-KI เข้มข้น 3% (บด I₂ และ KI ในน้ำ แล้วเจือจางให้ได้ 3% กองด้วย glasswool) ถ้ามีปริมาณแป้งมากจะได้สีม่วงดำของการทำ ปฏิกิริยาแสดงว่าผลไม้ยังมีวัยไม่บริบูรณ์ ถ้าสีที่ได้จางลงแสดงว่าผลไม้เริ่มเข้าสู่วัยบริบูรณ์แล้ว สามารถเก็บเกี่ยวได้ วิธีนี้ใช้ได้ผลดีกับแอปเปิลในต่างประเทศ และการใช้ให้ได้ผลดียิ่งขึ้นควรมี มาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบความเข้มของสีด้วย

2.2.3.2 น้ำตาล ผลไม้หลายชนิดสะสมอาหารในรูปของน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่ เช่น องุ่น และลำไย ยังมีวัยมากขึ้นการสะสมน้ำตาลยิ่งมากขึ้น ปริมาณน้ำตาลในผลจึงเป็นดัชนีความ บริบูรณ์และดัชนีการเก็บเกี่ยวที่ดี แต่ในผลไม้ประเภท climacteric ซึ่งสะสมอาหารในรูปแป้งแล้ว เปลี่ยนเป็นน้ำตาลภายหลัง การวัดปริมาณน้ำตาลในผลไม้ประเภทนี้จึงอาจสายเกินไปสำหรับการ เก็บเกี่ยวแต่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพ การวัดปริมาณน้ำตาลอาจทำได้ง่ายในแปลงโดยใช้ hand refractometer วัดปริมาณ soluble solids จากน้ำคั้นซึ่งหมายถึงปริมาณสารประกอบต่างๆ ที่ ละลายน้ำได้ หรือปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ดังตารางที่ 2.3 รวมทั้งกรดอินทรีย์ต่างๆ แต่ส่วน ใหญ่เป็นน้ำตาล ดังนั้นผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว มีกรดสะสมอยู่มาก การวัดปริมาณ soluble solids อาจให้ ค่าที่ไม่ถูกต้องนัก

2.2.3.3 กรด ผลไม้ส่วนใหญ่เมื่อยังอ่อนมักมีรสเปรี้ยวเนื่องจากการสะสมกรด อินทรีย์ชนิดต่างๆ ในแควคิวโอ เมื่อผลพัฒนาเข้าสู่ความบริบูรณ์ปริมาณกรดจะลดลงใช้เป็นดัชนี ความบริบูรณ์ได้ อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณกรดอย่างเดียวหรือน้ำตาลอย่างเดียวเป็นดัชนีอาจมี ความสอดคล้องกับวัยไม่ค่อยดีนัก การศึกษาในหลายพืชพบว่าการใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาณ น้ำตาลกับกรด (sugar/acid ratio) มีความสัมพันธ์กับวัยของผลไม้มากกว่า โดยเฉพาะในผลไม้ที่มี การสะสมทั้งน้ำตาลและกรดในปริมาณที่สูง

2.2.3.4 ไขมัน ผลไม้บางอย่างสะสมอาหารในรูปไขมันเป็นปริมาณมาก เช่น ผลอะโวคาโด โอลีฟ และเมล็ดเคี้ยวมันชนิดต่างๆ จึงมีการใช้ปริมาณไขมันเป็นดัชนีวัดความบริบูรณ์ เช่น

อะโวคาโดในรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ต้องมีไขมันอย่างน้อย 8-15 % ขึ้นกับพันธุ์จึงจะถือว่ามีความบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ การวิเคราะห์หาปริมาณไขมันทำได้ยากต้องทำในห้องปฏิบัติการใช้เครื่องมือยุ่งยาก และใช้เวลานานจึงไม่เป็นที่นิยม การศึกษาในภายหลังพบว่าปริมาณไขมันในอะโวคาโดมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักแห้ง ดัชนีความบริสุทธิ์ของอะโวคาโดในรัฐแคลิฟอร์เนียจึงเปลี่ยนมาเป็นน้ำหนักแห้งระหว่าง 17-25% ขึ้นกับพันธุ์

2.2.3.5 สารสี สีสรรของผักและผลไม้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารสีชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 2.3 โดยทั่วไปปริมาณคลอโรฟิลล์ลดน้อยลงเมื่อผลไม้เข้าสู่ระยะสุก ในขณะที่สารสีอื่นๆ เช่น carotene และ anthocyanin มีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่วนเนื้อของผลไม้แม้ว่าส่วนใหญ่จะไม่มีคลอโรฟิลล์แต่ก็มีการสร้างสารสีขึ้นในระยะเก็บเกี่ยวเช่นเดียวกัน เห็นได้ชัดในมะม่วงและทุเรียน เป็นต้น การวิเคราะห์ปริมาณสารสีเหล่านี้ใช้เป็นดัชนีความบริสุทธิ์ได้สำหรับงานทดลองในห้องปฏิบัติการ แต่ในทางการค้าไม่นิยมใช้เพราะค่อนข้างยุ่งยากและไม่สะดวก

2.2.3.6 สารประกอบฟีนอล ผลไม้ที่ยังอ่อนมักมีปริมาณสารประกอบฟีนอลสะสมอยู่มากเพื่อช่วยป้องกันตัวเองจากศัตรูภายนอก เช่น โรคและแมลงต่างๆ เมื่อผลไม้เข้าสู่ระยะสุก สารประกอบฟีนอลมักมีปริมาณลดลงโดยการรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหญ่ (polymerization) การตรวจวัดปริมาณสารฟีนอลสามารถทำได้คร่าวๆ ในแปลงโดยใช้สารละลาย $FeCl_3$ 1% หยดลงบนเนื้อผลไม้ปล่อยให้ทำปฏิกิริยาจนได้สารสีน้ำตาลเกิดขึ้น สีเข้มแสดงว่าผลไม้ยังไม่สุก และอาจมีรสฝาด เมื่อสีอ่อนลงแสดงว่าผลไม้เริ่มมีความบริสุทธิ์พร้อมเก็บเกี่ยวได้แล้ว วิธีนี้ใช้ปฏิบัติในผลพลับได้ดี

2.2.4 การวัดการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา

เมแทบอลิซึมของผักและผลไม้ที่มีวัยต่างกันย่อมไม่เท่ากัน ที่เห็นได้ชัดได้แก่ผลไม้ประเภท climacteric เมื่อผลสุกจะมีการสร้างเอทิลีนและมีการหายใจสูงขึ้น เอทิลีนภายในผลมีความเข้มข้นสูงขึ้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยานี้ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของผลแอปเปิลในต่างประเทศเพื่อประโยชน์ในการเลือกเก็บรักษาผลแอปเปิลไว้ภายใต้บรรยากาศควบคุม (controlled atmosphere, CA) ทั้งนี้เพราะผลแอปเปิลที่มีวัยต่างกันมีอายุการเก็บรักษาภายใต้ CA ไม่เท่ากัน ผลที่สุกมากมีอายุสั้นกว่า การตรวจสอบทางกายภาพและทางเคมีไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างในความบริสุทธิ์ของผลแอปเปิลที่เกี่ยวข้องมาในแต่ละชุดได้ชัดเจน ต้องอาศัยการสุ่มตรวจสอบอัตราการสร้างเอทิลีนหรือความเข้มข้นของเอทิลีนในผล ถ้าพบว่าแอปเปิลชุดนั้นมีปริมาณเอทิลีนสูง แอปเปิลจะถูกเก็บไว้ในห้องเย็นธรรมดาเพื่อรอการจำหน่ายในระยะสั้น ส่วนพวกที่มีปริมาณเอทิลีนต่ำจะถูกนำไปเก็บรักษาใน CA เพื่อรอการขายในระยะยาว

ตารางที่ 2.3 คำนีการเก็บเกี่ยวของผลไม้บางชนิด

ชนิดพืช(ตระกูลส้ม)	คำนีการเก็บเกี่ยว	
	ระยะเวลา	คำนีอื่นๆ
ส้มเขียวหวาน	9.5-10.5 เดือนหลังดอกบาน	เริ่มมีสีเหลือง, SS 8.0-8.8%
ส้มตรา	7.5-8.5 เดือน หลังดอกบาน	ผิวเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมเหลืองไม่เกิน 30% ของพื้นที่ผิวทั้งหมด, SS 9.5-10.0%
ส้มโอ “ขาวแป้น”	7-7.5 เดือน	ต่อมน้ำมันบริเวณก้นผลจะขยายใหญ่ และห่างกันมากขึ้น, ผิวเปลือกเริ่มเปลี่ยน สีจากสีเขียวเข้มเป็นสีเขียวอมเหลือง, น้ำหนักผลจะเพิ่มมากขึ้น, (โดยใช้มือ รอกันผลยกขึ้น) และถ้าใช้มือกดที่ก้น ผลจะยุบตัวเข้าไปได้มาก
ส้มโอ “โอขาว น้ำผึ้ง”	7-7.5 เดือน	
ส้มโอ “ทองดี”	8 เดือน	

หมายเหตุ: SS หมายถึง Soluble Solid คือ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

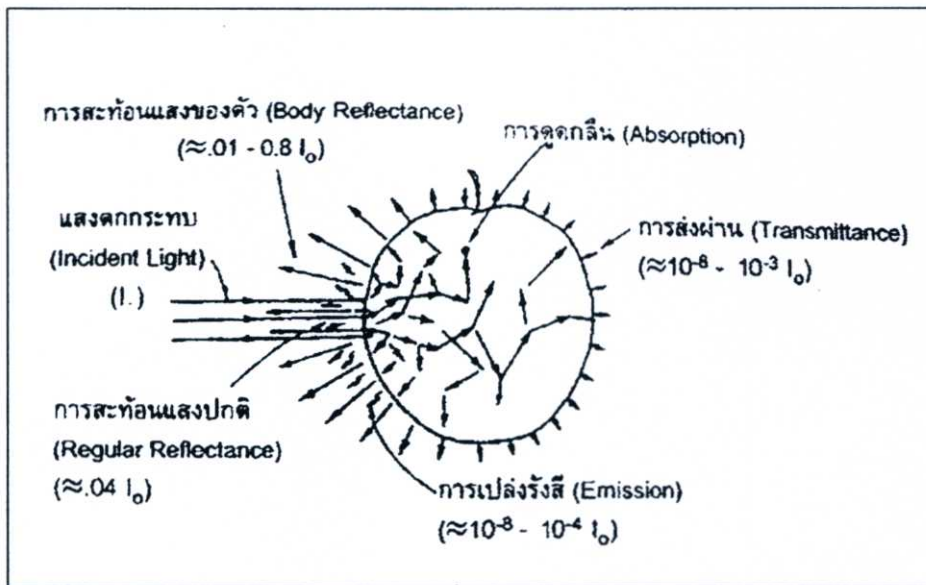
ที่มา:จริงแท้ ศิริพานิช และคณะ, 2543

2.3 สมบัติเชิงแสงของผลผลิตการการเกษตร (บัณฑิต จริโมภาส, 2546)

การที่ให้ลำแสงส่องกระทบวัตถุ ส่วนหนึ่งของลำแสงที่ตกกระทบจะสะท้อนโดยพื้นผิวของวัตถุนั้น ส่วนที่เหลือถูกส่งผ่านเข้าไปในวัตถุที่ซึ่งถ้าไม่ถูกดูดกลืนโดยวัตถุ ก็อาจถูกสะท้อนกลับไปสู่พื้นผิว (การสะท้อนของตัว body reflectance) หรือการส่งผ่านวัตถุออกไป ส่วนรังสีแสงที่ถูกดูดกลืนอาจถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบรังสีอื่น เช่น แสงฟลูออเรสเซนต์ การเปล่งรังสีแสงสว่างล่าช้า (Delayed Light Emission) หมายถึงแสงสว่างที่ถูกปล่อยจากตัวอย่างหลังจากเอาต้นกำเนิดแสงออกไปแล้ว ปริมาณของพลังงานแสงในการสะท้อน การส่งผ่าน การดูดกลืน การเปล่งรังสีขึ้นอยู่กับสมบัติของวัตถุ และรังสีตกกระทบ ดังนั้นการหาลักษณะเชิงแสงของวัตถุสามารถจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติต่างๆของวัตถุนั้นได้

2.3.1 การปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างแสงและวัสดุเกษตร วัสดุเกษตรส่วนมากไม่ เป็นเนื้อเดียวกัน แต่จะประกอบด้วยผนังกัน (Interface) ภายในชั้นเล็กๆจำนวนมาก แสงสว่างที่เข้าไปในวัสดุนั้นจะกระจายในทุกทิศทาง (ภาพที่ 2.1) เมื่อลำแสงสว่างอันหนึ่งตกกระทบผลไม้ ประมาณ 4 % ของรังสีตกกระทบทั้งหมด จะถูกสะท้อนกลับออกมาจากผลไม้ ซึ่งเป็นการสะท้อนแสงปกติ เมื่อรังสีเดินทางชนกับผนังกันเล็กๆ ในผิวของผลไม้ ที่มีโครงสร้างเซลล์และกระจายไปทุกทิศทาง ส่วนใหญ่รังสีจะกระจายกลับออกไปสู่ผิวผลไม้และออกจากผลไม้ในบริเวณที่แสงตกกระทบสำหรับการสะท้อนแบบนี้ Birth (1976) เรียกว่าการสะท้อนของตัวแสงที่กระจัดกระจาย ที่เหลือจะแพร่ลึกเข้าไปในผลไม้ และสุดท้ายอาจจะออกไปถึงผิวผลไม้ อีกด้านที่ห่างจากจุดกระทบ

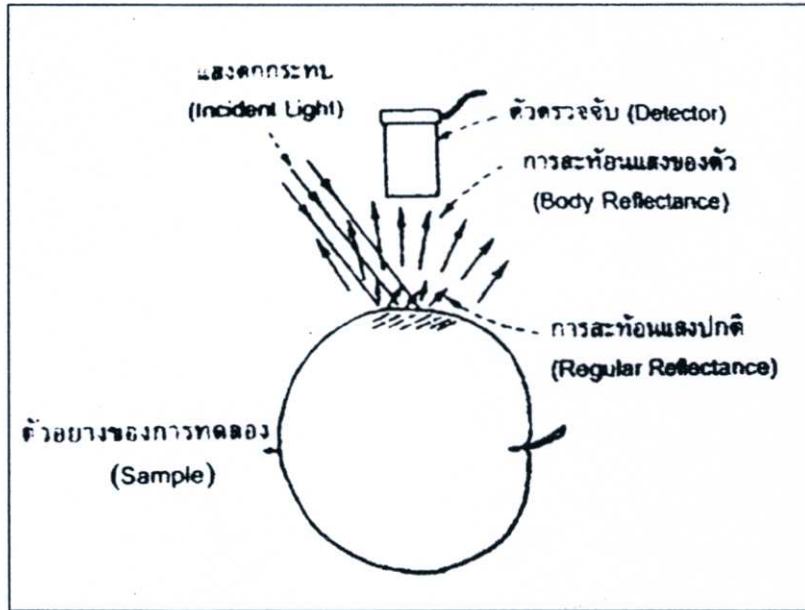
ออกไป ในขณะที่แสงเดินทางผ่านผลไม้ ปริมาณแสงหนึ่งจะถูกดูดกลืนโดยส่วนประกอบต่างๆของผลไม้ การดูดกลืนจะแปรผันกับส่วนประกอบของผลไม้ ความยาวคลื่น และความยาวของแสงที่เดินทาง พลังงานที่ถูกดูดกลืนถูกแปลงเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นกับวัสดุบางอย่าง ส่วนของแสงที่ถูกดูดกลืนอาจแปลงเป็นแสงฟลูออเรสเซนต์ การเปล่งรังสีสว่างล่าช้า ดังนั้นรังสีแสงที่ออกจากผิวของผลไม้อาจประกอบด้วยการสะท้อนแสงปกติ การสะท้อนแสงของตัว การส่งผ่านและการเปล่งรังสี



ภาพที่ 2.1 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแสงสว่างและผลไม้

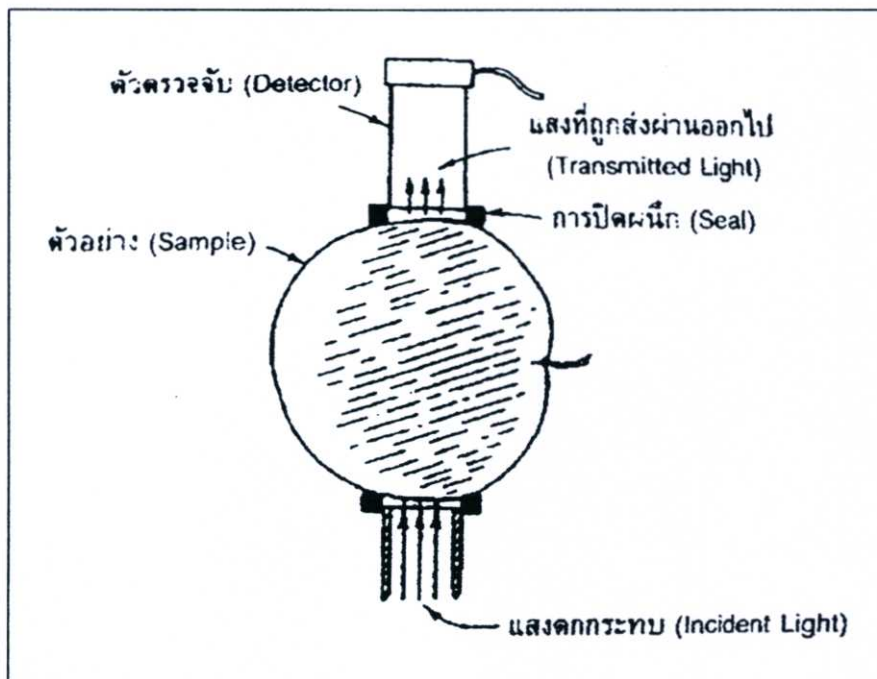
ที่มา: บัณฑิต จริโมภาส, 2546

2.3.2. ตำแหน่งที่สัมพันธ์กันของต้นกำเนิดแสง ตัวอย่าง และเครื่องตรวจจับ ในการวัดปัจจัยที่เกี่ยวกับคุณภาพ ณ บริเวณหนึ่งๆ ของตัวอย่าง จำเป็นต้องระบุตำแหน่งต้นกำเนิดแสง ตัวอย่าง และตัวตรวจจับแสง เพื่อให้ส่วนใหญ่ของแสงสว่างที่ถูกวัดผ่านบริเวณที่เราสนใจ (ภาพที่ 2.2) แสดงตำแหน่งที่สัมพันธ์กันของต้นกำเนิดแสง ตัวอย่างและตัวตรวจจับ บริเวณแรงแสงแสดงพื้นที่โดยประมาณซึ่งแสงสว่างที่เราจะวัดผ่านไป การวัดแสงสะท้อนของวัตถุต่างๆ ไปเรียกว่า แสงสะท้อน อาจจะทำให้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณลักษณะของบริเวณใกล้ผิวในบริเวณแสงกระทบ ดังนั้นการวัดแบบนี้เหมาะสำหรับวัดองค์ประกอบของคุณภาพ เช่น สีภายนอก ความเสียหายที่ผิว การซ้ำ ส่วนการวัดภายในมีวัตถุประสงค์อยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับหัววัด (ภาพที่ 2.3) โดยในการวัดแสงถูกส่งผ่านตัวอย่าง เหมาะกับการตรวจคุณภาพภายใน เช่น สีภายในมะเขือเทศ หัวใจกลวงในมันฝรั่ง ส่วนการตรวจวัดสมบัติของวัตถุบริเวณกึ่งกลางระหว่างผิวกับจุดศูนย์กลางของผลไม้ (ภาพที่ 2.4) อาจพบได้ไม่มากนักแต่อาจมีศักยภาพสำหรับประเมินคุณภาพภายในได้



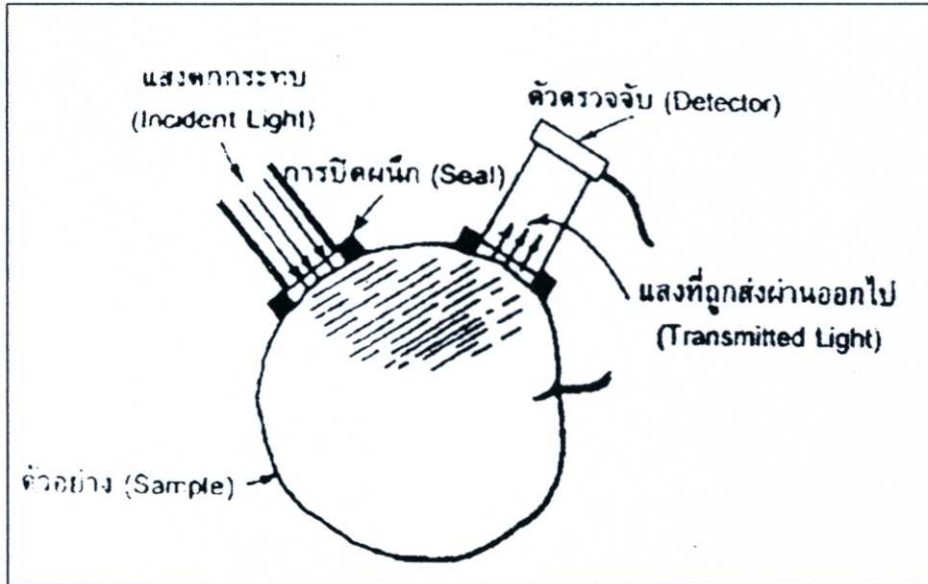
ภาพที่ 2.2 ตำแหน่งที่สัมพันธ์กัน สำหรับการวัดแบบสะท้อนกลับ

ที่มา: บัณฑิต จริโมภาส, 2546



ภาพที่ 2.3 ตำแหน่งที่สัมพันธ์กัน สำหรับการวัดแบบทะลุผ่าน

ที่มา: บัณฑิต จริโมภาส, 2546



ภาพที่ 2.4 ตำแหน่งที่สัมพันธ์กัน สำหรับการวัดแบบส่งผ่านส่วนหนึ่งของตัวอย่าง

ที่มา: บัณฑิต จริโมภาส, 2546

2.3.3 ความเข้มข้นของแสงสว่างที่วัด ความเข้มของแสงสว่าง ที่ออกมาจากตัวอย่างผันแปรอย่างมากกับความหนาแน่นเชิงแสงของตัวอย่างและระยะทางซึ่งแสงสว่างเดินทางผ่านไปจากต้นกำเนิดแสงไปสู่จุดที่ทำการวัด Birth (1975) อธิบายว่าการกระจายของพลังงานที่ถูกส่งผ่านรอบๆ ผิวของผลมะเขือเทศจากการส่องสว่าง แสดงว่าระดับพลังงานสูงสุดอยู่ใกล้สุดกับต้นกำเนิดแสง และพลังงานลดลงแบบ logarithm กับระยะทางจากต้นกำเนิดแสง สำหรับวัสดุเกษตร และอาหาร ส่วนมากการสะท้อนแสงโดยทั่วไปจะสูงกว่าการส่งผ่านแสง โดยต้นกำเนิดแสงอาจจะไม่จำเป็นต้องมีความเข้มสูง ตัวตรวจวัดอาจไม่จำเป็นต้องมีความไวมาก เพื่อให้การวัดแสงสะท้อนไม่ถูกรบกวนจากแสงของสภาพแวดล้อมที่มีความเข้มต่ำ

2.4 หลักการพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ (นิพนธ์ ตั้งคนานุรักษ์, 2545)

อินฟราเรดย่านใกล้ (near infrared) เป็นคลื่นแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 780-2500 นาโนเมตร โดยอาศัยหลักการคือ เมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ แล้วสารเกิดการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง near infrared ทำให้โมเลกุลของสารเกิดการสั่นที่ความถี่สูง ในการสั่นของพันธะต่างๆ จะเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละพันธะ รวมทั้งตำแหน่งของโมเลกุลและช่วงการดูดกลืนแสงก็เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละหมู่ฟังก์ชันด้วย ดังนั้นเมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นตรงกับพันธะในโมเลกุลก็จะเกิดการสั่น และการดูดกลืนรังสีไว้ ทำให้พลังงานมากกว่าปกติ จากเดิมที่โมเลกุลอยู่ในสภาวะปกติ (ground vibration level) เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจะอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited vibration level) อย่างไรก็ตามเมื่อโมเลกุลกลับสู่สภาวะปกติก็จะปล่อยพลังงานที่รับเข้าไปออกมา

ในรูปของพลังงานความร้อน ปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสง (Absorbance, A) เป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert) พลังงานของคลื่นแสงเมื่อผ่านเข้าไปในตัวอย่าง พลังงานจะถูกดูดกลืนไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง ความเข้มของแสงที่ผ่านออกมาโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีนั้น (Osborne et al., 1993) สารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้จะมี H-atom เป็นองค์ประกอบ เช่น O-H พบในแป้ง น้ำ น้ำตาล N-H พบในโปรตีน และ C-H พบในน้ำมัน (นิพนธ์ ดังคณานุรักษ์, 2545) โดยการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดของโมเลกุลสารอินทรีย์ ช่วงคลื่นอินฟราเรดสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง (ดังตารางที่ 2.4)

ตารางที่ 2.4 ช่วงคลื่นแม่เหล็กย่านอินฟราเรด

ช่วงคลื่น	ช่วงความยาวคลื่น (nm)	จำนวนคลื่น (cm ⁻¹)
อินฟราเรดย่านใกล้ (near IR, NIR)	780-2,500	12,800-4,000
อินฟราเรดย่านกลาง (mid IR or fundamental IR)	2,500-50,000	4,000-200
อินฟราเรดย่านไกล (far IR)	50,000-1,000,000	200-10

ที่มา: นิพนธ์ ดังคณานุรักษ์, 2545

ช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared หรือ overtone region) มีความยาวคลื่นในช่วง 780-2,500 นาโนเมตร แอมพลิจูดการดูดกลืนคลื่นแสงเกิดจาก overtone และมักพบว่าช่วงการดูดกลืนแสงที่ได้ค่อนข้างต่ำมีประโยชน์ในการวิเคราะห์หาปริมาณของกลุ่ม functional และศึกษาโครงสร้างโมเลกุล (วิชัย รวีตระกูล และคณะ, 2527)

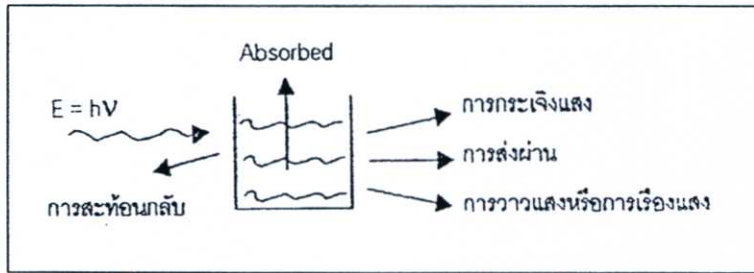
ช่วงกลางอินฟราเรด (middle infrared หรือ fundamental region) มีความยาวคลื่นในช่วง 2,500-50,000 นาโนเมตร สเปกตรัมที่อ่านได้ค่อนข้างยุ่งยาก เพราะโครงสร้างของโมเลกุลที่สมบูรณ์ การวิเคราะห์จึงต้องใช้วิธีเปรียบเทียบกับสเปกตรัมที่ทราบโครงสร้างแล้ว ใช้ในการวิเคราะห์พวกกลุ่ม functional (วิชัย รวีตระกูล และคณะ, 2527)

ช่วงไกลอินฟราเรด (far infrared) มีความยาวคลื่นในช่วง 50,000-1,000,000 นาโนเมตร ช่วงนี้ไม่ค่อยที่จะได้ใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากสเปกตรัมไม่ได้เกิดจากการสั่นหรือการหมุนของโมเลกุล แต่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการ transition ที่เกี่ยวกับการหมุนของโมเลกุล (วิชัย รวีตระกูล และคณะ, 2527)

2.5 หลักการพื้นฐานของเครื่อง Near Infrared Spectroscopy (อาทิตย์ พวงสมบัติ, 2549)

หลักการของสเปกโตรสโคปี คือ เมื่อดำแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ จะมีแสงบางส่วนที่จะถูกดูดกลืน (absorbed) บางส่วนผ่านทะลุออกไป (transmitted) บางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ (reflected) บางส่วนเกิดการรวมแสงหรือการเรียงแสง

(fluorescence or phosphorescence) และบางส่วนอาจเกิดการกระเจิงแสง (scattered) (นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, 2545) ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การกระทำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารต่างๆ
ที่มา:นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, 2545

2.5.1 สเปกโตรสโคปีมีกฎของการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กฎ คือ

1. กฎของแลมเบิร์ต (Lambert’s law) กล่าวว่า “เมื่อแสงสีเดียว (monochromatic light) คือ แสงความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว (homogeneous) เป็นสัดส่วนของความเข้มแสงที่ถูกตัวกลางดูดกลืนไว้ โดยไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงเริ่มต้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน” (วิชัย ธีวตระกูล และคณะ, 2527)

2. กฎของเบียร์ (Beer’s law) กล่าวว่า “เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียวสัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางดูดกลืนไว้จะแปร โดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น” (วิชัย ธีวตระกูล และคณะ, 2527)

ในทางปฏิบัติปริมาณความเข้มข้นของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่ลำแสงส่องผ่าน จึงต้องรวมกฎทั้งสองเข้าด้วยกันเรียกว่า กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon bc$$

เนื่องจาก T (Transmittance) เท่ากับ

$$T = \frac{I}{I_0}$$

เพราะฉะนั้น

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon bc = \log \frac{1}{T}$$

เมื่อ I = ความเข้มของแสงความยาวคลื่นเดียวที่ส่งผ่านออกมา

ϵ = สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง ปกติเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น และอุณหภูมิ

I_0 = ความเข้มของแสงก่อนผ่านตัวกลางเมื่อ $b=0$

b = ความหนาของตัวกลางในหน่วยเซนติเมตร

c = ความเข้มข้นของสารในหน่วย โมล/ลิตร

A = ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

โมเลกุลของสารแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์กับช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน เนื่องจากการจัดเรียงโครงสร้างของโมเลกุลต่างกัน นอกจากนี้ในแต่ละโมเลกุลจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นมากกว่า 1 ช่วง เช่น โมเลกุลของน้ำ (H_2O) ที่มีมากในผลิตภัณฑ์อาหาร มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น 4 ช่วง คือ 760, 970, 1450 และ 1940 นาโนเมตร ดังนั้นถ้าทำการทดสอบที่ช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวจะสามารถหาความสัมพันธ์ของน้ำภายในตัวอย่างได้ (Osborne et al., 1986) นอกจากนี้ในผลิตภัณฑ์อาหารยังมีองค์ประกอบอื่นๆ ที่สำคัญเช่น โปรตีน ไขมัน แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบภายในอาหารกับช่วงเนียร์อินฟราเรด

องค์ประกอบ	โมเลกุลที่เกี่ยวข้อง	ช่วงคลื่นที่เกี่ยวข้อง (nm)
น้ำ	H_2O	760, 970 (Osborne et al., 1986)
	-	842 (Saranwong et al., 2003)
โปรตีน	protein	910, 1020 (Osborne et al., 1986)
	-	934 (Tajaddin et al., 2002)
ไขมัน	oil	928, 1037 (Osborne et al., 1986)
	-	962 (Chen et al., 2002)
คาร์โบไฮเดรต	-	904 (Khuriyati et al., 2004)
	starch	990 (Osborne et al., 1986)

2.6 การแปลงข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ (Pretreatment of spectral data) (อาทิตย์ พวงสมบัติ, 2549)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสเปกตรัมมากได้แก่ ความชื้น และขนาดของอนุภาค ซึ่งทำให้สเปกตรัมที่ได้มีความแตกต่างกัน เนื่องมาจากการกระเจิงแสง และความแตกต่างที่เป็นผลมาจากความเข้มขององค์ประกอบที่ต้องการวัด ซึ่งอาจทำให้เกิดความแตกต่างในเชิงบวก (Additive scattering) ทำให้สเปกตรัมเพิ่มขึ้นตามตลอดช่วงความยาวคลื่น หรือผลเชิงคูณ (Multiplicative scattering) สเปกตรัมเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสูงขึ้น

นอกจากนี้สเปกตรัมที่ได้จากการดูคลื่นแสงในย่านใกล้อินฟราเรดเป็นสเปกตรัมที่มีการเหลื่อมซ้อนทับกันอยู่ (Overlapping band) ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงควรนำไปปรับแต่งด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ก่อน เพื่อปรับสเปกตรัมให้มีความเด่นชัดมากขึ้น และลดความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง วิธีการที่นิยมใช้มี 2 วิธี คือ

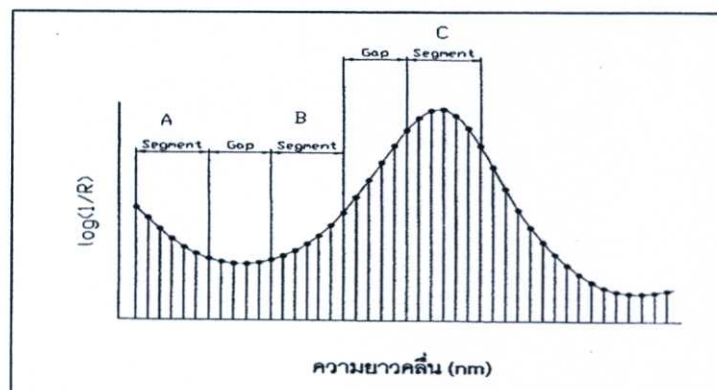
2.6.1. Derivative transformation

2.6.1.1 First derivative (อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง) การคำนวณ Derivative หรือ ความชันของสเปกตรัมสามารถทำได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{First derivative} &= \text{Slope} \\ &= B - A\end{aligned}$$

โดยที่ A และ B คือค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของ Segments ที่มีช่วงเท่ากัน และอยู่ติดกัน

ในการคำนวณต้องกำหนดขนาดของ Segment และ Gap ก่อน ซึ่งขนาด Segment คือขนาดของความยาวคลื่นที่เราทำการเฉลี่ยให้ได้ค่าใหม่เพื่อเป็นตัวแทนขึ้นมาหนึ่งจุด แล้วทำการข้ามช่วงความยาวคลื่นไปเท่ากับขนาดของ Gap เพื่อเริ่มนับจุดแรกในการคำนวณ Segment ต่อไป ตัวอย่างดังในภาพที่ 2.6 เป็นสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่น ที่แต่ละจุดห่างกัน 2 นาโนเมตร มีขนาด Segment และ Gap เท่ากับ 12 และ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยที่จุด A คือจุดที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยในช่วงความยาวคลื่น 12 นาโนเมตร (ขนาด Segment) จากนั้นข้ามไป 10 นาโนเมตร (ขนาด Gap) แล้วจึงเฉลี่ยอีกครั้งในช่วงความยาวคลื่น 12 นาโนเมตร เพื่อให้เป็นจุด B แล้วนำค่า A ลบจากค่า B ผลที่ได้นำไปแทนค่าสเปกตรัมที่จุดเริ่มต้นของ Segment แรกซึ่งคำนวณจะกระทำทุก Segment ต่อเนื่องกันไปจนตลอดความยาวคลื่น ต่อจากนั้นก็ขยับ Segment ไปทางขวา 1 จุด หรือ 2 นาโนเมตร แล้วคำนวณซ้ำเหมือนที่กล่าวมาจนเสร็จสิ้น



ภาพที่ 2.6 ขนาด Segment และ Gap ที่กำหนดในสเปกตรัมเพื่อคำนวณ Derivative

ที่มา: อนุพันธ์ เทอดวงศัรกุล, 2545

First derivative ใช้ได้ผลกับตัวอย่างที่มีเนื้อสม่ำเสมอ และมีการกระจายของอนุภาคสม่ำเสมอทั่วถึง นอกจากนั้นแล้ว First derivative ของสเปกตรัมจะช่วยแก้ปัญหาที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น

2.6.1.2 Second derivative (อนุพันธ์อันดับที่สอง) คือการคำนวณผลลบของค่าที่ได้จาก First derivative ที่ติดกันนั่นเอง หรือเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัมมาจาก

$$\text{สมการ} \quad \frac{d^2 \log(1/R)}{d\lambda^2}$$

ซึ่งเขียนแทนด้วย

$$d^2 \log(1/R)$$

สามารถคำนวณได้จาก

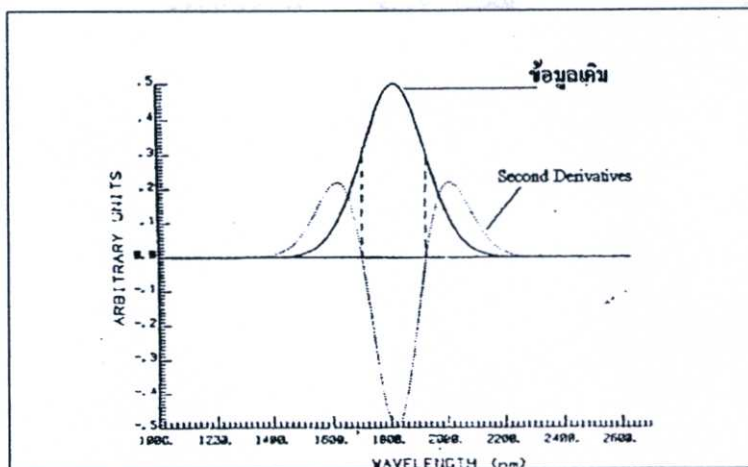
$$\begin{aligned} \text{Second derivative} &= \text{change in slope} \\ &= \text{First derivative แรก} - \text{First derivative ถัดมา} \\ &= (C-B) - (B-A) \\ &= C-2B+A \end{aligned}$$

โดยที่ A, B และ C เป็นค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของ Segments ที่ติดกันและมีช่วงเท่ากัน

การคำนวณคล้ายกับ First derivative โดยในการคำนวณค่า Second derivative ของจุดแรก ต้องหาค่า C ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมในช่วงที่สาม หรือ C แล้วคำนวณผลลบของค่าเฉลี่ยใน Segment แรก และ Segment ที่สอง ซึ่งก็คือ B-A แล้วคำนวณผลลบของค่าเฉลี่ยใน Segment ที่สองและ Segment ที่สาม ซึ่งก็คือ C-B แล้วนำผลลบค่าแรกมาลบออกจากผลลบค่าที่สอง ตามสมการ ค่าผลลบสุดท้ายที่นำไปแทนค่าสเปกตรัมที่จุดแรกของ Segment แรก และคำนวณผลลบตามสมการ ไปจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่นต่อจากนั้นจึงเลื่อนไปทางขวา 1 จุด หรือ 2 นาโนเมตร แล้วทำการหาซ้ำจนเสร็จสมบูรณ์

การใช้ Second derivative จะช่วยลดผลกระทบจากการกระเจิงแสง ทั้งที่เป็นผลเชิงบวกที่ทำให้ขนาดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น และผลเชิงลบที่ทำให้ขนาดของสเปกตรัมเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่น Second derivative ใช้ได้ผลดีกับตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ ผสมผสานกันอยู่

First derivative ให้ความหมายเป็นค่าความยาวคลื่นที่แต่ละความยาวคลื่น ซึ่งทำให้แปลความหมายยากกว่า Second derivative ซึ่งได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจาก Second derivative จะให้จุดยอดตรงกับจุดยอดของสเปกตรัมเดิม แม้ว่าจะกลับหัวดังภาพที่ 2.7

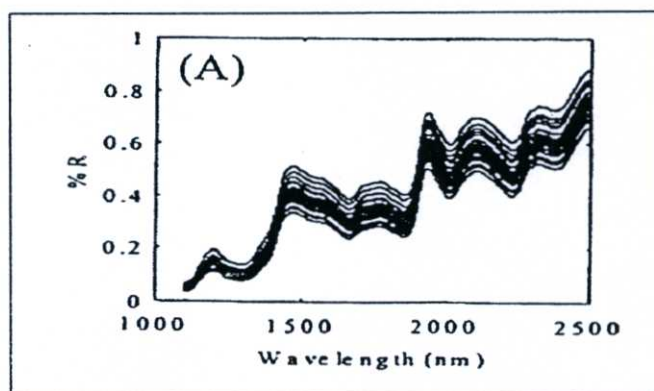


ภาพที่ 2.7 สเปกตรัม และ Second derivative ของสเปกตรัม

ที่มา: Hruschka, 1987

2.6.2 Multiplicative scatter correction (MSC)

เป็นวิธีการที่ช่วยลดผลจากการกระเจิงของแสง ซึ่งโดยทั่วไปการกระเจิงของแสง ทำให้ความชันของสเปกตรัมโดยรวมเปลี่ยนไป ดังภาพที่ 2.8 คล้ายกับว่าสเปกตรัมถูกทำให้หมุนรอบจุดที่ความยาวคลื่นต่ำสุด



ภาพที่ 2.8 NIR สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect ก่อนการปรับแก้ด้วย MSC

ที่มา: Boyworth and Booksh, 2001

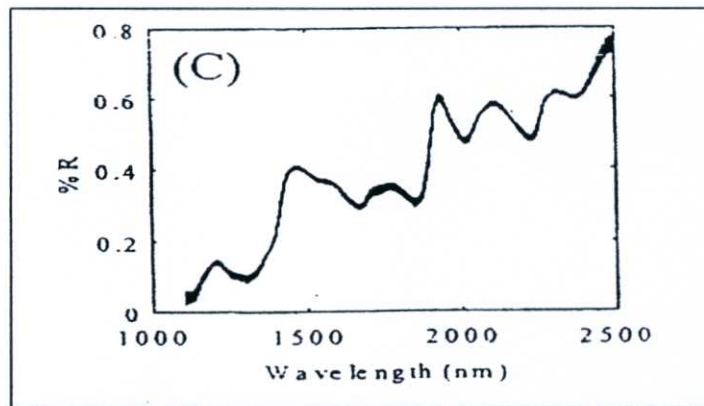
วิธีการ MSC คือทำการหมุนสเปกตรัมของแต่ละตัวอย่างให้มาตรงกับสเปกตรัมเฉลี่ย ขั้นตอนการหมุนดังกล่าวทำได้โดย ในแต่ละตัวอย่างนั้นต้องหาค่าคงที่ค่าหนึ่งมาลบออกจากสเปกตรัมเพื่อลดผลจากการเลื่อนตัวของสเปกตรัม และต้องหาค่าคงที่มาหารค่า $\log(1/R)$ ของทุกๆ จุดของตัวอย่างเพื่อปรับความชันของสเปกตรัมที่เปลี่ยนไป หรือก็คือการปรับค่า $\log(1/R)$ ให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นสัดส่วนเพื่อให้มีค่าตรงกับสเปกตรัมเฉลี่ยวิธีการให้ได้มาซึ่งค่าคงที่ดังกล่าวคือวิธีวิเคราะห์ความถดถอย (Regression) เพื่อให้ได้สมการเส้นตรงของแต่ละตัวอย่างได้ สเปกตรัมดังภาพที่ 2.9 ดังนี้

$$X_{iw} = a_i + b_i \bar{x}_w \quad w=1, \dots, p$$

เมื่อ X_{iw} = ค่า $\log(1/R)$ ของตัวอย่าง i ที่ความยาวคลื่น w ของตัวอย่างที่มี p ความยาวคลื่น
 \bar{X}_w = ค่าเฉลี่ย $\log(1/R)$ ที่ความยาวคลื่น w ของตัวอย่างทั้งหมด
 a_i และ b_i = ค่าคงที่สำหรับทุกความยาวคลื่นของตัวอย่าง i

ในแต่ละตัวอย่างก็จะได้ค่า a_i และ b_i อย่างละค่าแตกต่างกันค่า a_i และ b_i นี้จะนำมาใช้คำนวณ (หรือหามุมสเปกตรัม) ค่าสเปกตรัมใหม่ดังนี้

$$X_{i,MSC} = \frac{(X_{iw} - a_i)}{b_i} \quad w=1, \dots, p$$



ภาพที่ 2.9 NIR สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect หลังการปรับแก้ด้วย MSC
ที่มา: Boyworth and Booksh, (2001)

2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลจาก Near Infrared spectral (ธงชัย สุวรรณสิขณณ์, 2545)

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง NIR จะอยู่ในรูปของสเปกตรัม ส่วนข้อมูลของค่าคุณลักษณะคุณภาพวิเคราะห์ได้จากวิธีแบบ conventional นำข้อมูลที่ได้จากทั้ง 2 ส่วนมารวมเข้าด้วยกันแล้วจึงนำมาวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือขั้นตอนการวิเคราะห์หาสมการ calibration เพื่อใช้เป็น model ในการวัดค่าคุณลักษณะของคุณภาพต่างๆ ตามที่ต้องการตรวจสอบ ส่วนขั้นที่ 2 เป็นขั้นตอนการทดสอบความแม่นยำของสมการ calibration ที่สร้างขึ้น ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเรียกว่า ขั้นตอนการทำ validation เพื่อเลือกสมการที่มีความเหมาะสม และสามารถทำนายค่าได้แม่นยำมากที่สุด เมื่อได้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือแล้วจึงนำสมการ calibration ที่ได้ไปใช้ทำนายค่าคุณลักษณะที่ต้องการศึกษาจากสเปกตรัม NIR ที่ทำการวัดได้

2.7.1 การสร้างสมการ Calibration เริ่มต้นจากการหาตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่จะทำการวิเคราะห์คุณภาพมีวิธีการหาหลักๆ 2 วิธี คือ

2.7.1.1 Wavelength selection เป็นวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่จะทำการวิเคราะห์เทคนิคในการเลือกมีหลายแบบเช่น 1) เลือกจากความถี่ความชำนาญ หรือเอกสารอ้างอิงที่บ่งบอกถึงช่วงความยาวคลื่นที่คาดว่าจะสัมพันธ์กับค่าที่จะทำการวิเคราะห์ 2) อาจจะใช้เทคนิคทางสถิติในการคัดเลือกความยาวคลื่นที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์ เช่น Multiple regression หรือการสร้าง correlogram โดยการสร้าง correlogram เป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกน X คือความยาวคลื่น กับแกน Y คือค่า correlation อย่างง่ายของความสัมพันธ์ระหว่าง optical data ณ ความยาวคลื่นนั้นกับค่าวิเคราะห์ที่หามาได้ด้วยวิธี Reference measurement ซึ่งจะช่วยให้นักวิจัยสามารถคัดเลือกความยาวคลื่นที่มีความเป็นไปได้ที่จะสัมพันธ์กับค่าที่วิเคราะห์ ซึ่งการสร้างสมการ Calibration แบบ Wavelength selection อาศัยหลัก และวิธีการทางสถิติมาช่วยในการสร้างสมการ เช่น Simple linear regression, Multiple linear regression เป็นต้น

แต่การเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดไม่ใช่เรื่องง่าย และอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ ถ้าข้อมูลที่ไม่ถูกต้องอาจเกิดปัญหาทำให้ได้ค่าทำนายที่ต่ำกว่า หรือสูงกว่าค่าแท้จริงอันเนื่องมาจากความผิดพลาดจากการสร้างสมการ หรือเกิดปัญหาเมื่อจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการน้อย และทำให้ได้สมการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไปในสมการทำให้ได้ข้อมูลที่ไม่น่าเชื่อถือ

1. Simple linear regression หมายถึง สมการ regression ที่ประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระ(X) และตัวแปรตาม(Y) เพียงตัวเดียวในสมการ โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดหรืออธิบายความหมายของข้อมูลให้ได้มากที่สุด เส้นตรงที่ได้นี้เรียก linear regression

สมการของ linear regression คือ $y = b_0 + b_1 X$

model ของ linear regression คือ $Y = b_0 + b_1 X + e$

โดย b_0 = ค่าคงที่ ณ จุดตัดแกน Y

b_1 = ค่าคงที่ regression หรือ ค่าความชันของกราฟ

e = ผลต่างระหว่างค่า $Y - y = \text{residual}$ หรือ ค่าความคลาดเคลื่อน

2. Multiple linear regression (MLR) เป็นวิธีการใช้ตัวแปรอิสระ (X) มากกว่าหนึ่งตัวในการประมาณค่าตัวแปรตาม (Y) จะทำให้สมการที่ได้ลดความผิดพลาดในการประมาณค่าลงได้ หากพิจารณาในเรื่องการใช้เทคนิค NIRS ในการหาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างก็หมายถึงการพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงที่หลายความยาวคลื่นนั่นเอง สมการ regression คือ

สมการ regression $y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k$

model regression $Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k + e$

ซึ่ง $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ = สัมประสิทธิ์ regression บางส่วน (partial regression coefficient)

2.7.1.2 Full spectrum analysis เป็นวิธีการคัดเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสม (Selective wavelength) จากความยาวคลื่นทั้งหมดที่มีในสเปกตรัมมาสร้างสมการ calibration ดังวิธีที่ได้กล่าวมาแล้ว บางครั้งอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ถ้ามีการสร้างสมการที่ไม่ถูกต้อง อาจเกิดปัญหาทำให้ค่าที่ทำนายต่ำกว่าหรือสูงกว่าที่แท้จริง (Underestimation) อันเนื่องมาจากการเกิดความคลาดเคลื่อนจากการสร้างสมการ (Interference) หรือเกิดปัญหาเมื่อมีจำนวนตัวอย่างที่นำมาใช้ในการสร้างสมการทำนายมีน้อย จึงทำให้ได้สมการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไปในสมการ ทำให้ข้อมูลไม่น่าเชื่อถือ (Over fitting) การใช้ข้อมูลทั้งหมดที่มีในทุกความยาวคลื่นของสเปกตรัม (Full spectrum) น่าจะเป็นหนทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างไรก็ตามปัญหาที่มีอยู่ คือการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไป การใช้วิธีทางสถิติในการจัดกลุ่มแยกประเภทตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกัน และทำการสร้างตัวแปรใหม่ที่เกิดมาจากตัวแปรเดิมจะช่วยทำให้แก้ปัญหาดังกล่าวได้ วิธีการทางสถิติที่นิยมใช้ได้แก่ (ชงชัย สุวรรณสถิตินันท์, 2545)

1. Principal Components Regression (PCR) การทำ PCR จะเริ่มการการทำให้ Principal Components Analysis (PCA) กับข้อมูลที่เป็นตัวแปรอิสระที่ได้มาจากข้อมูลของสเปกตรัมเพื่อสร้างองค์ประกอบหรือตัวแปรใหม่ที่เรียกว่า New Factors ก่อน แล้วจึงนำค่าตัวแปรใหม่ที่สร้างขึ้นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่ได้จากวิธี Reference Methods เพื่อสร้างสมการ calibration โดยใช้หลักการของ MLR

2. Principal Components Analysis (PCA) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดจำนวนของตัวแปรอิสระ ในกรณีที่มีตัวแปรอิสระมีจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น วัดค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมที่ 700 ความยาวคลื่น การลดลงของจำนวนตัวแปรมีวิธีการคือ แบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่เรียกว่า factor หรือ องค์ประกอบ factor ที่สร้างขึ้น อีกนัยหนึ่งก็คือผลรวมของค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นที่มีน้ำหนักแตกต่างกัน factor จะมีได้หลาย factor โดยแต่ละ factor จะแตกต่างกันของน้ำหนักของแต่ละค่าสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งประกอบกันเป็น factor นั้นๆ factor แรกจะถูกสร้างขึ้นมาให้สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าสเปกตรัมได้มากที่สุด factor ที่สองอธิบายความแปรปรวนที่เหลือ ซึ่งทำให้ factor แต่ละ factor แยกจะไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน (Non-Co linearity) ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ เมื่อทำการหา factor เรียบร้อยแล้ว นำ factor ที่ได้มาทำ Regression กับค่าทางเคมีโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด ทำให้ได้ค่า Chemical loading หรือ Calibration coefficient

3. Partial Least Square (PLS) Regression เป็นวิธีการที่คล้ายกับ PCA กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมจะเป็นอิสระจากกระบวนการทำสมการถดถอยของสมการทำนาย ซึ่งใน PLS ทั้งสองกระบวนการจะถูกเชื่อมโยงเข้าไว้ด้วยกัน โดยมีการนำค่าองค์ประกอบทางเคมีมาคิดในกระบวนการหา factor ด้วย ซึ่ง Kasemsamran, (2005) ได้อธิบายถึง PLS ว่าเป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบตัวแปรหลายตัวแปร โดยการสร้าง factor แบบสมการเชิงเส้นตรง

จากข้อมูลของสเปกตรัมเริ่มต้น และนำ factor ที่ได้ไปใช้ในการสร้างสมการถดถอย โดย factor ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยวิธีสถิติ PLS ต้องสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล และเกี่ยวข้องกับการประเมินค่าทางเคมีในเวลาเดียวกัน วัตถุประสงค์ของ PLS เพื่อต้องการลดจำนวนข้อมูลสเปกตรัม ให้ได้เฉพาะข้อมูลสเปกตรัมที่มีความสำคัญกับการทำนายค่าทางเคมีที่สนใจเท่านั้น เพื่อให้สามารถประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น

4. Moving Window Partial Least Square (MWPLS) Regression ซึ่ง Kasemsamran, (2005) อธิบายว่า วิธีการเลือกช่วงความยาวคลื่นสำหรับการวิเคราะห์สเปกตรัมที่มีความซับซ้อนเนื่องจากเป็นสเปกตรัมของตัวอย่างที่มีหลายองค์ประกอบ วิธีนี้ได้มีการพิสูจน์แล้วว่าสามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ให้สมการที่มีประสิทธิภาพสูง และมีความเสถียรต่อการแทรกซ้อนของข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้อง ใน MWPLS มีการกำหนดให้มี 1 หน้าต่างสเปกตรัมขนาด X , เมตริกซ์ขนาด m แถว h คอลัมน์ ให้เคลื่อนที่ไปตามสเปกตรัมตลอดช่วงความยาวคลื่น (ในที่นี้สเปกตรัม คือเมตริกซ์ขนาด m แถว n คอลัมน์) ตำแหน่งข้อมูลที่หน้าต่างเคลื่อนที่ไปถึง จะนำไปสร้างสมการด้วยวิธี PLS ที่ค่า factor ต่างๆ หลังจากนั้นจะทำการคำนวณค่า \log (Sum of Squares Residues : SSR) จากสมการ PLS ที่ได้ และนำไปเขียนกราฟโดยให้แกน X เป็นความยาวคลื่น และแกน Y เป็นค่า \log (SSR) กราฟแต่ละเส้นแสดงค่า \log (SSR) ที่ได้จากการคำนวณในแต่ละ factor แล้วทำการพิจารณาเพื่อเลือกช่วงสเปกตรัมที่มีความสัมพันธ์กับค่าทางเคมี โดยเลือกช่วงกราฟที่มีค่า \log (SSR) ต่ำ เพื่อนำมาสร้างสมการทำนายที่ดีที่สุด

2.7.2 การทำ Validation

หลังจากที่ได้สร้างสมการแล้ว ต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพของสมการนั้นก่อนนำไปใช้งานจริง ซึ่งการทดสอบสมการที่นิยมมี 2 วิธี คือ

2.7.2.1. Full cross validation เป็นการทดสอบสมการภายใน ความหมายคือ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบสมการ เป็นตัวอย่างชุดมาตรฐานทั้งหมด ที่ใช้สร้างสมการประเมินค่าทางเคมีนั่นเอง มีขั้นตอนดังนี้

1. ตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐาน
2. ใช้ตัวอย่างมาตรฐานที่เหลือทำการสร้างสมการ
3. นำสมการที่ได้ประเมินค่าทางเคมีของตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ที่ตัดออก
4. ใส่ตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 กลับคืนเข้าไป
5. ตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 2 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐาน
6. ทำขั้นตอนซ้ำข้างต้น จนครบทุกตัวอย่าง

2.6.2.3 การทดสอบการประเมิน (Prediction testing) วิธีนี้จะทดสอบสมการแบบภายนอก โดยการเตรียมตัวอย่างชุดใหม่มาทำการวิเคราะห์ในสภาวะการทดลอง เช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐาน เรียกชุดตัวอย่างที่นำมาทดลองสมการนี้ว่า ชุดทดสอบ (Testing set) ตัวแปร

อิสระ (X) มากกว่าหนึ่งตัวในการประมาณค่าตัวแปรตาม (Y) สิ่งที่ต้องระวังคือ ปริมาณค่าทางเคมีที่ใช้ทดสอบต้องอยู่ในช่วงมาตรฐาน หลังจากได้สเปกตรัมจากชุดทดสอบก็นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณค่าทางเคมีจากสมการ

2.8 เทอมที่จำเป็นในการประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของโมเดล (Williams, 2007)

2.8.1 ค่าเฉลี่ย (The mean)

ค่าเฉลี่ยเป็นค่าทางคณิตศาสตร์ของข้อมูลที่ใช้อ้างอิง (X) หรือ ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องวัดสเปกตรัม (Y) ค่าเฉลี่ยนั้นจะถูกคำนวณจากผลรวมของค่า X หรือ Y และถูกหารโดยจำนวนของข้อมูล (N) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

2.8.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD)

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลง หรือความแปรปรวนในข้อมูล นั่นคือ รากที่สอง ของความแปรปรวน สูตรในการหาค่า SD_x (หรือ SD_y) คือ

$$SD_x = \{(\sum X^2 - [(\sum X)^2/N]) / (N-1)\}^{1/2}$$

2.8.3 สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of variability, CV %)

CV คือค่า SD ของประชากร x 100 หารด้วยค่าเฉลี่ยของประชากร แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$CV = (SD * 100) / \text{Mean } X \text{ (หรือ } Y)$$

ค่า CV แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์

ค่า Coefficient of variability (CV %) ถูกแสดงออกมาในเทอมของเปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า CV นี้แสดงถึงความแปรปรวนของประชากรที่ไม่ขึ้นกับหน่วยของการวัด ตารางที่ 2.6 แสดงให้เห็นตัวอย่างในการคำนวณค่า Coefficient of variability (CV %) ของตัวแปร

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างการคำนวณค่า Coefficient of variability (CV %)

ลำดับ	ค่าปริมาณโปรตีนของเมล็ดข้าวสาลี	ค่าสถิติ	ค่าที่ได้
1	9.7	N	12
2	11.9	Mean	13.08
3	17.3	ΣX	157.0
4	14.2	ΣX^2	2106.56
5	12.6	SD	± 2.18
6	10.3	CV %	16.67
7	15.1		
8	14.8		
9	11.1		
10	12.4		
11	13.5		
12	14.1		

ที่มา : (Williams, 2007)

2.8.4 ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดย NIRS และข้อมูลที่อ้างอิง (Bias)

เมื่อทำนายค่าตัวแปรที่ต้องการของข้อมูลในเซตตัวอย่าง Validation ค่า Bias หมายถึงความแตกต่างระหว่างค่าอ้างอิงและค่าที่ทำนายโดย NIRS และเป็นการวัดความแม่นยำโดยรวมของ calibration ในโลกความเป็นจริงของทางการค้าและอุตสาหกรรม Bias เป็นหนึ่งในสิ่งที่สำคัญมากในทางสถิติ Bias สามารถเกิดขึ้นได้แม้เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และ SEP แสดงว่าค่า calibration นั้นดีเยี่ยม

สูตรสำหรับการคำนวณ Bias คือ

$$\text{Bias} = (\Sigma X/N) - (\Sigma Y/N)$$

เมื่อ X = ค่าอ้างอิง และ Y = ค่าที่ได้จากการทำนาย โดย NIRS สามารถเป็นบวกหรือลบก็ได้

2.8.5 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (Coefficient of correlation, r)

สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (r) แสดงระดับ ซึ่งข้อมูล 2 เซต (ข้อมูลตัวเลข X และ Y) สอดคล้องซึ่งกันและกัน ความสอดคล้องที่สมบูรณ์จะไม่มีมีความแตกต่างกันเลยระหว่าง 2 เซต

ข้อมูล ผลของค่า r จะเท่ากับ 1.00 ในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ X และ Y อาจจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงบวกหรือลบก็ได้

สูตรสำหรับการคำนวณ r คือ

$$r = \frac{\sum(X \times Y) - [(\sum X \times \sum Y / N)]}{\left(\left[\sum X^2 - (\sum X)^2 / N \right] \times \left[\sum Y^2 - (\sum Y)^2 / N \right] \right)^{1/2}}$$

2.8.6 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, r^2)

แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดยความแปรปรวนในข้อมูล Y ค่าของ r^2 จะเป็นบวกเสมอ โดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของ r ผลประโยชน์ในทางปฏิบัติ r^2 ให้ข้อมูลมากกว่า r และใช้กันมากกว่า r การแปลความหมายของค่า r และ r^2 อยู่ในตาราง 2.7

2.8.7 Regression coefficient (b) และ intercept (a)

สัมประสิทธิ์ Regression, b_{yx} (ยังเรียกว่า slope อีกด้วย) และจุดตัด a แสดงถึงระดับที่ค่า y ถูกทำนายจากค่า x ในความสัมพันธ์ที่สมบูรณระหว่าง X และ Y (ซึ่งทั้ง X และ Y เป็นข้อมูลชนิดเดียวกัน เช่น ปริมาณโปรตีนโดยสเปกตรัม NIR และโดยวิธีอ้างอิง) ค่า r และ b จะเท่ากับ 1.000 และ a เท่ากับ 0.000 แต่เนื่องจากว่าไม่สามารถหลีกเลี่ยงค่า error ได้ ดังนั้น b อาจจะมีมากกว่าหรือน้อยกว่า 1.000 และ a จะต่างจาก 0

ตารางที่ 2.7 การแปลความหมายของค่า r และ r^2

ค่าของ r	r^2	การแปลความหมาย
Up to +/-0.5	Up to 0.25	ไม่สามารถใช้ใน NIR calibration
+/-0.51-0.70	0.26-0.49	เป็นความสัมพันธ์ที่แย่มาก ควรหาเหตุผล
+/-0.71-0.80	0.50-0.64	OK สำหรับการคัดเลือกอย่างหยาบๆ
+/-0.81-0.90	0.66-0.81	OK สำหรับการคัดเลือกและการประมาณค่าอย่างหยาบๆ
+/-0.91-0.95	0.83-0.90	ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย
+/-0.96-0.98	0.92-0.96	ใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
+/-0.99+	0.98+	ดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้

ที่มา : (Williams, 2007)

ในเทคโนโลยี NIRS ระดับ error ของ optical data จะต่ำกว่าข้อมูลอ้างอิงเสมอ ซึ่งเป็นผลดีในการใช้ Multiple Linear Regression (MLR) ในการพัฒนา calibration ซึ่งสมมุติว่าไม่มี error ใน

ค่า X (optical data) เช่นเดียวกับกรณีของ r, สัมประสิทธิ์ Regression และจุดตัด มีค่าเป็นไปได้ทั้งค่าบวกและค่าลบอีกด้วย สูตรในการคำนวณ b คือ

$$\frac{(\sum X \times Y) - [(\sum X \times Y) / N]}{(\sum Y^2 - [(\sum Y)^2 / N])} = \frac{r \times SD_y}{SD_x}$$

สูตรในการคำนวณ a คือ

$$a = Ybar \times (b \times Xbar)$$

2.8.8 การแจกแจงความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดย NIRS และค่าอ้างอิง

รูปแบบหรือการแจกแจงความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนาย NIRS และค่าอ้างอิง ควรจะศึกษาสำหรับทุกๆ การ calibration ที่ยังไม่ได้ทดสอบมาก่อน มี 9 รูปแบบลักษณะความชันของความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ทำนายจาก NIRS และค่าอ้างอิง สิ่งนี้ได้อธิบายไว้ในตารางที่ 2.8 การที่ความชันเปลี่ยนอาจจะเกิดพร้อมๆ กันกับค่า bias โดยรวมที่เป็นบวกหรือลบ ซึ่งอาจมีการแก้ไข ความชัน/bias Bias (ประเภท 8 และ 9) สามารถเกิดขึ้นได้โดยที่ความชันไม่มีความแตกต่าง

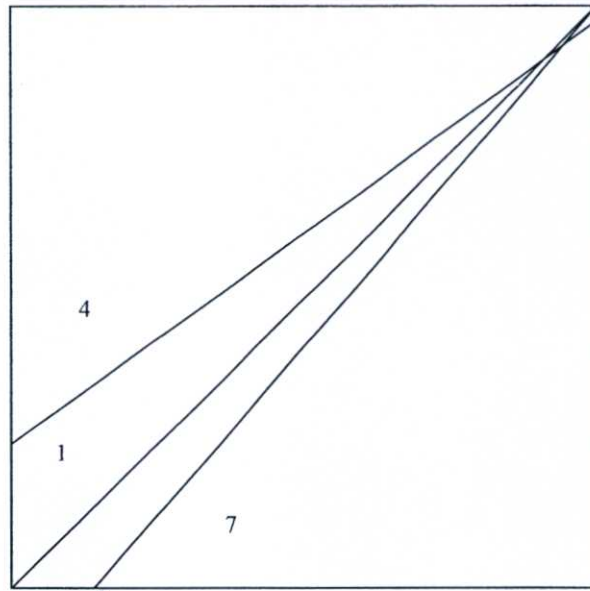
ตารางที่ 2.8 รูปแบบของความชัน

No.	ค่าอ้างอิงต่ำ	ค่าอ้างอิงสูง
1	แน่นอน	แน่นอน
2	แน่นอน	สูง
3	แน่นอน	ต่ำ
4	สูง	ต่ำ
5	ต่ำ	สูง
6	สูง	แน่นอน
7	ต่ำ	แน่นอน
8	สูง	สูง
9	ต่ำ	ต่ำ

ที่มา : (Williams, 2007)

ภาพที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของประเภทความชัน 1, 4 และ 7 ประเภท 8 และ 9 สามารถแก้ไขด้วยการปรับจุดตัด (intercept) ส่วนประเภทอื่นทั้งหมดของ bias ต้องการการปรับปรุงค่าความชัน/bias ถ้าความชันต่างจาก 1.0 โดยมากกว่า +/- 0.05 หรือถ้าความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดย NIRS และค่าอ้างอิงมากกว่า 1.5% ของค่าเฉลี่ย ถ้าค่าความชันอยู่ใน +/- 0.05 ของ 1.000

การเปลี่ยนความชันไม่น่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำนาย และไม่จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนความชัน



ภาพที่ 2.10 ตัวอย่างของประเภทความชัน

ที่มา : (Williams, 2007)

2.8.9 ค่า error มาตรฐานของการทำนาย (Standard error of prediction, SEP หรือ SEV)

SEP เป็นเทอมของ Standard error of performance แสดงสมรรถนะของการทำนาย SEP เป็นค่า SD ของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดย NIRS และค่าอ้างอิง สูตรในการคำนวณ SEP คือ

$$SEP = \left(\frac{\sum (X - Y)^2 - \left(\frac{\sum (X - Y)}{N} \right)^2}{N - 1} \right)^{1/2}$$

ซึ่งไม่เหมือนกับ RMSEP โดย SEP ไม่เกี่ยวข้องกับ bias SEP คำนวณจากผลการทำนายของเซตตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกใช้ในการพัฒนา calibration เซตตัวอย่างนี้คือ Prediction เซตตัวอย่างที่ถูกใช้ใน validation ของ calibration ประกอบด้วยตัวอย่างชนิดเดียวกัน นั่นคือความไม่เกี่ยวข้องอย่างสมบูรณ์ต่อเซตตัวอย่าง calibration บ่อยครั้งที่ตัวอย่าง validation คือส่วนหนึ่งของ single population จากทั้งเซตตัวอย่าง calibration และ validation รวมกัน ในเงื่อนไขนี้ เป็นกรณีที่ดีมากในการใช้เทอม SEV เพื่อแสดง Standard error of validation บางสูตรใช้ $N-2$ ขณะที่อื่นๆใช้ $N-(2)^{1/2}$ แทน $N-1$ ในทางปฏิบัติ ความเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ทำให้เกิดความแตกต่างเพียงเล็กน้อย โดยมีเงื่อนไขว่าเซต validation ต้องมีอย่างน้อย 40-50 ตัวอย่าง

ค่า Standard error of calibration (SEC) ซึ่งก็คือค่า SD ของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดย NIR และตัวอย่างค่าอ้างอิงในเซตตัวอย่าง calibration เนื่องจากการดูซ้ำคลี่น

ความยาวคลื่นที่อยู่ติดกัน มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันอย่างมากและถ้าใช้ MLR, r และ SEC จะดีขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรต้นมากขึ้น สิ่งนี้เรียกว่า over-fitting ของข้อมูล (multicollinearity) ซึ่งอาจทำให้แปลผลผิด ถ้าการทำ validation แสดงค่า r ต่ำและ SEP สูงจนยอมรับไม่ได้ควรลองทำนายข้อมูลชุด calibration และพิจารณาแต่ละข้อมูล SEC อาจจะแสดงให้เห็นว่ามี outliers 1 หรือมากกว่านั้น ซึ่งการเอา outlier ออกอาจจะทำให้ค่าจริงของ r และ SEP ดีขึ้น ตามหลักค่า SEP ควรจะสูงกว่า SEC เสมอ

2.8.10 ค่า error มาตรฐานของ cross-validation (SECV)

Cross-validation สามารถใช้ตัวอย่างชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการสร้าง calibration โมเดลเพื่อทำ validation สิ่งนี้ทำโดยชักตัวอย่างออกหนึ่งตัวอย่างหรือกลุ่มของหลายตัวอย่างจากชุด calibration และทำการปรับปรุงโมเดล calibration ด้วยตัวอย่างที่เหลืออยู่ ตัวอย่างที่ถูกกำจัดเป็นตัวอย่างทำนายและบันทึกค่าความผิดพลาด แล้วนำตัวอย่างนั้นกลับมาแล้วชักตัวอย่างอื่นออกไปและทำซ้ำกระบวนการจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดถูกใช้ในการพัฒนาโมเดลและทำนาย ซึ่งบันทึกค่าความผิดพลาด จะไม่มีตัวอย่างที่ถูกทำนายถูกใช้ในการพัฒนาโมเดลซึ่งเราได้ใช้ทำนาย ถ้าเอาออกเพียงทีละ 1 ตัวอย่างวิธีนี้เรียกว่า “full” หรือ “one-out” cross-validation ถ้านำชุดตัวอย่างออกจะเรียกว่า “segmented” cross-validation ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างที่เหลืออยู่ระหว่างค่าที่ทำนายโดย NIRS และค่าอ้างอิง คือ The standard error of cross-validation (SECV)

Cross-validation ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง และถูกใช้ในหลายการตีพิมพ์ แต่มีข้อเสียที่ว่าไม่มีข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ bias หรือ ความชัน/intercept เพราะว่าตัวอย่างทั้งหมดถูกชักออกจากชุดประชากรเดียวกัน สำหรับชุดตัวอย่างเล็ก (ถึง $N=100$) นิยมใช้ cross-validation มากกว่าวิธี test-set ในการวิเคราะห์โมเดล calibration เหตุผลก็คือชุดตัวอย่างขนาดเล็กนั้นมีความน่าพอใจในการเลือกตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของตัวอย่างทั้งหมดซึ่งเป็นไปได้ใน test-set. One-out cross-validation ใช้เพียงแค่ 2-3 วินาทีด้วยคอมพิวเตอร์ และให้ภาพที่แท้จริงของประสิทธิภาพของโมเดล calibration

ส่วนชุดตัวอย่างที่มีจำนวนมาก (300-400+) ควรจะใช้ประมาณ 20% ของตัวอย่างเป็น validation test set แรก อีก 20% สำหรับ validation test set ที่สองและใช้ที่เหลือ 60% เพื่อสร้างโมเดล calibration

2.8.11 รากที่สองยกกำลังสองของความแตกต่าง (Root mean square of the difference, RMSD, RMSEP)

ค่า Root mean square ของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดย NIRS และค่าอ้างอิงเป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพของสมการ calibration ค่า RMSD ได้รวมค่า bias error ถ้าไม่มีค่า bias อยู่ SEP และ RMSD จะมีค่าเท่ากัน การใช้ค่าสถิติ RMSD ถูกแนะนำมากกว่า SEP สูตรการคำนวณ RMSD คือ

$$\text{RMSD} = \left\{ \frac{\sum (X - Y)^2}{N - 1} \right\}^{1/2}$$

การรายงานผล โดยใช้ SEP กับ Bias แยกกัน แสดงถึงความแม่นยำของการทำนายได้ดี เนื่องจาก RMSD เกี่ยวข้องกับ Bias แต่ไม่ได้แสดงขนาดและเครื่องหมายของ bias

2.8.12 อัตราส่วนค่า SEP ต่อ SD (Ratio of SEP to the SD, RPD)

RPD ย่อมาจาก Ratio of (Standard error of) Prediction (Validation) to (Standard) Deviation อัตราส่วนของ (ค่า error มาตรฐาน) ของการทำนาย (validation) กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือ RPD คือสถิติอย่างง่ายที่ทำให้สามารถศึกษาความสัมพันธ์ของ SEP ในเทอมของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลอ้างอิง คำนวณโดยการหาร SEP ด้วย SD ของค่าอ้างอิงที่ใช้ใน validation (SD_x)

$$\text{RPD} = \text{SEP} / \text{SD}_x$$

อีกวิธีหนึ่งคือใช้สูตร

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

ซึ่งผู้ใช้ส่วนมากพบว่าการใช้สูตรแรกง่ายกว่า

ค่า SEP ควรต่ำกว่า SD มากๆ ซึ่งอัตราส่วนควรเท่ากับ 5 หรือมากกว่า บางกรณีด้วยอาจมีความสม่ำเสมอมาก ค่า SD จึงไม่สูง ซึ่ง RPD อาจจะไม่สูง แต่ถ้า SEP ต่ำกว่า SD มาก ดังนั้น RPD เท่ากับ 2.5-3.0 ก็อาจแสดงถึงการวิเคราะห์ที่แม่นยำถ้า SD มีค่าเพียง 0.4-0.5

2.8.15 อัตราส่วนของ SEP ต่อช่วงกว้างของข้อมูล (Ratio of the SEP to the range, RER)

วิธีอื่นๆ ที่ใช้ในหามาตรฐาน SEP คือการหาความสัมพันธ์ของ SEP ต่อช่วงกว้างของข้อมูลอ้างอิงใช้ชุด validation (RER) แสดงดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{RER} = (\text{ช่วงในข้อมูล validation อ้างอิง}) / \text{SEP}$$

ค่า RER ควรจะสูงที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ แต่ก็สามารถสูงขึ้นอย่างผิดปกติโดยตัวอย่างเดียวที่มีความเข้มข้นสูงมาก ในขณะที่ SD คือไม่มีผลกระทบมากจากค่าค่านั้น ตารางที่ 2.8 อธิบายผลของค่า RPD และ RER

ตารางที่ 2.9 ค่าทางสถิติ RPD และ RER

ค่า RPD	ค่า RER	การแบ่งกลุ่ม	การประยุกต์ใช้
0.0-2.3	จนถึง 6	แย่มาก	ไม่แนะนำ
2.4-3.0	7-12	แย่มาก	คัดเลือกแบบหยาบๆ
3.1-4.9	13-20	พอใช้	คัดเลือก
5.0-6.4	21-30	ดี	ควบคุมคุณภาพ
6.5-8.0	31-40	ดีมาก	ควบคุมขั้นตอน
8.1+	41+	ดีเยี่ยม	ได้ทุกการประยุกต์ใช้

ที่มา : (Williams, 2007)

2.8.16 สรุป

การอธิบายการสรุปของค่าสถิติเหล่านี้ SEP แสดงความแปรปรวนในความเบี่ยงเบนของ X จาก Y ส่วน bias แสดงค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของผล SEP ร่วมกับ Bias แสดงความแม่นยำโดยรวมของกระบวนการทดสอบค่า RPD สร้างความสัมพันธ์ SEP กับ SD ของข้อมูลอ้างอิง และสร้างมาตรฐานของการแปลความหมายของ SEP ค่า RPD ที่สูง (อย่างต่ำเท่ากับ 5 หรือมากกว่า แต่ที่อย่างน้อยคือ 3) แสดงสูงประสิทธิภาพในการทำนาย NIR ให้ต่ำกว่า SEP คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จึงมีข้อจำกัดเช่นเดียวกับ SD

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์, r หรือค่าการตัดสินใจ, r^2 แสดงความใกล้ชิดของความสอดคล้องระหว่างข้อมูลจากการทำนายของ NIR และข้อมูลอ้างอิง ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่สูงกับค่า SEP และ Bias ที่ต่ำ ร่วมด้วย slope ที่เข้าใกล้ 1.0 หมายความว่าผล NIRS ถูกต้องในช่วงข้อมูลที่วัด และยังคงอยู่ด้วยภายใต้เงื่อนไขว่าค่าสถิตินี้ได้จากจำนวนตัวอย่างที่มากเพียงพอ ตัวอย่างควรมีอย่างน้อย 25 ตัวอย่างสำหรับทุกๆความยาวคลื่น โดยใช้ MLR และอย่างน้อยที่สุด 15 ตัวอย่างต่อปัจจัยในการใช้ PLS regression ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่สูง (>0.95) แต่มีค่า bias โดยตลอด หรืออย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองมีค่ามาก หมายความว่ายังคงมีความคลาดเคลื่อนอย่างแน่นอน

Slope แสดงระดับการเปลี่ยนแปลงของค่าทำนายด้วย NIRS ซึ่งสัมพันธ์กับค่าอ้างอิง ค่า slope เท่ากับ 1 คือค่าที่ดีเยี่ยม เพราะแสดงว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงในเซตทั้งสองของข้อมูลเหมือนกันทุกประการ ความเบี่ยงเบนจาก 1.0 ที่มากกว่า 0.05 ควรจะต้องแก้ไข slope และค่า bias ที่อาจเป็นไปได้ ความเบี่ยงเบนที่มากกว่า 0.1 ยิ่งมีนัยสำคัญมาก และต้องการการสืบสวนไปยังสาเหตุ ค่า regression ทางสถิติ b และ a สามารถใช้ในสมการ $y = a + bx$ เพื่อแก้ไขค่า slope และ

bias แต่ในทางปฏิบัติ การเปลี่ยน slope ไม่ควรทำ โดยทั่วไป ถ้าค่า slope มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจาก 1.0 โมเดล calibration อาจจะไม่ดีในการทำนายสำหรับตัวอย่างที่ตามมา

การปรับปรุง slope/bias จะช่วยทำให้ทำนายตัวอย่างที่มีค่าสูงหรือต่ำมากได้แม่นยำขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์จะไม่เปลี่ยน ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์น้อย (<0.8) โดยปรกติจะเป็นไปไม่ได้ที่ NIRS จะทำนายได้แม่นยำสูงสม่ำเสมอ ถึงแม้ว่าจะปรับปรุง slope/bias แล้วเพราะว่าโมเดล calibration อาจจะไม่สามารถใช้ได้ ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ต่ำระหว่างข้อมูลที่ทำนายโดย NIRS และข้อมูลอ้างอิงหมายความว่า การวิเคราะห์ NIR ไม่ประสบความสำเร็จ ถ้าศึกษาสาเหตุของข้อผิดพลาด (error) ของผล NIR ที่ไม่ได้อย่างระมัดระวัง รวมถึงการวิเคราะห์ค่าอ้างอิง แต่ผลยังคงไม่ดี แสดงถึง NIRS นั้นไม่เหมาะสมในการวิเคราะห์

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์, r^2 , bias และค่า RPD คือค่าทางสถิติที่มีความสำคัญมากที่สุดสำหรับการประเมินค่าความมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์โดย NIRS

2.9 การแบ่งกลุ่มด้วยสมบัติการดูดกลืนแสง (Preisner et al. 2008)

2.9.1 Soft Independent Modelling of Class Analogy (SIMCA)

SIMCA มีพื้นฐานมาจากลักษณะของโมเดลที่สร้างจากกลุ่มตัวอย่าง มีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายสมาชิกของกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งของตัวอย่าง ใน SIMCA มีการทำ PCA ของข้อมูลของแต่ละกลุ่มในชุดข้อมูลทั้งหมด จะมีจำนวน PC ที่เพียงพอที่จะครอบคลุมความแปรปรวนภายในกลุ่มแต่ละกลุ่ม ทำให้แบบจำลอง PC ถูกใช้ในการแสดงกลุ่มแต่ละกลุ่ม ในชุดข้อมูลตัวอย่างใหม่สามารถถูก projected ลงบนแบบจำลองที่สร้างขึ้นแล้ว และความเป็นสมาชิกของกลุ่มจะถูกวิเคราะห์ตามระยะทางถึงโมเดลเหล่านี้ การวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับค่าทางสถิติ 2 ค่า คือ ค่า Hotelling (T^2) และค่าความผิดพลาดในการทำนายยกกำลังสอง (squared prediction error, SPE) ค่าทางสถิติเหล่านี้จะวัดระยะทางของตัวอย่างใหม่ในแบบจำลอง และค่าความผิดพลาด เนื่องจากค่าทางสถิติเหล่านี้เป็นค่าสัมพัทธ์ จึงจำเป็นต้องมีการทำ normalization ซึ่งสามารถทำได้โดยการหาค่าทางสถิติเหล่านี้ด้วยค่าจำกัดของความเชื่อมั่นที่ระดับความเป็นไปได้ที่แน่นอน (T^2_α และ SPE) สำหรับตัวอย่างใหม่แต่ละตัวถูก projected ไปบนแบบจำลอง PCA สำหรับกลุ่มที่ 1 ถึงกลุ่มที่ J สามารถหาเวกเตอร์ของระยะทางของแต่ละโมเดล คำนวณได้จาก (D_i)

$$D_i = (D_{i,1}, \dots, D_{i,J})$$

การวัดระยะที่สอดคล้องกับตัวอย่าง i สำหรับโมเดล j ถูกคำนวณตามสมการ

$$D_{i,j} = \sqrt{\frac{T_{i,j}^2}{T_\alpha^2} + \frac{SPE_{i,j}}{SPE_\alpha}}$$

ความเป็นสมาชิกของกลุ่มของตัวอย่าง i จะถูกแสดงค่า D_{ij} ต่างๆ ถ้าตัวอย่าง I จะจัดอยู่ในกลุ่มที่มีระยะ D_{ij} น้อยที่สุด ความเป็นไปได้ของความเป็นสมาชิกของกลุ่มสามารถจะประเมินจากระยะทางเหล่านี้

2.9.2 Partial least squares Discriminant Analysis (PLS-DA)

PLS-DA ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการจัดกลุ่ม โดยเป็นแบบจำลองที่ให้คำแนะนำในการแบ่งกลุ่มในกรณีพิเศษของแบบจำลองการแบ่งกลุ่ม ตัวแปรตามคือกลุ่มต่างๆ ซึ่งจะต้องกำหนดเป็นรหัส เป้าหมายของ PLS หรือกลุ่มถูกกำหนดเป็นรหัส โดยใช้เวกเตอร์ 0 หรือ 1 ที่มีมิติเท่ากับจำนวนสูงสุดของกลุ่ม ดังนั้นตัวอย่างจำนวน n ตัวอย่าง ซึ่งเป็นสมาชิกของกลุ่มต่างๆ m กลุ่ม จะให้มีมิติของเลขฐาน 2 โดยมีมิติเท่ากับ $n \times m$ แบบจำลอง PLS ที่สร้างจากมิติของตัวแปรต้น กับมิติของตัวแปรตามนี้เรียกว่า discriminant PLS (PLS-DA) โดยการ projected ตัวอย่างใหม่ i ลงบนแบบจำลอง PLS-DA จะได้เวกเตอร์ของการทำนาย (J คือจำนวนกลุ่มสูงสุด)

$$\hat{y}_i = (\hat{y}_{i,1}, \dots, \hat{y}_{i,J})$$

วิธีการที่ง่ายในการจัดกลุ่มคือ ตัวอย่างจะอยู่ในกลุ่มที่มีค่าเวกเตอร์ \hat{y}_i ที่สูงสุด

2.10 ประโยชน์ของเทคนิค NIR

Osborne et al. (1993) ได้กล่าวเครื่องมือแต่ละประเภทต่างก็มีข้อจำกัดในการใช้งาน แต่เครื่อง NIR มีประโยชน์ และข้อดีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ทางเคมี หรือการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่น สำหรับการนำเครื่อง NIR ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมีประโยชน์มากมาย เช่น

1. ง่ายต่อการเตรียมตัวอย่าง ไม่จำเป็นต้องชั่งตัวอย่างก่อนนำมาวัดค่า
2. ใช้เวลารวดเร็วในการวัด
3. การตรวจสอบเป็นแบบไม่ทำลาย ทำให้ตัวอย่างที่นำมาตรวจสอบสามารถจำหน่ายส่งออก หรือบริโภคต่อได้ เป็นการประหยัดต้นทุนของผลิตภัณฑ์อีกทางหนึ่ง
4. ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ลดต้นทุนในการดูแลรักษา สภาพแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี
5. สะดวกต่อการใช้งาน เนื่องจากในการปฏิบัติไม่จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีประสบการณ์ หรือต้องได้รับการฝึกฝนโดยเฉพาะ สามารถปฏิบัติตามคู่มือการใช้งานได้ทันที
6. ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมี และเครื่องแก้ว ทำให้สามารถลดต้นทุนในเรื่องสารเคมี และอุปกรณ์เครื่องแก้ว
7. เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับนำไปควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sohn et al. (2000) ใช้เทคนิค NIR วัดคุณภาพของแอปเปิล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ NIR ตรวจสอบคุณภาพภายในของแอปเปิล และได้พัฒนาสมการ Calibration ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ความหวาน ปริมาณกรด และความแน่นเนื้อ โดยสแกนผล แอปเปิลในช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร นำสเปกตรัมที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับค่า ต่างๆที่ทำการวัดโดยวิธีทางกายภาพ และทางเคมี ด้วยโปรแกรม Sesame ซึ่งอาศัยวิธีการทางสถิติ คือ MLR ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิค NIR ในการตรวจสอบ คุณภาพภายในของแอปเปิล

McGlone et al. (1998) ได้ประเมินความแน่นเนื้อ น้ำหนักแห้ง และปริมาณของแข็งที่ ละลายได้ของผลกีวี โดยใช้เทคนิค NIR ทำการวัดผลกีวีจากแหล่งต่างๆกัน ทั้งหมด 5 กลุ่ม ด้วย Fiber interactance probe ในช่วงคลื่น 400-700 นาโนเมตร และ 700-1000 นาโนเมตร นำข้อมูลมา วิเคราะห์ด้วยวิธี PLS โดยใช้โปรแกรม Unscrambler พบว่าตัวอย่างที่นำมาวัดควรจะมี ความหลากหลายในด้านของแหล่งปลูก อายุ และขนาด เพื่อให้การสร้างสมการมีความครอบคลุมเมื่อ นำไปทำนายค่า ส่วนช่วงคลื่น 800-1100 นาโนเมตร เป็นช่วงคลื่นที่เหมาะสมในการสร้างสมการ เพราะให้ค่าการดูดกลืนได้ดีในกลุ่มของ คาร์โบไฮเดรต และน้ำ ส่วนในการทำนายความแน่นเนื้อ นั้นให้ค่าที่ไม่ดี อาจเนื่องมาจากในผลกีวี มีปริมาณ Pectin น้อยกว่า 1% โดยน้ำหนัก จึงทำให้การ ทำนายค่าของสมการไม่ดีนัก

Kawano et al. (1992) ศึกษาการวัดปริมาณน้ำตาล โดย NIR แบบ Fiber optic probe ในผล พืชพันธุ์ Shimizu Hakuto โดยวัดในช่วงความยาวคลื่น 680-1235 นาโนเมตร พบว่า จากสเปกตรัมที่ ปรับแต่งด้วย Second derivative ที่ค่า Brix สูง กลาง และต่ำ พบการดูดซับคลื่นความยาวคลื่นที่ 906 นาโนเมตร อย่างชัดเจน และให้เป็นความยาวคลื่นของน้ำตาลตัวแรก ในสมการ Calibration ค่า Correlation coefficient สูงสุดอยู่ที่ 0.97 และความยาวคลื่นที่สร้างสมการที่ได้จากสเปกตรัม Second derivative คือ 906, 878, 870 และ 889 นาโนเมตร ในขณะที่ Standard error of calibration (SEC) คือ 0.48 °Brix และยังมีความแม่นยำที่จะวัดปริมาณน้ำตาลในผลพืช

อาทิตย์ พวงสมบัติ (2549) ได้ศึกษาการตรวจสอบคุณภาพภายในผลแก้วมังกรพันธุ์เบอร์ 100 ด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy ที่ช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร พบว่า สามารถทำนายค่าปริมาณกรด และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ภายในผลแก้วมังกร ให้ผลทำนายได้ ก่อนข้างแม่นยำ โดยการทำให้ค่าความแม่นยำเพิ่มขึ้น ซึ่งต้องอาศัย 1) การเลือกช่วงความยาวคลื่น 2) การนำค่าทางเคมี กับ ค่า absorbance spectra มาเฉลี่ยในหนึ่งผลแล้วสร้างสมการด้วยวิธี PLS และ 3) การใช้ค่า absorbance ของความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับเปลือกมาหารตลอดความยาว คลื่นแล้วสร้างสมการด้วยวิธี PLS จะช่วยให้สมการทำนายค่าปริมาณกรดได้แม่นยำมากขึ้น

บทที่ 3

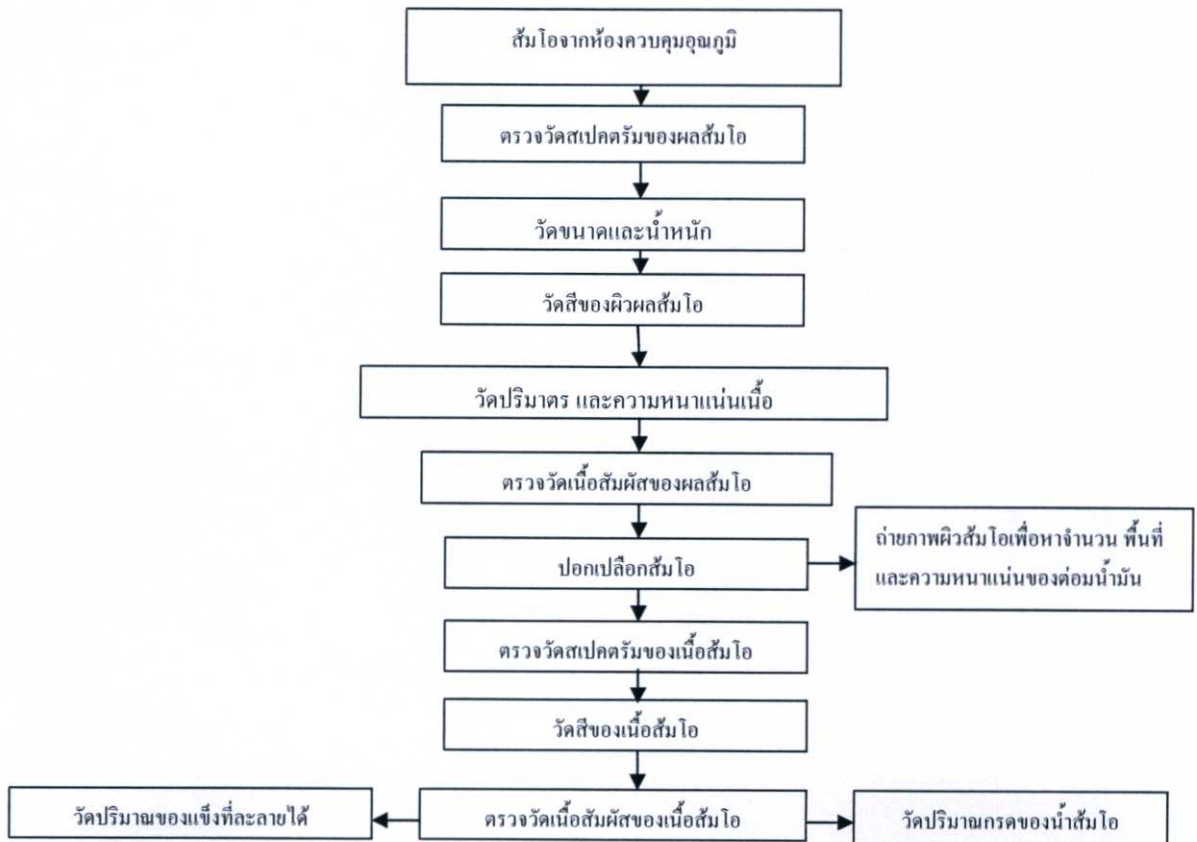
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมผลส้มโอสำหรับการศึกษา

การดำเนินงานได้ส้มผลส้มโอมาจากสวนผู้ผลิตส้มโอส่งออก โดยเริ่มจากเลือกสวนที่ผลิตส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งเพื่อการส่งออก จากนั้นรอวันที่ดอกส้มโอบานจึงนำไปผูกไว้กับช่อดอกพร้อมเขียนวันที่ดอกบาน รวมทั้งหมด 500 ช่อ แล้วปล่อยให้ผลส้มโอเจริญเติบโต ซึ่งอุปกรณ์ในการทดลองได้แก่ ป้ายพลาสติก เชือก ปากกาเมจิก เป็นต้น โดยเริ่มสุ่มเก็บผลส้มโอสำหรับทดลองเมื่อส้มโอมีอายุการเก็บเกี่ยวครบ 180 190 200 210 และ 220 วันหลังดอกบาน ครั้งละ 20 ผล



ภาพที่ 3.1 การผูกป้าย และผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งสำหรับการทดลอง



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนต่างๆ ในการทดลอง

3.2 การศึกษาตรวจสอบสมบัติภายนอกของผลส้มโอ

การดำเนินงานได้นำผลส้มโอที่สุ่มในแต่ละครั้ง วางไว้ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ (ประมาณ 25°C) แล้ว นำมาตรวจวัดด้วยเครื่อง FQA NIR GUN ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 600 – 1100 นาโนเมตร และตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของผลส้มโอ ได้แก่ ขนาด น้ำหนัก ปริมาตร ความแน่นเนื้อ สีผิว เนื้อสัมผัส พื้นที่ของต่อมน้ำมัน ความหนาแน่นของต่อมน้ำมัน และเปอร์เซ็นต์พื้นที่ของต่อมน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งมีวิธีการดังนี้

3.2.1 การตรวจวัดด้วยเครื่อง FQA NIR GUN ของผลส้มโอ

การดำเนินทดลองเพื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วง 600-1100 นาโนเมตร ตรวจวัดทุกๆ 2 นาโนเมตร ของผลส้มโอ ด้วยเครื่อง FQA NIR GUN ซึ่งมีลักษณะการวัดแบบ Interactance

อุปกรณ์

1. เครื่อง FQA NIR GUN (Fantec, Japan)
2. ผ้าสีดำ

ขั้นตอนการทดลอง

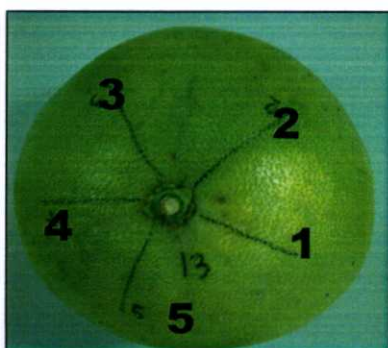
1. กำหนดตำแหน่งที่ตรวจวัดบริเวณด้านข้างกึ่งกลางผลส้มโอรวม 5 ตำแหน่งห่างกันประมาณทุกๆ 72° รอบผลส้มโอ แล้วทำเครื่องหมายบอกจากตำแหน่งวัดที่ 1-5 บนทวนเข็ม นาฬิกาไว้เหนือตำแหน่งวัดใกล้ขั้วผล ดังภาพที่ 3.3

2. ก่อนการตรวจวัดให้นำเครื่อง FQA NIR GUN มาตรวจวัดวัสดุมาตรฐาน (Ceramic) ก่อน เพื่อนำเป็นค่าอ้างอิงในการทำงานของเครื่อง

3. เริ่มการตรวจวัดที่ละตำแหน่ง โดยตั้งค่าที่เครื่อง FQA NIR GUN ให้ทำการตรวจวัด 3 ครั้ง/ตำแหน่ง ดังภาพที่ 3.3 เพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่ง ทั้งนี้ใช้ผ้าดำคลุมผลส้มโอ และ NIR GUN ขณะวัดเพื่อป้องกันแสงจากภายนอกรบกวน

4. ดำเนินการตรวจวัดทั้ง 5 ตำแหน่ง ของส้มโอแต่ละผล

5. ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 2-4 จนครบ 20 ผล



ภาพที่ 3.3 กำหนดตำแหน่งที่ตรวจวัด และการตรวจวัดด้วยเครื่อง FQA NIR GUN

3.2.2 การตรวจวัดขนาด และน้ำหนักของผลส้มโอ

การดำเนินการทดลองเพื่อวัดขนาดผลส้มโอที่ผ่านการทดลองในวิธีการที่ 3.2.1 เรียบร้อยแล้วนำมาวัดขนาด และชั่งน้ำหนักของผลส้มโอในแต่ละผลด้วย เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์

อุปกรณ์

1. Vernier Height Gauge (Mitutoyo, 514-106, Japan ขนาด 600 มิลลิเมตร ความละเอียด 0.02)

2. เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (OHAUSS, ARC 120, USA ขนาด 3100 กรัม ความละเอียด 0.01 กรัม)

3. โต้ะระดับ

ขั้นตอนการทดลอง

1. เริ่มนำผลส้มโอมาชั่งน้ำหนักทีละผล แล้วบันทึกผล

2. จากนั้นนำผลส้มโอที่ชั่งน้ำหนักแล้ว มาวัดขนาดผลด้วย Vernier Height Gauge ของ Mitutoyo โดยผลส้มโอ 1 ผล วัดความยาวเป็นเส้นตรงทั้งหมด 3 แกน คือ 1) แกน A คือเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดจากขั้วผลถึงก้นผล 2) แกน B คือวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับแกน A 3) แกน C วัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับแกน A และแกน B แล้วบันทึกผล จากนั้นนำไปค่าที่ได้ไปคำนวณค่า เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลเชิงเรขาคณิต (GMD) ของผลส้มโอ จาก

$$\text{สมการ} \quad GMD = (ABC)^{\frac{1}{3}}$$

โดยที่

A คือเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดจากขั้วผลถึงก้นผล (มิลลิเมตร)

B คือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับแกน A (มิลลิเมตร)

C คือเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยาวที่สุดที่ตั้งฉากกับแกน A และแกน B

(มิลลิเมตร)

3. ทำข้อ 1-2 จนครบทุกผล



ภาพที่ 3.4 การวัดขนาด และการชั่งน้ำหนักผลส้มโอ

3.2.3 การตรวจวัดสีผิวของผลส้มโอ

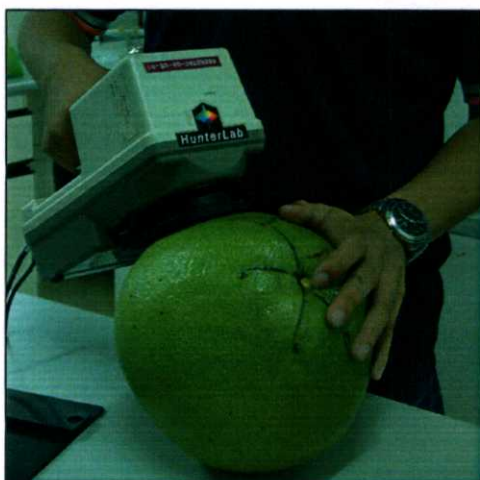
การดำเนินการทดลองเพื่อตรวจวัดสีผิวของส้มโอ โดยใช้เครื่องวัดสี แบบ Spectrophotometer ซึ่งมีลักษณะการวัดแบบ Interactance มีช่วงคลื่นระหว่าง 400-700 นาโนเมตร ที่มีความละเอียด 10 นาโนเมตร โดยใช้ผลส้มโอที่ผ่านการทดลองในวิธีการที่ 3.2.2 เรียบร้อยแล้ว

อุปกรณ์

1. เครื่องวัดสี Spectrophotometer (Hunter Lab, Miniscan XE Plus 45/0 LAV, Reston, USA)

ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับตั้งค่าเครื่องวัดสี เพื่อให้พร้อมใช้งาน โดยใช้มุมการวัด 2° และวัดตำแหน่งละ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย
2. ตรวจวัดที่ละตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดนั้นจะเป็นตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ใช้ตรวจวัดสเปกตรัมของผลส้มโอ โดยค่าที่ได้นั้นจะแสดงออกมาเป็นค่า $L^* a^* b^*$
3. ดำเนินการตรวจวัดทั้ง 5 ตำแหน่ง ของส้มโอแต่ละผล แล้วบันทึกผล
4. ดำเนินการตามขั้นตอนจนครบ 20 ผล



ภาพที่ 3.5 การวัดสีผิวส้มโอด้วยเครื่องวัดสี แบบ Spectrophotometer

3.2.4 การตรวจวัดปริมาตร และความหนาแน่นเนื้อของผลส้มโอ

การดำเนินการทดลองเพื่อตรวจวัดปริมาตร และความหนาแน่นเนื้อของผลส้มโอที่ผ่านการทดลองในวิธีการที่ 3.2.3 แล้วด้วยการชั่งน้ำหนักผลส้มโอในน้ำที่อุณหภูมิ

อุปกรณ์

1. เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (UWE Model รุ่น AFM, Taiwan ขนาด 60 กิโลกรัม ความละเอียด 10 กรัม)
2. ถังน้ำขนาดบรรจุน้ำได้ 10 ลิตร

3. น้ำ RO (Reverse Osmosis)

4. ผ่าสะอาด

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำน้ำมาเติมใส่ถังประมาณ $\frac{3}{4}$ ของถัง
2. นำถังน้ำมาวางบนเครื่องชั่งน้ำหนัก แล้วบันทึกน้ำหนัก
3. นำมือจุ่มลงในถังที่ใส่น้ำขณะวางอยู่บนเครื่องชั่งน้ำหนักปริมาณข้อมือของผู้ทดลองและทำสัญลักษณ์ที่ข้อมือบริเวณจุดแบ่งแยกระหว่างที่เปียกน้ำกับที่ไม่เปียกน้ำ ปรับค่าน้ำหนักที่ตาชั่งให้เท่ากับ 0 (set zero)

4. เช็ดมือให้แห้งแล้วจับผลส้มโอทีละ 1 ผล มานำไปใส่ในในถังที่ใส่น้ำให้ผลส้มโอจมน้ำโดยสังเกตจากสัญลักษณ์ที่ทำไว้อ่านค่าน้ำหนักที่ได้ แล้วบันทึกน้ำหนัก

5. คำนวณปริมาตรของผลส้มโอจากสมการ

$$V_m = \frac{m_L}{\rho_L}$$

โดยที่

V_m คือปริมาตรของผลส้มโอ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

m_L คือมวลของน้ำที่ถูกแทนที่ค่าที่อ่านได้จากเครื่องชั่งในขั้นตอนที่ 4 (กรัม)

ρ_L คือความหนาแน่นของน้ำ (เท่ากับ 1 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

6. คำนวณความหนาแน่นของผลส้มโอจากสมการ

$$\rho_m = \frac{m_m}{V_m}$$

โดยที่

ρ_m คือความหนาแน่นของผลส้มโอ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

m_m คือมวลของผลส้มโอที่ชั่งในอากาศจากการทดลองในข้อ 3.2.2

V_m ปริมาตรของผลส้มโอ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

7. ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 2-6 จนครบทุกผล



ภาพที่ 3.6 การตรวจวัดปริมาตร และความหนาแน่นของผลส้มโอ

3.2.6 การตรวจวัดเนื้อสัมผัสของผลส้มโอ

การดำเนินการทดลองเพื่อตรวจวัดเนื้อสัมผัสของผลส้มโอการทดลองเพื่อตรวจวัดเนื้อสัมผัสของผลส้มโอด้วยเครื่อง Texture Analyzer นั้นจะทำการทดสอบแบบ Puncture Test ซึ่งเป็นวิธีในการทดสอบเนื้อสัมผัสที่จุดใดๆ โดยการทดลองนี้จะทดสอบตำแหน่งที่ 1 และทดสอบแบบ Plate Compression Test ซึ่งเป็นวิธีในการทดสอบเนื้อสัมผัสของส้มโอทั้งผล ในตำแหน่ง ซึ่งเป็นส้มโอที่ผ่านการทดลองในวิธีการที่ 3.2.5

อุปกรณ์

1. เครื่อง Texture Analyzer (Stable Micro Systems, TA. HD. Plus, UK)
2. หัวกดชนิดแท่งทรงกระบอกทำด้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม.

สำหรับการทดสอบ Puncture Test

3. หัวกดแบบแผ่นกลมทำด้วยอลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มม. สำหรับ

การทดสอบแบบ Plate Compression Test

4. กระดาษทรายละเอียดชั้น

ขั้นตอนการทดลอง

1. ใส่อุปกรณ์แท่งทรงกระบอกสำหรับการทดสอบ Puncture Test และปรับตั้งเครื่อง Texture Analyzer รุ่นให้พร้อมใช้งานโดยกำหนดความเร็วในการกดเท่ากับ 2 มิลลิเมตร/วินาที และความลึกในการแทงทะลุเท่ากับ 50 มิลลิเมตร

2. นำกระดาษทรายชั้นวางไว้ตรงแท่นวางผลไม้ ซึ่งจะอยู่ใต้หัวกด

3. เริ่มนำผลส้มโอที่ละผลวางไว้บนกระดาษทรายให้ตำแหน่งวัดที่ 1 ตรงกับหัวกดพอดี และสั่งให้เครื่องทำงาน

4. ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 3 จนครบผลส้มโอทุกผล

5. เปลี่ยนหัวกดเป็นชนิดแผ่นวงกลม และปรับตั้งเครื่อง Texture Analyzer ให้พร้อมใช้งานโดยกำหนดความเร็วในการกดเท่ากับ 2 มม./วินาที และกดให้จนกว่าจะได้แรงเท่ากับ 40 นิวตัน แล้วค้างไว้เป็นเวลา 30 วินาที แล้วถอนหัวกดขึ้นด้วยความเร็วเท่ากับ 2 มม./วินาที

6. เริ่มนำผลส้มโอที่ผ่านขั้นตอนที่ 4 แล้วทีละผลมาวางไว้บนกระดาษทรายให้ตำแหน่งวัดที่ 3 ตรงกับหัวกดพอดี และสั่งให้เครื่องทำงาน

7. ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 5 และ 6 จนครบผลส้มโอทุกผล

8. จากนั้นวิเคราะห์ค่าต่างๆ ในการทดสอบ Puncture Test ได้แก่ค่า Initial firmness, Average firmness, Bioyield distance, Rupture distance, Bioyield force, Penetrating force in Albedo, Rupture force, Penetrating force in flesh, Strength of membrane, Penetrating energy in flesh และ Toughness และการทดสอบแบบ Plate Compression Test ได้แก่ค่า Initial

firmness, Average firmness, Energy absorption, Degree of elasticity, Relaxation ratio และ Deformation ratio ด้วยโปรแกรม Texture Analyzer



ภาพที่ 3.7 การตรวจแบบ Puncture Test และแบบ Plate Compression Test

3.2.5 การตรวจวัดความหนาแน่นของต่อมน้ำมันที่ผิวของผลส้มโอ

การดำเนินการทดลองเพื่อตรวจวัดความหนาแน่นของต่อมน้ำมันที่ผิวของผลส้มโอ ตำแหน่งที่ 5 ด้วยกล้อง CCD Progressive Scan Camera โดยนำเปลือกส้มโอที่ตำแหน่งที่ 5 ของแต่ละผลที่ผ่านการทดลองในวิธีการที่ 3.2.4 เรียบร้อยแล้ว

อุปกรณ์

1. เครื่องมือการทำ Image Processing ได้แก่ กล้องถ่ายภาพ CCD Progressive Scan Cam (Hitachi, KP-FD 32F, Japan) กล้องแสง โปรแกรม Lab VIEW 8.0 และคอมพิวเตอร์

2. มีดคัดเตอร์

3. ไม้บรรทัด

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำเปลือกส้มโอของแต่ละผลมาตัดให้ได้ขนาด 3 x 3 เซนติเมตร หนา ประมาณ 0.5 เซนติเมตร

2. นำชิ้นเปลือกส้มโอที่เตรียมไว้วางลงในกล่องแสง และวางไม้บรรทัดไว้ด้านข้าง

3. ถ่ายภาพชิ้นเปลือกส้มโอทีละ 1 ชิ้น ให้ติดไม้บรรทัดที่วางอยู่

4. นำภาพที่ได้มาตัดให้ได้ขนาด 1 x 1 เซนติเมตร ตามสเกลของไม้บรรทัด

5. หลังจากนั้นนำภาพที่ได้มาหาจำนวนต่อมน้ำมัน และพื้นผิวต่อมน้ำมัน ด้วย

โปรแกรม Lab view

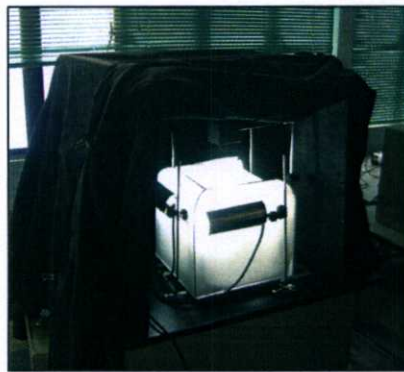
6. คำนวณหาพื้นที่ต่อมน้ำมันเฉลี่ย ความหนาแน่นต่อมน้ำมัน และเปอร์เซ็นต์พื้นที่ต่อมน้ำมันจากสูตร

พื้นที่ต่อมไขมันเฉลี่ย = ผลรวมพื้นที่ผิวต่อมไขมัน/จำนวนต่อมไขมัน

ความหนาแน่นต่อมไขมัน = จำนวนต่อมไขมัน/พื้นที่ 1 cm²

เปอร์เซ็นต์พื้นที่ต่อมไขมัน = (ผลรวมพื้นที่ผิวต่อมไขมัน/พื้นที่ 1 cm²) x 100

7.ทำข้อ 1-5 จนครบทุกผล



ภาพที่ 3.8 ลักษณะเปลือก และการถ่ายภาพต่อมไขมันที่ผิวของผลส้มโอ

3.3 การศึกษาตรวจสอบสมบัติภายในของเนื้อส้มโอ

นำผลส้มโอที่ผ่านการตรวจสอบสมบัติภายนอกแล้ว นำมาปอกเปลือกออก และแกะเอาเฉพาะเนื้อเรียงใส่ถาดโฟมตามแนวขวาง โดย 1 ผล แบ่งใส่ให้ได้ 2 ถาด โดยไม่เอาชิ้นที่เกิดความเสียหายจากการทดลองวัดเนื้อส้มผัส แล้วปิดด้วยฟิล์มพลาสติกที่นิยมนำใช้กันทั่วไปในการผนึกอาหารชนิด PVC หนา 10 ไมครอน จากนั้นนำมาตรวจวัดด้วยเครื่อง FQA NIR GUN ทั้งขณะมีฟิล์ม และไม่มีฟิล์ม แล้วตรวจสอบคุณสมบัติภายในได้แก่ สีของเนื้อส้มโอ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอ ปริมาณกรดที่ไตรเครทได้ของน้ำส้มโอ และ เนื้อสัมผัสของเนื้อส้มโอ ซึ่งมีวิธีการดังนี้



ภาพที่ 3.9 การปอกส้มโอ และการจัดวาง

3.3.1 การตรวจวัดเนื้อส้มโอด้วยเครื่อง FQA NIR GUN

การดำเนินการทดลองเพื่อวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วง Near Infrared ของเนื้อส้มโอ โดยใช้เครื่อง FQA NIR GUN ซึ่งมีลักษณะการวัดแบบ Interactance มีช่วงคลื่นระหว่าง

600-1100 นาโนเมตร ที่มีความละเอียด 2 นาโนเมตร โดยแบ่งออกเป็นแบบตรวจวัดผ่านฟิล์ม และแบบสัมผัสเนื้อโดยตรง ตำแหน่งละ 3 ครั้ง ทดลองในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ $26 \pm 1^{\circ}\text{C}$

อุปกรณ์

1. เครื่อง FQA NIR GUN
2. ผ้าสีดำ
3. กระดาษทิชชู

ขั้นตอนการทดลอง

1. เตรียมการตรวจวัดให้นำเครื่อง FQA NIR GUN ตรวจวัดกับวัสดุมาตรฐาน (ceramic) ก่อน เพื่อนำเป็นค่าอ้างอิงในการทำงานของเครื่อง
3. จากนั้นนำภาคโฟมเนื้อสัมผัสมาตรวจวัดด้วยเครื่อง FQA NIR GUN ตรงกึ่งกลางบริเวณส่วนที่หนาที่สุดของชิ้นข้าง และคลุมผ้าดำ เพื่อป้องกันแสงภายนอก
4. หลังจากนั้นแกะฟิล์มออก แล้วตรวจวัดด้วยเครื่อง FQA NIR GUN ตรงกึ่งกลางของชิ้นข้างๆ ขณะวัดคลุมผ้าดำ เพื่อป้องกันแสงภายนอก (ภาพที่ 3.10)
5. ดำเนินการตรวจวัดตามขั้นตอนที่ 2-4 จนครบการทดลอง



ภาพที่ 3.10 การตรวจวัดเนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง FQA NIR GUN

3.3.2 การตรวจวัดสีของเนื้อสัมผัส

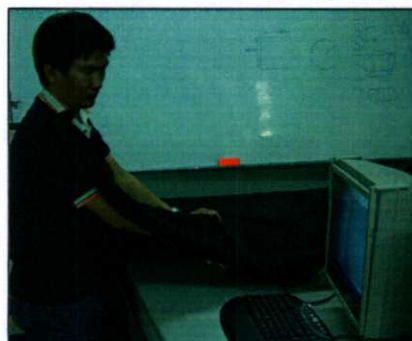
การดำเนินการทดลองเพื่อตรวจวัดสีของเนื้อสัมผัส โดยใช้เครื่องวัดสี แบบ Spectrophotometer ซึ่งมีลักษณะการวัดแบบ Interactance มีช่วงคลื่นระหว่าง 400-700 นาโนเมตร ที่มีความละเอียด 10 นาโนเมตร โดยใช้ผลสัมผัสที่ผ่านการทดลองในวิธีการที่ 3.3.1 เรียบร้อยแล้ว

อุปกรณ์

1. เครื่องวัดสี Spectrophotometer (Hunter Lab, Miniscan XE Plus 45/0 LAV, Reston, USA)
2. ผ้าสีดำ

ขั้นตอนการทดลอง

1. ปรับตั้งค่าเครื่องวัดสี Hunter Lab เพื่อให้พร้อมใช้งาน โดยใช้มุมการวัด 2° และ วัดตำแหน่งละ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย
2. ตรวจวัดที่เนื้อส้มโอที่ได้โดยเครื่องวัดสี ทำการตรวจวัดขึ้นเดียวกับที่ตรวจวัด NIR GUN 1 ขึ้น/ถาด โดยค่าที่ได้นั้นจะแสดงออกมาเป็นค่า $L^* a^* b^*$
3. ดำเนินการจนครบการทดลอง



ภาพที่ 3.11 การวัดสีของเนื้อส้มโอด้วยเครื่องวัดสี Hunter Lab

3.3.3 การตรวจวัดเนื้อส้มผัสเนื้อส้มโอ

การดำเนินการทดลองเพื่อตรวจวัดเนื้อสัมผัสของเนื้อส้มโอ ด้วยเครื่อง Texture Analyzer โดยนำเนื้อส้มโอที่ใส่ในถาดโฟม และผ่านการทดลองในวิธีการที่ 3.3.2 เรียบร้อยแล้ว

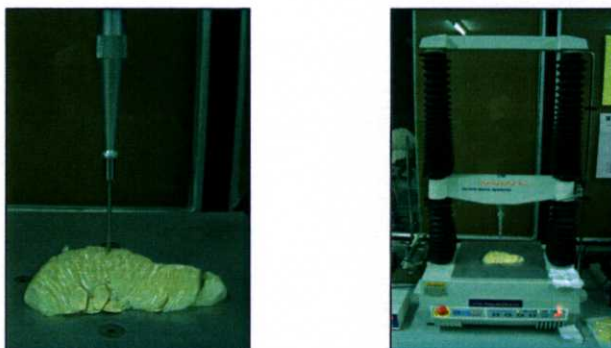
อุปกรณ์

1. เครื่อง Texture Analyzer (Stable Micro Systems, TA. HD. Plus, UK)
2. หัวกดชนิดแท่งทรงกระบอกทำด้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม.

สำหรับการทดสอบ Puncture Test

ขั้นตอนการทดลอง

1. ใส่หัวกดแท่งทรงกระบอก และปรับตั้งเครื่อง Texture Analyzer รุ่นให้พร้อมใช้งาน โดยกำหนดความเร็วในการกดเท่ากับ 2 มม./วินาที และความลึกในการแทงทะลุเท่ากับ 10 มม.
2. นำชิ้นเนื้อส้มโอที่ผ่านการวัดสีวางบนแท่นวางของเครื่อง Texture Analyzer และ จัดให้ตำแหน่งกดที่อยู่กึ่งกลางของชิ้นตรงส่วนหนาสุดพอดี และสั่งให้เครื่องทำงาน (ภาพที่ 3.12)
3. ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 2 จนครบทุกตัวอย่าง
4. จากนั้นวิเคราะห์ค่าต่างๆ ในการทดสอบ Puncture Test ได้แก่ค่า Initial firmness, Max force, Average force และ Toughness



ภาพที่ 3.12 การวัดเนื้อสัมผัสของเนื้อส้มโอแบบ Puncture Test

3.3.4 การตรวจวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอ

การดำเนินการทดลองเพื่อตรวจวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอที่ผ่านการทดลองในวิธีการที่ 3.3.3 เรียบร้อยแล้ว ด้วยเครื่อง Refractometer

อุปกรณ์

1. เครื่อง Digital Refractometer (ATAGO, Pocket PAL-1, Japan)
2. บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
3. น้ำกลั่น
4. กระดาษทำความสะอาด
5. มีด
6. ที่คั้นน้ำผลไม้

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำเนื้อส้มโอเฉพาะชิ้นผ่านการทดลองในวิธีการที่ 3.3.3 มาคั้นน้ำใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. แล้วหยดน้ำส้มโอในช่องที่ใส่ตัวอย่างของเครื่อง Refractometer แล้วอ่านค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (% Brix) ทำ 2-3 ซ้ำ แล้วบันทึกผล (ภาพที่ 3.13)
3. จากนั้นเทตัวอย่างออกจากเครื่อง Refractometer ฉีดล้างด้วยน้ำกลั่นและใช้กระดาษเช็ดให้แห้ง
4. ดำเนินการตรวจวัดตามขั้นตอนที่ 1-3 จนครบทุกตัวอย่าง



ภาพที่ 3.13 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอ

3.3.5 การตรวจวัดปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้ของน้ำส้มโอ

การดำเนินการทดลองเพื่อตรวจวัดความเป็นกรดของน้ำส้มโอที่เหลือจากการทดลองในวิธีการที่ 3.3.4 ด้วยวิธีการไตเตรท ตามวิธี AOAC (1990)

อุปกรณ์

1. เครื่อง pH meter แบบหัวจุ่ม (HANNA, HI 8521, Italy)
2. สารละลาย Buffer solution ที่มีค่า pH เท่ากับ 4 และ 7 สำหรับปรับตั้งเครื่อง pH meter
3. บิวเรต
4. สารละลาย Sodium hydroxide (NaOH) เข้มข้น 0.1 M
5. น้ำกลั่น
6. บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
7. ขวดลูกอมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
8. ปิเปตต์ขนาด 0.2 มิลลิลิตร

ขั้นตอนการทดลอง

1. คั้นน้ำส้มโอที่เตรียมไว้ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ปรับตั้งเครื่อง pH meter ด้วยสารละลาย Buffer solution ที่มีค่า pH เท่ากับ 4 และ 7
3. คณน้ำส้มโอและนำหัวจุ่มวัดค่า pH ของน้ำส้มโอที่เตรียมไว้และบันทึกผลน้ำส้มโอที่ตรวจวัดค่า pH เรียบร้อยแล้วนั้นจะนำมาทดลองหาปริมาณความเป็นกรด
4. เตรียมสารละลาย Sodium hydroxide (NaOH) เข้มข้น 0.1 M และบรรจุใส่ในบิวเรตจนเต็ม
5. คณน้ำส้มโอที่ตรวจวัดค่า pH เรียบร้อย จากนั้นไตเตรทด้วยสารละลาย Sodium hydroxide (NaOH) เข้มข้น 0.1 M จนกระทั่งค่า pH ที่อ่านได้จากเครื่อง pH meter มีค่าเท่ากับ 6 อ่านและบันทึกค่าปริมาณของสารละลาย Sodium hydroxide (NaOH) เข้มข้น 0.1 M ที่ใช้ไปจากบิวเรต
6. หลังจากนั้นไตเตรทต่อด้วยสารละลาย Sodium hydroxide (NaOH) เข้มข้น 0.1 M อย่างช้าๆ จนกระทั่งค่า pH เท่ากับ 7 ขณะที่ค่า pH เท่ากับ 7 แล้วนั้นเติมสารละลาย Sodium hydroxide (NaOH) เข้มข้น 0.1 M ลงไปอีก 4 หยด อ่านและบันทึกค่าปริมาณของสารละลาย Sodium hydroxide (NaOH) เข้มข้น 0.1 M ที่ใช้ไปจากบิวเรต
7. จากนั้นทำการไตเตรตต่อจนกระทั่งค่า pH ที่อ่านได้มีค่าเท่ากับ 8.1 อ่านและบันทึกค่าปริมาณของสารละลาย Sodium hydroxide (NaOH) เข้มข้น 0.1 M ที่ใช้ไปจากบิวเรต (โดยค่า pH ที่ยอมรับได้นั้นจะต้องอยู่ในช่วง 8.1 ± 0.02)

8.คำนวณหาค่าความเป็นกรดของน้ำส้มโอจากสมการข้างล่าง ซึ่งค่าที่ได้จะแสดงออกมาเป็นของปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้ของน้ำส้มโอ และบันทึกผลที่ได้จากการคำนวณ

$$\text{ปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้} = \left[\frac{A \times B \times K}{O} \right] \times 100$$

โดยที่ A คือ ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH (0.1 N)

B คือ ปริมาณสารละลาย NaOH ที่ใช้ในการไตรเตรทให้ได้ค่า pH 8 (มิลลิลิตร)

K คือ milliequivalent of citric acid (anhydrous) = 0.064 (Pearson, 1971)

O คือ ปริมาณของน้ำส้มโอเริ่มต้นที่ใช้ในการไตรเตรท (มิลลิลิตร)

9.ทำซ้ำข้อ 2-8 จนครบทุกตัวอย่าง



ภาพที่ 3.14 การวัดหาความเป็นกรดของน้ำส้มโอ

3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง จำเป็นต้องตัดค่าบางส่วนที่มีค่ามากเกินไปหรือน้อยเกินไป (Out linier) ออกจากผลการทดลอง ที่อาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของตัวอย่าง หรือเกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการทดลอง เพื่อให้ค่าต่างๆ อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน สามารถหาได้จากสมการ

$$(X_i - \bar{X}) / SD$$

โดยที่ X_i คือ ค่าที่ได้จากการทดลองของแต่ละตัวอย่าง

\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยทั้งหมดของตัวอย่าง

SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง

3.4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง โดยวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ โดยวิธี Duncan Multiple Range Test แล้วแสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับอายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ของผลส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้ง สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของผลส้มโอ การวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test การวัดเนื้อสัมผัสแบบ Plate Compression test และภาพถ่ายของเปลือกส้มโอ

3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และชีวเคมีของเนื้อส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้ง

ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ และชีวเคมีของเนื้อส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้ง วิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ความเบี่ยงมาตรฐาน และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ โดยวิธี Duncan Multiple Range Test แล้วแสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับอายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ของผลส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้ง สมบัติทางกายภาพของเนื้อส้มโอ ได้แก่ สีเนื้อส้มโอ การวัดเนื้อสัมผัสของเนื้อส้มโอ และสมบัติทางชีวเคมีของเนื้อส้มโอ ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้

3.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม

ผลจากวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 600–1100 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง FQA NIR GUN ในการตรวจวัดคุณภาพจากผิวผล และเนื้อส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยว 180 190 200 210 และ 220 วันหลังจากดอกบาน เป็นสเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) แล้วปรับปรุงสเปกตรัม โดยจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น 2 วิธี ได้แก่ 1) Multiplicative Scatter Correction (MSC) 2) Savitzky-Golay second differentiation วิเคราะห์ผลโดยการอธิบายความยาวคลื่นที่มีการดูดซับแสงสูงว่าเป็นการดูดซับแสงของพันธะหรือสารใด ซึ่งเปรียบเทียบกับผลของบทความวิจัยอื่นๆ

3.4.4 การคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้ง

การคัดแยกผลส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้งตามอายุการเก็บเกี่ยว โดยใช้ความแตกต่างของสเปกตรัมในช่วงของแสงที่มองเห็น (400-700 นาโนเมตร) ของโดยใช้เครื่องวัดสี แบบ Spectrophotometer วัดผิวเปลือกผลส้มโอ และสเปกตรัมที่ผ่านการตัดค่าในช่วงที่มีการรบกวนออก จึงได้ในช่วง 633-961 โดยใช้เครื่อง FQA NIR GUN วัดผิวเปลือกผล และเนื้อส้มโอ ทั้งหมด 5 อายุการเก็บเกี่ยว ได้แก่ 180 190 200 210 และ 220 วันหลังจากดอกบาน ใช้โมเดลการคัดแยก 2 แบบ คือ Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) และ Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) โดยใช้สเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) และ spectrum ที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น 2 วิธี ได้แก่ 1) Multiplicative Scatter Correction (MSC) 2) Savitzky-Golay second differentiation

3.4.5 การทำนายการเปลี่ยนแปลงตามอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้ง

การสร้างสมการทำนายสมบัติที่มีภายนอกและภายในด้วยวิธี Partial least square (PLS) ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 633–961 นาโนเมตร (สเปกตรัมที่ผ่าน

การตัดค่าในช่วงที่มีการรบกวนออก) ด้วยเครื่อง FQA NIR GUN ในการตรวจวัดสเปกตรัมจากผิวผล และเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง กับสมบัติที่วัดได้จากส่วนต่างๆของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งในห้องปฏิบัติการคือ ส่วนผลส้มโอ และส่วนเนื้อส้มโอ ทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว ได้แก่ 180 190 200 210 และ 220 วันหลังจากดอกบาน โดยใช้สเปกตรัม ดั้งเดิม (Raw spectrum) และ สเปกตรัมที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น 2 วิธี ได้แก่ 1) Multiplicative Scatter Correction (MSC) 2) Savitzky-Golay second differentiation ที่มี 2 derivative segment คือ 10 และ 20 nm ค่าที่ทำนาย ได้แก่ ความหนาแน่นของต่อมน้ำมัน เปอร์เซ็นต์พื้นผิวต่อมน้ำมัน ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณกรดที่ไตรเอสเตอร์ได้ Max force Average force และ Toughness

บทที่ 4

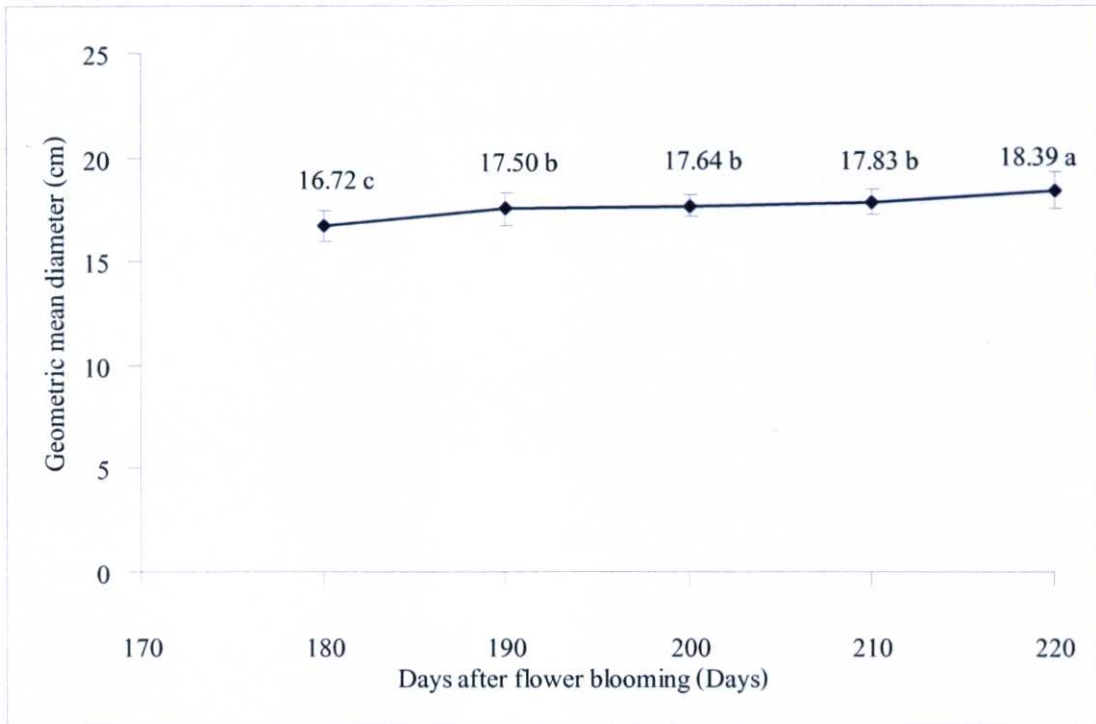
ผลการทดลอง

4.1 ผลการตรวจวัดสมบัติของผลส้มโอพันธุ์ชวบน้ำฝิ่ง

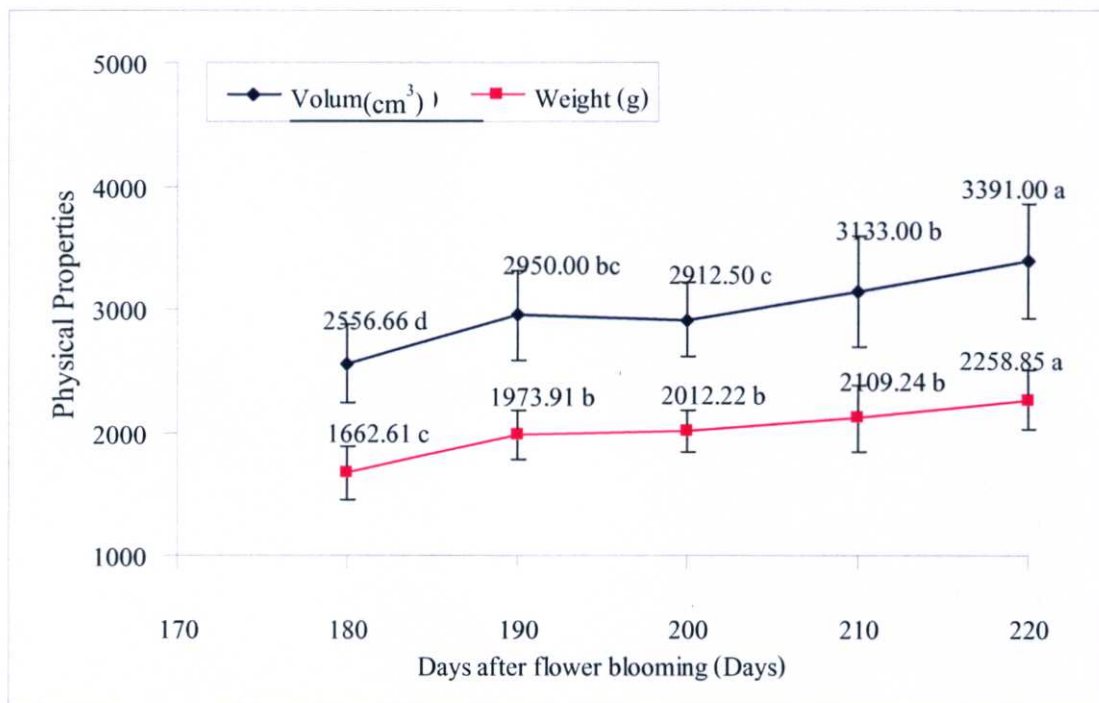
ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของผลส้มโอพันธุ์ชวบน้ำฝิ่ง โดยวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ความเบี่ยงมาตรฐาน และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ โดยวิธี Duncan Multiple Range Test แล้วแสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับอายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ของผลส้มโอพันธุ์ชวบน้ำฝิ่ง ดังนี้

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของผลส้มโอพันธุ์ชวบน้ำฝิ่ง

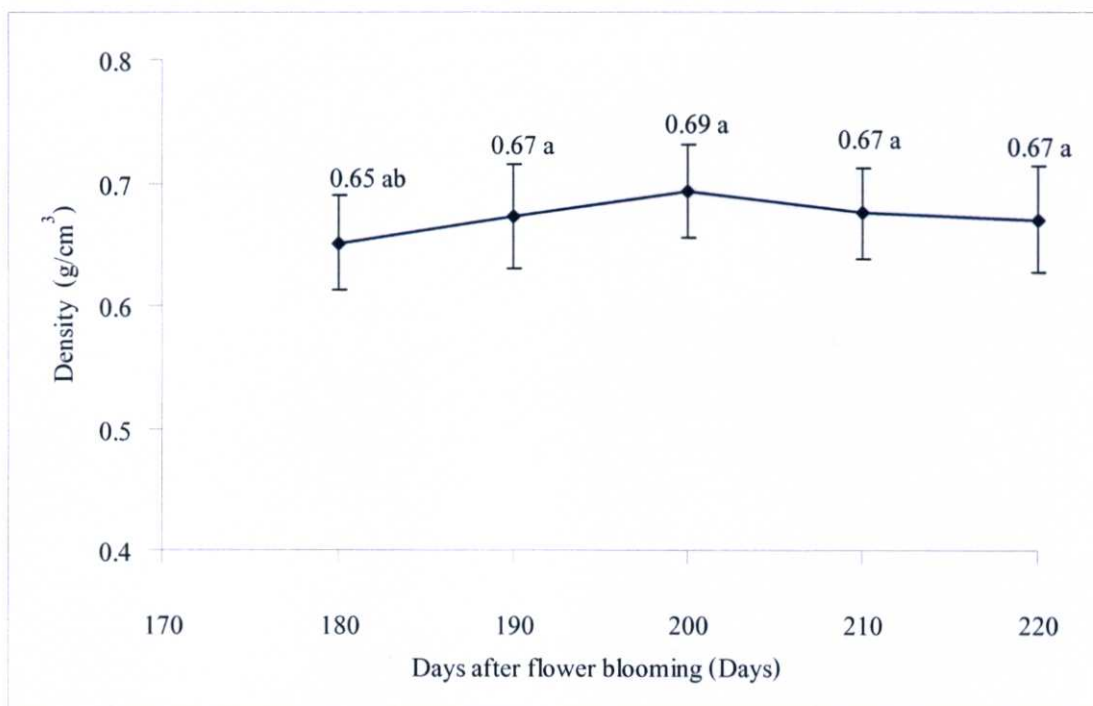
การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลส้มโอพันธุ์ชวบน้ำฝิ่งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน 5 ระยะ พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometric mean diameter : GMD) แสดงดังภาพที่ 4.1 GMD ผลส้มโอในการเก็บเกี่ยว 180 วันหลังดอกบาน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ แต่กลับมีขนาดแตกต่างไม่มากในอายุการเก็บเกี่ยว 190, 200 และ 210 วันหลังดอกบาน ทั้งที่มีขนาดเพิ่มขึ้นอีกในอายุการเก็บเกี่ยว 220 วันหลังดอกบาน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับน้ำหนัก และปริมาตรของผลส้มโอแสดงดังภาพที่ 4.2 ในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 180 กับ 190 วันหลังดอกบาน เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ และมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากในช่วงช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 190-210 วันหลังดอกบาน แล้วมีการเพิ่มขึ้นในอายุการเก็บเกี่ยว 220 วันหลังดอกบาน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ แต่เมื่อสังเกตค่าความหนาแน่นของผลส้มโอทั้ง 5 ช่วงอายุ แสดงดังภาพที่ 4.3 มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ $P>0.05$ เนื่องจากความหนาแน่นเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อผลส้มโอมีอายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นผลส้มโอมีน้ำหนักและปริมาตรเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเท่ากัน ส่วนการเปลี่ยนแปลงของสีผิวผลส้มโอแสดงดังภาพที่ 4.4 โดยแสดงค่าสีตามระบบ C.I.E. LAB ($L^*a^*b^*$) โดยค่า L^* แสดงค่าความสว่าง (สีดำ-ขาว) ส่วนค่า a^* แสดงสีเขียว-แดง และค่า b^* แสดงสีน้ำเงิน-เหลือง ซึ่งผลการทดลองจากค่า L^* ผลส้มโอมีความสว่างเพิ่มขึ้น จากค่า a^* เป็นค่าติดลบผลส้มโอมีสีเขียวและเมื่ออายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นจะมีค่าลบน้อยลงแสดงว่ามีสีเขียวจางลง และ b^* มีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นตามอายุการเก็บเกี่ยว แสดงว่ามีสีเหลืองเพิ่มขึ้น



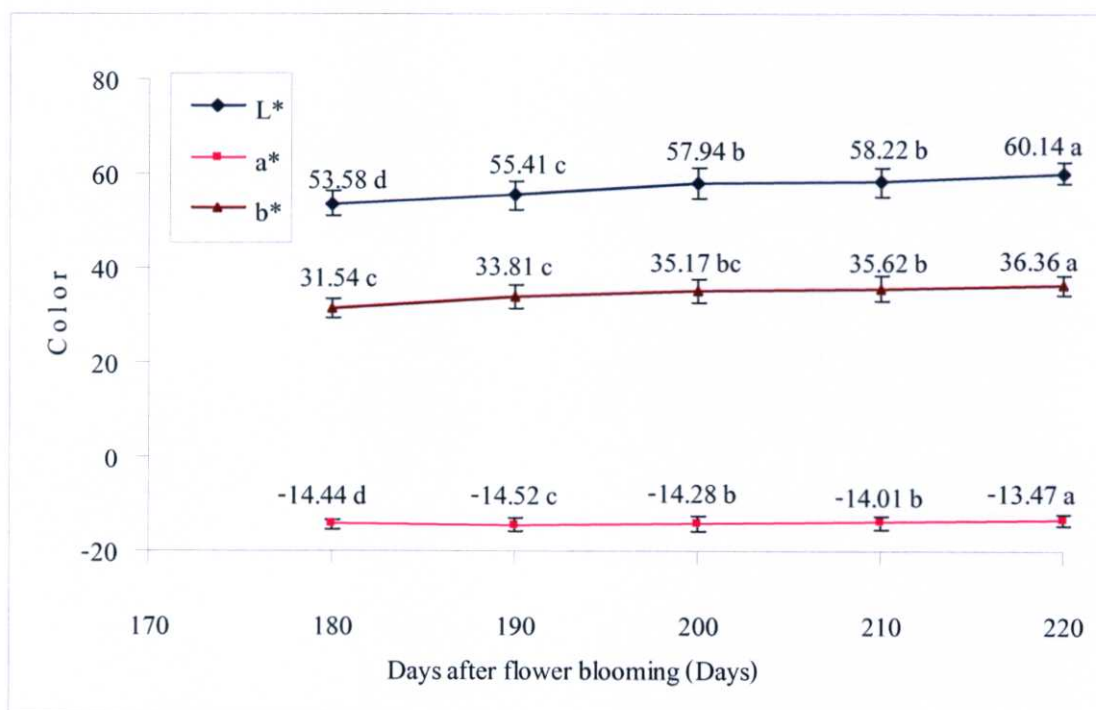
ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต



ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก และปริมาตรของผลส้มโอ



ภาพที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของผลส้มโอ

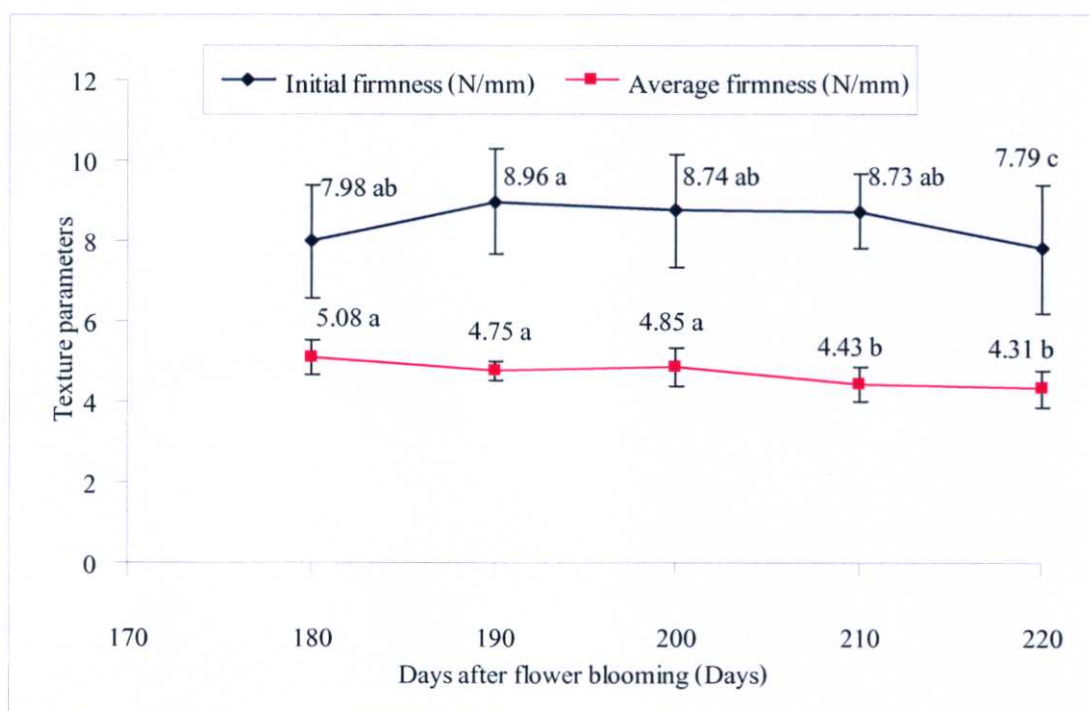


ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงสีผิวผลส้มโอ

4.1.2 ผลการตรวจวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test

ในการตรวจวัดเป็นลักษณะการรับแรงของสั้มโอเฉพาะตรงจุดที่ตรวจวัดตั้งแต่เปลือกกลงไปถึงเนื้อ โดยค่าต่างๆที่ตรวจวัดได้แสดงรายละเอียดดังนี้

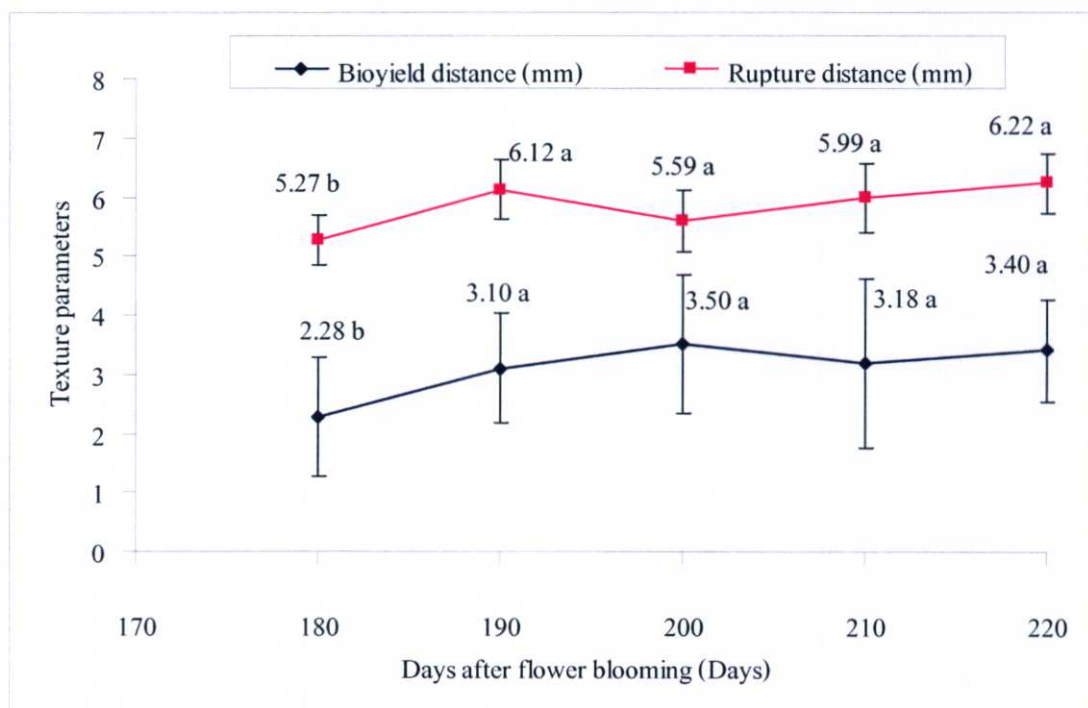
1) ค่าความแน่นเนื้อเฉพาะตรงจุดที่ตรวจวัดแสดงดังภาพที่ 4.5 พบว่าค่า Initial firmness คือความแน่นเนื้อเริ่มต้นเมื่อเริ่มรับแรงในอายุการเก็บเกี่ยวที่ 180, 190, 200 และ 210 วัน หลังดอกบาน มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ที่อายุการเก็บเกี่ยว 220 วันหลังดอกบาน แสดงว่าอายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นอาจมีเปลือกนุ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ Average firmness คือความแน่นเนื้อเฉลี่ยตั้งแต่เริ่มรับแรงจนถึงก่อนเปลือกทะลุ มีความเปลี่ยนแปลงไม่มากในอายุการเก็บเกี่ยว 180, 190 และ 200 วันหลังดอกบาน และลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ในอายุการเก็บเกี่ยว 210 และ 220 วันหลังดอกบาน



ภาพที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อเฉพาะตรงจุดที่ทดลอง

2) ระยะทางการยุบของเปลือกเฉพาะตรงจุดที่ตรวจวัดแสดงดังภาพที่ 4.6 พบว่าค่า Bioyield distance คือระยะทางชีวิตลากจากการเริ่มต้นกดจนถึงจุดที่เซลล์ได้เปลือกแตกแต่เปลือกยังไม่ทะลุ ในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 180 กับ 190 วันหลังดอกบาน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ต่างกับในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 190-220 วันหลังดอกบาน มีค่าเพิ่มไม่มากนักจึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ $P>0.05$ แสดงว่าอายุการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น ไม่ได้ทำให้ระยะทางชีวิตลากของเปลือกเฉพาะจุดเพิ่มขึ้นมากนัก ส่วนค่า Rupture distance คือระยะทางที่กดลึกเมื่อเปลือกแตก ค่า

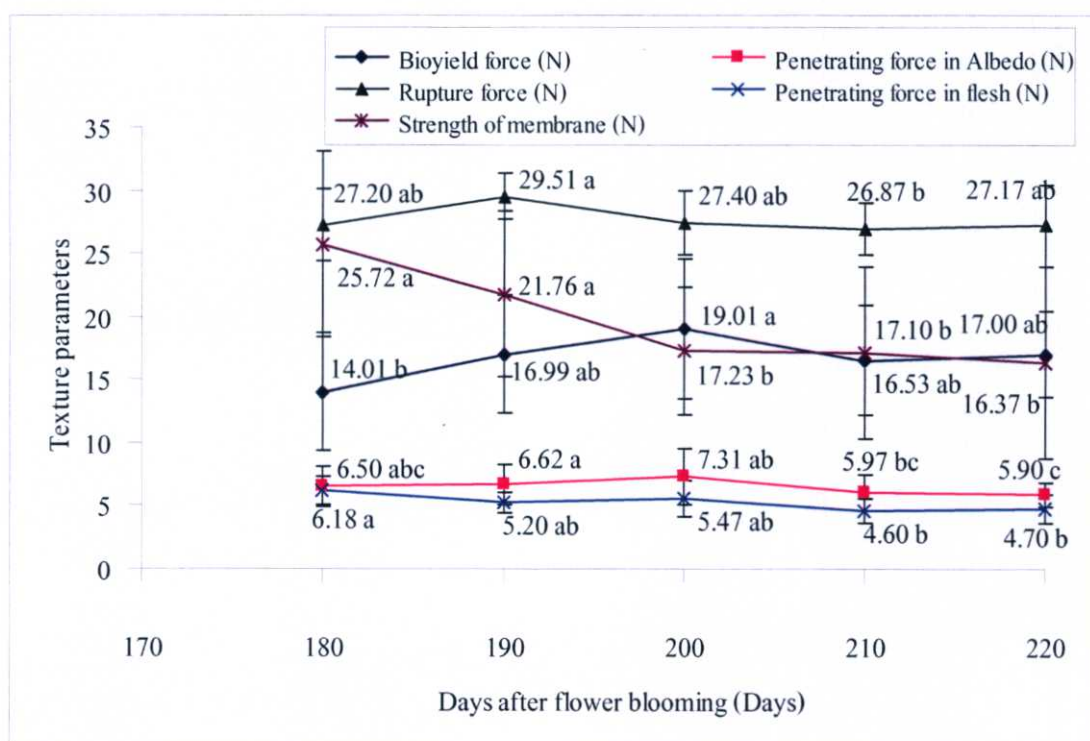
ในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 180 และ 190 วันหลังดอกบาน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ แต่ในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 190 ถึง 220 วันหลังดอกบาน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ $P>0.05$ แสดงว่าถ้าผลส้มโอมีอายุการเก็บเกี่ยวตั้งแต่ 190 วันหลังดอกบาน ความลึกในการกดเมื่อเปลือกทะลุไม่มีการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงระยะทางการยุบของเปลือกเฉพาะตรงจุด

3) แรงที่ใช้ในการกดผลส้มโอเฉพาะตรงจุดที่ตรวจวัดแสดงดังภาพที่ 4.7 พบว่าค่า Bioyield force คือแรงที่ทำให้เกิดจุดชิวคลากหรือจุดที่เซลล์ได้ผิวแตกแต่เปลือกยังไม่แตก โดยช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 180 190 และ 200 วันหลังดอกบาน Bioyield force เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ซึ่งแสดงถึงเซลล์ได้ผิวมีความแข็งแรงขึ้น ต่างกับช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 210-220 วันหลังดอกบาน Bioyield force มีค่าลดลงและไม่แตกต่างกัน แสดงถึงเซลล์ได้ผิวมีความแข็งแรงลดลงและมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่า Rupture force คือแรงต้านทานการแทงทะลุเปลือกซึ่งในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 180 กับ 190 วันหลังดอกบาน เปลือกมีความต้านทานการแทงทะลุเพิ่มขึ้น แต่หลังจากอายุการเก็บเกี่ยว 190 วันหลังดอกบาน มีความต้านทานการแทงทะลุลดลง และมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 200-220 วันหลังดอกบาน ส่วนค่า Penetrating force in Albedo คือแรงเฉลี่ยที่ใช้ในการแทงส่วนของเปลือกชั้นในสีขาวที่อยู่ระหว่างเปลือกชั้นนอกกับเนื้อส้ม โดยช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 180-200 วันหลังดอกบาน ต้องใช้แรงในการแทงทะลุเพิ่มขึ้น ตามลำดับ แต่เมื่ออายุการเก็บเกี่ยวมากกว่า 200 วันหลังดอกบานความสามารถใน

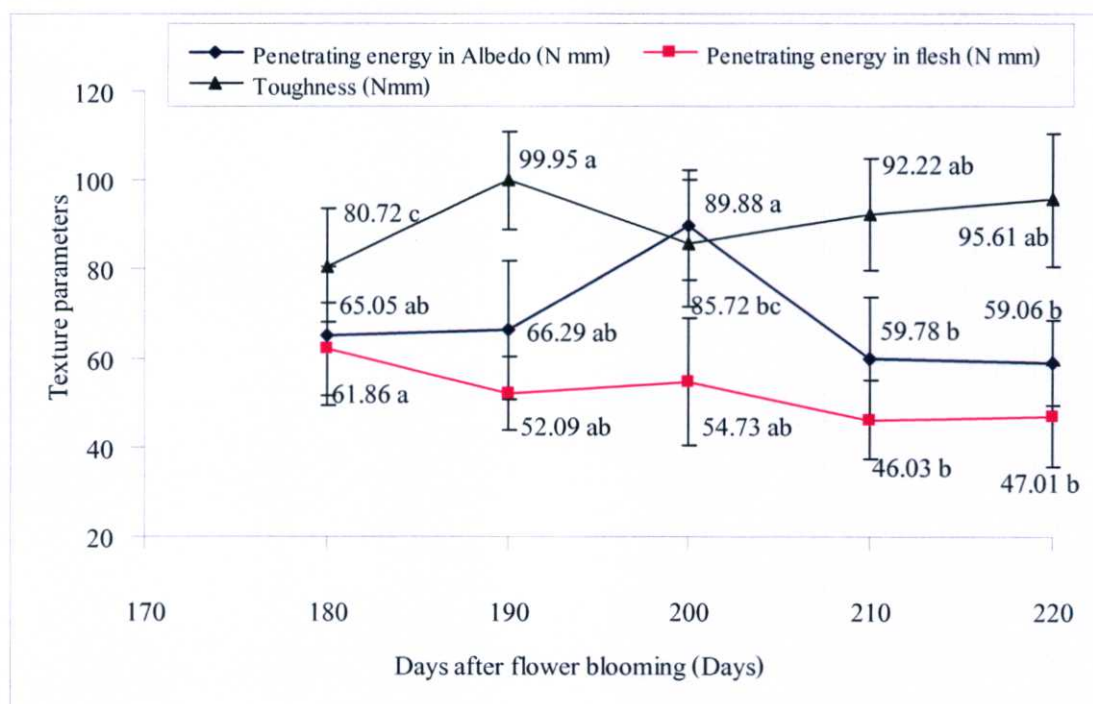
การด้านการแทงทะลุของเปลือกชั้นในมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คาดว่าเปลือกชั้นในของผลส้มโอจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจนถึงอายุเก็บเกี่ยว 200 วันหลังดอกบาน ซึ่งมีความต้านทานการแทงผ่านสูงสุด แล้วค่อยๆ นิ่มลง ส่วนค่า Strength of membrane คือความเหนียวของเยื่อหุ้มเนื้อส้มโอ มีค่าค่อยๆ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ เมื่ออายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นถึงอายุการเก็บเกี่ยว 200 วันหลังดอกบาน หลังจากนั้นไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ค่า Penetrating force in flesh คือแรงที่ใช้ในการแทงทะลุเนื้อส้มโอ ซึ่งเนื้อส้มโอมีความต้านทานการแทงทะลุค่อยๆ ลดลงเมื่ออายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าในช่วงอายุการเก็บเกี่ยวเนื้อส้มโอนิ่มขึ้นเมื่ออายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงแรงที่ใช้ในการกดแทงทะลุผลส้มโอเฉพาะตรงจุด

4) ความเหนียวของเปลือกชั้นนอก เฉพาะตรงจุดที่ตรวจวัดแสดงดังภาพที่ 4.8 พบว่าค่า Toughness คือความเหนียวของเปลือกชั้นนอก ในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 180 กับ 190 วันหลังดอกบาน มีความเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ แต่ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่อมาไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ส่วนค่า Penetrating energy in Albedo คือพลังงานที่ใช้ในการแทงผ่านเปลือกชั้นใน เฉพาะตรงจุดที่ตรวจวัดแสดงดังภาพที่ 4.8 พบว่าช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 180-200 วันหลังดอกบาน พลังงานที่ใช้ในการแทงทะลุเปลือกชั้นในไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ แต่หลังจากอายุการเก็บเกี่ยว 200 วันหลังดอกบาน พลังงานที่ใช้ในการแทงทะลุเปลือกกลับลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ แสดงว่าความแข็ง

ของเปลือกส้มโอชั้นในค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงอายุการเก็บเกี่ยว 200 วันหลังดอกบาน แล้วเปลือกชั้นในจะค่อยๆ นิ่มขึ้นเมื่ออายุเพิ่มขึ้น ต่างกับค่า Penetrating energy in flesh คือพลังงานที่ใช้ในการแทงทะลุเนื้อส้มโอ ซึ่งมีการใช้พลังงานในการแทงทะลุค่อยๆ ลดลง ตามอายุการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ แสดงว่าอายุการเก็บเกี่ยวมากขึ้นจะทำให้เนื้อส้มโอค่อยๆ นิ่มมากขึ้น

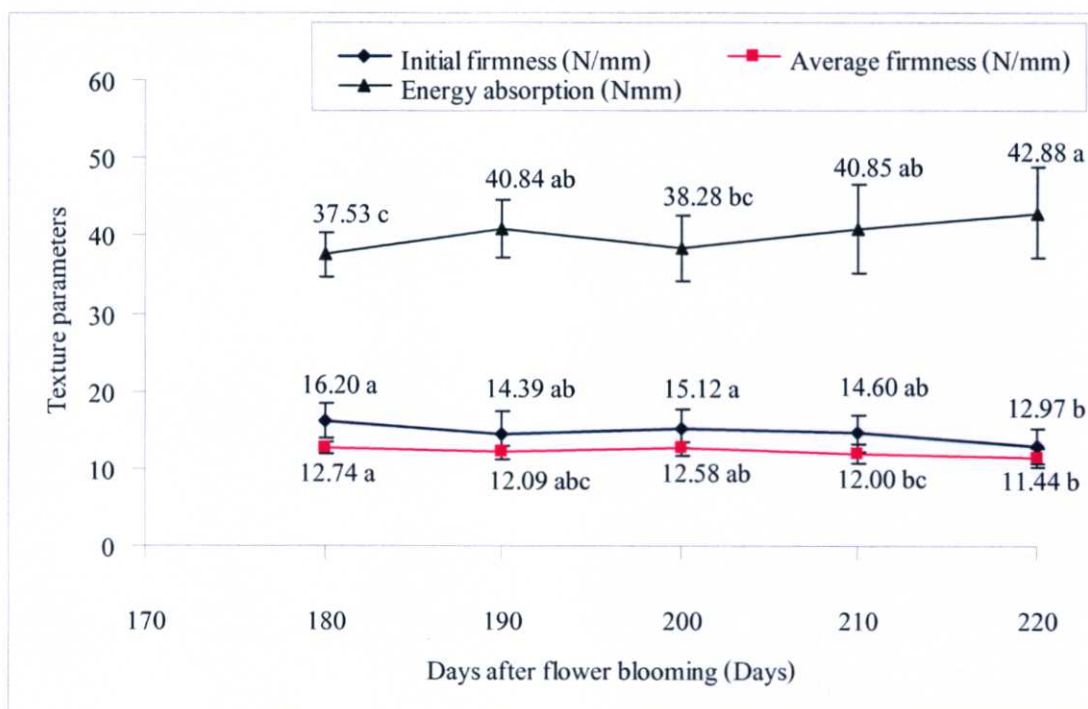


ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้ในการแทงทะลุผลส้มโอเฉพาะตรงจุด

4.1.3 ผลการตรวจวัดเนื้อส้มผัสแบบ Plate Compression test

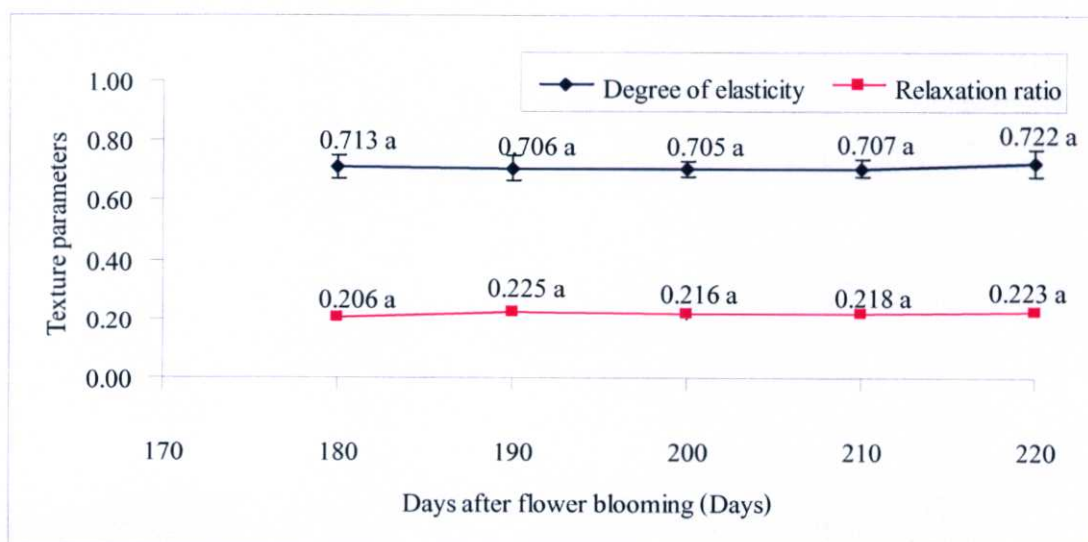
ในการตรวจวัดเป็นลักษณะการรับแรงของผลส้มโอทั้งผล โดยค่าต่างๆที่ตรวจวัดได้มีรายละเอียดดังนี้

1) ความแน่นเนื้อ และการดูดซับพลังงานของผลส้มโอทั้งผลแสดงดังภาพที่ 4.9 พบว่า ค่า Initial firmness คือความแน่นเนื้อของผลส้มโอเริ่มต้น โดยทั้ง 4 อายุการเก็บเกี่ยวแรกไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ในอายุการเก็บเกี่ยวที่ 5 มีความหนาแน่นเริ่มต้นลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ส่วนค่า Average firmness คือค่าความแน่นเนื้อเฉลี่ย ที่ 3 อายุการเก็บเกี่ยวแรกไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ หลังจากนั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ Energy absorption คือพลังงานที่ผลส้มโอดูดซับเพื่อทำให้เกิดการเสียรูป เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ตามอายุการเก็บเกี่ยว



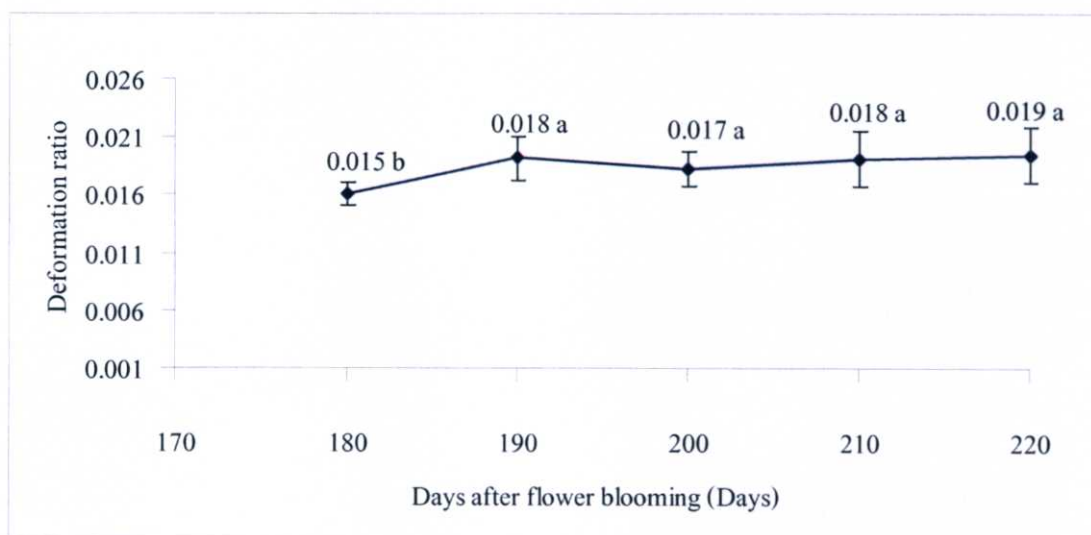
ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อ และการดูดซับพลังงานของผลส้มโอ

2) ค่าระดับความยืดหยุ่นและอัตราส่วนการคลายเครียดของผลส้มโอทั้งผลแสดงดังภาพที่ 4.10 พบว่า ค่า Degree of elasticity คือระดับความยืดหยุ่นของผลส้มโอ มีค่าสอดคล้องกับค่า Relaxation ratio คืออัตราส่วนการคลายเครียดของผลส้มโอ แสดงถึงความเป็นวัสดุแบบ ยืดหยุ่นหนืด (Viscoelastic) โดยการเพิ่มขึ้นของอายุการเก็บเกี่ยวไม่ได้ทำให้ 2 ค่าดังกล่าวเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P > 0.05$ ค่า Relaxation ratio ที่ใกล้ 1 แสดงถึงวัสดุมีแนวโน้มเป็นวัสดุหนืด (viscose) ค่า Relaxation ratio ที่ใกล้ 0 แสดงถึงวัสดุมีแนวโน้มเป็นวัสดุยืดหยุ่น (elastic)



ภาพที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงค่าระดับความยืดหยุ่นและอัตราส่วนการคลายเครียดของผลส้มโอ

3) ค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนรูปร่างของผลส้มโอที่แสดงผลแสดงดังภาพที่ 4.11 พบว่า ค่า Deformation ratio คืออัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งเป็นความเครียด (Strain) ของผล ในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 180 กับ 190 วันหลังดอกบาน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ แต่หลังจากอายุการเก็บเกี่ยว 190-220 วันหลังดอกบาน มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพียงเล็กน้อยจึงไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$



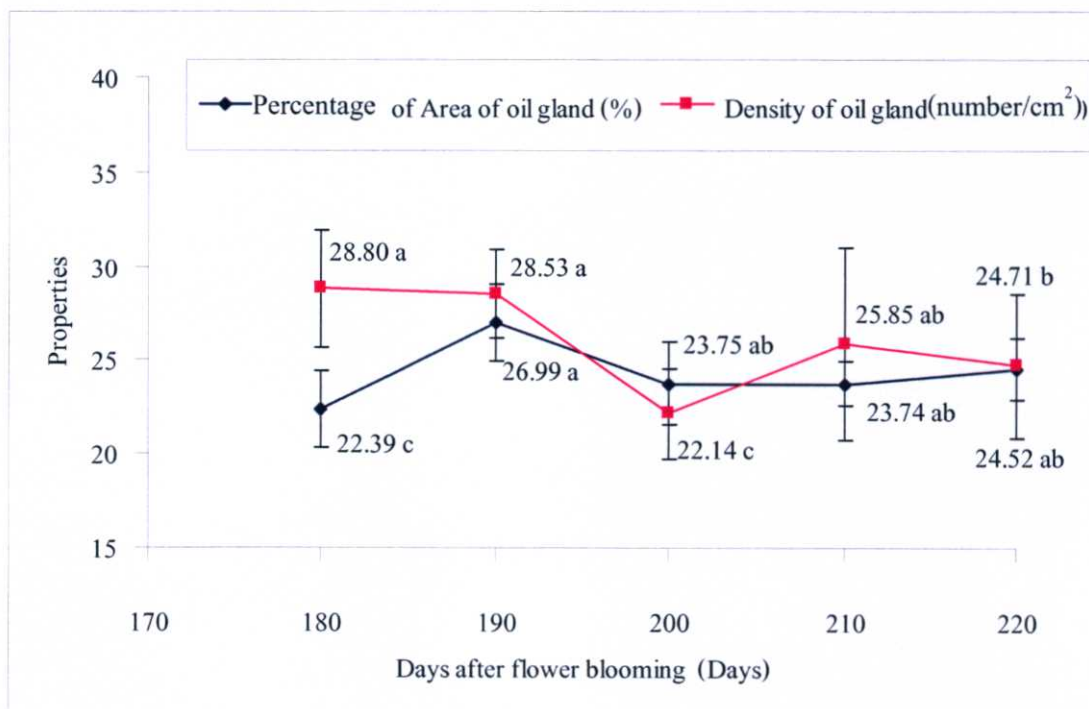
ภาพที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการเปลี่ยนรูปร่างของผลส้มโอ

4.1.4 การวิเคราะห์ภาพถ่ายของเปลือกส้มโอ

การนำภาพถ่ายของผิวเปลือกส้มโอมาวิเคราะห์ เพื่อหาค่าพื้นที่ต่อมน้ำมัน และความหนาแน่นของต่อมน้ำมัน และเปอร์เซ็นต์พื้นที่ต่อมน้ำมัน ที่ฝังตัวอยู่ในชั้นผิวเปลือกส้มโอชั้นนอก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

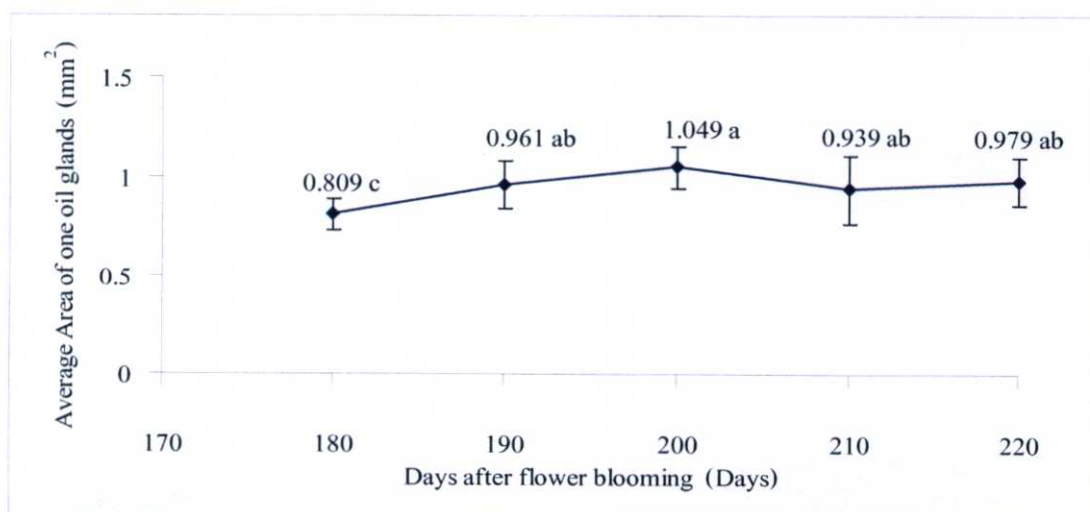
1) เปอร์เซ็นต์พื้นที่ และความหนาแน่นของต่อมน้ำมันในพื้นที่ผิวเปลือกผลแสดงดังภาพที่ 4.12 พบว่า ค่า Percentage of Area of oil gland คือเปอร์เซ็นต์พื้นที่ต่อมน้ำมันต่อพื้นที่ผิว ในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 180 กับ 190 วันหลังดอกบาน มีพื้นที่ต่อมน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ แล้วอายุการเก็บเกี่ยวหลังจากนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงไม่มีความแตกต่างทางสถิติ $P>0.05$ ส่วนค่า Density of oil gland คือความหนาแน่นของต่อมน้ำมันหรือจำนวนต่อมน้ำมันต่อพื้นที่ ในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 180-190 วันหลังดอกบาน มีจำนวนต่อมน้ำมันต่อพื้นที่มาก แต่อายุการเก็บเกี่ยว 200 วันหลังดอกบาน จำนวนต่อมน้ำมันต่อพื้นที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ หลังจากนั้นจำนวนต่อมน้ำมันต่อพื้นที่มีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจำนวนต่อมน้ำมันในช่วงแรกทำให้มีจำนวนต่อมน้ำมันเพิ่มขึ้นแล้วจึงลดลง สอดคล้อง

กับการศึกษาของ นกคด, 2545 ที่ศึกษาความหนาแน่นต่อมน้ำมันของผิวส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งจากเทคนิคการประมวลผลภาพ



ภาพที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์พื้นที่ และความหนาแน่นของต่อมน้ำมันในพื้นที่ผิวเปลือก

2) พื้นที่ต่อมน้ำมันของผิวเปลือกส้มโอแสดงดังภาพที่ 4.13 พบว่า ค่า Area of oil glands คือพื้นที่ผิวต่อมน้ำมันบนผิวเปลือกส้มโอ ในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 180-200 วันหลังดอกบาน ต่อมน้ำมันบนผิวส้มโอค่อยๆ ขยายพื้นที่ผิวใหญ่ขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P > 0.05$ หลังจากนั้นพื้นที่ผิวต่อมน้ำมันมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากจึงไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าต่อมน้ำมันบนผิวเปลือกส้มโอมีการเพิ่มขนาดขึ้นในช่วงแรก แล้วพื้นที่ผิวต่อมน้ำมันก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

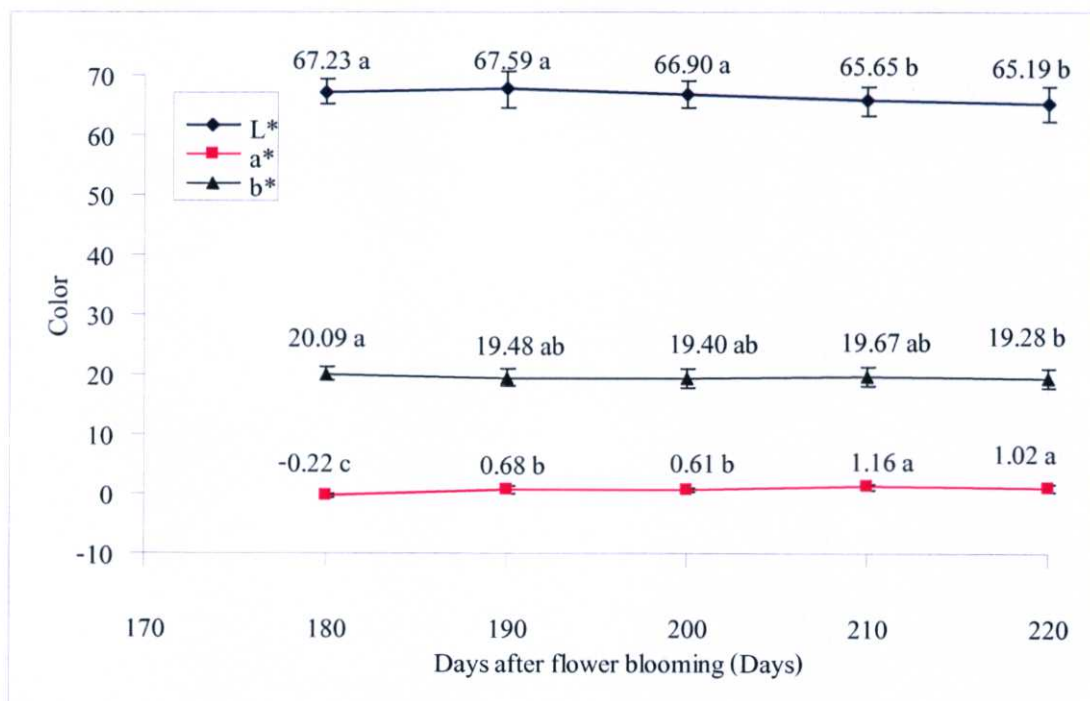


ภาพที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ต่อมน้ำมันของผิวเปลือกส้มโอ

4.2 ผลการตรวจวัดสมบัติทางกายภาพและชีวเคมีของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและชีวเคมี ได้แก่ สีเนื้อส้มโอ เนื้อส้มผัสของเนื้อส้มโอ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอ และปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้ของน้ำส้มโอของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง วิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ความเบี่ยงมาตรฐาน และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ โดยวิธี Duncan Multiple Range Test แล้วแสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับอายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง ดังนี้

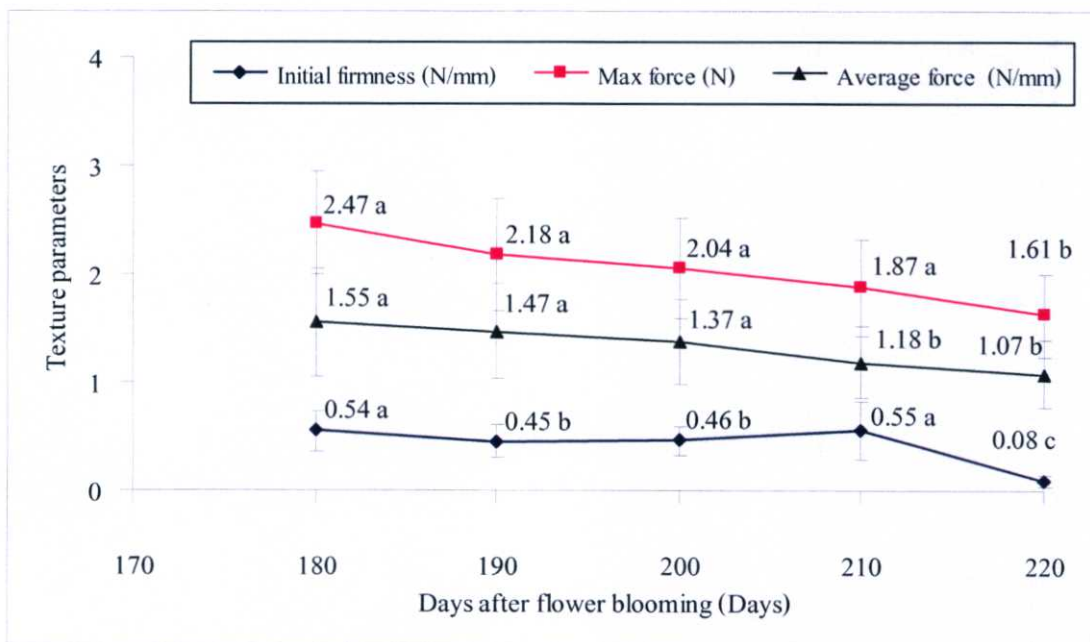
4.2.1 ผลการวัดสีของเนื้อส้มโอแต่ละช่วงอายุการเก็บเกี่ยว แสดงดังภาพที่ 4.14 โดยค่า L^* แทนค่าความสว่าง (สีดำ-ขาว) a^* แทนค่าสีแดง-เขียว และ b^* แทนค่าสีเหลือง-น้ำเงิน พบว่า ผลส้มโอมีอายุการเก็บเกี่ยวมากขึ้นค่า L^* และ b^* ลดลงอย่างช้าๆ แสดงว่าเนื้อส้มโอมีสีเข้มขึ้น โดยมีพบความแตกต่างอย่างนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ในค่า L^* ที่อายุการเก็บเกี่ยว 180, 190 และ 200 วัน ต่างกับอายุการเก็บเกี่ยว 210 และ 220 วัน และในค่า b^* ที่อายุการเก็บเกี่ยว 180 วัน กับอายุการเก็บเกี่ยว 220 วัน ต่างกับค่า a^* ที่อายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าเนื้อส้มโอมีสีแดงขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ที่ช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 180 วัน กับ 190 200 วัน และ 210 220 วัน



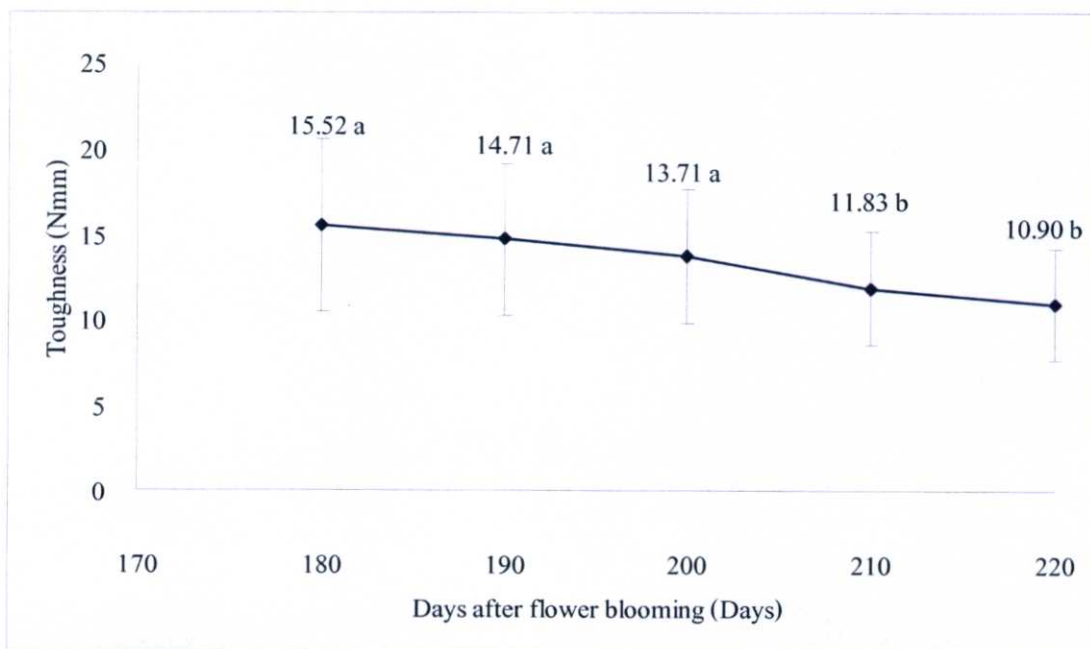
ภาพที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อส้มโอตามอายุการเก็บเกี่ยว

4.2.2 ผลการวัดเนื้อส้มผัสของเนื้อส้มโอแต่ละช่วงอายุการเก็บเกี่ยว แสดงดังภาพที่ 4.15 พบว่าทุกค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ โดยค่า Initial firmness (ความแน่นเนื้อเริ่มต้น)

ลดลงแสดงว่าความแน่นเนื้อเริ่มต้นของเนื้อส้มโอลดลง เช่นเดียวกับค่า แรงด้านการแทงทะลุ (Max force) และ แรงด้านทานเฉลี่ย (Average force) ลดลง แสดงว่าเนื้อส้มโอนิ่มขึ้น และ ค่า ความเหนียว (Toughness) แสดงคังภาพที่ 4.15 ซึ่งหมายถึงพลังงานที่ใช้ในการตัดเนื้อส้มโอให้ขาด แสดงว่าเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งมีความเหนียวลดลง เมื่ออายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น แต่จากการสังเกตอายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นเนื้อส้มโอบริเวณขั้วผลเริ่มแข็ง และแห้งกรอบในช่วงอายุหลังๆ



ภาพที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของเนื้อส้มโอตามอายุการเก็บเกี่ยว



ภาพที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของเนื้อส้มโอตามอายุการเก็บเกี่ยว

4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม

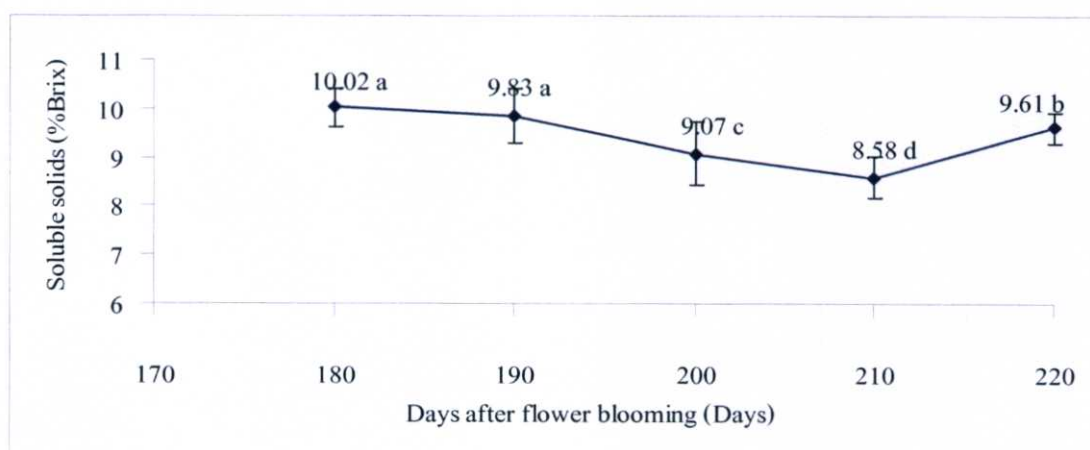
ในการทดลองได้ทำการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงย่าน NIR ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 600 – 1100 nm ด้วยเครื่อง FQA NIR GUN ในการตรวจวัดคุณภาพจากผิวผล และเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยว 180 190 200 210 และ 220 วันหลังจากดอกบาน

4.3.1. ลักษณะสเปกตรัมของผิวผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

จากการสังเกตสเปกตรัมดั้งเดิมที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของผิวผลส้มโอ (ภาพที่ 4.19) พบว่าลักษณะของสเปกตรัมทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยวมีแนวโน้มที่เหมือนกัน และค่าการดูดกลืนแสงลดลงเมื่อผลส้มโอมีอายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น ต่างกับอายุการเก็บเกี่ยวที่ 210 วันหลังจากดอกบานที่มีค่าการดูดกลืนแสงมากกว่าอายุการเก็บเกี่ยวที่ 200 วันหลังจากดอกบาน แต่มีค่าการดูดกลืนแสงน้อยกว่าอายุการเก็บเกี่ยวที่ 220 วันหลังดอกบาน ซึ่งสเปกตรัมไม่ปรากฏพีคชัดเจนมากนักที่สังเกตได้ช่วงความยาวคลื่น 970 nm คาดว่าเป็นการสั่นเสมือนของพันธะของหมู่ O-H str. ในช่วง second overtone ในโครงสร้างของ ROH, H₂O (Osborne et al., 1986) เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางเคมีอาจจะเป็นพีคของน้ำที่ค่าการดูดกลืนแสงใกล้เคียงกับการศึกษาในมะเขือเทศ (Khuriyati et al., 2004) ซึ่งเป็นลักษณะพีคที่เกิดจากอิทธิพลของน้ำจะพบในการศึกษาผลไม้ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้ไม่สามารถมองเห็นพีคอื่นได้ชัดเจน (วลัยพร, 2548) นอกจากนั้นช่วงพีคที่ฐานกว้าง (Broad band) ทำให้ไม่สามารถระบุตำแหน่งพีคได้ (อาทิตย์, 2549) โดยก่อนการสร้างสมการ Calibration จำเป็นต้องใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ เพื่อช่วยในการปรับแต่งสเปกตรัมให้สังเกตพบพีคอื่นๆ ได้ง่ายขึ้น จึงเลือกใช้วิธีการหาอนุพันธ์อันดับที่สอง (second derivative) ซึ่งจะช่วยให้พบพีคต่างๆ ชัดเจนขึ้น ในขณะที่พีคนั้นยังคงอยู่ที่ความยาวคลื่นเดิมเพียงแต่ค่าการดูดกลืนแสงมีการกลับค่าสลับกันจากค่าลบเป็นค่าบวก และจากค่าบวกเป็นค่าลบ แต่สเปกตรัมที่ได้จะเห็นผลสัญญาณรบกวน (Noise) เป็นพีคเล็กๆ มากขึ้น (อนุพันธ์, 2545)

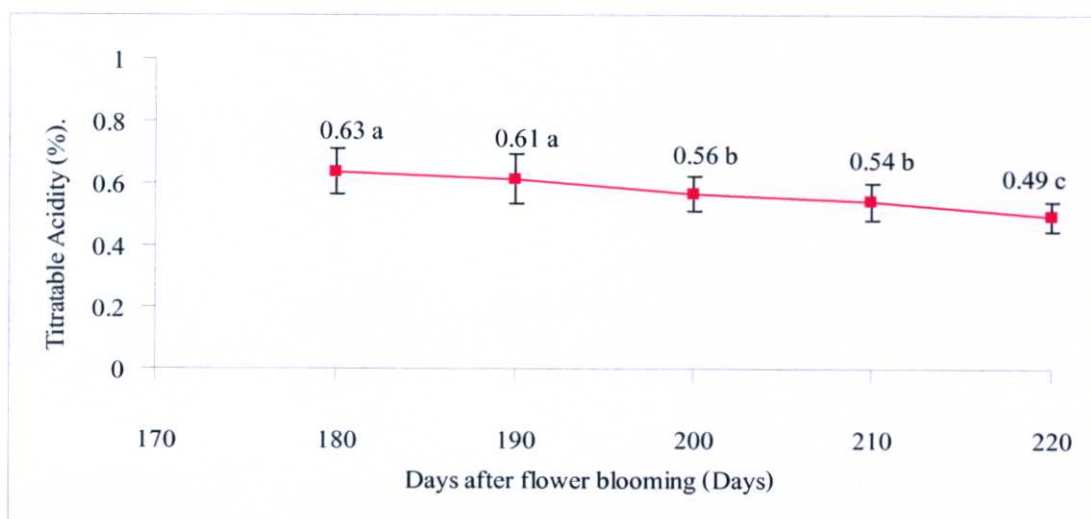
โดยสเปกตรัมที่ได้จาก Savitzky-Golay second differentiation มี derivative segment 10 และ 20 nm แสดงดังภาพที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ พบว่าปรากฏพีคต่างๆ มากขึ้น โดยสังเกตพบพีคที่ช่วง 644-66 นาโนเมตร และที่ 956 -960 นาโนเมตร ซึ่งอาจเป็นช่วงคลื่นการดูดซับของคลอโรฟิลล์ (Abbt et al., 1997; Chauchard et al., 2004) และน้ำ (ElMasry et al., 2007)

4.2.3 ผลการวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอแต่ละช่วงอายุการเก็บเกี่ยว แสดงดังภาพที่ 4.17 พบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในช่วงอายุการเก็บเกี่ยวที่ 180 และ 190 วัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ซึ่งในช่วงอายุการเก็บเกี่ยวที่ 200 และ 210 มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ คาดว่าเกิดจากสภาวะอากาศในพื้นที่สวนส้มโอที่มีฝนตกชุกทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอลดลง ต่างกับอายุการเก็บเกี่ยวที่ 220 วัน ซึ่งไม่มีฝนตก ทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ โดยผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ นพดล อรุณยะเดช, 2545

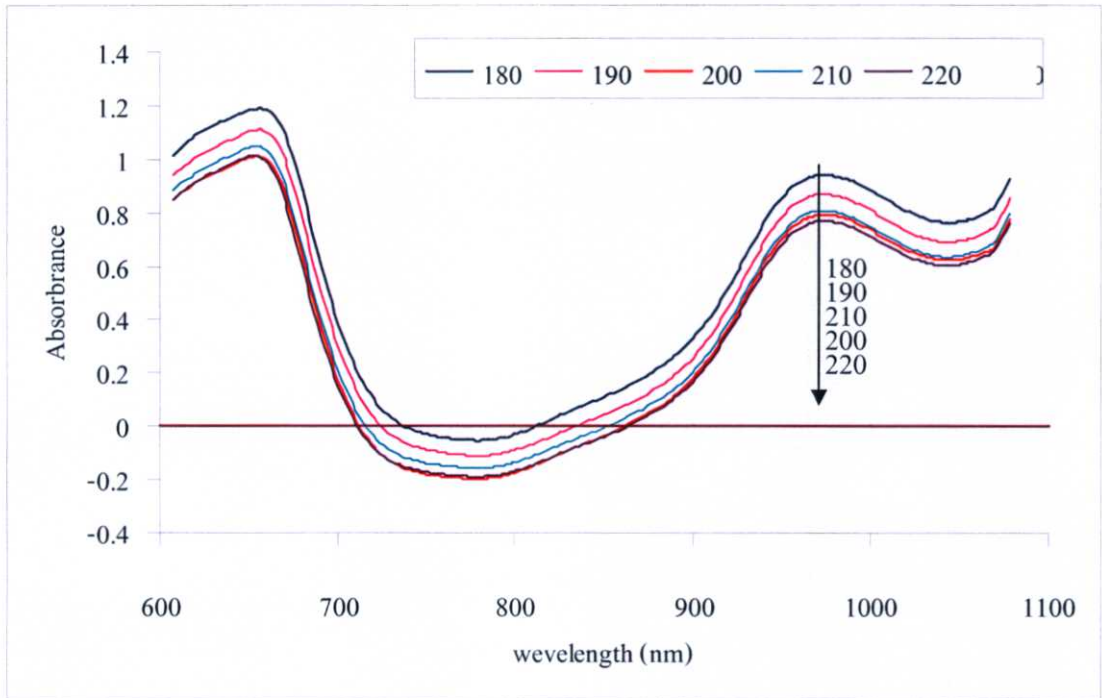


ภาพที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอตามอายุการเก็บเกี่ยว

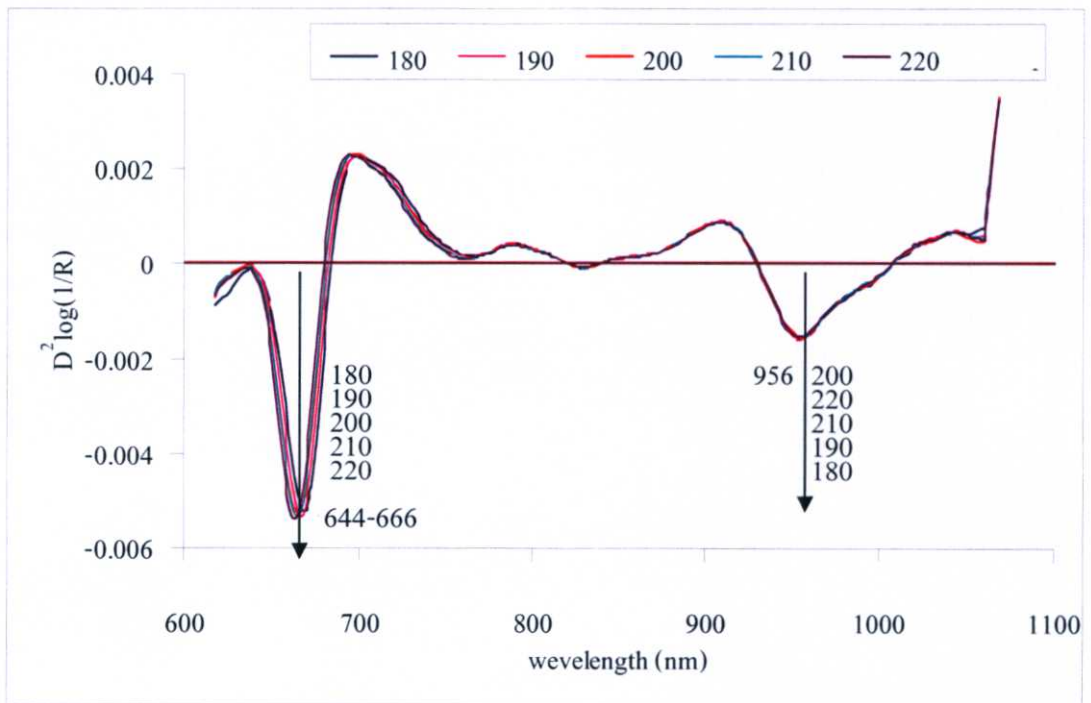
4.2.4 ผลการวัดความเป็นกรด จากปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ของน้ำส้มโอแต่ละช่วงอายุการเก็บเกี่ยว แสดงดังภาพที่ 4.18 พบว่าปริมาณกรดลดลงตามอายุการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ โดยค่าการลดลงของปริมาณกรดสังเกตเห็นได้ชัดช่วงอายุการเก็บเกี่ยวทุกๆ 20 วัน ได้แก่ อายุการเก็บเกี่ยวที่ 180 กับ 200 วัน และ 200 กับ 220 วัน



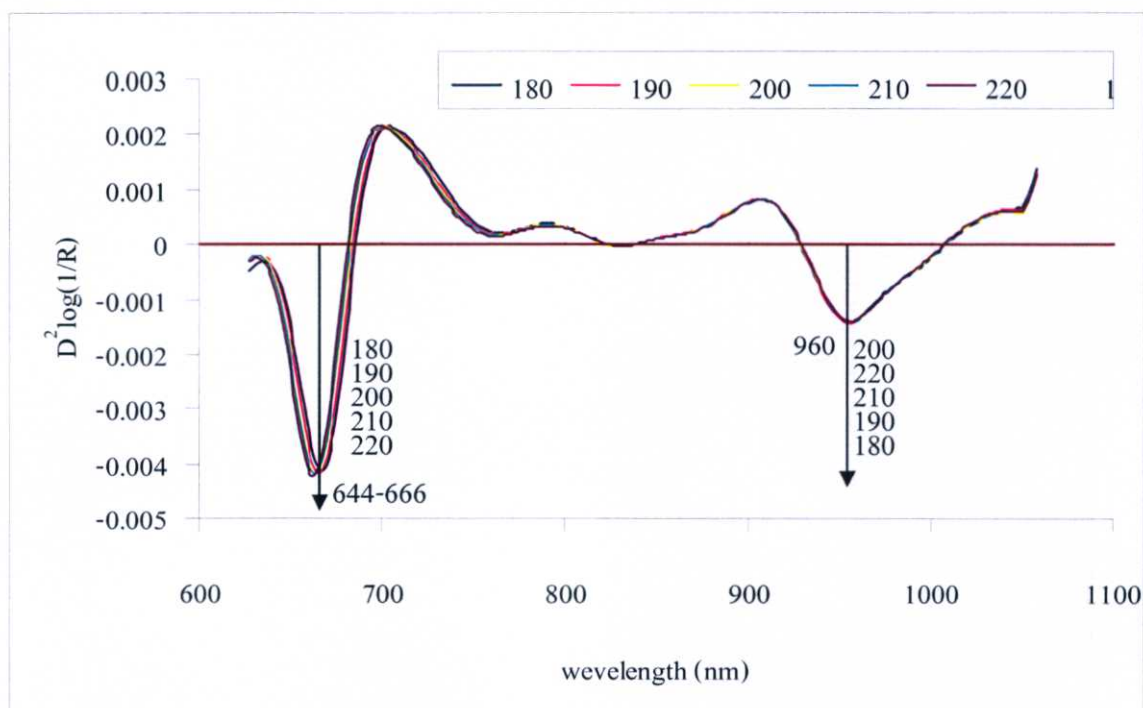
ภาพที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ของน้ำส้มโอตามอายุการเก็บเกี่ยว



ภาพที่ 4.19 สเปกตรัมดั้งเดิมของผิวผลส้มโอ



ภาพที่ 4.20 สเปกตรัมที่ได้จาก Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm ของผิวผลส้มโอ



ภาพที่ 4.21 สเปกตรัมที่ได้จาก Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm ของผิวผลส้มโอ

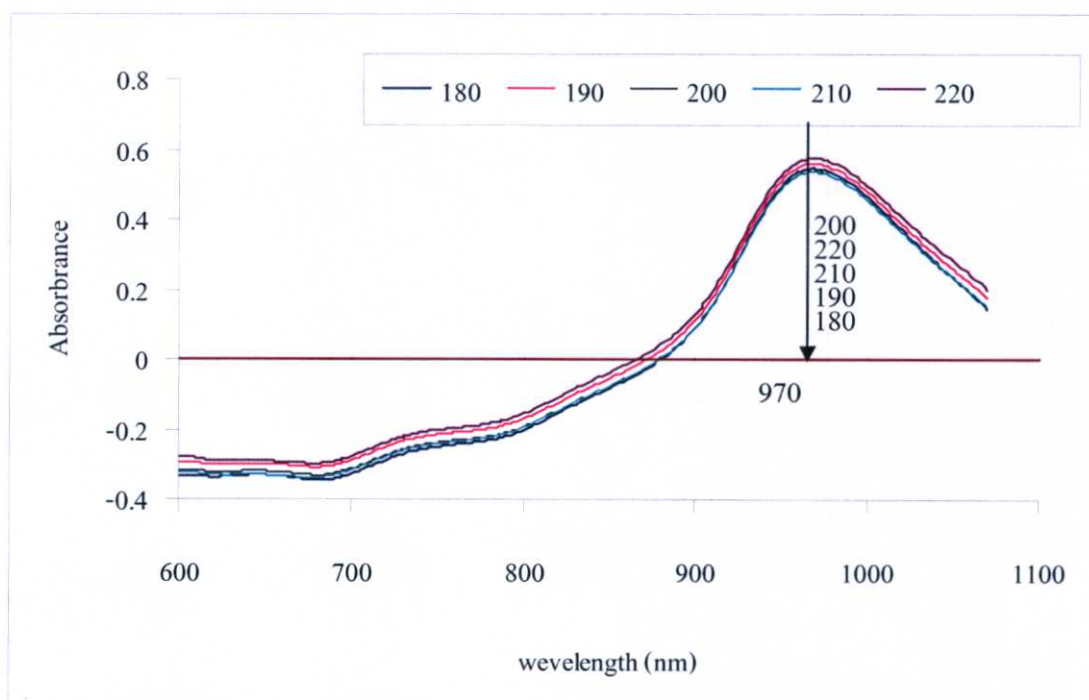
4.3.2 ลักษณะสเปกตรัมของเนื้อผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

ในการทดลองได้นำเฉพาะเนื้อส้มโอใส่ภาชนะถาดโฟม แล้วห่อหุ้มด้วยฟิล์มผนึกอาหารที่ทำมาจาก PVC ลักษณะเดียวกับที่นิยมใช้กันทั่วไป และมีวงจำหน่ายในห้างสรรพสินค้าต่าง โดยทำการศึกษาค่าการดูดกลืนแสง 2 แบบ คือ การตรวจวัดเนื้อส้มโอที่มีฟิล์มผนึกอาหารห่อหุ้ม และการตรวจวัดที่เนื้อส้มโอโดยตรง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

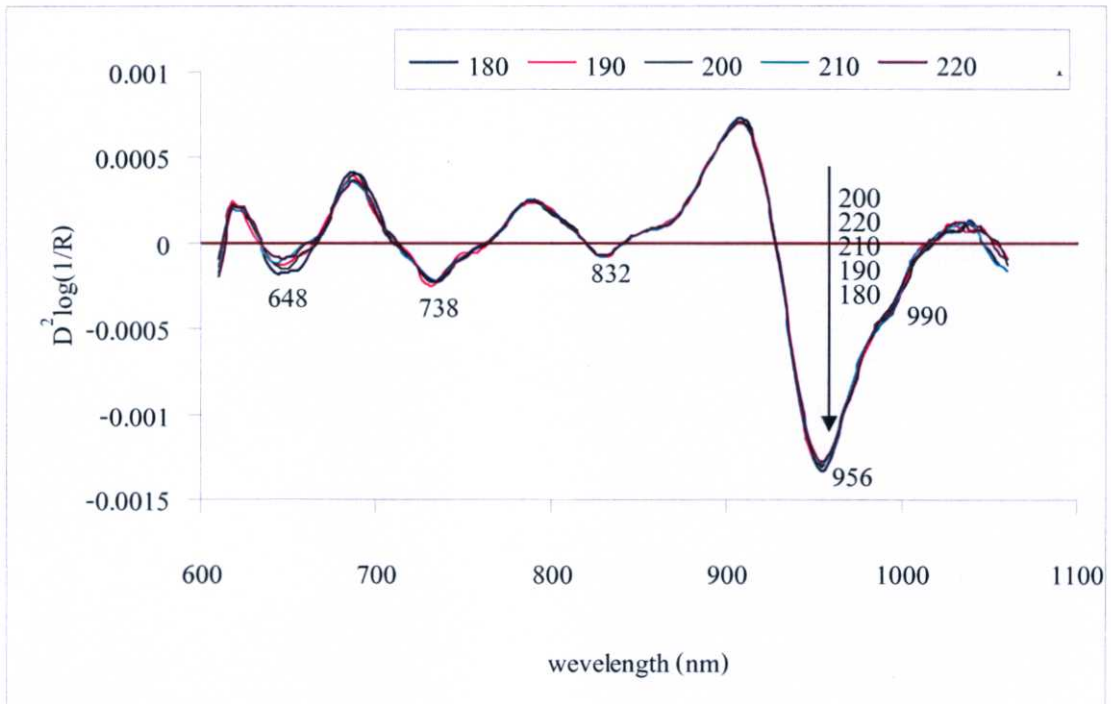
ในการตรวจวัดเนื้อส้มโอที่มีฟิล์มผนึกอาหารห่อหุ้ม จากการสังเกต raw spectrum ที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของเนื้อส้มโอที่มีฟิล์มผนึกอาหารห่อหุ้ม (ภาพที่ 4.22) มีลักษณะแนวโน้มเหมือนกับการตรวจวัดที่เนื้อส้มโอโดยตรง (ภาพที่ 4.25) พบว่าลักษณะของสเปกตรัมดั้งเดิมต่อช่วงคลื่นเหล่านี้ทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยวมีแนวโน้มที่เหมือนกัน อาจเนื่องจากฟิล์มมีความโปร่งใส ทำให้เกิดการส่องทะลุผ่าน หรือไม่มีการดูดกลืนแสงของฟิล์มห่อหุ้มอาหาร โดยการตรวจวัดเนื้อส้มโอที่มีฟิล์มผนึกอาหารห่อหุ้มตรงบริเวณความยาวคลื่น 970 นาโนเมตร พบช่วงอายุการเก็บเกี่ยวที่ 220 วัน มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด รองลงมาเป็นช่วงอายุการเก็บเกี่ยวที่ 190 180 200 และ 210 วัน ตามลำดับ เช่นเดียวกับการตรวจวัดที่เนื้อส้มโอโดยตรงตรงบริเวณความยาวคลื่น 970 นาโนเมตร พบช่วงอายุการเก็บเกี่ยวที่ 190 และ 220 วัน มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด รองลงมาเป็นช่วงอายุการเก็บเกี่ยวที่ 180 และ 200 วัน ซึ่งช่วงอายุการเก็บเกี่ยวที่ 210 วัน มีค่าการดูดกลืนแสงต่ำสุด

โดยในการทำ Savizky-Golay second differentiation มี derivative segment 10 และ 20 nm ค่าดูดกลืนแสงของการตรวจวัดเนื้อส้มโอที่มีฟิล์มผนังอาหารห่อหุ้ม และการตรวจวัดที่เนื้อส้มโอโดยตรง แสดงดังภาพที่ 4.23 และ 4.24 และภาพที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ พบว่าปรากฏพีคต่างๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งในการทำ Savizky-Golay second differentiation มี derivative segment 10 และ 20 nm แสดงพีคที่เหมือนกัน โดยสังเกตพบพีคในช่วงคลื่นที่ 956 นาโนเมตร อย่างชัดเจน และพีคที่พบในช่วงคลื่น 738 นาโนเมตร เป็นการสั่นของพันธะของหมู่ O-H str. ในช่วง third overtone ในโครงสร้างของ ROH (Osborne et al., 1986) เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางเคมีอาจจะเป็นองค์ประกอบของน้ำ ส่วนพีคที่พบในช่วงคลื่น 832 นาโนเมตร เป็นการสั่นของพันธะของหมู่ $2 \times \text{N-H str.} + 2 \times \text{N-H def.} + 2 \times \text{C-N str.}$ ในโครงสร้างของ RNHR' เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางเคมี อาจจะเป็นองค์ประกอบของ amino (Osborne et al., 1986) และพีคที่พบในช่วงคลื่น 990 นาโนเมตร เป็นการสั่นของพันธะของหมู่ O-H str. ในช่วง second overtone เป็นโครงสร้างของ starch (Osborne et al., 1986)

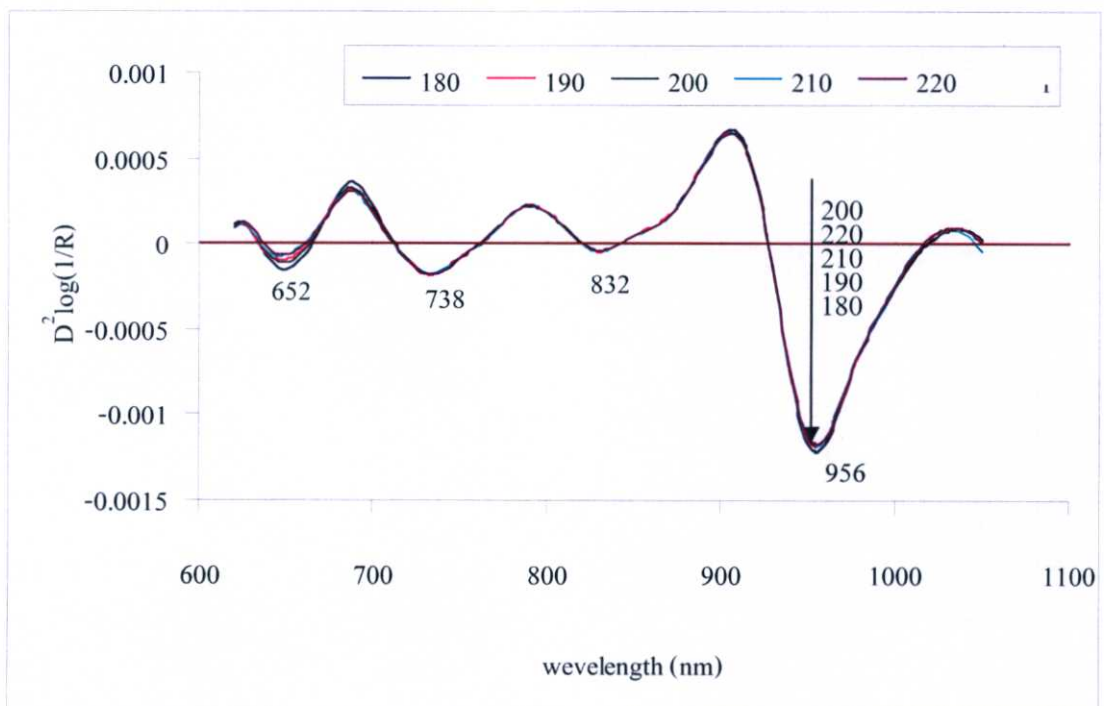
โดยเมื่อพิจารณาลักษณะ และค่าการดูดกลืนแสงของพีคที่ปรากฏระหว่างการตรวจวัดเนื้อส้มโอที่มีฟิล์มผนังอาหารห่อหุ้ม และการตรวจวัดที่เนื้อส้มโอโดยตรงมีความคล้ายและใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์สร้างสมการเพื่อทำนายค่าต่างๆ จะใช้ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากการตรวจวัดเนื้อส้มโอที่มีฟิล์มผนังอาหารห่อหุ้ม เพื่อให้สอดคล้องกับการวางจำหน่ายเนื้อส้มโอตามศูนย์การค้าต่างๆ



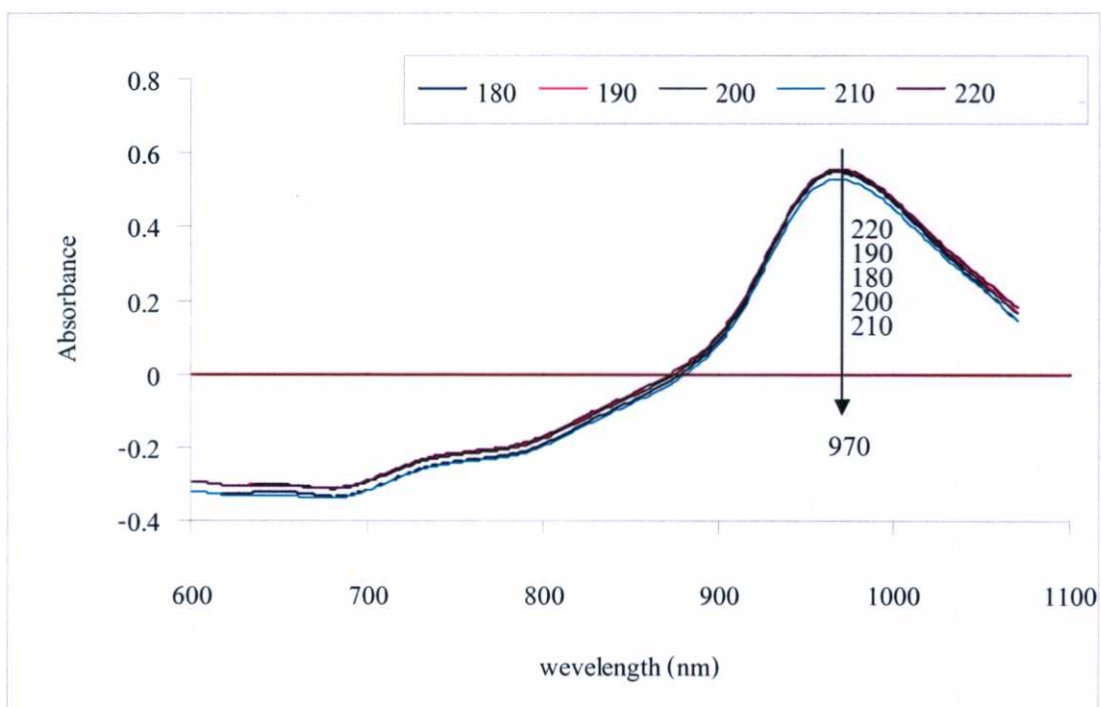
ภาพที่ 4.22 สเปกตรัมดั้งเดิมของเนื้อส้มโอห่อหุ้มฟิล์ม



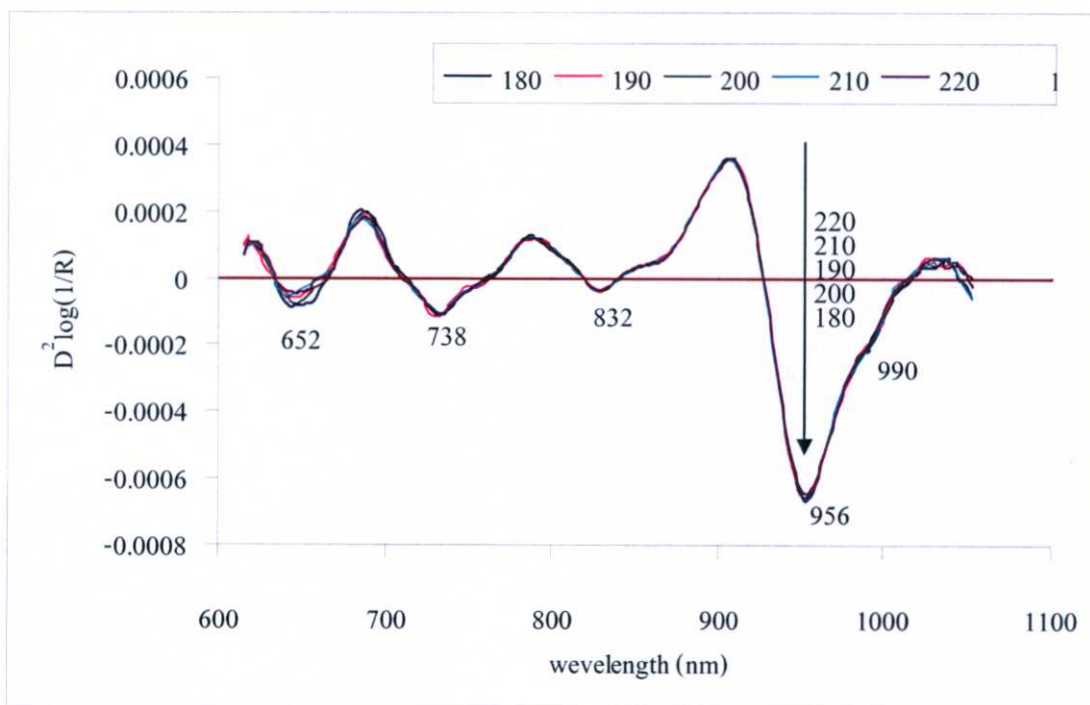
ภาพที่ 4.23 สเปกตรัมที่ได้จาก Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm ของเนื้อสั่มโอะห่อหุ้มฟิล์ม



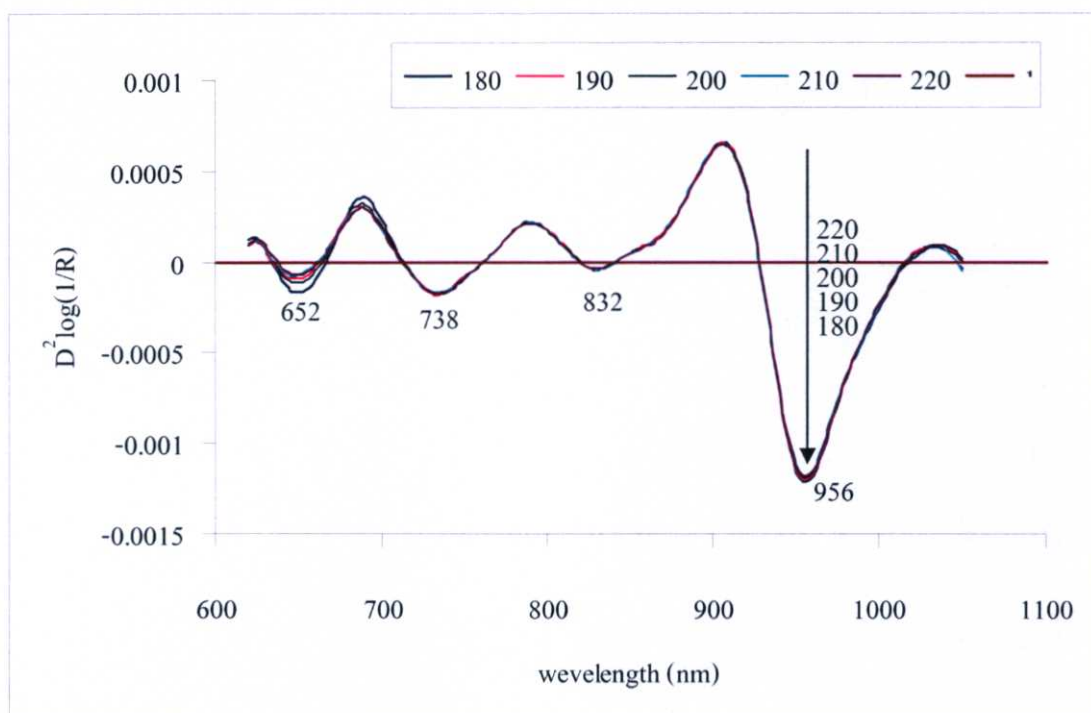
ภาพที่ 4.24 สเปกตรัมที่ได้จาก Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm ของเนื้อสั่มโอะห่อหุ้มฟิล์ม



ภาพที่ 4.25 สเปกตรัมดั้งเดิมของเนื้อไหมโอ



ภาพที่ 4.26 สเปกตรัมที่ได้จาก Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm ของเนื้อไหมโอ



ภาพที่ 4.27 สเปกตรัมที่ได้จาก Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm ของเนื้อส้มโอ

4.4 ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

การคัดแยกผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งตามอายุการเก็บเกี่ยว โดยใช้สเปกตรัมในช่วงแสงที่มองเห็น (400-700 นาโนเมตร) ของโดยใช้เครื่องวัดสี แบบ Spectrophotometer (Hunter Lab, Miniscan XE Plus 45/0 LAV, Reston, USA) วัดผิวเปลือกผลส้มโอ และสเปกตรัมในช่วง 633-961 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง FQA NIR GUN วัดผิวเปลือกผล และเนื้อส้มโอ ทั้งหมด 5 อายุการเก็บเกี่ยวได้แก่ 180 190 200 210 และ 220 วันหลังจากดอกบาน ใช้โมเดลการคัดแยก 2 แบบ คือ Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) และ Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) โดยใช้สเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) และสเปกตรัมที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น 2 วิธี ได้แก่ 1) Multiplicative Scatter Correction (MSC) 2) Savitzky-Golay second differentiation มีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 การคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมผิวเปลือกส้มโอ ช่วงคลื่น 400-700 นาโนเมตร

ผลการคัดแยกสเปกตรัมจากเครื่องวัดสี แบบ Spectrophotometer ของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน โดยใช้ model SIMCA and PLS-DA มีรายละเอียดดังนี้

4.4.1.1 ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวผลส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมผิวเปลือกส้มโอที่ช่วง 400-700 นาโนเมตร ด้วยวิธี SIMCA

ผลการคัดแยกผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน ด้วยใช้โมเดล Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) โดยใช้สเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) และสเปกตรัมที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น 2 วิธี ได้แก่ 1) Multiplicative Scatter Correction (MSC) 2) Savitzky-Golay second differentiation ที่มี 2 derivative segment ที่ 50 และ 100 nm โดยเมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกด้วยการสร้างแบบจำลองจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยว 180 วันหลังดอกบาน สามารถคัดแยกกลุ่มเดียวกันได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็น 190, 220, 210 และ 200 วันหลังดอกบาน ตามลำดับ ส่วนแบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยว 180 วันหลังดอกบาน สามารถคัดแยกต่างกลุ่มกัน ได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็น 220, 200, 190 และ 210 วันหลังดอกบาน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกด้วยการสร้างแบบจำลองจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยวตามการจัดการสเปกตรัมด้วยวิธีต่างๆ พบว่า การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 50 nm สามารถคัดแยกได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี MSC, สเปกตรัมดั้งเดิม และ Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 100 nm ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาความถูกต้องในการคัดแยกกลุ่มเดียวกันนั้น การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธี วิธี MSC สามารถคัดแยกได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธีสเปกตรัม Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 100 nm และ Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 50 nm ตามลำดับ ต่างกับเมื่อพิจารณาความถูกต้องในการคัดแยกต่างกลุ่มกัน การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธี spectrum Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 50 nm สามารถคัดแยกได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 100 nm, MSC และ สเปกตรัมดั้งเดิมตามลำดับ

จากผลการคัดแยกผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกันด้วยสเปกตรัมผิวเปลือกส้มโอที่ช่วง 400-700 นาโนเมตร ด้วย SIMCA สามารถคัดแยกกลุ่มที่เหมือนกับแบบจำลองได้จึงควรใช้แบบจำลองทุกอายุการเก็บเกี่ยวในการคัดแยกกลุ่มเดียวกับแบบจำลองจะให้ผลดีที่สุด

ตารางที่ 4.1 ผลการคัดแยกผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกันด้วยสเปกตรัมผิวเปลือกส้มโอในช่วง 400-700 นาโนเมตร ด้วย SIMCA

pretreated spectra	maturity group	No. of fruits for prediction		Model					Self-prediction	Other group prediction
				180	190	200	210	220		
raw spectra	180	60	Percentage of correct classification	95.00	5.00	10.00	15.00	36.67	95.00	16.67
	190	60		38.33	90.00	11.67	6.67	18.33	90.00	18.75
	200	50		58.00	34.00	72.00	20.00	22.00	72.00	33.50
	210	50		52.00	34.00	28.00	90.00	22.00	90.00	34.00
	220	50		74.00	46.00	46.00	2.00	90.00	90.00	42.00
	Total	270	%Correct	63.70	42.22	31.85	25.56	37.04	87.40	28.98
Multiplicative Scatter Correction (MSC)	180	60	Percentage of correct classification	98.33	5.00	40.00	23.33	76.67	98.33	36.25
	190	60		20.00	95.00	35.00	16.67	65.00	95.00	34.17
	200	50		18.00	12.00	78.00	10.00	34.00	78.00	18.50
	210	50		46.00	34.00	50.00	90.00	48.00	90.00	44.50
	220	50		28.00	20.00	46.00	4.00	84.00	84.00	24.50
	Total	270	%Correct	43.33	34.44	48.89	28.15	62.22	89.07	31.58
Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 50 nm	180	60	Percentage of correct classification	90.00	3.33	18.33	13.33	43.33	90.00	19.58
	190	60		53.33	80.00	31.67	18.33	16.67	80.00	30.00
	200	50		52.00	30.00	62.00	54.00	32.00	62.00	42.00
	210	50		76.00	54.00	66.00	76.00	30.00	76.00	56.50
	220	50		88.00	60.00	86.00	30.00	90.00	90.00	66.00
	Total	270	%Correct	71.85	45.19	50.74	36.67	41.48	79.60	42.82
Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 100 nm	180	60	Percentage of correct classification	90.00	10.00	15.00	15.00	61.67	90.00	25.42
	190	60		36.67	86.67	11.67	0.00	30.00	86.67	19.58
	200	50		56.00	30.00	66.00	16.00	18.00	66.00	30.00
	210	50		62.00	48.00	36.00	86.00	28.00	86.00	43.50
	220	50		72.00	42.00	46.00	6.00	86.00	86.00	41.50
	Total	270	%Correct	63.33	43.70	33.33	23.33	44.81	82.93	32.00

4.4.1.2 ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวผลส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมผิวเปลือกส้มโอในช่วง 400-700 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLS-DA

ผลการคัดแยกผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน ด้วยใช้วิธี Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) โดยใช้สเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) และสเปกตรัมที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น 2 วิธี ได้แก่ 1) Multiplicative Scatter Correction (MSC) 2) Savitzky-Golay second differentiation ที่มี 2 derivative segment คือ 50 และ 100 นาโนเมตร

โดยเมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกด้วยการสร้างแบบจำลองจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยว 180 วันหลังดอกบาน สามารถคัดแยกกลุ่มเดียวกัน ได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมา เป็น 220, 210, 200 และ 190 วันหลังดอกบาน ตามลำดับ ส่วนแบบจำลอง ที่สร้างจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยว 200 วันหลังดอกบาน สามารถคัดแยกต่างกลุ่มกัน ได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมา เป็น 190, 180, 210 และ 220 วันหลังดอกบาน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความถูกต้อง ในการคัดแยกด้วยการสร้างแบบจำลองจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยวตามการ จัดการสเปกตรัมด้วยวิธีต่างๆ พบว่า การจัดการสเปกตรัม ด้วยวิธีสเปกตรัมดั้งเดิมสามารถคัดแยก ได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี MSC, Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 100 nm และ Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 50 nm ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาความถูกต้องในการคัดแยกกลุ่มเดียวกันนั้น การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธี วิธีสเปกตรัมดั้งเดิมสามารถคัดแยกได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี MSC, Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 100 nm และ Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 50 nm ตามลำดับ ต่างกับเมื่อพิจารณาความถูกต้องในการคัดแยกต่างกลุ่มกัน การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธี MSC สามารถคัดได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 100 nm, สเปกตรัมดั้งเดิมและ spectrum Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 50 nm ตามลำดับ

จากผลการคัดแยกผลส้ม โปพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกันด้วยสเปกตรัมผิว เปลือกส้มโอที่ช่วง 400-700 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLS-DA สามารถคัดแยกต่างกลุ่มว่าไม่ใช่กลุ่ม เดียวกับแบบจำลอง ได้ดีกว่าการคัดแยกกลุ่มเดียวกับแบบจำลอง

ตารางที่ 4.2 ผลการคัดแยกผลส้ม โปพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกันด้วยสเปกตรัมผิว เปลือกส้มโอที่ช่วง 400-700 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLS-DA

pretreated spectra	maturity group	No. of fruits for prediction		Model					Self-prediction	Other group prediction
				180	190	200	210	220		
raw spectra	180	60	Percentage of correct classification	65.00	100.00	100.00	98.33	100.00	65.00	99.58
	190	60		100.00	48.33	98.33	91.67	95.00	48.33	96.25
	200	50		100.00	92.00	48.00	76.00	98.00	48.00	91.50
	210	50		96.00	92.00	96.00	92.00	94.00	92.00	94.50
	220	50		100.00	96.00	100.00	70.00	70.00	70.00	91.50
	Total	270	%Correct	91.48	84.81	89.26	86.30	91.85	64.67	94.67

ตารางที่ 4.2 ผลการคัดแยกผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกันด้วยสเปกตรัมผิวเปลือกส้มโอที่ช่วง 400-700 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLS-DA (ต่อ)

pretreated spectra	maturity group	No. of fruits for prediction		Model					Self-prediction	Other group prediction
				180	190	200	210	220		
Multiplicative Scatter Correction (MSC)	180	60	Percentage of correct classification	78.33	98.33	100.00	100.00	100.00	78.33	99.58
	190	60		100.00	38.33	98.33	98.33	98.33	38.33	98.75
	200	50		100.00	90.00	30.00	98.00	98.00	30.00	96.50
	210	50		100.00	82.00	96.00	20.00	82.00	20.00	90.00
	220	50		100.00	100.00	100.00	94.00	38.00	38.00	98.50
	Total	270	%Correct	95.19	80.74	85.93	83.33	84.44	40.93	96.67
Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 50 nm	180	60	Percentage of correct classification	0.00	100.00	100.00	100.00	98.33	0.00	99.58
	190	60		98.33	1.67	100.00	96.67	85.00	1.67	95.00
	200	50		98.00	100.00	38.00	96.00	82.00	38.00	94.00
	210	50		82.00	98.00	96.00	34.00	56.00	34.00	83.00
	220	50		62.00	100.00	100.00	76.00	70.00	70.00	84.50
	Total	270	%Correct	66.67	77.78	87.78	81.85	79.26	28.73	91.22
Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 100 nm	180	60	Percentage of correct classification	66.67	100.00	100.00	100.00	100.00	66.67	100.00
	190	60		98.33	0.00	96.67	100.00	93.33	0.00	97.08
	200	50		100.00	100.00	32.00	100.00	90.00	32.00	97.50
	210	50		94.00	100.00	100.00	18.00	68.00	18.00	90.50
	220	50		100.00	100.00	100.00	82.00	30.00	30.00	95.50
	Total	270	%Correct	91.11	77.78	86.67	81.48	77.78	29.33	96.12

จากผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวผลส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมผิวเปลือกส้มโอที่ช่วง 400-700 นาโนเมตร การคัดแยกด้วยวิธี SIMCA สามารถคัดแยกกลุ่มเดียวกันได้ดีกว่าการคัดแยกด้วยวิธี PLS-DA แต่การคัดแยกต่างกลุ่มกันการคัดแยกด้วยวิธี PLS-DA สามารถคัดแยกได้ดีกว่าการคัดแยกด้วยวิธี SIMCA

4.4.2 การคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมผิวเปลือกส้มโอช่วงคลื่น 633-961 นาโนเมตร

ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวส้มโอด้วยความแตกต่างของสเปกตรัม ช่วง 633-961 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง FQA NIR GUN โดยใช้วิธี SIMCA และ PLS-DA มีรายละเอียดดังนี้

4.4.2.1 ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวผลส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมช่วง 633-961 นาโนเมตร ด้วยวิธี SIMCA

ผลการคัดแยกผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน ด้วยวิธี model Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) โดยใช้สเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) และสเปกตรัมที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น 2 วิธี ได้แก่ 1) Multiplicative Scatter Correction (MSC) 2) Savitzky-Golay second differentiation ที่มี 2 derivative segment คือ 10 และ 20 nm โดยเมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกด้วยการสร้างวิถีจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าแบบจำลอง ที่สร้างจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยว 180 วันหลังดอกบาน สามารถคัดแยกกลุ่มเดียวกันได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็น 190, 220, 200 และ 210 วันหลังดอกบาน ตามลำดับ ส่วนแบบจำลอง ที่สร้างจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยว 220 วันหลังดอกบาน สามารถคัดแยกต่างกลุ่มกันได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็น 180, 210, 190 และ 200 วันหลังดอกบาน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกด้วยการสร้างแบบจำลองจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยวตามการจัดการสเปกตรัมด้วยวิธีต่างๆ พบว่า การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธีสเปกตรัมดั้งเดิมสามารถคัดแยกได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี MSC, Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm และ Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาความถูกต้องในการคัดแยกกลุ่มเดียวกันนั้น การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm สามารถคัดได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm, สเปกตรัมดั้งเดิมและ MSC ตามลำดับ ต่างกับเมื่อพิจารณาความถูกต้องในการคัดแยกต่างกลุ่มกัน การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธี สเปกตรัมดั้งเดิมสามารถคัดแยกได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี MSC, Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm และ Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm ตามลำดับ

จากผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวผลส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมช่วง 633-961 นาโนเมตร ด้วยวิธี SIMCA สามารถคัดแยกกลุ่มที่เหมือนกับแบบจำลองได้ดีจึงควรใช้แบบจำลองทุกอายุการเก็บเกี่ยวในการคัดแยกกลุ่มเดียวกับแบบจำลองจะให้ผลดีที่สุด

ตารางที่ 4.3 ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวผลส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมช่วง 633-961 นาโนเมตร ด้วยวิธี SIMCA

pretreated spectra	maturity group	No. of fruits for prediction		Model					Self-prediction	Other group prediction
				180	190	200	210	220		
raw spectra	180	180	Percentage of correct classification	93.89	66.11	41.11	65.56	67.78	93.89	60.14
	190	165		22.42	90.91	20.61	18.79	26.06	90.91	21.97
	200	150		85.33	56.00	92.00	72.00	76.00	92.00	72.33
	210	150		63.33	12.00	17.33	94.00	16.67	94.00	27.33
	220	150		56.00	26.00	19.33	15.33	94.00	94.00	29.17
	Total	795	%Correct	64.53	51.57	37.86	52.96	55.97	92.96	42.19
Multiplicative Scatter Correction (MSC)	180	180	Percentage of correct classification	96.11	55.56	41.67	64.44	86.11	96.11	61.94
	190	165		50.30	90.30	11.52	15.15	29.09	90.30	26.52
	200	150		41.33	54.67	91.33	52.00	70.00	91.33	54.50
	210	150		54.00	10.67	20.00	92.67	24.00	92.67	27.17
	220	150		54.00	22.00	23.33	8.67	92.67	92.67	27.00
	Total	795	%Correct	60.38	47.80	37.23	46.67	60.75	92.62	39.43
Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm	180	180	Percentage of correct classification	98.33	23.89	37.78	66.67	83.33	98.33	52.92
	190	165		16.36	96.97	9.70	15.76	35.76	96.97	19.39
	200	150		33.33	11.33	94.00	16.67	20.67	94.00	20.50
	210	150		36.67	8.00	8.00	89.33	18.00	89.33	17.67
	220	150		46.00	20.67	7.33	6.00	94.67	94.67	20.00
	Total	795	%Correct	47.55	33.08	31.19	39.50	51.45	94.66	26.10
Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm	180	180	Percentage of correct classification	97.78	37.78	28.89	59.44	89.44	97.78	53.89
	190	165		20.00	97.58	20.61	24.85	41.82	97.58	26.82
	200	150		30.00	14.00	92.67	30.67	28.00	92.67	25.67
	210	150		37.33	5.33	19.33	90.67	24.67	90.67	21.67
	220	150		43.33	16.67	16.00	10.67	94.00	94.00	21.67
	Total	795	%Correct	47.17	35.60	34.97	43.52	56.60	94.54	29.94

4.4.2.2 ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวผลส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมช่วง 633-961 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLS-DA

ผลการคัดแยกผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน ด้วยวิธี Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) โดยใช้สเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) และสเปกตรัมที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น 2 วิธี ได้แก่ 1) Multiplicative Scatter Correction (MSC) 2) Savitzky-Golay second differentiation ที่มี 2 derivative segment คือ 10 และ 20 nm โดยเมื่อ

เปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกด้วยการสร้างแบบจำลองจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่า แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยว 200 วันหลังดอกบาน สามารถคัดแยกกลุ่มเดียวกัน ได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็น 180, 220, 190 และ 210 วันหลังดอกบาน ตามลำดับ ส่วนแบบจำลอง ที่สร้างจากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยว 210 วันหลังดอกบาน สามารถคัดแยกต่างกลุ่มกัน ได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็น 190, 180, 200 และ 220 วันหลังดอกบาน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกด้วยการสร้างแบบจำลอง จากสเปกตรัมของผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยวตามการจัดการสเปกตรัมด้วยวิธีต่างๆ พบว่า การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm สามารถคัดแยกได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm, สเปกตรัมดั้งเดิมและ MSC ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาความถูกต้องในการคัดแยกกลุ่มเดียวกันนั้น การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธี วิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm สามารถคัดแยกได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm , สเปกตรัมดั้งเดิมและ MSC ตามลำดับ ต่างกับเมื่อพิจารณาความถูกต้องในการคัดแยกต่างกลุ่มกัน การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm สามารถคัดได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm, สเปกตรัมดั้งเดิมและ MSC ตามลำดับ

จากผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวผลส้ม โขขวาน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมช่วง 633-961 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLS-DA สามารถคัดแยกต่างกลุ่มว่าไม่ใช่กลุ่มเดียวกับแบบจำลองได้ดีกว่าการคัดแยกกลุ่มเดียวกับแบบจำลอง

ตารางที่ 4.4 ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวผลส้ม โขขวาน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมช่วง 633-961 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLS-DA

pretreated spectra	maturity group	No. of fruits for prediction		Model					Self-predic-tion	Other group prediction
				180	190	200	210	220		
raw spectra	180	180	Percentage of correct classification	72.22	99.44	98.33	100.00	100.00	72.22	99.44
	190	165		96.97	18.18	94.55	92.73	94.55	18.18	94.70
	200	150		96.00	100.00	72.00	96.00	80.67	72.00	93.17
	210	150		96.67	89.33	98.67	4.00	90.00	4.00	93.67
	220	150		93.33	97.33	98.00	93.33	23.33	23.33	95.50
	Total	795	%Correct	90.44	80.38	92.58	78.36	78.87	37.95	95.29

ตารางที่ 4.4 ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวผลส้มโอขาวนำฝิ่งด้วยสเปกตรัมช่วง 633-961 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLS-DA (ต่อ)

pretreated spectra	maturity group	No. of fruits for prediction		Model					Self-prediction	Other group prediction
				180	190	200	210	220		
Multiplicative Scatter Correction (MSC)	180	180	Percentage of correct classification	47.78	99.44	82.78	100.00	100.00	47.78	95.56
	190	165		95.76	40.61	95.15	96.97	95.15	40.61	95.76
	200	150		93.33	94.67	53.33	97.33	92.00	53.33	94.33
	210	150		98.00	96.00	92.67	0.00	73.33	0.00	90.00
	220	150		100.00	96.67	96.00	100.00	40.00	40.00	98.17
	Total	795	%Correct	85.66	85.16	84.15	80.00	81.13	36.34	94.76
Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm	180	180	Percentage of correct classification	48.33	96.11	82.78	100.00	100.00	48.33	94.72
	190	165		94.55	24.24	100.00	100.00	96.36	24.24	97.73
	200	150		100.00	100.00	86.00	100.00	91.33	86.00	97.83
	210	150		97.33	96.00	100.00	0.00	74.67	0.00	92.00
	220	150		100.00	96.67	99.33	99.33	39.33	39.33	98.83
	Total	795	%Correct	86.67	82.01	93.33	81.01	81.38	39.58	96.22
Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm	180	180	Percentage of correct classification	48.89	98.89	77.78	100.00	100.00	48.89	94.17
	190	165		95.15	26.67	100.00	100.00	96.36	26.67	97.88
	200	150		92.67	99.33	94.67	100.00	88.67	94.67	95.17
	210	150		97.33	99.33	100.00	0.67	74.67	0.67	92.83
	220	150		98.00	95.33	100.00	99.33	34.00	34.00	98.17
	Total	795	%Correct	85.16	83.40	93.96	81.13	79.87	40.98	95.64

จากผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวผลส้มโอขาวนำฝิ่งด้วยสเปกตรัมช่วง 633-961 นาโนเมตร การคัดแยกด้วยวิธี SIMCA สามารถคัดแยกกลุ่มเดียวกันได้ดีกว่าการคัดแยกด้วยวิธี PLS-DA แต่การคัดแยกต่างกลุ่มกันการคัดแยกด้วยวิธี PLS-DA สามารถคัดแยกได้ดีกว่าการคัดแยกด้วยวิธี SIMCA

4.4.3 การคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอพันธุ์ขาวนำฝิ่งด้วยสเปกตรัมเนื้อส้มโอช่วงคลื่น 633-961 นาโนเมตร

ผลการคัดแยกสเปกตรัมช่วง 633-961 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง FQA NIR GUN ของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวนำฝิ่งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน โดยใช้วิธี SIMCA และ PLS-DA มีรายละเอียดดังนี้

4.4.3.1 ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวเนื้อส้มโอขาวนำฝิ่งด้วยสเปกตรัมเนื้อส้มโอที่ช่วง 633-961 นาโนเมตร ด้วยวิธี SIMCA

ผลการคัดแยกเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน โดยใช้วิธี Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) โดยใช้สเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) และสเปกตรัมที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น 2 วิธี ได้แก่ 1) Multiplicative Scatter Correction (MSC) 2) Savitzky-Golay second differentiation ที่มี 2 derivative segment คือ 10 และ 20 nm โดยเมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกด้วยการสร้างแบบจำลองจากสเปกตรัมของเนื้อส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ พบว่าแบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมของเนื้อส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยว 200 วันหลังดอกบาน สามารถคัดแยกกลุ่มเดียวกันได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็น 180, 220, 190 และ 210 วันหลังดอกบาน ตามลำดับ ส่วนแบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรัมของเนื้อส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยว 210 วันหลังดอกบาน สามารถคัดแยกต่างกลุ่มกันได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็น 190, 180, 200 และ 220 วันหลังดอกบาน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกด้วยการสร้างแบบจำลองจากสเปกตรัมของเนื้อส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยวตามการจัดการสเปกตรัมด้วยวิธีต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่า การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธีสเปกตรัมดั้งเดิมสามารถคัดแยกได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm, MSC และ Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาความถูกต้องในการคัดแยกกลุ่มเดียวกันนั้น การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธี วิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm สามารถคัดแยกได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm, MSC และสเปกตรัมดั้งเดิมตามลำดับ ต่างกับเมื่อพิจารณาความถูกต้องในการคัดแยกต่างกลุ่มกัน การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธีสเปกตรัมดั้งเดิมสามารถคัดได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี MSC, Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm และ Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm ตามลำดับ

จากผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวเนื้อส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมเนื้อส้มโอที่ช่วง 633-961 นาโนเมตร ด้วยวิธี SIMCA สามารถคัดแยกกลุ่มที่เหมือนกับแบบจำลองได้ดีจึงควรใช้แบบจำลองทุกอายุการเก็บเกี่ยวในการคัดแยกกลุ่มเดียวกับแบบจำลองจะให้ผลดีที่สุด

ตารางที่ 4.5 ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวเนื้อส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมเนื้อส้มโอที่ช่วง 633-961 นาโนเมตร ด้วยวิธี SIMCA

pretreated spectra	maturity group	No. of fruits for prediction		Model					Self-prediction	Other group prediction
				180	190	200	210	220		
raw spectra	180	77	Percentage of correct classification	93.51	16.88	19.48	10.39	12.99	93.51	14.94
	190	66		22.73	96.97	7.58	21.21	12.12	96.97	15.91
	200	60		23.33	10.00	91.67	16.67	8.33	91.67	14.58
	210	60		15.00	5.00	10.00	90.00	5.00	90.00	8.75
	220	60		15.00	13.33	15.00	15.00	93.33	93.33	14.58
	Total	323	%Correct	36.84	29.10	27.86	29.41	25.39	93.10	13.75
Multiplicative Scatter Correction (MSC)	180	77	Percentage of correct classification	97.40	16.88	5.19	3.90	5.19	97.40	7.79
	190	66		3.03	98.48	0.00	4.55	4.55	98.48	3.03
	200	60		6.67	15.00	95.00	8.33	6.67	95.00	9.17
	210	60		1.67	8.33	1.67	96.67	5.00	96.67	4.17
	220	60		8.33	21.67	10.00	10.00	93.33	93.33	12.50
	Total	323	%Correct	26.93	32.51	21.05	23.22	21.67	96.18	7.33
Savitzky-Golay second differentiation that derivative segment 10 nm	180	77	Percentage of correct classification	97.40	14.29	5.19	2.60	2.60	97.40	6.17
	190	66		6.06	100.00	3.03	7.58	0.00	100.00	4.17
	200	60		10.00	0.00	96.67	3.33	0.00	96.67	3.33
	210	60		6.67	6.67	5.00	100.00	1.67	100.00	5.00
	220	60		10.00	5.00	5.00	5.00	96.67	96.67	6.25
	Total	323	%Correct	29.41	26.01	21.67	22.29	18.89	98.15	4.98
Savitzky-Golay second differentiation that derivative segment 20 nm	180	77	Percentage of correct classification	96.10	9.09	2.60	7.79	9.09	96.10	7.14
	190	66		1.52	100.00	3.03	9.09	4.55	100.00	4.55
	200	60		8.33	5.00	95.00	5.00	3.33	95.00	5.42
	210	60		6.67	8.33	0.00	100.00	3.33	100.00	4.58
	220	60		11.67	16.67	10.00	10.00	96.67	96.67	12.08
	Total	323	%Correct	28.17	28.17	20.74	25.08	22.29	97.55	6.75

4.4.3.2 ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวเนื้อส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมเนื้อส้มโอที่ช่วง 633-961 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLS-DA

ผลการคัดแยกเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน โดยใช้วิธี Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) โดยใช้สเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) และ spectrum ที่มีการจัดการ spectrumเบื้องต้น 2 วิธี ได้แก่ 1) Multiplicative Scatter Correction (MSC) 2) Savitzky-Golay second differentiation ที่มี 2 derivative segment คือ 10 และ 20 nm โดยเมื่อ

เปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกด้วยการสร้างแบบจำลองจากสเปกตรัมของเนื้อส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่า แบบจำลอง ที่สร้างจากสเปกตรัมของเนื้อส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยว 190 วันหลังดอกบาน สามารถคัดแยกกลุ่มเดียวกันได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็น 180, 210, 200 และ 220 วันหลังดอกบาน ตามลำดับ ส่วนแบบจำลอง ที่สร้างจากสเปกตรัมของเนื้อส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยว 200 วันหลังดอกบาน สามารถคัดแยกต่างกลุ่มกันได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็น 190, 210, 220 และ 180 วันหลังดอกบาน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องในการคัดแยกด้วยการสร้างแบบจำลองจากสเปกตรัมของเนื้อส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยวตามการจัดการสเปกตรัมด้วยวิธีต่างๆ พบว่า การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm สามารถคัดแยกได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm, สเปกตรัมดั้งเดิมและ MSC ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาความถูกต้องในการคัดแยกกลุ่มเดียวกันนั้น การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธี วิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm สามารถคัดแยกได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm, สเปกตรัมดั้งเดิมและ MSC ตามลำดับ ต่างกับเมื่อพิจารณาความถูกต้องในการคัดแยกต่างกลุ่มกัน การจัดการสเปกตรัมด้วยวิธีสเปกตรัมดั้งเดิมสามารถคัดได้ถูกต้องสูงสุด รองลงมาเป็นวิธี Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm, MSC และ Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm ตามลำดับ

จากผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวเนื้อส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมเนื้อส้มโอที่ช่วง 633-961 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLS-DA สามารถคัดแยกต่างกลุ่มว่าไม่ใช่กลุ่มเดียวกับแบบจำลองได้ดีกว่าการคัดแยกกลุ่มเดียวกับแบบจำลอง

ตารางที่ 4.6 ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวเนื้อส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมเนื้อส้มโอที่ช่วง 633-961 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLS-DA

pretreated spectra	maturity group	No. of fruits for prediction		Model					Self-prediction	Other group prediction
				180	190	200	210	220		
raw spectra	180	77	Percentage of correct classification	30.20	100.00	100.00	100.00	100.00	30.20	100.00
	190	66		98.48	51.52	100.00	100.00	100.00	51.52	99.62
	200	60		98.33	88.33	0.00	100.00	100.00	0.00	96.67
	210	60		91.67	100.00	100.00	0.00	100.00	0.00	97.92
	220	60		96.67	98.33	100.00	98.33	0.00	0.00	98.33
	Total	323	%Correct	80.57	87.62	81.42	81.11	81.42	16.34	98.51

ตารางที่ 4.6 ผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวเนื้อส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมเนื้อส้มโอที่ช่วง 633-961 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLS-DA (ต่อ)

pretreated spectra	maturity group	No. of fruits for prediction		Model					Self-prediction	Other group prediction
				180	190	200	210	220		
Multiplicative Scatter Correction (MSC)	180	77	Percentage of correct classification	38.96	100.00	96.10	100.00	96.10	38.96	98.05
	190	66		98.48	9.09	100.00	98.48	100.00	9.09	99.24
	200	60		78.33	100.00	11.67	95.00	98.33	11.67	92.92
	210	60		96.67	100.00	100.00	8.33	100.00	8.33	99.17
	220	60		76.67	100.00	95.00	98.33	0.00	0.00	92.50
	Total	323	%Correct	76.16	81.42	81.73	81.42	80.19	13.61	96.38
Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm	180	77	Percentage of correct classification	28.57	98.70	100.00	96.10	96.10	28.57	97.73
	190	66		98.48	98.48	100.00	98.48	98.48	98.48	98.86
	200	60		96.67	100.00	61.67	100.00	100.00	61.67	99.17
	210	60		95.00	98.33	96.67	51.67	48.33	51.67	84.58
	220	60		93.33	100.00	93.33	88.33	11.67	11.67	93.75
	Total	323	%Correct	79.88	99.07	91.02	87.62	72.76	50.41	94.82
Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm	180	77	Percentage of correct classification	44.16	100.00	100.00	94.81	92.21	44.16	96.75
	190	66		100.00	98.48	96.97	100.00	100.00	98.48	99.24
	200	60		96.67	90.00	0.00	100.00	98.33	0.00	96.25
	210	60		100.00	100.00	100.00	30.00	100.00	30.00	100.00
	220	60		83.33	100.00	100.00	96.67	16.67	16.67	95.00
	Total	323	%Correct	82.97	97.83	80.80	85.14	82.35	37.86	97.45

จากผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวเนื้อส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมเนื้อส้มโอที่ช่วง 633-961 นาโนเมตร การคัดแยกด้วยวิธี SIMCA สามารถคัดแยกกลุ่มเดียวกันได้ดีกว่าการคัดแยกด้วยวิธี PLS-DA แต่การคัดแยกต่างกลุ่มกันการคัดแยกด้วยวิธี PLS-DA สามารถคัดแยกได้ดีกว่าการคัดแยกด้วยวิธี SIMCA

สรุปจากผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอขาวน้ำผึ้ง พบว่าในการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวด้วยสเปกตรัมผิวเปลือกส้มโอที่ความยาวคลื่น 633-961 นาโนเมตร ให้ผลดีกว่าช่วง 400-700 นาโนเมตร และควรใช้แบบจำลองทุกอายุการเก็บเกี่ยวในการคัดแยกกลุ่มเดียวกับแบบจำลอง โดยการใช้การคัดแยกด้วยวิธี SIMCA ในการคัดแยกกลุ่มเดียวกัน ร่วมกับวิธี PLS-DA ในการคัดแยกต่างกลุ่มกัน ซึ่งสอดคล้องกับการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวเนื้อส้มโอขาวน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมเนื้อส้มโอที่ช่วง 633-961 นาโนเมตร

4.5 ผลการทำนายสมบัติภายนอกและภายในที่มีการเปลี่ยนแปลงตามอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอพันธุ์ชวบน้ำผึ้ง

การสร้างสมการทำนายสมบัติภายนอกและภายในด้วยวิธี Partial least square (PLS) Regression ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นระหว่าง 633–961 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง FQA NIR GUN ในการตรวจวัดสเปกตรัมจากผิวผล และเนื้อส้มโอพันธุ์ชวบน้ำผึ้ง กับสมบัติที่วัดได้จากส่วนต่างๆของผลส้มโอพันธุ์ชวบน้ำผึ้งในห้องปฏิบัติการคือ ส่วนผลส้มโอ และส่วนเนื้อส้มโอ ทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว ได้แก่ 180 190 200 210 และ 220 วันหลังจากดอกบาน โดยใช้สเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) และสเปกตรัมที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น 2 วิธี ได้แก่ 1) Multiplicative Scatter Correction (MSC) 2) Savitzky-Golay second differentiation ที่มี 2 derivative segment คือ 10 และ 20 nm โดยค่าทางสถิติของชุด Calibration และชุด Prediction จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ แสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งผลการสร้างสมการทำนายค่าความสัมพัทธ์ มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.7 ค่าทางสถิติของสมบัติต่างๆ ผลส้มโอพันธุ์ชวบน้ำผึ้งที่ใช้สร้างสมการทำนายค่า

Parameter measured	Calibration set					Prediction set				
	n	max	min	average	SD	n	max	min	average	SD
Density of oil gland (number/cm ²)	73	41.00	14.06	26.52	5.99	28	38.06	18.00	26.82	5.58
Percentage of Area of oil gland (%)	73	1.31	0.59	0.93	0.18	28	1.29	0.59	0.94	0.17
Soluble solids (%Brix)	146	10.90	7.56	9.47	0.72	56	10.70	7.90	9.39	0.72
Titratable acidity (%)	146	0.82	0.40	0.57	0.08	56	0.73	0.41	0.57	0.08
Max force (N)	119	3.51	1.04	1.99	0.50	46	2.99	1.13	1.99	0.47
Average force (N/mm)	119	2.46	0.62	1.31	0.42	46	1.77	0.57	1.26	0.31
Toughness (N mm)	119	24.56	6.23	13.14	4.21	46	17.73	5.67	12.70	3.14

4.5.1 ผลการสร้างสมการทำนายค่าการเปลี่ยนแปลงของผิวผลส้มโอพันธุ์ชวบน้ำผึ้ง

ผลการทำนายความหนาแน่นของค่อมน้ำมัน (Density of oil gland (number/cm²)) และเปอร์เซ็นต์พื้นที่ค่อมน้ำมัน (Percentage of Area of oil gland (%)) ของผิวผลส้มโอพันธุ์ชวบน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ด้วยวิธี PLS แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่า ปัจจัยที่วัดค่าความหนาแน่นของค่อมน้ำมัน โดยถูกพัฒนาแบบจำลองมาจากสเปกตรัมดั้งเดิมระหว่างค่าที่ทำนายได้ และค่าอ้างอิงมีค่า correlation coefficient (r=0.70) สูงสุดในการทดลอง ซึ่ง r มีค่าอยู่ช่วง +/- 0.51-0.70 แปลว่ามีความแม่นยำไม่ต่ำ (Williams, 2007) ส่วนอัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) จากข้อมูลอ้างอิงของชุด prediction ต่อความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard error) ของ prediction

(ratio of the SEP to the SD=RPD) และ อัตราส่วนของช่วง (Range) ในข้อมูลอ้างอิงจากชุด prediction ต่อความผิดพลาดมาตรฐานของ prediction (ratio of the SEP to the range=RER) ได้ 1.35 และ 4.86 ตามลำดับ ซึ่ง RPD และ RER มีค่าอยู่ช่วง 0.0-2.3 และ น้อยกว่า 6 ตามลำดับ แปลว่าแบบจำลองไม่สามารถคัดแยกและนำไปใช้ไม่ได้ตามลำดับ (Williams, 2007) ในเรื่องของค่าความหนาแน่นของต่อน้ำมัน กระบวนการจัดการสเปกตรัมไม่สามารถทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น

ส่วนปัจจัยที่วัดค่าเปอร์เซ็นต์พื้นที่ผิวของต่อน้ำมัน โดยแบบจำลอง ถูกพัฒนาจากสเปกตรัมดั้งเดิมได้ค่า $r=0.56$ สูงสุดในการทดลอง ซึ่ง r มีค่าอยู่ช่วง $\pm 0.51-0.70$ แปลว่ามีความแม่นยำไม่ดี (Williams, 2007) ส่วนค่า RPD=1.17 และ RER=4.79 มีค่าอยู่ช่วง 0.0-2.3 และ น้อยกว่า 6 ตามลำดับ แปลว่า model ไม่สามารถคัดแยกและนำไปใช้ได้ตามลำดับ (Williams, 2007) ในเรื่องของค่าพื้นที่ผิวของต่อน้ำมัน กระบวนการจัดการสเปกตรัมไม่สามารถทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น

ความสัมพันธ์ ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่วัดจริง โดยถูกพัฒนาแบบจำลอง มาจากสเปกตรัมดั้งเดิมด้วย PLS regression แสดงดังภาพที่ 4.28 พบว่า ค่าความสัมพันธ์ค่อนข้างกระจัดกระจายตัวตลอดช่วงของค่าที่ทำนายได้ ทำให้ค่าความแม่นยำในการทำนายไม่ค่อยดีนัก โดยภาพที่ 4.28 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่วัดจริงของความหนาแน่นของต่อน้ำมัน ได้ค่าความแม่นยำในการทำนายเพียง $r=0.70$ และมีค่าความผิดพลาด (bias) สูงถึง 1.32 number/cm^2 เช่นเดียวกับการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่วัดจริงของเปอร์เซ็นต์พื้นที่ผิวของต่อน้ำมัน ได้ค่าความแม่นยำในการทำนายเพียง $r=0.56$ แต่มีค่าความผิดพลาด (bias) เพียง -0.03 ดังภาพที่ 4.28 (b) ซึ่งอาจประมาณได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 600-1100 nm ที่ใช้วัดจากผิวของเปลือกส้มโอไม่ค่อยมีความสัมพันธ์กันมากนักกับความหนาแน่นของต่อน้ำมัน และพื้นที่ผิวของต่อน้ำมัน จึงส่งผลให้ค่าความแม่นยำในการทำนายค่าไม่สูง

เมื่อพิจารณาอย่างละเอียดบนพื้นฐานของโมเดลจากค่า regression coefficient แสดงดังภาพที่ 4.29 ที่สร้างขึ้นระหว่างค่า regression coefficient กับความยาวคลื่น โดยแบบจำลองถูกพัฒนา มาสเปกตรัมดั้งเดิม ภาพที่ 4.29 (a) และภาพที่ 4.29 (b) มีค่า regression coefficient สูงที่พีคประมาณ 680 ซึ่งเป็นพีคของคลอโรฟิลล์ (Abbott et al., 1997)

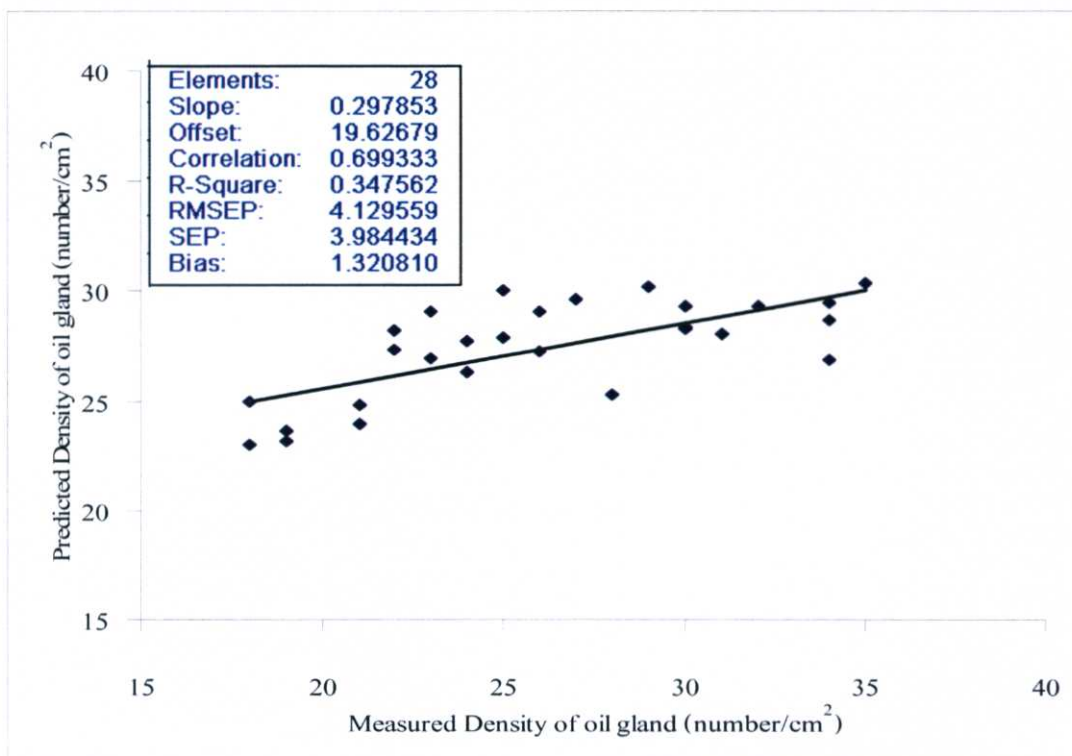
ค่า X-loading weight ของ PC (principle component) ต่างๆ ของความหนาแน่นของต่อน้ำมัน และของพื้นที่ผิวต่อน้ำมันแสดงดังภาพที่ 4.30 (a) และ (b) ตามลำดับ โดยลักษณะของกราฟที่ปรากฏคล้ายกับลักษณะกราฟใน regression coefficient ซึ่งที่ความยาวคลื่นที่มีค่า X-loading weight ที่สูงแสดงว่าตัวแปรต้นที่ความยาวคลื่นนั้นมีผลต่อแบบจำลอง มาก จากภาพที่ 4.30 (a) PC1-PC4 สามารถครอบคลุมความแปรปรวน 96 2 2 และ 0 ตามลำดับ จากภาพที่ 4.29 (b) PC1-PC4 สามารถครอบคลุมความแปรปรวน 96 3 1 และ 0 ตามลำดับ โดยภาพที่ 4.30 (a) ค่า X-loading weigh

ที่กราฟ PC1 ของความหนาแน่นของต่อมน้ำมันแสดงช่วงคลื่นที่สร้างแบบจำลอง พบว่าตลอดทั้งช่วงคลื่นมีอิทธิพลกับแบบจำลอง ส่วน PC2 พบช่วงคลื่นที่ไม่มีอิทธิพลกับแบบจำลองได้แก่ 712 และ 884 nm ส่วน PC3 พบช่วงคลื่นที่ไม่มีอิทธิพลกับแบบจำลองได้แก่ 740 และ 777-801 nm และ PC4 พบช่วงคลื่นที่ไม่มีอิทธิพลกับ model ได้แก่ 679 712 785 และ 921 nm ซึ่งช่วงคลื่นที่มีอิทธิพลกับแบบจำลองประมาณตำแหน่งที่ 738 nm (ROH) 760 nm (H₂O) 806 nm (RNH₂) 840 nm (benzene) 874 nm (benzene) 900 nm (CH₃) 928 nm (oil) 938 nm (CH₂) (Osborne and Fearn, 1986) และ 962 nm (น้ำ) (Saranwong et al., 2003) โดยภาพที่ 3 (b) ค่า X-loading weigh ที่กราฟ PC1 ของความหนาแน่นของต่อมน้ำมันแสดงช่วงคลื่นที่สร้าง model พบว่าตลอดทั้งช่วงคลื่นมีอิทธิพลกับ model ส่วน PC2 พบช่วงคลื่นที่ไม่มีอิทธิพลกับแบบจำลองได้แก่ 813 nm ส่วน PC3 พบช่วงคลื่นที่ไม่มีอิทธิพลกับแบบจำลองได้แก่ 710 และ 896 nm และ PC4 พบช่วงคลื่นที่ไม่มีอิทธิพลกับแบบจำลองได้แก่ 679 716 783 793 881-831 919 และ 955 nm ซึ่งช่วงคลื่นที่มีอิทธิพลกับ model ประมาณตำแหน่งที่ 740 nm (CH₃) 746 nm (CH₂) 928 nm (oil) 938 nm (CH₂) (Osborne and Fearn, 1986) และ 962 nm (น้ำ) (Saranwong et al., 2003)

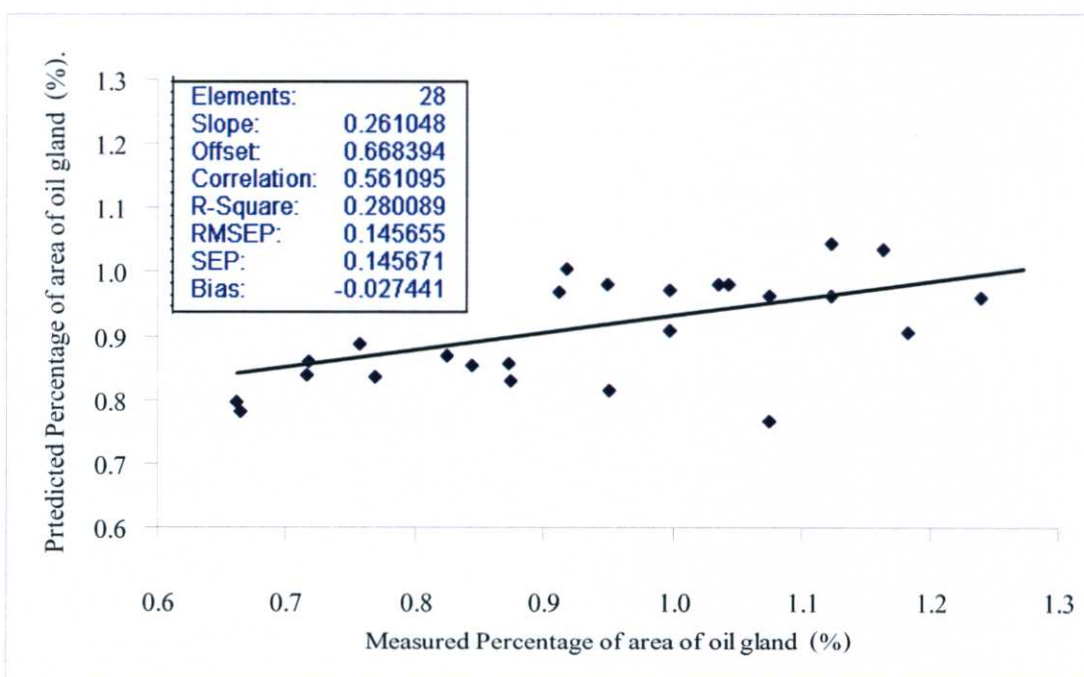
ตารางที่ 4.8 ผลการสร้างสมการและการทำนายความหนาแน่นของต่อมน้ำมัน และของเปอร์เซ็นต์พื้นผิวต่อมน้ำมันด้วยวิธี PLS

Parameter measured	Pretreatment	PCs	Calibration			Prediction			RPD	RER
			r	SEC	Bias	r	SEP	Bias	SD/SEP	(max-min)/SEP
Density of oil gland (number/cm ²)	Raw spectra	1	0.41	5.53	0.00000078	0.70	4.13	1.321	1.35	4.86
	Multiplicative Scatter Correction (MSC)	1	0.17	5.97	0.00000086	0.23	5.03	0.732	1.11	3.99
	Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm	4	0.14	6.01	0.00000076	0.17	5.09	0.731	1.10	3.94
	Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm	4	0.45	5.41	-0.00000057	0.55	4.50	1.692	1.24	4.45
Percentage of area of oil gland (%)	Raw spectra	1	0.43	0.16	0.00000001	0.56	0.15	-0.027	1.17	4.79
	Multiplicative Scatter Correction (MSC)	1	0.35	0.17	0.00000001	0.25	0.17	-0.008	1.02	4.16
	Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm	1	0.34	0.17	0.00000001	0.28	0.17	-0.008	1.03	4.23
	Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm	3	0.45	0.16	0.00000005	0.48	0.15	-0.033	1.10	4.51

หมายเหตุ : PC = principle component, r=correlation, SEC= Standard error of Calibration, Bias= error, SEP= Standard error of Prediction, RPD= ratio of the SEP to the SD, RER= ratio of the SEP to the range, SD= Standard deviation

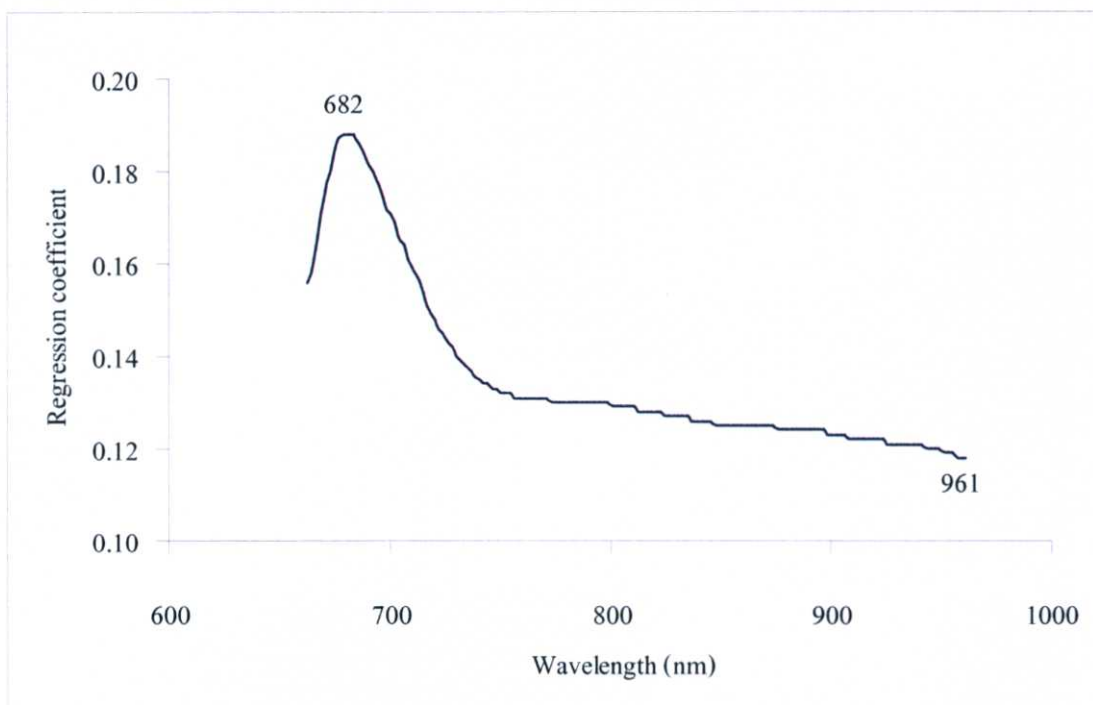


a

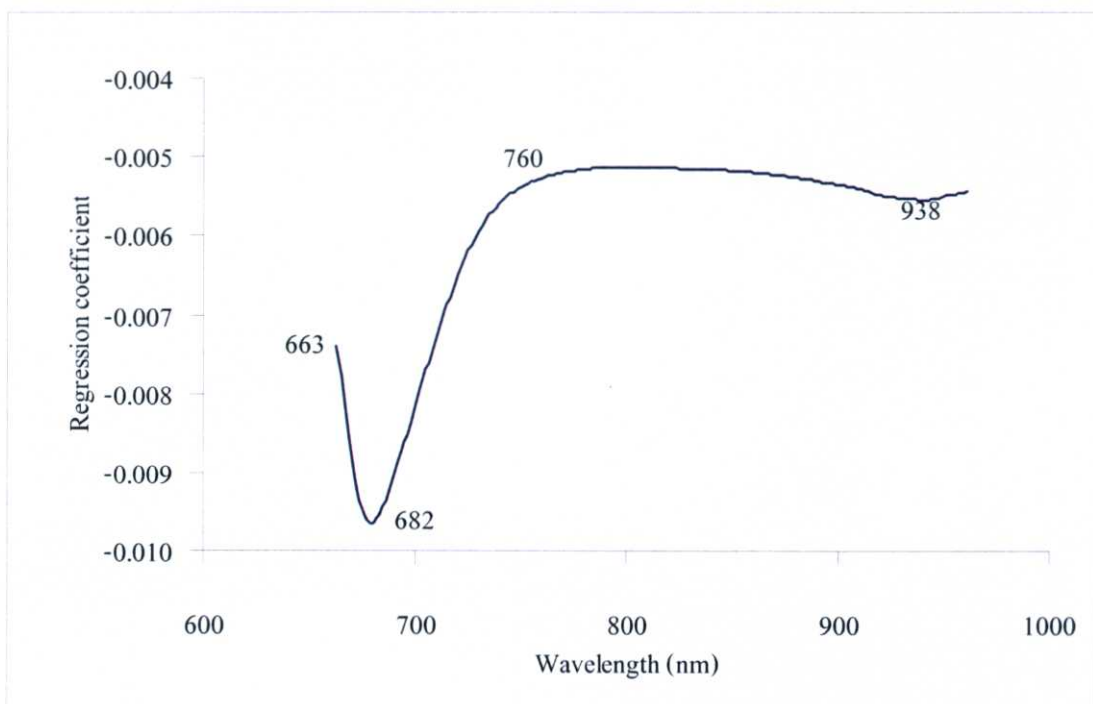


b

ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้กับค่าที่ทำนาย (a) ของความหนาแน่นของต่อมน้ำมัน และ (b) ของเปอร์เซ็นต์พื้นที่ผิวต่อมน้ำมัน

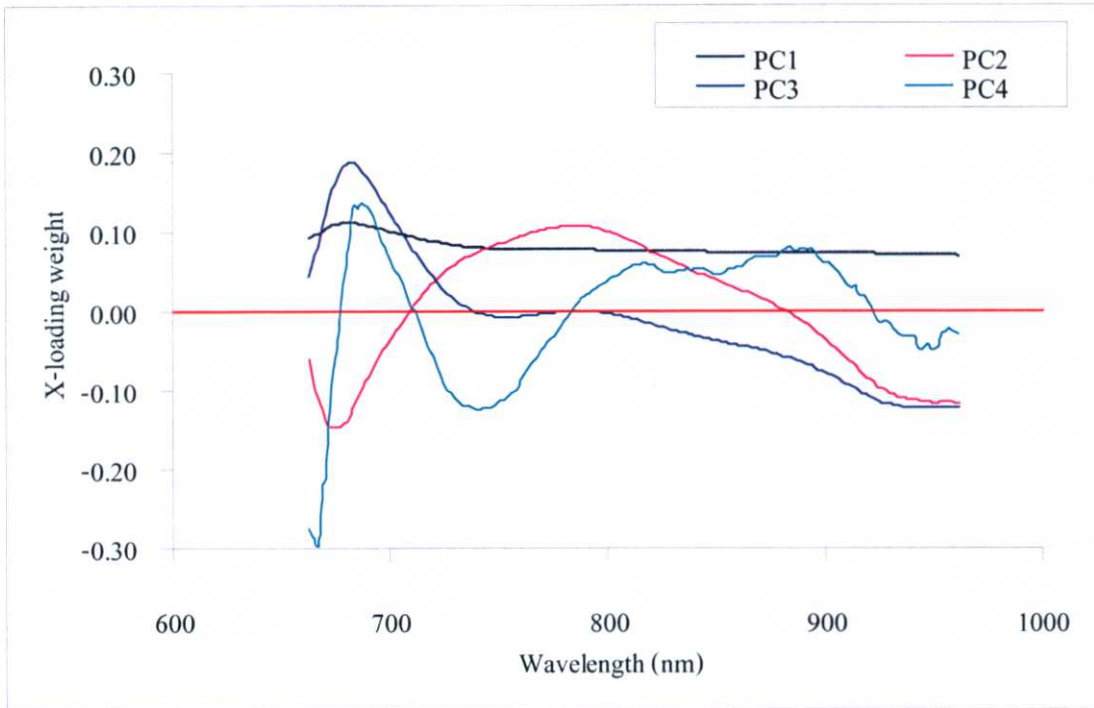


a

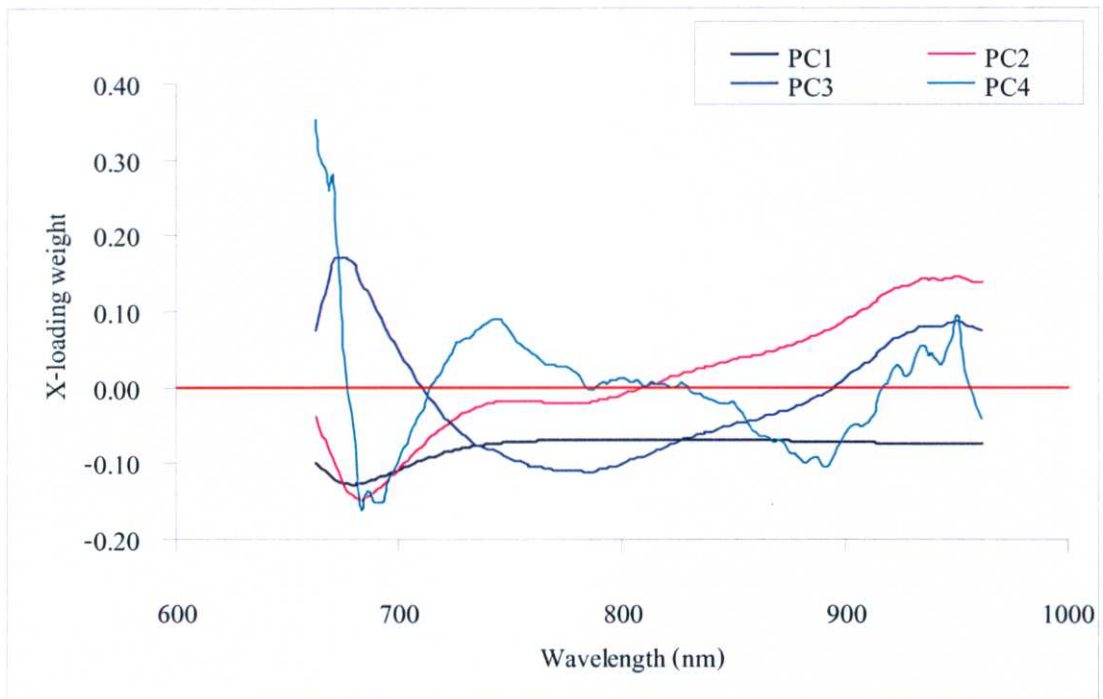


b

ภาพที่ 4.29 ค่า regression coefficient (a) ของความหนาแน่นของต่อมน้ำมัน และ (b) ของเปอร์เซ็นต์พื้นที่ผิวต่อมน้ำมัน



a



b

ภาพที่ 4.30 ค่า X-loading (a) ของความหนาแน่นของต่อมน้ำมัน และ
(b) ของเปอร์เซ็นต์พื้นผิวต่อมน้ำมัน

4.5.2 ผลการสร้างสมการทำนายค่าการเปลี่ยนแปลงของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

ผลการสร้างสมการทำนายค่าความสัมพันธ์ ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Soluble solid (%brix)) และ ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (Titratable acidity (%)) ด้วยวิธี PLS ของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่า แบบจำลองที่ทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ถูกพัฒนาแบบจำลองมาจากสเปกตรัม Multiplicative Scatter Correction (MSC) มีค่า correlation coefficient ($r=0.87$) สูงสุดในการทดลอง ซึ่ง r มีค่าอยู่ช่วง $\pm 0.81-0.90$ แปลว่าใช้ในการตรวจวัดได้ (Williams, 2007) ส่วนอัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) จากข้อมูลอ้างอิงของชุด prediction ต่อความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard error) ของ prediction (ratio of the SEP to the SD=RPD) และ อัตราส่วนของช่วง (Range) ในข้อมูลอ้างอิงจากชุด prediction ต่อความผิดพลาดมาตรฐานของ prediction (ratio of the SEP to the range=RER) ได้ 2.08 และ 8.10 ตามลำดับ ซึ่ง RPD มีค่าอยู่ช่วง 0.0-2.3 แปลว่าแบบจำลองไม่สามารถคัดแยกและไม่สามารถนำไปใช้ได้ ส่วนค่า RER มีค่าอยู่ช่วง 7-12.0 แปลว่าแบบจำลองไม่สามารถคัดแยกได้ดีและการนำไปใช้คร่าวๆ (Williams, 2007) ในเรื่องของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ กระบวนการจัดการสเปกตรัมสามารถทำให้แบบจำลอง มีความแม่นยำมากขึ้น

ส่วนการทำนายค่าปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ โดยแบบจำลอง ถูกพัฒนาจากสเปกตรัมดั้งเดิม ได้ค่า $r=0.57$ สูงสุดในการทดลอง ซึ่ง r มีค่าอยู่ช่วง $\pm 0.51-0.70$ แปลว่ามีความแม่นยำไม่ดี (Williams, 2007) ส่วนค่า RPD=1.14 และ RER=4.75 มีค่าอยู่ช่วง 0.0-2.3 และ น้อยกว่า 6 ตามลำดับ แปลว่าแบบจำลองไม่สามารถคัดแยกและนำไปใช้ไม่ได้ตามลำดับ (Williams, 2007) ในเรื่องของค่าปริมาณกรดที่ไตเตรท กระบวนการจัดการสเปกตรัมไม่สามารถทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น

ความสัมพันธ์ ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่วัดจริง ของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และ ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ซึ่งถูกพัฒนาแบบจำลองมาจาก MSC และสเปกตรัมแบบดั้งเดิม ตามลำดับด้วย PLS regression แสดงดังภาพที่ 4.31 พบว่า ค่าความสัมพันธ์ค่อนข้างกระจัดกระจาย ทั่วตลอดช่วงของค่าที่ทำนายได้ โดยภาพที่ 4.31 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่วัดจริงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ค่าความแม่นยำในการทำนาย $r=0.87$ และมีค่าความผิดพลาด (bias) เพียง-0.051 เช่นเดียวกับการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่วัดจริงของปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ ค่าความแม่นยำในการทำนายเพียง $r=0.57$ แต่มีค่าความผิดพลาด (bias) เพียง 0.003 ดังภาพที่ 4.31 (b) ซึ่งอาจประมาณได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงที่วัดจากเนื้อส้มโอมีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ส่วนกับค่าปริมาณกรดที่ไตเตรทมีความสัมพันธ์ไม่ค่อยดี

เมื่อพิจารณาอย่างละเอียดบนพื้นฐานของโมเดลจากค่า regression coefficient แสดงดังภาพที่ 4.32 ที่สร้างขึ้นระหว่างค่า regression coefficient กับความยาวคลื่น โดยภาพที่ 4.32 (a) เป็น

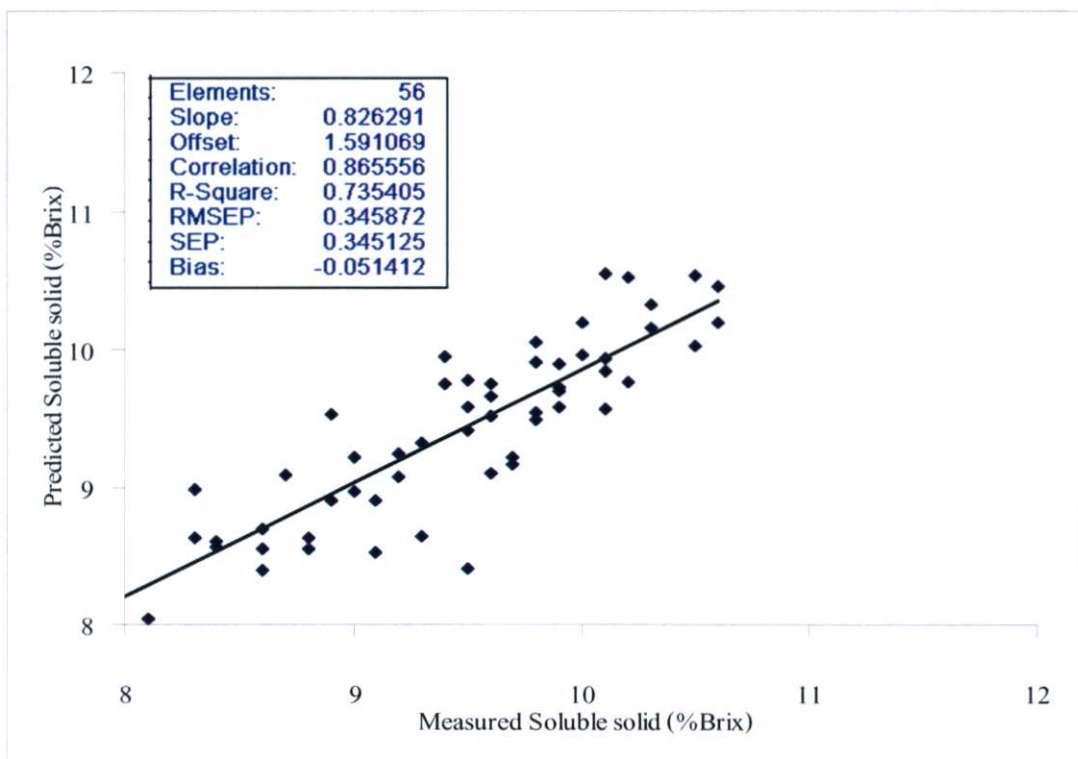
ค่า regression coefficient ของความหนาแน่นของต่อมน้ำมัน โดยแบบจำลองถูกพัฒนามาจากสเปกตรัม MSC มีพีคที่สัมพันธ์กับค่าอ้างอิงจำนวนมากปรากฏพีคประมาณตำแหน่งที่ 713 nm (benzene) 740 nm (CH₃) 746 nm (CH₂) 760 nm (H₂O) 913 nm (CH₂) 928 nm (oil) และ 970 nm (ROH, H₂O) nm (Osborne and Fearn, 1986) ส่วนภาพที่ 4.32 (b) เป็นค่า regression coefficient ของปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้ปรากฏพีคประมาณตำแหน่งที่ 713 nm (benzene) 760 nm (H₂O) 779 nm (RNH₂) 832 nm (RNHR') 840 nm (benzene) 928 nm (oil) และ 938 nm (CH₂) (Osborne and Fearn, 1986)

ค่า X-loading weight ของ PC (principle component) ต่างๆ ของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้ แสดงดังภาพที่ 4.33 (a) และ (b) ตามลำดับ โดยยาวคลื่นที่มีค่า X-loading weight ที่สูงแสดงว่าตัวแปรต้นที่ความยาวคลื่นนั้นมีผลต่อแบบจำลองมาก จากภาพที่ 4.33 (a) PC1-PC5 สามารถครอบคลุมความแปรปรวน 79 10 9 1 และ 0 ตามลำดับ เช่นเดียวกับภาพที่ 4.33 (b) PC1-PC3 สามารถครอบคลุมความแปรปรวน 97 3 และ 0 โดยภาพที่ 4.33 (a) ค่า X-loading weigh ที่กราฟ PC1 ของปริมาณของแข็งที่ละลายได้แสดงช่วงคลื่นที่มีผลต่อแบบจำลอง พบว่าช่วงคลื่นที่ไม่มีอิทธิพลกับแบบจำลอง ได้แก่ 797 และ 943 nm ส่วน PC2 พบช่วงคลื่นที่ไม่มีอิทธิพลกับแบบจำลอง ได้แก่ 763 823-838 906 และ 963 nm ส่วน PC3 พบช่วงคลื่นที่ไม่มีอิทธิพลกับแบบจำลอง ได้แก่ 759 866 925 939 971 และ 979 nm ส่วน PC4 พบช่วงคลื่นที่ไม่มีอิทธิพลกับแบบจำลอง ได้แก่ 724 809 870 902 และ 962 nm และ PC5 พบช่วงคลื่นที่ไม่มีอิทธิพลกับแบบจำลอง ได้แก่ 710 728 756 767 829 884 912 943 และ 973 nm ซึ่งช่วงคลื่นที่มีอิทธิพลกับแบบจำลอง ประมาณตำแหน่งที่ 713 nm (benzene) 738 nm (ROH) 762 nm (CH₂) 760 nm (H₂O) 806 nm (RNH₂) 840 nm (benzene) 874 nm (benzene) 900 nm (CH₃) 928 nm (oil) 938 nm (CH₂) 970 nm (ROH, H₂O) (Osborn and Fearn, 1986) และ 962 nm (น้ำ) (Saranwong et al., 2003) โดยภาพที่ 4.33 (b) ค่า X-loading weigh ที่กราฟ PC1 ของปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้ แสดงช่วงคลื่นที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลอง พบว่าตลอดทั้งช่วงคลื่นมีอิทธิพลกับแบบจำลอง ส่วน PC2 พบช่วงคลื่นที่ไม่มีอิทธิพลกับแบบจำลอง ได้แก่ 878 nm ส่วน PC3 พบช่วงคลื่นที่ไม่มีอิทธิพลกับแบบจำลอง ได้แก่ 722-742 833 921 และ 961-965 nm ซึ่งช่วงคลื่นที่มีอิทธิพลกับแบบจำลองประมาณตำแหน่งที่ 713 nm (benzene) 738 nm (ROH) 762 nm (CH₂) 760 nm (H₂O) 806 nm (RNH₂) 840 nm (benzene) 874 nm (benzene) 900 nm (CH₃) 928 nm (oil) 938 nm (CH₂) 970 nm (ROH, H₂O) (Osborn and Fearn, 1986) และ 962 nm (น้ำ) (Saranwong et al., 2003)

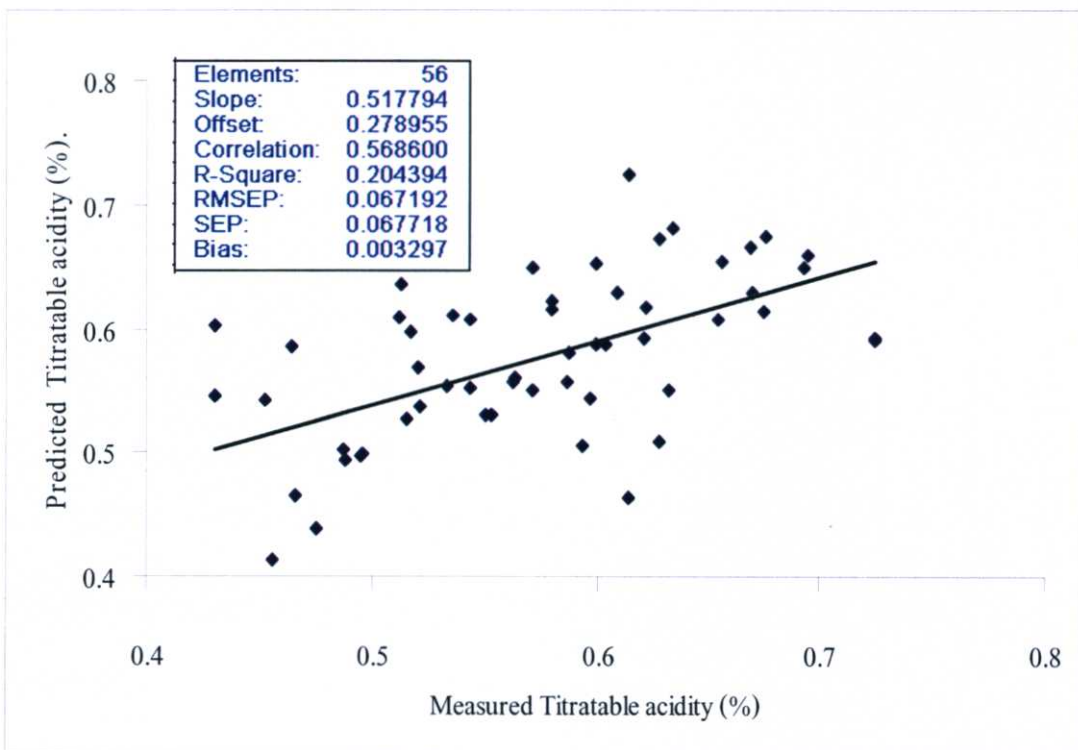
ตารางที่ 4.9 ผลการสร้างสมการและการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และของปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้ด้วยวิธี PLS

Parameter measured	Pretreatment	PCs	Calibration			Prediction			RPD	RER
			r	SEC	Bias	r	SEP	Bias	SD/SEP	(max-min)/SEP
Soluble solid (%Brix)	Raw spectra	11	0.89	0.33	0.00001302	0.82	0.41	-0.012	1.77	6.89
	Multiplicative Scatter Correction (MSC)	9	0.87	0.37	0.00000222	0.87	0.35	-0.051	2.08	8.09
	Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm	11	0.90	0.32	0.00000032	0.77	0.46	-0.088	1.58	6.14
	Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm	8	0.85	0.38	0.00000076	0.83	0.38	0.005	1.91	7.43
Titratable acidity (%)	Raw spectra	10	0.75	0.06	-0.00000132	0.57	0.07	0.003	1.14	4.75
	Multiplicative Scatter Correction (MSC)	9	0.75	0.06	0.00000082	0.56	0.07	0.003	1.17	4.86
	Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm	10	0.82	0.05	-0.00000001	0.45	0.08	-0.004	0.98	4.05
	Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm	8	0.73	0.06	-0.00000017	0.50	0.07	0.006	1.12	4.63

หมายเหตุ : PC = principle component, r=correlation, SEC= Standard error of Calibration, Bias= error, SEP= Standard error of Prediction, RPD= ratio of the SEP to the SD, RER= ratio of the SEP to the range, SD= Standard deviation

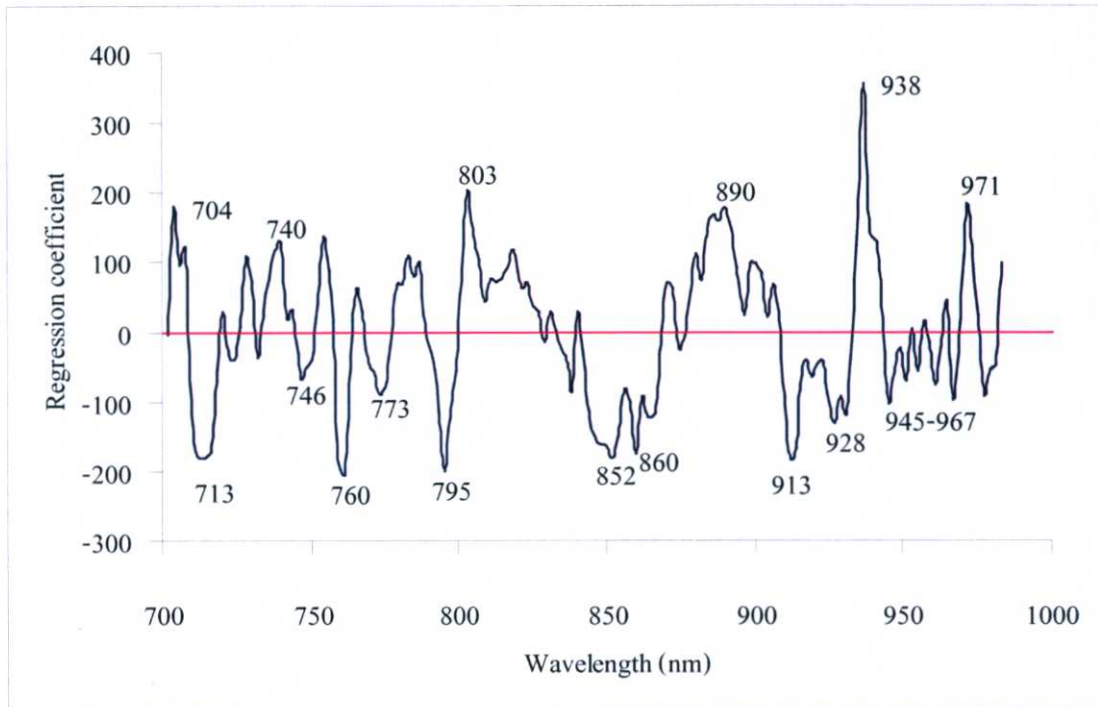


a

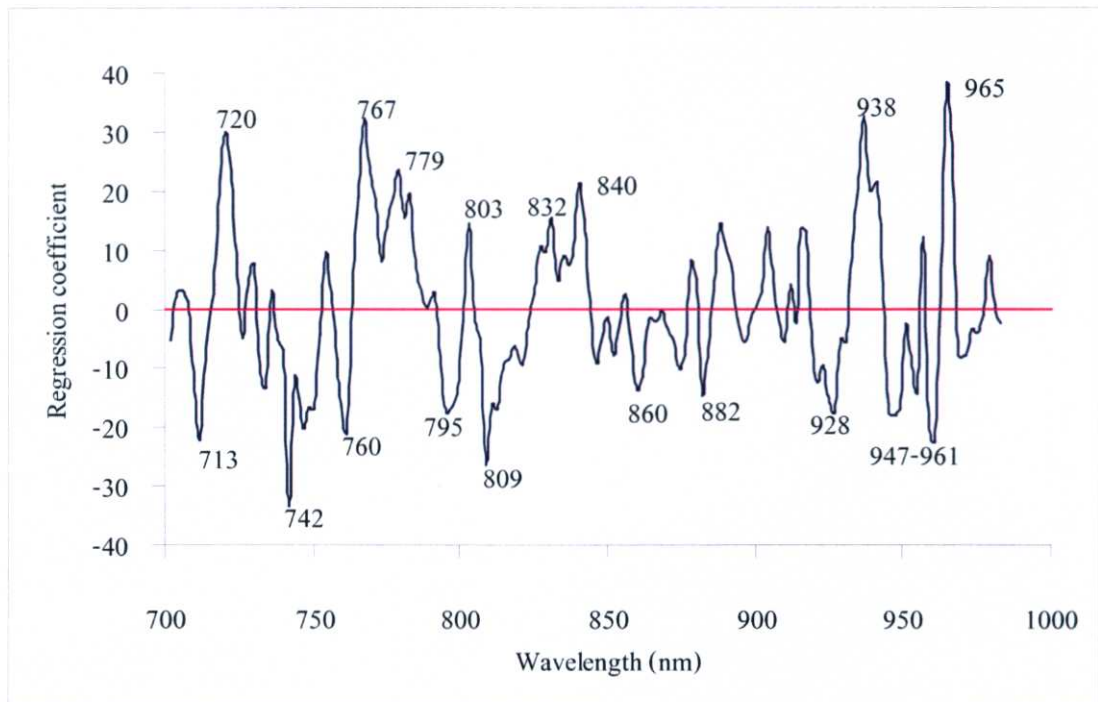


b

ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้กับค่าที่ทำนาย (a) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และ (b) ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้

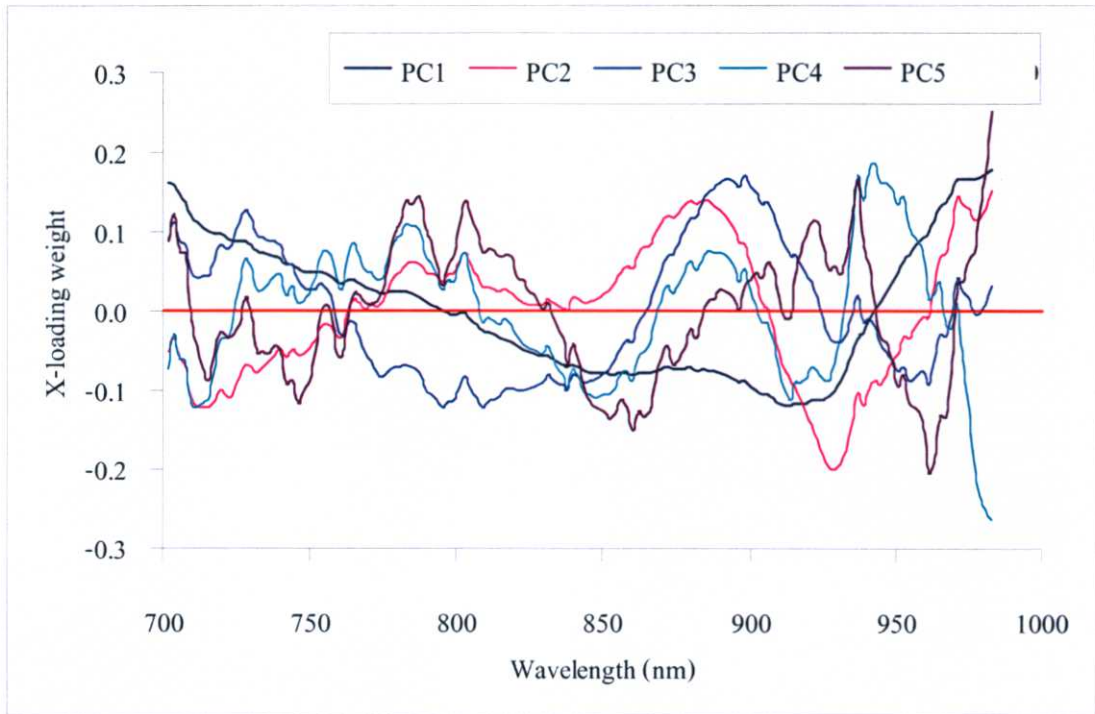


a

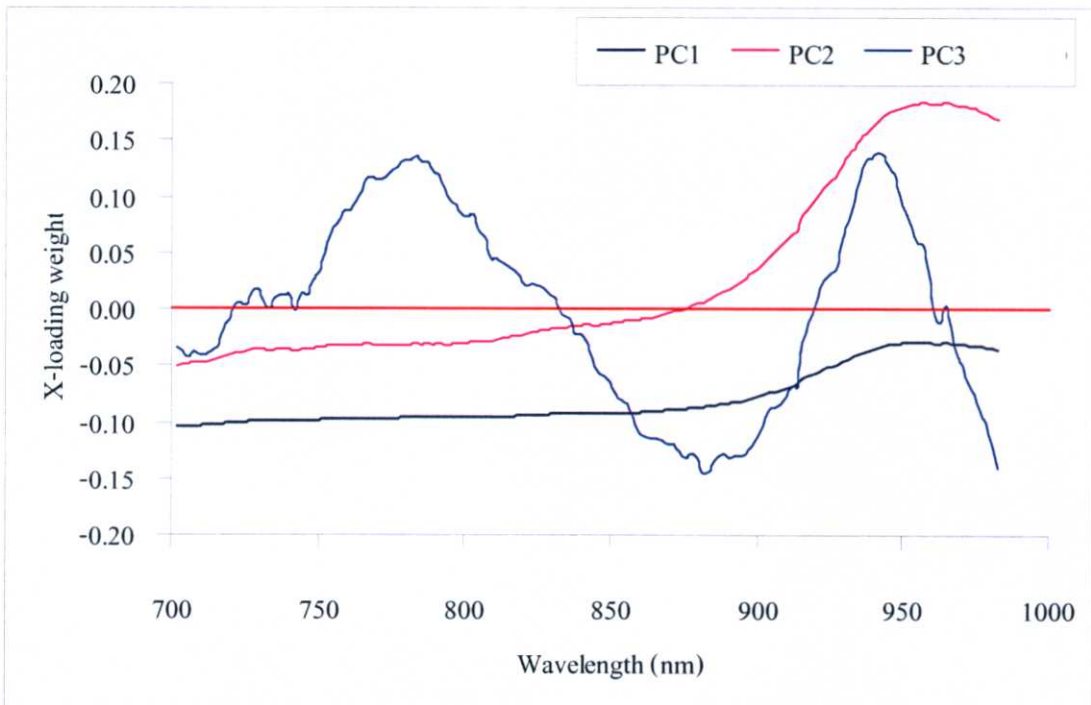


b

ภาพที่ 4.32 ค่า regression coefficient (a) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้
และ (b) ของปริมาณกรดที่ละลายได้



a



b

ภาพที่ 4.33 ค่า X-loading (a) ของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และ (b) ปริมาณกรดที่ไตรเอทิลได้

4.5.3 ผลการสร้างสมการทำนายค่าการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

ผลการสร้างสมการทำนายค่าความสัมพันธ์ ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับ แรงที่แทงทะลุ เนื้อส้มโอ (Max force (N)) แรงที่แทงทะลุเนื้อส้มโอเฉลี่ย (Average force (N/mm)) และความเหนียวของเนื้อส้มโอ (Toughness (N mm)) ของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ด้วยวิธี PLS แสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่า แบบจำลองที่ทำนายค่าแรงที่แทงทะลุเนื้อส้มโอ ถูกพัฒนาแบบจำลองมาจากสเปกตรัมดั้งเดิมมีค่า correlation coefficient ($r=0.30$) สูงสุดในการทดลอง ซึ่ง r มีค่าอยู่ช่วงไม่เกิน ± 0.50 แปลว่าใช้ในการสร้าง calibration ไม่ได้ (Williams, 2007) ส่วนอัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) จากข้อมูลอ้างอิงของชุด prediction ต่อความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard error) ของ prediction (ratio of the SEP to the SD=RPD) และอัตราส่วนของช่วง (Range) ในข้อมูลอ้างอิงจากชุด prediction ต่อความผิดพลาดมาตรฐานของ prediction (ratio of the range to the SEP =RER) ได้ 0.95 และ 3.78 ตามลำดับ ซึ่ง RPD มีค่าอยู่ช่วง 0.0-2.3 แปลว่าแบบจำลอง คัดแยกได้ไม่ดี ส่วนค่า RER มีค่าอยู่ช่วงไม่เกิน 6 แปลว่าแบบจำลองการนำไปใช้ได้ไม่ดี (Williams, 2007) ในเรื่องของค่าแรงที่แทงทะลุเนื้อส้มโอ กระบวนการจัดการสเปกตรัมไม่สามารถทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น

ส่วนการทำนายค่าแรงที่แทงทะลุเนื้อส้มโอเฉลี่ย โดยแบบจำลองถูกพัฒนาจาก Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm ได้ค่า $r=0.30$ สูงสุดในการทดลอง ซึ่ง r มีค่าอยู่ช่วงไม่เกิน ± 0.50 แปลว่าใช้ในการสร้าง calibration ไม่ได้ (Williams, 2007) ส่วนค่า RPD=0.80 และ RER=3.22 มีค่าอยู่ช่วง 0.0-2.3 และ น้อยกว่า 6 ตามลำดับ แปลว่า model คัดแยกได้ไม่ดี และการนำไปใช้ได้ไม่ดี ตามลำดับ (Williams, 2007) ในเรื่องของค่าแรงที่แทงทะลุเนื้อส้มโอเฉลี่ย กระบวนการจัดการสเปกตรัมสามารถทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น

ส่วนการทำนายที่วัดค่าความเหนียวเนื้อส้มโอ โดยแบบจำลองถูกพัฒนาจาก Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm ได้ค่า $r=-0.05$ สูงสุดในการทดลอง ซึ่ง r มีค่าอยู่ช่วงไม่เกิน ± 0.50 แปลว่าใช้ในการสร้าง calibration ไม่ได้ (Williams, 2007) ส่วนค่า RPD=0.81 และ RER=3.13 มีค่าอยู่ช่วง 0.0-2.3 และ น้อยกว่า 6 ตามลำดับ แปลว่า model คัดแยกได้ไม่ดี และการนำไปใช้ได้ไม่ดี ตามลำดับ (Williams, 2007) ในเรื่องของค่าความเหนียวเนื้อส้มโอ กระบวนการจัดการสเปกตรัมสามารถทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น

จะเห็นว่าแบบจำลองที่ใช้ยังไม่สามารถทำนายแรงที่แทงทะลุเนื้อส้มโอ แรงที่แทงทะลุเนื้อส้มโอเฉลี่ย และค่าความเหนียวเนื้อส้มโอได้

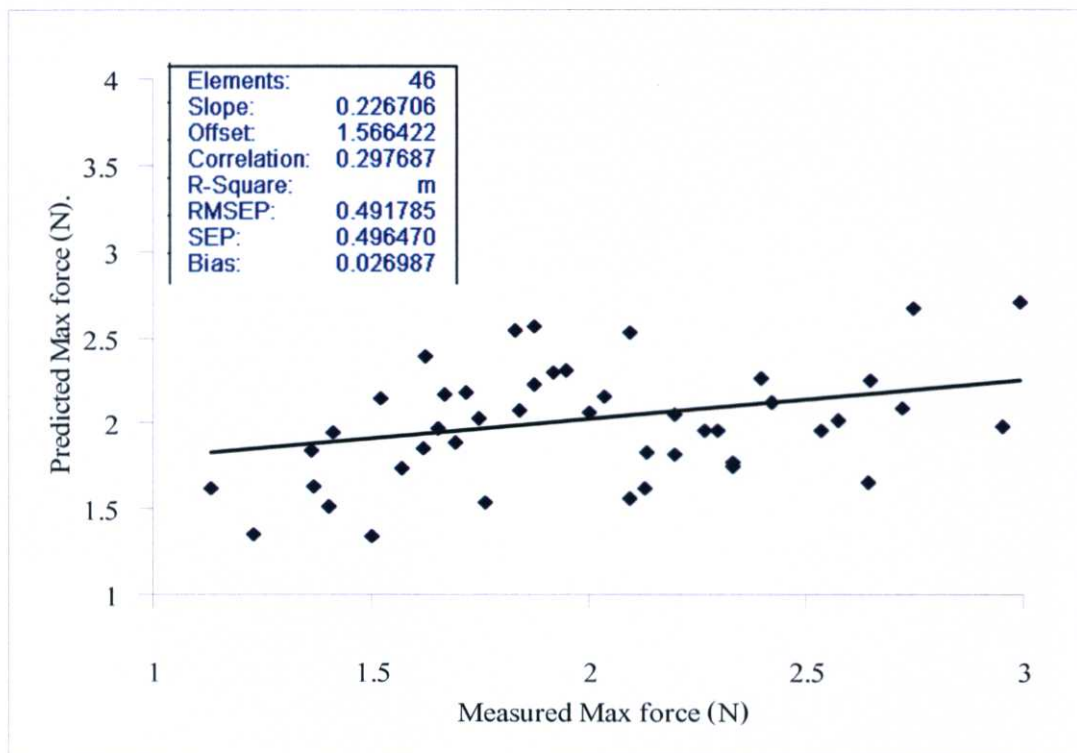
ความสัมพันธ์ ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่วัดจริงของแรงที่แทงทะลุเนื้อส้มโอ แรงที่แทงทะลุเนื้อส้มโอเฉลี่ย และค่าความเหนียวเนื้อส้มโอด้วยวิธี PLS regression โดยถูกพัฒนาแบบจำลองมาจากสเปกตรัมดั้งเดิม แสดงดังภาพที่ 4.34 พบว่า ค่าความสัมพันธ์ค่อนข้างจะจัดกระจายตัวตลอดช่วงของค่าที่ทำนายได้ โดยภาพที่ 4.34 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จาก

การทำนายกับค่าที่วัดจริงของแรงที่แทงทะลุเยื่อหุ้มเนื้อ ค่าความแม่นยำในการทำนาย $r=0.30$ และมีค่าความผิดพลาด (bias) เพียง 0.027 เช่นเดียวกับการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่วัดจริงของค่าแรงที่แทงทะลุเยื่อหุ้มเนื้อเฉลี่ย ค่าความแม่นยำในการทำนายเพียง $r=0.30$ แต่มีค่าความผิดพลาด (bias) 0.665 ดังภาพที่ 4.34 (b) และการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่วัดจริงของค่าความเหนียวเยื่อหุ้มเนื้อ ดังภาพที่ 4.35 (c) ค่าความแม่นยำในการทำนายเพียง $r=-0.05$ แต่มีค่าความผิดพลาด (bias) 0.073 ซึ่งอาจประมาณได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงที่วัดจากเนื้อส้ม ใอมีความสัมพันธ์ไม่ค่อยดีกับค่าแรงที่แทงทะลุเยื่อหุ้มเนื้อ ค่าแรงที่แทงทะลุเยื่อหุ้มเนื้อเฉลี่ย และค่าความเหนียวเยื่อหุ้มเนื้อ

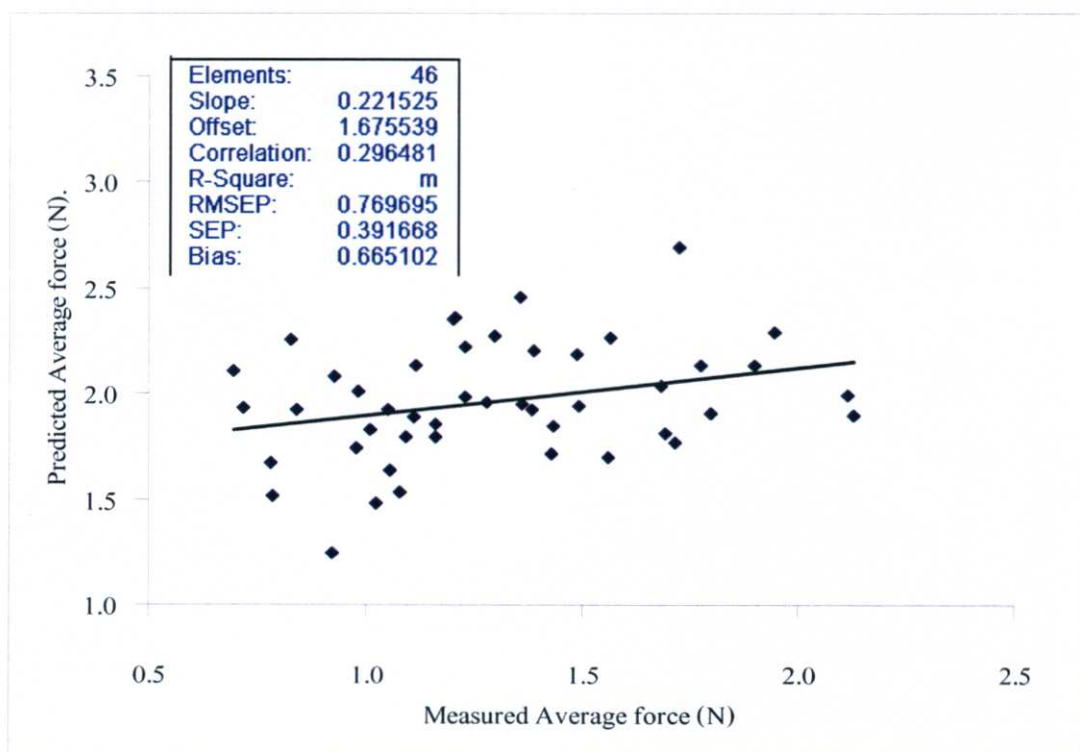
ตารางที่ 4.10 ผลการสร้างสมการและการทำนายค่าแรงที่แทงทะลุเยื่อหุ้มเนื้อ แรงที่แทงทะลุเยื่อหุ้มเนื้อเฉลี่ยและ ความเหนียวเยื่อหุ้มเนื้อ โดยวิธี PLS

Parameter measured	Pretreatment	PCs	Calibration			Prediction			RPD	RER
			r	SEC	Bias	r	SEP	Bias	SD/SEP	(mix-min)/SEP
Max force (N)	Raw spectra	7	0.59	0.40	0.00000647	0.30	0.49	0.027	0.95	3.78
	Multiplicative Scatter Correction (MSC)	9	0.69	0.36	0.00001894	0.18	0.55	-0.031	0.85	3.38
	Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm	6	0.67	0.37	0.00000026	0.22	0.52	-0.013	0.90	3.59
	Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm	8	0.63	0.38	-0.00000048	0.20	0.53	-0.011	0.88	3.52
Average force (N/mm)	Raw spectra	1	0.02	0.40	0.00000002	-0.29	0.37	0.002	0.85	3.26
	Multiplicative Scatter Correction (MSC)	1	0.12	0.40	-0.00000001	-0.04	0.37	0.006	0.84	3.24
	Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm	6	0.64	0.39	0.00000021	0.30	0.39	0.665	0.80	3.08
	Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm	1	0.15	0.40	0.00000006	-0.05	0.37	0.005	0.84	3.22
Toughness (Nmm)	Raw spectra	1	0.02	4.02	0.00000043	-0.24	3.69	-0.073	0.85	3.27
	Multiplicative Scatter Correction (MSC)	1	0.12	3.99	0.00000020	-0.06	3.73	-0.038	0.84	3.24
	Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm	1	0.25	3.90	0.00000062	-0.05	3.86	0.073	0.81	3.13
	Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 20 nm	1	0.15	3.98	0.00000081	-0.08	3.76	-0.043	0.84	3.21

หมายเหตุ : PC = principle component, r=correlation, SEC= Standard error of Calibration, Bias= error, SEP= Standard error of Prediction, RPD= ratio of the SEP to the SD, RER= ratio of the SEP to the range, SD= Standard deviation

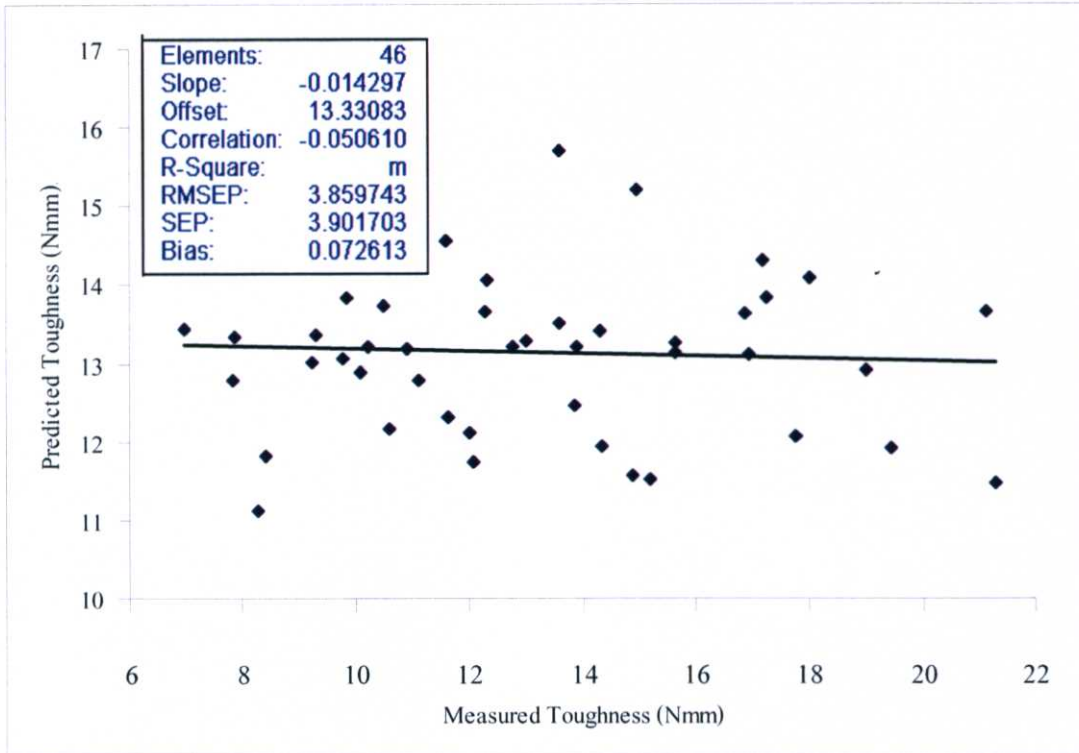


a



b

ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้กับค่าที่ทำนาย (a) แรงที่แทงทะลุเชือกหุ้มเนื้อ และ (b) แรงแทงทะลุเชือกหุ้มเนื้อเฉลี่ย



c

ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้กับค่าที่ทำนาย (c) ความเหนียวของของเยื่อหุ้มเนื้อ

บทที่ 5

สรุปผลและเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการตรวจวัดสมบัติของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

5.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน 5 ระยะ พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต (Geometric mean diameter : GMD) ผลส้มโอมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P > 0.05$ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับน้ำหนัก และปริมาตรของผลส้มโอ แต่ค่าความหนาแน่นของผลส้มโอมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ส่วนการเปลี่ยนแปลงของสีผิวผลส้มโอแสดงค่าสีตามระบบ C.I.E. LAB ผลการทดลองจากค่า L^* ผลส้มโอมีความสว่างเพิ่มขึ้น ค่า a^* เป็นค่าติดลบผลส้มโอมีสีเขียวและเมื่ออายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นจะมีค่าลบน้อยลงแสดงว่ามีสีเขียวจางลง และ b^* มีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นตามอายุการเก็บเกี่ยว แสดงว่ามีสีเหลืองเพิ่มขึ้น

5.1.2 ผลการตรวจวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test

ผลการตรวจวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test โดยค่าความแน่นเนื้อเฉพาะตรงจุดที่ตรวจวัด ค่า Initial firmness และ Average firmness มีแนวโน้มลดลงตลอดอายุการเก็บเกี่ยว ต่างกับค่าระยะทางการยุบของเปลือกเฉพาะตรงจุดที่ตรวจวัดค่า Bioyield distance และ Rupture distance มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดอายุการเก็บเกี่ยว ส่วนค่าแรงที่ใช้ในการกดผลส้มโอเฉพาะตรงจุดที่ตรวจวัดค่า Bioyield force มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดอายุการเก็บเกี่ยว แต่ค่า Strength of membrane มีแนวโน้มลดลงตลอดอายุการเก็บเกี่ยว ในขณะที่ค่า Rupture force, Penetrating force in Albedo และ Penetrating force in flesh มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตลอดอายุการเก็บเกี่ยว ส่วนค่าความเหนียวของเปลือกชั้นนอก เฉพาะตรงจุดที่ตรวจวัดค่า Toughness แนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตลอดอายุการเก็บเกี่ยว ต่างกับค่า Penetrating energy in Albedo มีแนวโน้มค่อยๆลดลงตลอดอายุการเก็บเกี่ยว ในขณะที่ค่า Penetrating energy in flesh มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกหลังจากนั้นก็กลับลดลง

5.1.3 ผลการตรวจวัดเนื้อสัมผัสแบบ Plate Compression test

ผลการตรวจวัดเนื้อสัมผัสแบบ Plate Compression test ความแน่นเนื้อ และการดูดซับพลังงานของผลส้มโอทั้งผล ค่า Initial firmness และ Average firmness มีแนวโน้มค่อยๆลดลงตลอดอายุการเก็บเกี่ยว ต่างกับค่า Energy absorption แนวโน้มค่อยๆเพิ่มขึ้นตลอดอายุการเก็บเกี่ยว ส่วนค่าระดับความยืดหยุ่นและอัตราส่วนการคลายเครียดของผลส้มโอทั้งผล ค่า Degree of elasticity และ Relaxation ratio มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และค่าอัตราส่วนการเปลี่ยนรูปร่างของผลส้มโอทั้งผล ค่า Deformation ratio แนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดอายุการเก็บเกี่ยว

5.1.4 การวิเคราะห์ภาพถ่ายของเปลือกส้มโอ

ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายของเปลือกส้มโอ ค่า Percentage of Area of oil gland มีแนวโน้มพื้นที่ต่อน้ำมันเพิ่มขึ้น และ Density of oil gland มีแนวโน้มจำนวนต่อม้ำมันค่อยๆ ลดลง ส่วนค่า Average area of one oil glands มีแนวโน้มขนาดค่อยๆ เพิ่มขึ้น

5.2 สรุปผลการตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ และชีวเคมีของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

การวัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งตามอายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ แสดงให้เห็นว่ายิ่งอายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นเนื้อส้มโอมีสีเข้มขึ้นออกสีชมพู และมีความแน่นเนื้อเริ่มต้นลดลง เช่นเดียวกับแรงต้านการแทงทะลุกับแรงต้านทานเฉลี่ยลดลง สอดคล้องกับพลังงานที่ใช้ในการตัดเนื้อส้มโอให้ขาดที่มีค่าลดลงเช่นกัน แสดงว่าเนื้อส้มโอนิ่มขึ้น และความเหนียวลดลง แต่เนื้อบริเวณขั้วผลเริ่มแข็งเมื่ออายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น ส่วนค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีค่าลดลงในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 200 และ 210 วัน อาจเกิดจากเป็นช่วงที่มีฝนตกชุก โดยจากการลองชิมปรากฏเนื้อส้มโอมีรสชาติจืดกว่าช่วงแรก แต่ค่าเพิ่มขึ้นหลังฝนทิ้งช่วงในอายุการเก็บเกี่ยวที่ 220 วัน ทำให้ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณกรดมีค่าลดลงตามอายุการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น

5.3 สรุปผลการวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม

4.3.1. ลักษณะ spectrum ของผิวผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

จากการสังเกตสเปกตรัมดั้งเดิมที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของผิวผลส้มโอมีลักษณะของสเปกตรัมทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว มีความยาวคลื่นที่มีการดูดซับคลื่นมากที่สุดที่ 970 nm โดยการสร้างสมการ Calibration จำเป็นต้องใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้ Savitzky-Golay second differentiation ที่มี derivative segment 10 และ 20 nm ทำให้ปรากฏพีคต่างๆ มากขึ้น ซึ่งมีการขยับตำแหน่งความยาวคลื่นที่มีการดูดซับคลื่นมากเป็น 965 และ 960 nm ตามลำดับ

4.3.2 ลักษณะสเปกตรัม ตรีของเนื้อผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

ในการทดลองได้นำเฉพาะเนื้อส้มโอ โดยทำการศึกษาค่าการดูดกลืนแสง 2 แบบ คือ การตรวจวัดเนื้อส้มโอที่มีฟิล์มผนังอาหารห่อหุ้ม และการตรวจวัดที่เนื้อส้มโอโดยตรง โดยจากการสังเกตสเปกตรัมดั้งเดิมที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของเนื้อส้มโอที่มีฟิล์มผนังอาหารห่อหุ้ม มีลักษณะเหมือนกับการตรวจวัดที่เนื้อส้มโอโดยตรง และลักษณะของสเปกตรัมดั้งเดิมทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยวมีแนวโน้มที่เหมือนกัน โดยช่วงคลื่นที่มีการดูดซับคลื่นมากที่สุดได้แก่ 680 และ 970 นาโนเมตร โดยในการทำ Savitzky-Golay second differentiation มี derivative segment 10 และ 20 nm พบว่าปรากฏพีคต่างๆ เพิ่มขึ้น พบช่วงคลื่นที่มีการดูดซับคลื่นมากที่สุดได้แก่ 652 738 832 956 และ 990 nm

5.4 สรุปผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอพันธุ์ขนาน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัม

จากผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอขนาน้ำผึ้ง พบว่าในการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวด้วยสเปกตรัมผิวเปลือกส้มโอที่ความยาวคลื่น 633-961 นาโนเมตร ให้ผลดีกว่าช่วง 400-700 นาโนเมตร และควรใช้แบบจำลองทุกอายุการเก็บเกี่ยวในการคัดแยกกลุ่มเดียวกับแบบจำลอง โดยการใช้การคัดแยกด้วยวิธี SIMCA ในการคัดแยกกลุ่มเดียวกัน ร่วมกับวิธี PLS-DA ในการคัดแยกต่างกลุ่มกัน ซึ่งสอดคล้องกับการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวเนื้อส้มโอขนาน้ำผึ้งด้วยสเปกตรัมเนื้อส้มโอในช่วง 633-961 นาโนเมตร

5.5 สรุปผลการสร้างสมการทำนายค่าการเปลี่ยนแปลงตามอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอพันธุ์ขนาน้ำผึ้ง

การสร้างสมการทำนายค่าความสัมพันธ์ด้วย Partial least square (PLS) ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงย่าน NIR ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 633-961 นาโนเมตร ของผิวผล และเนื้อส้มโอพันธุ์ขนาน้ำผึ้ง กับค่าสมบัติทางกายภาพและชีวเคมีวัดผล และเนื้อส้มโอพันธุ์ขนาน้ำผึ้งในห้องปฏิบัติการ ทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว โดยใช้สเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) และสเปกตรัมที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น 2 วิธี ได้แก่ 1) Multiplicative Scatter Correction (MSC) และ 2) Savitzky-Golay second differentiation ที่มี 2 derivative segment คือ 10 และ 20 nm

5.5.1 ผลการสร้างสมการทำนายค่าการเปลี่ยนแปลงของผิวผลส้มโอพันธุ์ขนาน้ำผึ้ง

ผลการสร้างสมการทำนายค่าความสัมพันธ์ ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับค่าความหนาแน่นของต่อมน้ำมัน โดยถูกพัฒนาแบบจำลองมาจากสเปกตรัมดั้งเดิมมีค่า correlation coefficient ($r=0.70$) สูงสุด ส่วนค่า RPD และ ค่า RER ได้ 1.35 และ 4.86 ตามลำดับ ส่วนกับค่าพื้นผิวของต่อมน้ำมัน โดยแบบจำลอง ถูกพัฒนาจากสเปกตรัมดั้งเดิมได้ค่า $r=0.56$ สูงสุดในการทดลอง ส่วนค่า RPD และ RER ได้ 1.17 และ 4.79 ตามลำดับ แสดงว่ากระบวนการจัดการสเปกตรัมทำให้แบบจำลองแม่นยำมากขึ้น โดยสรุปว่าวิธีการทำนายที่ใช้ยังไม่สามารถทำนายได้แม่นยำ

5.5.2 ผลการสร้างสมการทำนายค่าการเปลี่ยนแปลงของเนื้อส้มโอพันธุ์ขนาน้ำผึ้ง

ผลการสร้างสมการทำนายค่าความสัมพันธ์ ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับ ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ โดยถูกพัฒนาแบบจำลองมาจาก Multiplicative Scatter Correction (MSC) มีค่า correlation coefficient ($r=0.87$) สูงสุด ส่วนค่า RPD และ ค่า RER ได้ 2.08 และ 8.10 ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการจัดการสเปกตรัมสามารถทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น ส่วนกับค่าปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ โดยแบบจำลองถูกพัฒนาจากสเปกตรัมดั้งเดิมได้ค่า $r=0.57$ สูงสุดในการทดลอง ส่วนค่า RPD และ ค่า RER ได้ 1.14 และ 4.75 ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการจัดการสเปกตรัมดั้งเดิมไม่สามารถทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น โดยสรุปว่าวิธีการทำนายที่ใช้

ยังไม่สามารถทำนายได้แม่นยำ ซึ่งใช้ประมาณค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ได้ แต่ยังไม่สามารถใช้ทำนายปริมาณกรดที่ไตรเออร์ทได้

5.5.3 ผลการสร้างสมการทำนายค่าการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

ผลการสร้างสมการทำนายค่าความสัมพันธ์ ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับ ค่าแรงที่แทงทะลุเยื่อหุ้มเนื้อ โดยถูกพัฒนาแบบจำลองมาจากสเปกตรัมดั้งเดิมมีค่า correlation coefficient ($r=0.30$) สูงสุด และค่า RPD และ ค่า RER ได้ 0.95 และ 3.78 ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการจัดการสเปกตรัมไม่สามารถทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น ส่วนค่ากับความแน่นอนเนื้อเฉลี่ย โดยแบบจำลองถูกพัฒนาจาก Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm ได้ค่า $r=0.30$ สูงสุด และค่า RPD และ ค่า RER ได้ 0.80 และ 3.22 ตามลำดับ และค่าความเหนียวของเปลือกชั้นนอก โดยแบบจำลองถูกพัฒนาจาก Savitzky-Golay second differentiation ที่ derivative segment 10 nm ได้ค่า $r=-0.05$ สูงสุด และค่า RPD และ ค่า RER ได้ 0.81 และ 3.13 ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการจัดการสเปกตรัมทำให้แบบจำลองแม่นยำมากขึ้น โดยสรุปว่าวิธีการทำนายที่ใช้ไม่สามารถทำนายได้ แสดงมีความสัมพันธ์กันน้อยมาก

5.6 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัย

- 1.การผูกปายซื้อวันคอกบานเพื่อสำหรับนั้บอายุการเก็บเกี่ยวส้ม โอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งควรผูกจำนวนมากๆ เพราะอัตราการร่วงหล่นของผลอ่อนมีสูงมาก
- 2.การนำโมเดลไปประยุกต์ใช้ในการคัดแยกควรทำการศึกษาซ้ำในฤดูกาลถัดไปเพื่อให้ผลการทดลองครอบคลุม และอาจทำให้ความแม่นยำในการทดสอบสูงขึ้น
- 3.การนำโมเดลเพื่อทำนายค่าควรหาวิธีการจัดการสเปกตรัมอื่นๆ ที่อาจทำให้ค่าความแม่นยำของโมเดลสูงขึ้น
- 4.การศึกษาคั้งนี้มีข้อจำกัดหลายด้าน ทำให้บางสิ่งยังหาแนวทางของคำตอบไม่ได้มาก ซึ่งควรมีการศึกษาให้ได้แนวทางของคำตอบต่อไป
- 5.การนำเทคโนโลยี NIR ไปประยุกต์ใช้งานนั้นมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องค่อนข้างมาก ควรมีการศึกษาหลักการให้เข้าใจเสียก่อนจะช่วยในการใช้งานสะดวกมากขึ้น

บรรณานุกรม

กรมศุลกากร. 2549. สถิติการนำเข้าส่งออก. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :

<http://www.customs.go.th/Staistic/StatisticIndex.jsp>.

“.....”. 2552. สถิติการนำเข้าส่งออก. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :

<http://www.customs.go.th/Staistic/StatisticResult2550.jsp?Page=1&statype=export&moth=12&year=2008&productcodecheck=y&productcode=08054000001&countrycheck=null&country>.

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2549. สถานการณ์ส้มโอ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :

<http://www.doae.go.th/plant/orange.html>.

กัลปพฤกษ์ ลีละวัฒน์. 2534. “การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของผลส้มโอ 7 พันธุ์.” ปัญหาพิเศษปริญญาโท สาขาวิชาพืชสวน บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คมจันทร์ สรวงจันทร์. 2548. “ความเข้มข้นของธาตุอาหารในส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งระหว่างการพัฒนาของผล และผลของการใส่ปุ๋ยที่ระยะก่อนการเก็บเกี่ยวต่อคุณภาพผล.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพืชสวน บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จริงแท้ สิริพานิช และคณะ. 2543 การจัดการหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ พิมพ์ครั้งที่ 1 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ.

จริงแท้ สิริพานิช. 2541. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ พิมพ์ครั้งที่ 2 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชวนพิศ อรุณรังสีกุล. 2549. มาตรฐานผักผลไม้และอาหารที่ตลาดต้องการ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.clgc.rid.ku.ac.th/article/seed/foodstd.html>.

ตลาดไท. 2549. ไม้ผลเศรษฐกิจ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :

<http://www.talaadthai.com/web/resource/detail.asp>.

ทิพวรรณ ลิ้มงูร. 2546. รวบทบทความคุณภาพและมาตรฐานทางการเกษตร.

กรุงเทพฯ: คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- ธงชัย สุวรรณสิขณน์. 2545. การวิเคราะห์สเปกตรัม NIR ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ. การอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. หน้า 99-129.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุกาญจน์. 2545. หลักพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้สเปกโตรสโกปี. การอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. หน้า 39-61.
- นพดล อรุณยะเดช. 2545 “การวิเคราะห์ความแก่ของผลส้มคอกพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บัณฑิต จริโมภาส. 2546. สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. หน้า 126-153.
- มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช. 2549. ส้มโอ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.nstrc.rmutsv.ac.th/Oncampus_source/herbal/v2.html.
- รวี เสฐฐักดิ์. 2523. เอกสารประกอบคำบรรยายวิชาไม้ผลอุตสาหกรรม2. ภาควิชาพืชสวน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- รักบ้านเกิด. 2549. การปลูกส้มโอ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.rakbankerd.com/agriculture/in_agricultural.html.
- วิทยา บัวเจริญ. 2546. “คุณภาพไม้ผลของประเทศไทย.” หน้า 31-35. ใน รวบรวมบทความคุณภาพและมาตรฐานทางการเกษตร. กรุงเทพฯ : คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วิชัย ธีวระกุล และคณะ. 2527. การประยุกต์สเปกโตรสโกปีในเคมีอินทรีย์. กรุงเทพฯ. 298 หน้า.
- วลัยพร เตียประสิทธิ์. 2548. “การทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณกรดทั้งหมดของชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์ เพชรสามพราน และทุลเกล้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy”. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ม.ป.น.. 2549. ส้มโอ. พันธุ์ส้มโอที่ปลูกในประเทศไทย. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :
<http://www.geocities.com/psplant/pomo>.

อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. 2545. การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์. การอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. หน้า 67-86.

อาทิตย์ พวงสมบัติ. 2549. “การตรวจสอบคุณภาพภายในผลแก้วมังกรด้วยเทคนิค Near Infrared spectroscopy.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Abbott, J. A., Lu, R., Upchurch, B. L., & Strohshine, R.L. 1997. Technologies for non-destructive quality evaluation of fruits and vegetables. In Horticultural reviews — Technologies for nondestructive quality evaluation of fruits and vegetables, 20, 1–120. John Wiley & Sons, Inc.

Birth, G.S. 1976. How light interacts with foods. ASAE Publication 1-76, Quality Detection in Foods, pp. 6-11, St.. Jaseph, Michigan.

Birth, G.S. 1975. Electromagnetic radiation:optical. Chapter 9. In:Instrumentation and Measurement of Environmental Science, (Z.A. Henry, ed.), ASAE Special publication No. SP0375, St. Jaseph, Michigan.

Boysworth, M. K. and K. S. Booksh. 2001. Aspect of multivariate calibration applied to near infrared spectroscopy. IN D. A. Burns and E. W. Ciurczak, eds. Handbook of Near Infrared Analysis. Marcel Dekker. Inc, New York.

Chauchard, F., Cogdill, R., Roussel, S., Roger, J. M., & Bellon-Maurel, V. 2004. Application of LS-SVM to non-linear phenomena in NIR spectroscopy: development of a robust and portable sensor for acidity prediction in grapes. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 71, 141-150.

ElMasry, G., Wang, N., ElSayed, A., & Ngadi, M. 2007. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry. Journal of Food Engineering, 81, 98-107.

Hruschka, R. W. 1987. Data analysis : Wavelength selection methods. In P. Williams and K. Norris, eds. Near Infrared Technology in the agricultural and food industries. American Association of Cereal Chemists, Inc.

- J. Y. Chen, C. Iyo, F. Terada and S. Kawano. 2002. Effect of multiplicative scatter correction on wavelength selection for near infrared calibration to determine fat content in raw milk *J. Near Infrared Spectrosc.* 10, pp. 301-307.
- Kasemsamran, S. 2005. Nondestructive Quantitative Analysis of biomedical Samples by Near Infrared Spectroscopy with Chemometrics and Development of novel Chemometric Methods for quantitative Analysis. Ph. D. Thesis. Kwansai Gakuin University, Japan.
- Mc Glone, V.A. and S. Kawano. 1998. Firmness, dry-matter and soluble solids assessment of postharvest Kiwifruit by NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology* 13 : 131-141.
- Miller and Zude-Sasse. 2004. NIR-Based sensing to Measure Soluble Solids Content of Florida Citrus. *Applied Engineering in Agriculture.* (20). pp.321-327.
- N. Khuriyati, T. Matsuoka and S. Kawano. 2004. Precise near infrared spectral acquisition of intact tomatoes in interactance mode *J. Near Infrared Spectrosc.* 12, pp. 391-395.
- Ornella Preisner, João A. Lopes José C. Menezes. 2008. Uncertainty assessment in FT-IR spectroscopy based bacteria classification models. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 94 (2008) 33–42.
- Osborne, B. G, and T. Fearn. 1986. *Near Infrared Spectroscopy in Food Analysis.* Longmont science & Technology. U.S.A. pp. 200.
- Osborne, B. G, T. Fearn. and P. H. Hindle. 1993. *Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis.* Longmont science & Technology. U.S.A. pp. 227.
- Pearson, D. 1971. *The Chemical Analysis of Food.* Chemical Publishing. New York.
- S. Kawano, M. Iwamoto, and H. Watanabe. 1992. Determination of Sugar Content in Intact Peaches by Near Infrared Spectroscopy with Fiber Optics in Interactance Mode. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 61(2) : 445-451.
- S. Saranwong, J. Sornsrivichi and S. Kawano. 2003. On-tree evaluation of harvesting quality of mango fruit using a hand-held NIR instrument. *J. Near Infrared Spectrosc.* 11, pp. 283-293.

- Sohn, M. R., W. C. Park and R. K. Cho. 2000. Near infrared spectroscopy for noninvasive measuring to internal quality of apple fruit. *Near Infrared Analysis 1* (1) : 27-30.
- T. Tajaddin, S. Watanabe, R. Masuda, K. Harada and S. Kawano. 2002. Application of near infrared transmittance spectroscopy to the estimation of protein and lipid contents in single seeds of soybean recombinant inbred lines for quantitative trait loci analysis. *J. Near Infrared Spectrosc.* 10, pp. 315-325.
- Williams, P. "Near-infrared Technology – Getting the best out of light". Edition 5.0. A short course in the practical implementation of near-infrared spectroscopy for the user. PDK Grain, Nanaimo, Canada. 2007.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การตรวจวัดสมบัติของผลส้มโอพันธุ์ขนาน้ำผึ้ง

ตารางที่ ก.1 ผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงเรขาคณิตของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงเรขาคณิต (เซนติเมตร)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	17.098	17.694	17.599	17.704	18.132
2	16.850	17.741	16.747	18.551	16.343
3	16.014	17.599	17.480	17.394	19.369
4	17.654	18.536	17.965	18.020	18.317
5	16.947	17.780	17.128	17.570	20.070
6	16.104	17.911	17.451	18.617	18.855
7	16.038	17.836	18.013	18.147	19.033
8	16.430	16.808	16.819	18.175	18.737
9	16.252	17.237	17.710	17.296	17.791
10	18.096	17.492	18.278	17.383	18.041
11	16.938	18.232	17.930	18.522	19.387
12	15.596	18.816	17.817	17.704	18.265
13	16.589	16.673	17.606	17.699	18.077
14	15.879	16.942	17.188	18.354	17.550
15	16.426	16.750	18.708	20.343	17.449
16	16.430	16.208	18.003	17.722	18.206
17	15.683	18.972	17.166	17.217	19.742
18	17.970	17.474	17.387	19.016	17.712
19	18.011	18.009	18.464	16.866	17.790
20	17.459	16.226	17.372	16.814	18.972
21	16.452	16.693	n	n	n
22	15.826	17.474	n	n	n
23	17.341	n	n	n	n
24	15.814	n	n	n	n
25	16.345	n	n	n	n
26	16.340	n	n	n	n
27	17.089	n	n	n	n
28	17.778	n	n	n	n
29	17.143	n	n	n	n
30	17.260	n	n	n	n
Average	16.728	17.505	17.641	17.956	18.392
Max	18.096	18.972	18.708	20.343	20.070
Min	15.596	16.208	16.747	16.814	16.343
SD	0.737	0.765	0.517	0.817	0.888

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.2 ผลการวัดน้ำหนักของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	น้ำหนักผลส้มโอ (กรัม)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	1668.54	1976.70	2020.80	1714.94	2300.07
2	1590.45	1907.57	1833.96	2324.39	1775.73
3	1298.23	2026.56	2029.51	1987.97	2552.51
4	1903.40	2351.16	1935.16	2147.98	2087.48
5	1935.47	1970.93	1808.54	1808.20	2667.52
6	1517.11	1960.85	1938.84	2181.53	2176.34
7	1346.62	1860.09	2247.21	2321.86	2402.91
8	1593.63	1752.56	1792.56	2237.19	2292.55
9	1605.29	1884.84	2194.53	1958.43	2074.77
10	2029.59	2035.44	2298.86	1989.04	2286.99
11	1679.32	2022.88	1963.13	2299.55	2461.37
12	1412.89	2444.76	2095.66	2079.86	2137.65
13	1643.73	1778.13	2093.84	1975.42	2161.08
14	1487.50	1714.09	1841.19	2354.58	1801.15
15	1556.19	1731.77	2307.68	2764.75	2079.28
16	1442.83	1701.58	2039.02	2251.80	2366.48
17	1464.93	2297.84	1782.45	1803.90	2525.87
18	1955.32	1945.00	1808.15	2388.22	2339.05
19	2246.60	2107.36	2211.38	1683.42	2118.46
20	1940.24	1548.39	2001.84	1911.70	2569.68
21	1676.76	2039.47	n	n	n
22	1524.74	1942.46	n	n	n
23	1750.17	n	n	n	n
24	1535.69	n	n	n	n
25	1656.65	n	n	n	n
26	1461.95	n	n	n	n
27	1666.95	n	n	n	n
28	1793.12	n	n	n	n
29	1691.24	n	n	n	n
30	1803.07	n	n	n	n
Average	1662.61	1954.57	2012.22	2109.24	2258.85
Max	2246.60	2444.76	2307.68	2764.75	2667.52
Min	1298.23	1548.39	1782.45	1683.42	1775.73
SD	215.86	216.88	173.41	268.45	239.93

หมายเหตุ : n คือ ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.3 ผลการวัดปริมาณของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ปริมาณผลส้มโอ (cm ³)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	2750.00	3100.00	3070.00	2870.00	3360.00
2	2640.00	3010.00	2410.00	3490.00	2410.00
3	2250.00	2920.00	2780.00	2870.00	3940.00
4	3030.00	3560.00	2930.00	3180.00	3090.00
5	2650.00	2850.00	2620.00	2790.00	4280.00
6	2360.00	3110.00	2770.00	3500.00	3510.00
7	2250.00	2980.00	3040.00	3240.00	3720.00
8	2430.00	2580.00	2410.00	3220.00	3500.00
9	2330.00	2720.00	2970.00	2840.00	3280.00
10	3170.00	2980.00	3150.00	2800.00	3270.00
11	2650.00	3270.00	3090.00	3490.00	3900.00
12	2050.00	3620.00	3180.00	2900.00	3250.00
13	2420.00	2610.00	2950.00	3060.00	3130.00
14	2270.00	2710.00	2740.00	3390.00	2940.00
15	2430.00	2630.00	3570.00	4410.00	2930.00
16	2450.00	2340.00	2970.00	3070.00	3320.00
17	2170.00	3680.00	2570.00	2760.00	4030.00
18	3030.00	2870.00	2760.00	3700.00	3040.00
19	3200.00	3210.00	3440.00	2370.00	2980.00
20	2880.00	3320.00	2830.00	2710.00	3940.00
21	2410.00	2610.00	n	n	n
22	2180.00	2590.00	n	n	n
23	2780.00	n	n	n	n
24	2160.00	n	n	n	n
25	2450.00	n	n	n	n
26	2340.00	n	n	n	n
27	2670.00	n	n	n	n
28	2880.00	n	n	n	n
29	2680.00	n	n	n	n
30	2740.00	n	n	n	n
Average	2556.67	2966.82	2912.50	3133.00	3391.00
Max	3200.00	3680.00	3570.00	4410.00	4280.00
Min	2050.00	2340.00	2410.00	2370.00	2410.00
SD	312.29	365.67	301.31	449.89	463.21

หมายเหตุ : n คือ ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.4 ผลการวัดความหนาแน่นของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ความหนาแน่นผลส้มโอ (kg/cm ³)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	0.61	0.64	0.66	0.60	0.68
2	0.60	0.63	0.76	0.67	0.74
3	0.58	0.69	0.73	0.69	0.65
4	0.63	0.66	0.66	0.68	0.68
5	0.73	0.69	0.69	0.65	0.62
6	0.64	0.63	0.70	0.62	0.62
7	0.60	0.62	0.74	0.72	0.65
8	0.66	0.68	0.74	0.69	0.66
9	0.69	0.69	0.74	0.69	0.63
10	0.64	0.68	0.73	0.71	0.70
11	0.63	0.62	0.64	0.66	0.63
12	0.69	0.68	0.66	0.72	0.66
13	0.68	0.68	0.71	0.65	0.69
14	0.66	0.63	0.67	0.69	0.61
15	0.64	0.66	0.65	0.63	0.71
16	0.59	0.73	0.69	0.73	0.71
17	0.68	0.62	0.69	0.65	0.63
18	0.65	0.68	0.66	0.65	0.77
19	0.70	0.66	0.64	0.71	0.71
20	0.67	0.47	0.71	0.71	0.65
21	0.70	0.78	n	n	n
22	0.70	0.75	n	n	n
23	0.63	n	n	n	n
24	0.71	n	n	n	n
25	0.68	n	n	n	n
26	0.62	n	n	n	n
27	0.62	n	n	n	n
28	0.62	n	n	n	n
29	0.63	n	n	n	n
30	0.66	n	n	n	n
Average	0.65	0.66	0.69	0.68	0.67
Max	0.73	0.78	0.76	0.73	0.77
Min	0.58	0.47	0.64	0.60	0.61
SD	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.5 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Initial firmness ของผลส้มโอพันธุ์ขาว
น้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Initial firmness (N/mm)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	10.54	10.66	47.32	8.93	6.15
2	7.06	7.15	34.02	8.15	6.44
3	6.90	10.96	51.45	8.96	7.16
4	57.96	38.25	31.53	8.10	7.45
5	9.62	6.97	43.82	7.33	81.67
6	48.37	9.78	32.29	9.06	89.94
7	56.45	7.22	39.78	7.56	10.09
8	10.00	10.11	40.33	10.11	8.79
9	9.17	9.87	44.88	5.95	5.89
10	7.07	9.46	44.27	7.63	104.93
11	5.43	43.60	38.58	9.92	6.88
12	6.80	8.60	45.25	9.77	6.18
13	9.62	8.93	48.20	9.30	116.80
14	9.02	8.46	54.13	6.51	9.08
15	8.09	7.59	56.95	6.71	9.99
16	7.17	35.88	44.02	6.62	7.29
17	6.38	8.92	52.46	9.09	112.18
18	8.11	11.06	43.92	8.57	70.41
19	8.75	7.41	49.93	9.07	8.86
20	6.73	8.58	39.68	7.56	n
21	6.72	8.76	n	n	n
22	7.47	9.02	n	n	n
23	9.53	n	n	n	n
24	7.55	n	n	n	n
Average	13.77	13.05	44.14	8.24	35.58
Max	57.96	43.60	56.95	10.11	116.80
Min	5.43	6.97	31.53	5.95	5.89
SD	15.76	10.79	7.01	1.22	43.26

หมายเหตุ : n คือ ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.6 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Average firmness ของผลส้มโอพันธุ์
 ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Average firmness (N/mm)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	5.11	5.01	4.63	4.08	3.40
2	4.74	4.75	4.95	4.51	4.14
3	4.64	5.08	5.03	4.99	5.19
4	31.34	24.01	5.15	4.74	4.45
5	5.36	4.70	4.45	3.63	562.70
6	27.80	4.57	4.64	4.31	460.78
7	24.53	4.69	4.47	5.15	4.90
8	6.34	5.35	4.53	5.00	4.63
9	5.57	4.55	5.35	4.61	3.91
10	5.00	4.97	4.91	4.92	333.99
11	4.29	24.90	4.43	4.68	4.00
12	4.86	4.67	4.53	5.13	4.49
13	5.20	4.45	5.24	4.19	580.03
14	5.37	5.08	5.96	4.77	4.14
15	4.70	4.41	5.87	4.04	4.87
16	5.09	25.73	4.48	5.30	4.68
17	4.94	4.87	5.92	4.37	519.56
18	5.56	5.20	4.32	4.71	405.15
19	5.11	4.61	4.77	4.65	4.51
20	5.09	5.12	4.55	4.42	n
21	4.65	4.86	n	n	n
22	5.30	4.57	n	n	n
23	4.97	n	n	n	n
24	4.92	n	n	n	n
Average	7.93	7.55	4.91	4.61	153.66
Max	31.34	25.73	5.96	5.30	580.03
Min	4.29	4.41	4.32	3.63	3.40
SD	7.78	7.06	0.52	0.43	231.26

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.7 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Bioyield distance ของผลส้มโอพันธุ์
ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Bioyield distance (mm)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	2.39	4.75	3.80	2.69	2.91
2	1.71	4.67	4.41	2.75	5.22
3	3.01	2.81	2.16	2.16	2.25
4	1.91	3.42	2.34	2.69	4.86
5	1.64	4.45	4.46	6.74	7.40
6	0.70	2.50	2.57	2.84	5.70
7	1.53	3.13	2.71	2.13	2.67
8	1.07	2.79	2.26	2.37	3.20
9	3.87	3.02	4.14	4.60	3.75
10	1.62	2.65	5.27	1.79	4.32
11	3.81	2.97	2.86	1.53	2.85
12	4.40	3.68	2.97	2.41	3.26
13	2.72	2.97	5.47	4.68	6.09
14	1.32	2.52	2.11	2.10	2.98
15	2.96	2.16	3.45	2.40	2.80
16	1.19	3.03	5.70	3.71	2.27
17	1.02	2.78	3.33	3.34	6.20
18	2.31	3.09	4.12	2.47	5.14
19	1.59	2.44	2.21	4.23	2.89
20	2.60	4.39	3.59	2.63	n
21	3.54	2.59	n	n	n
22	1.10	1.55	n	n	n
23	1.95	n	n	n	n
24	2.20	n	n	n	n
Average	2.17	3.11	3.50	3.01	4.04
Max	4.40	4.75	5.70	6.74	7.40
Min	0.70	1.55	2.11	1.53	2.25
SD	1.01	0.83	1.15	1.24	1.54

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.8 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Rupture distance ของผลส้มโอพันธุ์
ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Rupture distance (mm)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	5.33	5.87	6.07	6.06	6.69
2	5.07	6.19	4.86	5.39	6.71
3	5.39	5.43	5.52	5.06	5.80
4	4.76	5.04	5.59	5.89	6.14
5	5.22	5.44	5.20	7.11	25.99
6	6.27	5.59	6.05	6.25	27.87
7	5.51	6.95	5.63	6.42	6.65
8	5.26	5.30	5.49	5.37	5.39
9	5.25	5.91	4.57	6.06	6.62
10	5.05	5.77	5.59	5.80	24.93
11	5.07	5.07	5.25	5.60	6.30
12	5.61	6.22	5.82	5.41	6.25
13	4.74	6.85	6.21	6.03	32.32
14	4.60	5.27	4.75	5.76	5.25
15	5.36	6.80	5.30	6.51	6.23
16	4.82	5.70	6.08	5.56	6.20
17	6.05	5.49	5.76	5.65	27.59
18	5.42	5.58	6.63	6.62	26.56
19	5.32	6.16	5.98	6.20	6.31
20	4.72	6.16	5.78	6.43	n
21	5.48	6.28	n	n	n
22	4.91	6.43	n	n	n
23	6.31	n	n	n	n
24	5.74	n	n	n	n
Average	5.30	5.89	5.61	5.96	12.94
Max	6.31	6.95	6.63	7.11	32.32
Min	4.60	5.04	4.57	5.06	5.25
SD	0.46	0.56	0.52	0.51	10.29

หมายเหตุ : n คือ ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.9 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Bioyield force ของผลส้มโอพันธุ์ขาว
น้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Bioyield force (N)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	15.81	25.77	19.89	14.16	12.09
2	11.07	23.31	23.43	15.46	22.97
3	15.98	16.22	13.66	13.32	12.91
4	15.83	17.59	14.27	15.28	23.32
5	12.14	22.83	20.95	26.02	3.78
6	6.05	14.18	13.00	15.18	3.07
7	11.66	15.18	14.84	11.91	16.56
8	10.61	16.92	11.81	13.99	17.39
9	23.52	16.42	23.94	21.50	16.71
10	10.49	14.96	27.35	10.73	3.35
11	18.31	16.20	14.47	10.75	13.29
12	22.90	19.09	16.28	14.86	15.85
13	17.27	16.49	30.47	21.73	3.96
14	10.48	14.50	15.34	10.56	15.85
15	16.42	10.64	23.46	13.00	16.94
16	7.58	16.67	26.78	20.58	12.81
17	6.67	15.76	21.35	17.50	4.37
18	14.53	19.67	19.84	15.18	1.84
19	10.92	13.67	13.89	21.31	16.15
20	15.88	24.33	17.64	12.88	n
21	19.12	14.29	n	n	n
22	8.08	9.86	n	n	n
23	12.57	n	n	n	n
24	13.90	n	n	n	n
Average	13.66	17.02	19.13	15.79	12.27
Max	23.52	25.77	30.47	26.02	23.32
Min	6.05	9.86	11.81	10.56	1.84
SD	4.67	4.09	5.44	4.31	6.84

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.10 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Penetrating force in Albedo ของผล
ส้ม โอปันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Penetrating force in Albedo (N)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	5.50	9.04	4.60	4.15	6.68
2	4.79	6.99	10.07	8.37	7.17
3	4.73	9.01	6.37	6.79	12.84
4	6.14	12.02	4.52	4.97	4.93
5	5.03	9.78	4.90	5.79	40.64
6	11.73	6.14	7.04	4.87	43.18
7	5.73	8.64	5.53	12.24	5.11
8	6.84	10.95	9.37	10.90	4.83
9	8.79	5.61	10.88	13.10	6.21
10	5.07	10.78	11.24	12.63	60.40
11	5.07	11.68	9.50	7.24	4.69
12	8.00	4.82	5.61	6.83	6.88
13	5.44	4.95	9.34	6.02	121.63
14	4.77	10.32	8.10	11.60	5.63
15	5.51	8.00	6.85	4.20	7.11
16	8.81	11.71	7.19	12.97	11.62
17	8.81	7.10	14.29	5.10	36.62
18	8.33	4.90	5.02	4.82	44.99
19	8.36	5.91	5.81	7.58	5.74
20	8.04	7.85	7.00	11.34	n
21	5.96	5.48	n	n	n
22	7.55	5.02	n	n	n
23	5.73	n	n	n	n
24	5.50	n	n	n	n
Average	6.68	8.03	7.66	8.07	22.99
Max	11.73	12.02	14.29	13.10	121.63
Min	4.73	4.82	4.52	4.15	4.69
SD	1.82	2.49	2.63	3.26	29.79

หมายเหตุ : n คือ ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.11 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Rupture force ของผลส้มโอพันธุ์ขาว
น้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Rupture force (N)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	27.70	30.03	28.36	24.85	22.95
2	24.16	29.71	24.37	24.84	28.00
3	25.47	28.12	28.12	25.78	30.50
4	30.60	24.38	28.94	28.23	27.57
5	28.69	25.83	23.49	26.25	3.49
6	35.53	26.16	28.28	27.38	4.84
7	27.65	33.11	25.65	33.27	33.14
8	33.75	28.84	25.25	27.26	25.63
9	30.06	27.42	24.59	28.26	25.91
10	25.43	29.32	27.93	29.22	4.35
11	21.93	25.78	23.51	26.93	25.58
12	27.69	29.19	26.77	28.11	28.14
13	25.09	30.83	32.74	25.57	4.46
14	25.64	27.12	28.93	27.73	22.33
15	25.57	30.15	31.90	26.35	30.81
16	25.11	29.62	27.48	29.73	29.47
17	29.84	27.12	34.42	25.38	3.96
18	30.49	29.36	28.81	31.74	4.72
19	27.77	28.73	28.98	29.33	28.82
20	24.31	32.15	26.60	28.76	n
21	25.82	30.80	n	n	n
22	26.40	29.79	n	n	n
23	31.79	n	n	n	n
24	28.51	n	n	n	n
Average	27.71	28.80	27.76	27.75	20.25
Max	35.53	33.11	34.42	33.27	33.14
Min	21.93	24.38	23.49	24.84	3.49
SD	3.21	2.15	2.93	2.21	11.41

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.12 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Penetrating force in flesh ของผลส้ม
โอฟันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Penetrating force in flesh (N)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	7.47	5.28	5.59	5.01	5.40
2	8.08	5.77	3.28	4.29	4.34
3	7.79	4.78	6.68	4.60	4.84
4	12.01	4.31	6.13	9.16	6.91
5	5.97	4.90	5.68	2.82	36.01
6	7.21	5.52	7.87	5.52	84.93
7	8.47	3.60	6.64	3.92	5.53
8	5.03	7.58	4.36	3.65	5.36
9	6.44	4.34	4.16	4.84	3.96
10	6.74	5.60	7.93	3.46	40.80
11	6.24	4.39	5.49	4.27	4.02
12	4.62	5.39	4.38	4.62	3.40
13	6.47	5.01	5.67	6.12	46.11
14	6.24	6.17	4.34	3.64	4.06
15	7.07	5.78	7.48	3.30	5.59
16	7.15	3.30	6.05	3.35	4.88
17	4.14	5.58	5.41	4.93	46.65
18	5.93	6.50	4.36	4.96	52.42
19	5.13	3.85	4.82	4.80	3.17
20	5.14	5.83	3.10	4.58	n
21	5.64	6.09	n	n	n
22	5.26	4.82	n	n	n
23	6.69	n	n	n	n
24	6.69	n	n	n	n
Average	6.57	5.20	5.47	4.59	19.39
Max	12.01	7.58	7.93	9.16	84.93
Min	4.14	3.30	3.10	2.82	3.17
SD	1.60	1.01	1.40	1.35	24.02

หมายเหตุ : n คือ ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.13 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Strength of mambrane ของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Strength of mambrane (N)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	13.97	26.94	8.04	9.51	15.84
2	19.87	25.38	17.66	23.46	22.06
3	25.33	19.66	12.66	9.29	21.96
4	31.22	18.11	21.70	18.27	15.52
5	21.64	38.94	16.75	15.70	10.00
6	33.01	21.04	13.52	9.95	10.00
7	28.53	17.39	26.49	16.94	6.86
8	23.94	31.34	21.48	15.39	9.21
9	41.19	20.10	21.99	20.01	26.95
10	23.76	28.58	13.70	22.46	10.00
11	34.24	22.14	24.78	17.24	29.06
12	23.12	17.91	21.96	10.81	21.37
13	20.97	21.66	13.74	12.64	10.00
14	34.57	21.85	16.70	24.78	7.65
15	23.03	22.30	9.80	23.47	11.40
16	28.61	13.58	11.89	16.84	14.45
17	22.21	16.84	26.32	19.99	10.00
18	16.79	40.65	19.22	24.66	10.00
19	21.87	21.52	18.82	28.58	14.25
20	20.14	26.78	16.51	14.56	n
21	39.73	11.92	n	n	n
22	26.13	16.38	n	n	n
23	22.92	n	n	n	n
24	36.27	n	n	n	n
Average	26.38	22.77	17.69	17.73	14.56
Max	41.19	40.65	26.49	28.58	29.06
Min	13.97	11.92	8.04	9.29	6.86
SD	7.12	7.25	5.33	5.66	6.64

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.14 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Penetrating energy in Albedo ของผล
ส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Penetrating energy in Albedo (N mm)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	55.00	90.43	9.20	41.45	66.74
2	47.85	69.91	20.14	83.72	71.69
3	47.31	90.09	12.74	67.86	202.91
4	12.29	36.15	9.05	49.70	49.34
5	50.28	97.81	9.80	57.92	1.31
6	23.45	61.41	14.08	48.70	1.97
7	11.46	86.37	11.07	201.01	51.07
8	68.44	109.47	18.73	167.47	48.30
9	87.91	56.11	31.70	210.36	62.05
10	50.66	107.80	35.05	199.53	2.85
11	50.69	35.20	28.98	72.41	46.91
12	79.96	48.20	11.22	68.26	68.82
13	54.41	49.47	18.67	60.16	6.52
14	47.71	103.16	16.20	182.74	56.33
15	55.13	79.97	13.69	42.04	71.09
16	88.11	36.77	14.39	201.80	188.26
17	88.05	70.96	45.03	50.97	1.62
18	83.34	48.98	10.04	48.21	1.94
19	83.60	59.09	11.61	75.77	57.42
20	80.39	78.45	13.99	186.37	n
21	59.59	54.76	n	n	n
22	75.50	50.19	n	n	n
23	57.30	n	n	n	n
24	55.01	n	n	n	n
Average	58.89	69.12	17.77	105.82	55.64
Max	88.11	109.47	45.03	210.36	202.91
Min	11.46	35.20	9.05	41.45	1.31
SD	22.23	23.82	9.87	66.84	56.34

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.15 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Penetrating energy in flesh ของผลส้ม
โพนันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Penetrating energy in flesh (N mm)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	74.68	52.76	11.18	50.12	53.96
2	80.79	57.66	6.56	42.86	43.42
3	77.86	47.82	13.35	46.03	48.37
4	24.02	8.62	12.26	91.58	69.05
5	59.68	48.99	11.35	28.19	1.37
6	14.42	55.18	15.73	55.19	1.80
7	16.94	36.03	13.27	39.17	55.31
8	50.30	75.78	8.71	36.45	53.59
9	64.39	43.36	8.33	48.42	39.56
10	67.41	55.97	15.87	34.59	n
11	62.40	8.78	10.97	42.72	40.17
12	46.18	53.93	8.76	46.18	33.96
13	64.71	50.11	11.34	61.20	n
14	62.38	61.74	8.69	36.40	40.57
15	70.67	57.83	14.96	33.04	55.93
16	71.47	6.60	12.11	33.53	48.77
17	41.42	55.77	10.81	49.29	n
18	59.31	65.03	8.72	49.57	n
19	51.25	38.48	9.64	48.03	31.68
20	51.44	58.32	6.19	45.81	n
21	56.36	60.93	n	n	n
22	52.62	48.17	n	n	n
23	66.94	n	n	n	n
24	66.93	n	n	n	n
Average	56.44	47.63	10.94	45.92	41.17
Max	80.79	75.78	15.87	91.58	69.05
Min	14.42	6.60	6.19	28.19	1.37
SD	17.68	18.27	2.79	13.51	18.72

หมายเหตุ : n คือ ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.16 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Toughness ของผลส้มโอพันธุ์ขาว
น้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Toughness (N mm)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	86.40	98.92	19.89	87.90	85.95
2	69.68	100.36	13.06	78.38	102.35
3	75.67	83.40	17.56	73.31	92.74
4	16.79	13.26	17.36	92.60	94.98
5	84.87	78.16	13.71	105.15	2.00
6	23.46	82.94	17.66	96.30	2.00
7	17.87	117.09	16.49	109.25	125.02
8	102.98	83.64	15.03	80.60	79.15
9	87.93	92.61	12.47	87.22	96.57
10	72.01	91.57	16.86	91.71	2.00
11	62.07	14.12	13.70	88.56	88.65
12	85.79	101.60	17.85	84.83	94.02
13	70.01	118.45	22.52	89.98	2.00
14	67.28	77.44	15.23	80.95	70.31
15	78.20	105.61	19.50	99.42	109.62
16	64.75	17.59	18.89	86.22	99.62
17	96.91	82.84	21.36	83.37	2.00
18	87.96	97.17	21.59	119.16	2.00
19	83.70	98.84	19.82	100.34	105.17
20	65.75	109.10	16.56	97.40	n
21	80.31	103.87	n	n	n
22	71.65	106.49	n	n	n
23	108.49	n	n	n	n
24	92.86	n	n	n	n
Average	73.06	85.23	17.36	91.63	66.11
Max	108.49	118.45	22.52	119.16	125.02
Min	16.79	13.26	12.47	73.31	2.00
SD	23.96	30.82	2.91	11.19	46.14

หมายเหตุ : n คือ ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.17 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Plate Compression test ด้วยค่า Initial firmness ของผลส้ม
โอฟันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Initial firmness (N/mm)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	11.81	14.62	16.78	11.41	12.54
2	11.10	16.59	15.25	17.94	13.73
3	12.14	14.92	16.02	17.70	12.08
4	11.72	15.60	17.08	14.42	11.01
5	9.04	15.87	15.90	10.53	10.68
6	15.97	17.90	16.15	15.64	14.44
7	20.42	13.96	15.37	14.34	13.08
8	16.84	9.68	17.40	14.67	12.57
9	15.96	21.18	17.56	15.20	132.00
10	15.85	18.46	16.40	12.50	10.51
11	15.65	16.83	13.87	14.07	18.09
12	12.51	14.74	11.67	17.81	14.03
13	14.84	16.65	14.16	11.22	n
14	19.64	16.43	14.53	17.63	n
15	16.26	11.47	13.69	12.27	n
16	19.08	12.69	12.90	15.43	n
17	15.75	10.61	19.85	13.17	n
18	16.75	9.87	13.96	17.65	n
19	17.81	11.22	14.80	12.73	n
20	20.44	10.85	8.53	15.75	n
21	16.05	11.50	n	n	n
22	15.21	15.00	n	n	n
23	10.77	n	n	n	n
24	14.27	n	n	n	n
25	15.25	n	n	n	n
26	17.73	n	n	n	n
27	16.06	n	n	n	n
28	13.65	n	n	n	n
Average	15.31	14.39	15.09	14.60	22.89
Max	20.44	21.18	19.85	17.94	132.00
Min	9.04	9.68	8.53	10.53	10.51
SD	2.92	3.08	2.42	2.37	34.42

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.18 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Plate Compression test ด้วยค่า Average firmness ของผล
ส้ม โอปันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Average firmness (N/mm)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	13.03	13.12	11.92	10.54	12.19
2	13.10	11.74	12.14	12.62	11.42
3	15.44	13.23	13.30	14.19	11.52
4	13.20	13.28	13.17	11.87	10.64
5	14.58	12.25	12.38	9.06	12.06
6	13.04	13.31	12.96	12.17	9.82
7	14.09	11.20	11.88	14.00	11.07
8	13.26	10.16	12.11	12.67	12.05
9	12.69	12.76	14.23	12.69	11.15
10	12.61	10.90	13.18	11.87	9.31
11	12.56	11.82	11.25	12.77	13.41
12	12.31	12.96	11.06	13.18	12.40
13	12.97	12.20	13.15	10.58	n
14	13.64	11.79	12.67	12.07	n
15	13.22	11.85	14.16	11.08	n
16	10.98	12.31	12.43	12.72	n
17	13.03	12.29	13.51	10.69	n
18	13.17	11.37	11.47	12.08	n
19	12.73	12.13	12.98	11.06	n
20	13.22	11.04	11.77	12.22	n
21	12.52	11.76	n	n	n
22	11.66	12.55	n	n	n
23	11.45	n	n	n	n
24	13.15	n	n	n	n
25	11.99	n	n	n	n
26	13.62	n	n	n	n
27	13.05	n	n	n	n
28	12.09	n	n	n	n
Average	12.94	12.09	12.59	12.01	11.42
Max	15.44	13.31	14.23	14.19	13.41
Min	10.98	10.16	11.06	9.06	9.31
SD	0.90	0.84	0.90	1.23	1.14

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.19 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Plate Compression test ด้วยค่า Energy absorption ของผล
ส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Energy absorption (N mm)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	62.73	36.84	42.03	46.92	33.61
2	60.10	43.24	39.67	38.11	45.05
3	51.42	36.32	36.44	31.33	41.30
4	59.88	36.58	37.29	41.96	45.76
5	51.25	39.31	38.07	55.31	41.58
6	35.46	35.05	34.08	40.43	52.45
7	34.11	44.79	42.43	32.24	45.12
8	36.09	50.65	40.39	36.65	38.92
9	35.16	38.68	30.58	35.92	41.82
10	37.18	45.64	34.50	42.17	51.69
11	35.64	41.85	42.93	38.42	36.66
12	36.18	37.96	47.73	34.54	39.59
13	37.12	40.36	36.56	46.18	n
14	35.45	43.98	38.20	38.12	n
15	34.13	38.40	33.85	44.24	n
16	43.98	37.88	37.39	39.79	n
17	35.99	41.01	34.30	49.52	n
18	36.25	42.83	43.37	42.07	n
19	36.24	41.55	35.72	42.64	n
20	37.16	44.76	40.17	40.53	n
21	40.14	40.93	n	n	n
22	42.27	39.96	n	n	n
23	42.41	n	n	n	n
24	37.21	n	n	n	n
25	41.70	n	n	n	n
26	35.19	n	n	n	n
27	36.58	n	n	n	n
28	41.68	n	n	n	n
Average	41.03	40.84	38.29	40.85	42.79
Max	62.73	50.65	47.73	55.31	52.45
Min	34.11	35.05	30.58	31.33	33.61
SD	8.32	3.72	4.10	5.79	5.59

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.20 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Plate Compression test ด้วยค่า Degree of elasticity ของผล
ส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Degree of elasticity				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	n	0.70	0.69	0.70	0.85
2	n	0.68	0.66	0.72	0.72
3	n	0.72	0.70	0.73	0.72
4	n	0.70	0.71	0.68	0.71
5	n	0.70	0.69	0.70	0.69
6	0.74	0.74	0.75	0.71	0.70
7	0.76	0.70	0.70	0.76	0.69
8	0.73	0.66	0.70	0.74	0.73
9	0.79	0.71	0.76	0.73	0.73
10	0.67	0.84	0.70	0.70	0.69
11	0.75	0.76	0.71	0.71	0.74
12	0.76	0.72	0.65	0.74	0.71
13	0.72	0.70	0.72	0.64	n
14	0.71	0.68	0.61	0.71	n
15	0.75	0.73	0.71	0.72	n
16	0.72	0.72	0.69	0.67	n
17	0.73	0.71	0.73	0.65	n
18	0.72	0.64	0.69	0.70	n
19	0.73	0.66	0.74	0.72	n
20	0.62	0.71	0.70	0.71	n
21	0.65	0.68	n	n	n
22	0.70	0.69	n	n	n
23	0.69	n	n	n	n
24	0.68	n	n	n	n
25	0.69	n	n	n	n
26	0.72	n	n	n	n
27	0.70	n	n	n	n
28	0.69	n	n	n	n
Average	0.71	0.71	0.70	0.71	0.72
Max	0.79	0.84	0.76	0.76	0.85
Min	0.62	0.64	0.61	0.64	0.69
SD	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.21 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Plate Compression test ด้วยค่า Relaxation ratio ของผลส้ม
โอฟันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Relaxation ratio				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	0.21	0.22	0.23	0.21	0.20
2	0.20	0.21	0.22	0.21	0.24
3	0.19	0.21	0.22	0.20	0.21
4	0.21	0.23	0.21	0.23	0.22
5	0.20	0.22	0.20	0.22	0.22
6	0.21	0.21	0.20	0.22	0.23
7	0.19	0.24	0.23	0.21	0.23
8	0.20	0.24	0.22	0.21	0.22
9	0.19	0.21	0.20	0.21	0.22
10	0.20	0.22	0.21	0.24	0.21
11	0.18	0.23	0.21	0.22	0.23
12	0.20	0.23	0.25	0.20	0.23
13	0.20	0.23	0.23	0.22	n
14	0.21	0.23	0.21	0.21	n
15	0.20	0.21	0.22	0.22	n
16	0.19	0.22	0.20	0.24	n
17	0.21	0.24	0.19	0.24	n
18	0.22	0.23	0.22	0.23	n
19	0.21	0.24	0.20	0.21	n
20	0.22	0.23	0.25	0.23	n
21	0.24	0.23	n	n	n
22	0.21	0.23	n	n	n
23	0.23	n	n	n	n
24	0.21	n	n	n	n
25	0.21	n	n	n	n
26	0.21	n	n	n	n
27	0.22	n	n	n	n
28	0.23	n	n	n	n
Average	0.21	0.23	0.22	0.22	0.22
Max	0.24	0.24	0.25	0.24	0.24
Min	0.18	0.21	0.19	0.20	0.20
SD	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.22 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Plate Compression test ด้วยค่า Deformation ratio ของผล
สัมผัสโพชั่นข้าวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	ค่า Deformation ratio				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	1.534	0.017	0.019	0.021	0.017
2	1.526	0.019	0.018	0.017	0.018
3	1.295	0.017	0.017	0.016	0.019
4	1.516	0.015	0.017	0.018	0.019
5	1.371	0.019	0.018	0.026	0.018
6	1.520	0.017	0.017	0.018	0.022
7	1.387	0.020	0.019	0.016	0.019
8	1.503	0.023	0.018	0.017	0.018
9	1.561	0.018	0.015	0.017	0.019
10	1.570	0.021	0.016	0.019	0.025
11	1.583	0.018	0.019	0.017	0.017
12	1.626	0.016	0.019	0.017	0.017
13	1.543	0.019	0.017	0.020	n
14	1.450	0.019	0.017	0.017	n
15	1.503	0.019	0.015	0.018	n
16	1.783	0.021	0.018	0.017	n
17	1.528	0.017	0.018	0.021	n
18	1.498	0.019	0.020	0.017	n
19	1.544	0.018	0.016	0.022	n
20	1.476	0.022	0.020	0.019	n
21	1.582	0.020	n	n	n
22	1.686	0.018	n	n	n
23	1.742	n	n	n	n
24	1.514	n	n	n	n
25	1.659	n	n	n	n
26	1.454	n	n	n	n
27	1.522	n	n	n	n
28	1.647	n	n	n	n
Average	1.540	0.019	0.018	0.019	0.019
Max	1.783	0.023	0.020	0.026	0.025
Min	1.295	0.015	0.015	0.016	0.017
SD	0.105	0.002	0.001	0.002	0.002

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.23 ผลการหาเปอร์เซ็นต์พื้นที่ต่อมน้ำมันที่ผิวของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	Percentage of area of oil gland (%)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	23.58	22.37	20.36	16.89	20.39
2	20.48	20.45	25.06	23.93	26.31
3	18.90	21.28	18.70	21.77	26.26
4	23.42	24.51	19.34	23.61	24.83
5	23.40	27.91	22.74	23.72	23.15
6	24.32	28.34	24.76	n	25.67
7	23.20	30.61	29.11	25.02	25.51
8	17.14	26.57	25.97	23.93	16.75
9	24.74	26.72	25.36	28.03	16.75
10	22.72	28.52	25.12	27.67	21.97
11	25.39	22.71	26.48	24.70	28.99
12	19.72	27.48	19.72	n	24.30
13	17.22	28.60	24.20	24.56	22.69
14	19.55	29.35	20.73	25.73	24.01
15	19.73	25.11	20.78	22.83	26.67
16	21.04	31.71	19.64	n	23.75
17	26.96	23.60	26.52	19.72	26.35
18	21.17	28.33	31.30	22.84	25.72
19	22.97	29.31	21.70	28.13	22.52
20	20.12	22.25	22.84	22.24	22.70
21	17.92	27.92	n	n	n
22	27.46	19.65	n	n	n
23	19.60	n	n	n	n
24	27.53	n	n	n	n
25	25.62	n	n	n	n
26	24.35	n	n	n	n
27	26.08	n	n	n	n
28	24.09	n	n	n	n
29	27.45	n	n	n	n
30	21.15	n	n	n	n
Average	22.57	26.06	23.52	23.84	23.76
Max	27.53	31.71	31.30	28.13	28.99
Min	17.14	19.65	18.70	16.89	16.75
SD	3.12	3.45	3.45	2.86	3.12

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.24 ผลการหาความหนาแน่นของต่อมน้ำมันที่ผิวของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุ การเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	Density of oil gland (number/cm ²)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	0.91	1.14	1.03	1.19	0.86
2	0.65	1.06	0.82	0.75	0.75
3	0.63	0.72	0.95	1.19	0.80
4	0.93	0.73	1.04	0.72	1.04
5	0.74	0.72	0.94	0.81	1.12
6	0.66	0.84	0.92	1.03	1.14
7	0.70	0.97	1.15	0.86	0.91
8	1.01	0.97	1.04	0.92	1.02
9	0.95	1.10	1.19	0.91	1.02
10	1.00	1.10	0.80	1.27	0.59
11	1.07	0.90	1.31	0.86	1.13
12	0.72	0.87	1.12	1.23	1.07
13	0.65	0.98	0.91	1.06	1.15
14	0.77	0.97	0.86	1.29	1.16
15	0.87	1.09	1.06	1.11	0.54
16	1.22	1.53	1.18	0.88	1.00
17	0.71	0.77	1.20	0.97	0.92
18	0.77	1.00	1.29	0.70	0.97
19	0.71	0.85	0.96	0.78	1.09
20	0.66	0.71	1.63	0.59	0.60
21	0.80	1.24	n	n	n
22	0.82	0.76	n	n	n
23	0.83	n	n	n	n
24	0.82	n	n	n	n
25	1.16	n	n	n	n
26	0.83	n	n	n	n
27	0.82	n	n	n	n
28	1.07	n	n	n	n
29	0.95	n	n	n	n
30	0.74	n	n	n	n
Average	0.84	0.96	1.07	0.96	0.95
Max	1.22	1.53	1.63	1.29	1.16
Min	0.63	0.71	0.80	0.59	0.54
SD	0.16	0.20	0.20	0.21	0.20

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ก.25 ผลการหาพื้นที่ต่อมไขมันบนผิวของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	Average area of one oil gland (cm ²).				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	29.00	20.00	20.00	14.00	24.00
2	32.00	23.00	32.00	32.00	37.00
3	28.00	29.00	19.00	19.00	34.00
4	26.00	34.00	18.00	34.00	25.00
5	31.00	39.00	24.00	30.00	21.00
6	35.00	34.00	28.00	21.00	23.00
7	34.00	31.00	26.00	28.00	28.00
8	18.00	28.00	24.00	28.00	16.00
9	27.00	27.00	21.00	30.00	16.00
10	24.00	26.00	30.00	22.00	38.00
11	25.00	24.00	21.00	29.00	26.00
12	29.00	30.00	18.00	15.00	23.00
13	27.00	31.00	26.00	16.00	20.00
14	26.00	30.00	23.00	20.00	21.00
15	23.00	23.00	19.00	20.00	50.00
16	18.00	21.00	19.00	32.00	24.00
17	39.00	31.00	23.00	20.00	29.00
18	30.00	27.00	23.00	31.00	27.00
19	33.00	34.00	22.00	36.00	21.00
20	32.00	31.00	14.00	41.00	38.00
21	24.00	22.00	n	n	n
22	34.00	26.00	n	n	n
23	23.00	n	n	n	n
24	33.00	n	n	n	n
25	24.00	n	n	n	n
26	31.00	n	n	n	n
27	32.00	n	n	n	n
28	23.00	n	n	n	n
29	31.00	n	n	n	n
30	31.00	n	n	n	n
Average	28.40	28.23	22.50	25.90	27.05
Max	39.00	39.00	32.00	41.00	50.00
Min	18.00	20.00	14.00	14.00	16.00
SD	4.98	4.87	4.39	7.60	8.52

หมายเหตุ : n คือ ไม่มีตัวอย่าง

ภาคผนวก ข.

การตรวจสอบัติทางกายภาพ และชีวเคมีของเนื้อสัมผัสอาหารขำน้ำผึ้ง

ตารางที่ ข.1 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Initial firmness ของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาว
น้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	Initial firmness (N/mm)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	0.48	0.33	0.10	0.16	0.03
2	0.46	0.34	0.31	0.51	0.08
3	0.76	0.41	1.08	0.34	0.18
4	0.96	0.40	0.26	0.43	0.36
5	0.65	0.46	0.48	1.01	0.22
6	1.32	0.72	0.71	1.26	0.30
7	0.40	0.37	0.21	0.41	0.14
8	0.88	0.48	0.47	0.38	0.16
9	0.52	0.45	0.80	0.85	0.16
10	0.56	0.34	0.10	0.55	0.02
11	0.88	0.54	0.62	0.57	0.10
12	0.85	0.47	0.68	0.39	0.06
13	0.65	0.69	0.64	0.42	0.02
14	0.15	0.42	0.36	0.64	0.03
15	0.51	0.47	0.86	0.40	0.12
16	0.90	0.46	0.83	0.50	0.10
17	0.59	0.58	0.59	0.51	0.04
18	0.59	0.44	0.59	0.93	0.03
19	0.60	0.78	0.71	0.46	0.02
20	0.55	0.43	0.31	0.68	0.07
21	0.31	0.28	0.57	0.30	0.04
22	0.63	0.36	0.77	0.41	0.10
23	0.47	0.48	0.87	0.67	0.17
24	0.26	0.09	0.74	0.42	0.06
25	0.47	0.31	1.04	0.39	0.07
26	0.58	0.62	0.78	0.32	0.04
27	0.42	0.33	0.95	0.19	0.07
28	0.33	0.95	0.19	0.63	0.11
29	0.37	0.30	0.31	0.36	0.05
30	0.42	0.67	0.37	0.52	0.14
31	0.63	0.53	0.19	0.49	0.12
32	n	0.50	0.67	0.69	0.03
33	n	0.17	0.48	0.35	0.05
34	n	0.33	0.46	0.45	0.17
35	n	0.52	0.31	0.43	0.10

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ข.1 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Initial firmness ของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาว
น้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว (ต่อ)

ตัวอย่างที่	Initial firmness (N/mm)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
36	n	0.43	0.67	0.39	0.21
37	n	0.75	0.51	0.56	0.11
38	n	0.44	0.83	0.74	0.09
39	n	0.37	0.59	n	0.10
40	n	0.49	0.17	n	n
41	n	0.40	n	n	n
42	n	0.61	n	n	n
43	n	0.63	n	n	n
44	n	0.29	n	n	n
Average	0.59	0.46	0.55	0.52	0.10
Max	1.32	0.95	1.08	1.26	0.36
Min	0.15	0.09	0.10	0.16	0.02
SD	0.24	0.16	0.26	0.22	0.08

หมายเหตุ : n คือ ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ข.2 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Max force ของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาว
น้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	Max force (N)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	2.10	1.75	1.39	1.75	1.10
2	2.35	2.52	1.47	2.30	1.59
3	2.11	2.19	2.13	2.68	2.20
4	1.88	1.39	1.91	2.38	3.78
5	2.32	2.23	1.53	3.79	1.57
6	5.35	2.42	1.76	2.87	3.41
7	1.92	2.33	1.11	2.67	1.67
8	2.59	2.99	2.09	2.61	1.36
9	2.23	2.06	2.33	3.07	2.92
10	2.74	3.02	1.13	1.34	1.57
11	3.51	2.72	2.14	2.18	1.54
12	2.45	4.57	1.68	1.54	1.65
13	3.07	2.31	1.80	2.23	1.23
14	1.59	2.99	2.13	2.72	1.54

ตารางที่ ข.2 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Max force ของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาว
น้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว (ต่อ)

ตัวอย่างที่	Max force (N)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
15	2.75	2.04	2.78	2.08	1.86
16	4.23	2.58	1.88	2.76	1.36
17	2.25	2.00	2.33	1.87	1.33
18	2.75	2.06	2.64	2.17	1.74
19	2.40	2.87	1.37	1.42	1.11
20	2.39	2.27	1.73	2.95	1.44
21	2.34	1.48	2.37	1.33	1.61
22	2.70	1.84	1.38	2.57	1.87
23	2.00	1.72	2.31	1.82	2.51
24	2.68	1.09	2.33	1.72	1.53
25	2.62	1.95	2.10	1.67	1.63
26	3.82	1.99	2.47	1.91	1.12
27	2.13	1.68	2.20	1.49	1.50
28	2.44	2.72	1.90	1.52	1.67
29	2.51	2.18	4.17	1.38	1.41
30	2.08	3.04	1.64	1.85	2.17
31	2.91	3.35	1.97	1.79	1.63
32	n	2.65	1.16	2.53	1.37
33	n	1.63	3.04	1.72	1.66
34	n	1.98	1.80	2.38	1.52
35	n	1.83	2.24	2.00	1.84
36	n	1.69	1.61	2.17	3.63
37	n	2.82	1.66	2.13	1.04
38	n	2.63	1.69	2.08	1.85
39	n	3.82	1.28	n	2.19
40	n	1.92	1.49	n	n
41	n	1.77	n	n	n
42	n	1.56	n	n	n
43	n	1.80	n	n	n
44	n	2.13	n	n	n
Average	2.62	2.29	1.95	2.14	1.79
Max	5.35	4.57	4.17	3.79	3.78
Min	1.59	1.09	1.11	1.33	1.04
SD	0.75	0.66	0.58	0.56	0.65

หมายเหตุ : n คือ ไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ข.3 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Average force ของเนื้อส้ม โอปันธุ์ขาว น้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	Average force (N)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	1.71	1.06	0.68	1.23	0.35
2	0.73	1.24	1.17	1.49	1.21
3	0.63	1.42	1.72	2.13	1.39
4	1.43	1.06	1.26	1.10	2.53
5	1.21	1.36	1.11	2.25	1.16
6	3.23	1.48	1.52	1.74	1.54
7	0.96	1.87	0.80	1.75	1.03
8	1.62	1.17	1.11	2.11	0.70
9	1.61	1.51	1.43	2.56	1.74
10	1.30	2.34	0.77	0.84	1.08
11	1.86	1.99	1.43	1.80	0.92
12	1.22	2.56	0.68	1.23	1.15
13	1.50	1.73	1.33	1.35	0.78
14	1.20	2.28	1.65	1.57	1.13
15	2.27	0.93	2.36	1.72	1.33
16	2.70	1.84	1.09	2.29	0.86
17	1.73	1.14	0.72	1.33	0.92
18	1.94	1.48	1.69	1.14	1.23
19	1.17	1.78	0.98	0.99	0.83
20	1.75	1.39	1.28	1.11	0.99
21	1.07	1.03	1.49	1.12	0.94
22	2.05	1.17	1.20	1.69	1.21
23	1.00	0.88	1.05	1.41	1.85
24	1.98	0.77	1.70	1.11	1.27
25	2.10	1.23	1.39	1.38	1.38
26	2.47	1.57	1.80	1.40	0.79
27	1.53	0.93	0.57	0.88	1.07
28	1.86	1.95	1.15	1.02	0.74
29	1.90	1.39	3.03	0.99	1.04
30	0.83	2.55	1.09	1.36	1.76
31	2.46	2.50	1.49	1.12	1.03
32	n	1.73	0.75	1.77	0.97
33	n	1.18	1.47	0.80	1.02
34	n	1.33	1.29	1.56	0.62
35	n	1.38	1.26	0.82	1.48

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ข.3 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Average force ของเนื้อสัมผัสไอพ่นธัญชา
น้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว (ต่อ)

ตัวอย่างที่	Average force (N)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
36	n	1.38	0.99	1.49	3.09
37	n	2.05	0.79	1.69	0.75
38	n	1.70	1.01	1.00	1.06
39	n	1.91	0.94	n	1.52
40	n	1.62	1.16	n	
41	n	1.23	n	n	
42	n	1.26	n	n	
43	n	0.87	n	n	
44	n	1.56	n	n	
Average	1.64	1.52	1.26	1.43	1.19
Max	3.23	2.56	3.03	2.56	3.09
Min	0.63	0.77	0.57	0.80	0.35
SD	0.60	0.47	0.47	0.44	0.50

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ข.4 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Toughness ของเนื้อสัมผัสไอพ่นธัญชา
น้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	Toughness (N mm)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	17.07	10.63	6.76	12.30	17.39
2	7.31	12.43	11.68	14.85	60.56
3	6.34	14.17	17.16	21.28	69.27
4	14.29	10.59	12.59	11.00	126.37
5	12.07	13.58	11.11	22.53	57.96
6	32.30	14.77	15.17	17.35	77.13
7	9.57	18.71	7.97	17.44	51.70
8	16.17	11.70	11.12	21.12	34.77
9	16.05	15.09	14.31	25.62	86.95
10	12.97	23.37	7.67	8.41	53.80
11	18.62	19.87	14.30	18.03	46.11
12	12.16	25.61	6.80	12.29	57.40
13	14.98	17.26	13.31	13.48	39.08
14	12.01	22.82	16.49	15.70	56.32

ตารางที่ ข.4 ผลการวัดเนื้อสัมผัสแบบ Puncture test ด้วยค่า Toughness ของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาว
น้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว (ต่อ)

ตัวอย่างที่	Toughness (N mm)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
15	22.64	9.30	23.63	17.17	66.52
16	27.03	18.39	10.92	22.88	43.06
17	17.25	11.41	7.18	13.31	46.06
18	19.44	14.81	16.93	11.35	61.66
19	11.66	17.77	9.78	9.92	41.25
20	17.48	13.85	12.76	11.11	49.27
21	10.72	10.34	14.94	11.20	47.05
22	20.45	11.72	11.99	16.93	60.51
23	10.01	8.75	10.49	14.13	92.35
24	19.76	7.73	16.96	11.12	63.39
25	21.02	12.29	13.91	13.79	68.81
26	24.67	15.64	17.99	13.95	39.66
27	15.24	9.32	5.67	8.82	53.43
28	18.57	19.52	11.47	10.24	37.13
29	18.98	13.88	30.28	9.92	51.89
30	8.25	25.45	10.91	13.58	88.12
31	24.56	24.94	14.85	11.15	51.30
32	n	17.32	7.47	17.73	48.24
33	n	11.76	14.70	7.95	51.11
34	n	13.26	12.92	15.62	31.17
35	n	13.84	12.60	8.21	74.18
36	n	13.75	9.93	14.88	154.54
37	n	20.49	7.87	16.85	37.31
38	n	16.97	10.09	10.01	52.88
39	n	19.13	9.38	n	75.84
40	n	16.19	11.61	n	n
41	n	12.24	n	n	n
42	n	12.58	n	n	n
43	n	8.66	n	n	n
44	n	15.55	n	n	n
Average	16.44	15.17	12.59	14.29	59.53
Max	32.30	25.61	30.28	25.62	154.54
Min	6.34	7.73	5.67	7.95	17.39
SD	6.01	4.66	4.69	4.41	25.09

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ข.5 ผลการวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	Soluble solids (%Brix)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	8.90	10.50	9.90	9.20	9.60
2	10.10	10.20	9.90	9.10	9.80
3	9.90	10.80	9.50	9.00	10.30
4	10.10	10.60	9.50	8.70	10.20
5	10.10	9.90	8.70	8.40	9.80
6	9.40	9.80	9.50	8.10	9.70
7	10.10	10.20	8.90	9.10	9.80
8	10.30	10.20	8.90	8.80	9.40
9	9.80	9.10	8.70	7.50	9.10
10	9.60	9.30	8.90	7.80	8.90
11	10.10	9.00	8.60	9.10	9.60
12	9.80	9.20	8.60	8.60	9.60
13	9.90	9.80	9.70	8.10	9.50
14	9.80	9.70	9.60	8.60	9.50
15	10.50	10.60	9.60	7.90	8.90
16	10.40	10.30	9.60	7.70	9.10
17	9.90	9.80	7.60	8.70	9.40
18	10.00	9.90	7.90	8.70	9.50
19	10.30	10.30	8.40	8.60	9.80
20	10.50	10.20	8.30	8.50	9.60
21	9.30	8.60	9.50	8.50	9.90
22	9.20	8.90	9.10	8.40	9.70
23	9.50	10.50	9.80	8.40	9.70
24	9.40	10.90	10.10	8.40	9.50
25	10.60	9.30	9.30	8.10	9.60
26	10.40	9.20	9.20	8.10	9.50
27	9.80	10.50	10.00	8.30	9.30
28	9.90	10.70	10.20	8.50	9.30
29	10.60	9.60	9.00	8.80	9.60
30	10.50	9.40	9.00	8.80	10.00
31	10.10	9.30	8.10	9.00	9.90
32	10.10	9.20	8.30	9.00	9.70
33	10.20	10.10	8.60	8.70	9.60
34	10.20	10.00	8.60	8.70	9.70
35	10.60	9.80	8.80	9.30	9.50

ตารางที่ ข.5 ผลการวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว (ต่อ)

ตัวอย่างที่	Soluble solids (%Brix)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
36	10.70	9.90	9.20	9.20	9.20
37	10.00	9.70	8.30	8.50	10.00
38	10.20	9.90	8.20	8.90	10.10
39	10.20	9.30	9.40	8.80	9.80
40	10.30	9.40	9.70	8.60	10.00
41	10.10	9.60	n	n	n
42	10.20	9.60	n	n	n
43	9.70	9.90	n	n	n
44	9.70	10.00	n	n	n
45	9.90	n	n	n	n
46	10.10	n	n	n	n
Average	10.02	9.83	9.07	8.58	9.62
Max	10.70	10.90	10.20	9.30	10.30
Min	8.90	8.60	7.60	7.50	8.90
SD	0.40	0.55	0.65	0.43	0.32

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ตารางที่ ข.6 ผลการวัดปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ของน้ำส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว

ตัวอย่างที่	Titratable Acidity (%)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
1	0.67	0.60	0.60	0.55	0.53
2	0.69	0.66	0.60	0.52	0.52
3	0.43	0.56	0.49	0.55	0.49
4	0.46	0.54	0.51	0.51	0.54
5	0.66	0.70	0.61	0.54	0.46
6	0.63	0.61	0.58	0.54	0.42
7	0.62	0.67	0.62	0.59	0.47
8	0.57	0.65	0.62	0.64	0.46
9	0.67	0.61	0.67	0.58	0.47
10	0.68	0.62	0.75	0.57	0.51
11	0.57	0.60	0.57	0.52	0.48
12	0.56	0.60	0.56	0.58	0.49
13	0.69	1.07	0.59	0.58	0.55
14	0.72	0.61	0.57	0.52	0.51
15	0.68	0.52	0.64	0.60	0.47

ตารางที่ ข.6 ผลการวัดปริมาณกรดที่ไตเรตราดได้ของน้ำส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งทั้ง 5 อายุการเก็บเกี่ยว (ต่อ)

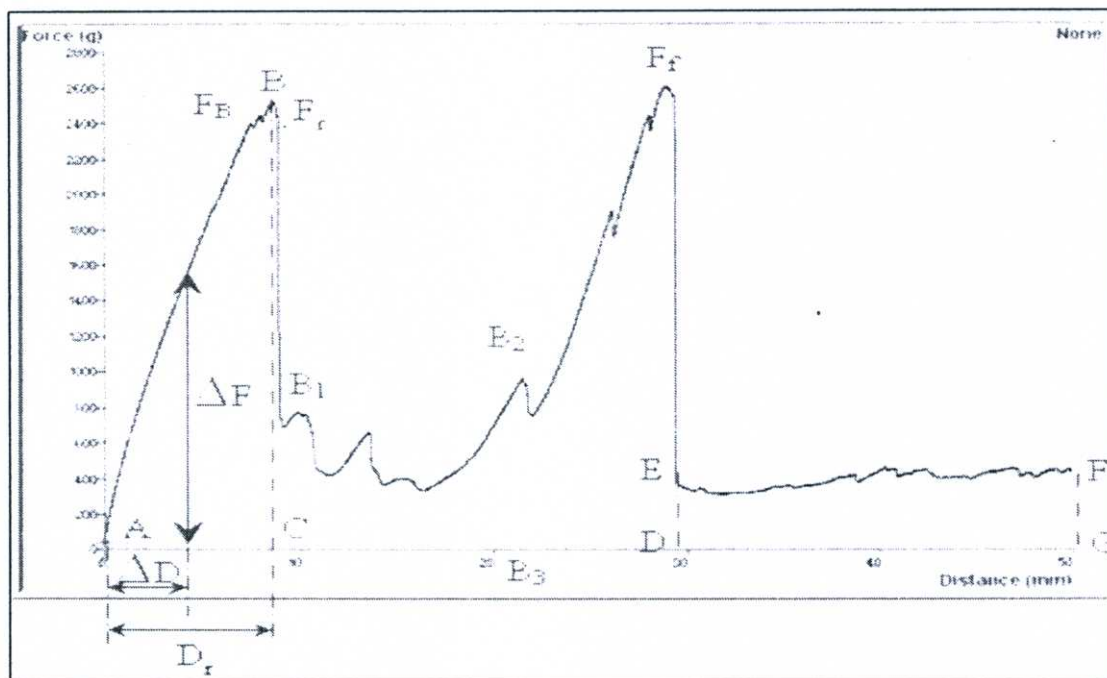
ตัวอย่างที่	Titratable Acidity (%)				
	180 วัน	190 วัน	200 วัน	210 วัน	220 วัน
16	0.72	0.51	0.63	0.52	0.48
17	0.68	0.63	0.49	0.54	0.50
18	0.69	0.60	0.54	0.58	0.49
19	0.54	0.58	0.58	0.59	0.20
20	0.54	0.59	0.60	0.65	0.45
21	0.69	0.78	0.56	0.50	0.56
22	0.67	0.82	0.60	0.47	0.52
23	0.73	0.58	0.48	0.53	0.51
24	0.77	0.77	0.49	0.52	0.52
25	0.48	0.67	0.63	0.44	0.40
26	0.53	0.70	0.66	0.46	0.41
27	0.62	0.59	0.51	0.47	0.59
28	0.62	0.60	0.57	0.45	0.56
29	0.62	0.62	0.52	0.54	0.61
30	0.60	0.63	0.49	0.55	0.52
31	0.63	0.43	0.50	0.51	0.45
32	0.68	0.46	0.51	0.54	0.45
33	n	0.61	0.52	0.57	0.48
34	0.66	0.62	0.52	0.54	0.49
35	0.61	0.63	0.63	0.57	0.47
36	0.64	0.59	0.50	0.57	0.48
37	0.60	0.68	0.58	0.44	0.41
38	0.58	0.69	0.63	0.43	0.46
39	0.67	0.66	0.59	0.63	0.55
40	0.74	0.60	0.55	0.67	0.55
41	0.63	0.51	n	n	n
42	0.70	0.46	n	n	n
43	0.72	0.60	n	n	n
44	0.73	0.61	n	n	n
45	0.63	n	n	n	n
46	0.63	n	n	n	n
Average	0.64	0.62	0.57	0.54	0.49
Max	0.77	1.07	0.75	0.67	0.61
Min	0.43	0.43	0.48	0.43	0.20
SD	0.08	0.10	0.06	0.06	0.07

หมายเหตุ : n คือไม่มีตัวอย่าง

ภาคผนวก ค.
การคำนวณค่า Texture

ค.1 การคำนวณหาค่า Texture ในการทดสอบแบบ Puncture test ของผลส้มโอ

ในการคำนวณหาค่า Texture ในการทดสอบแบบ Puncture test สามารถนำมาหาสมบัติเชิงกลจากภาพที่ ค.1 ดังนี้



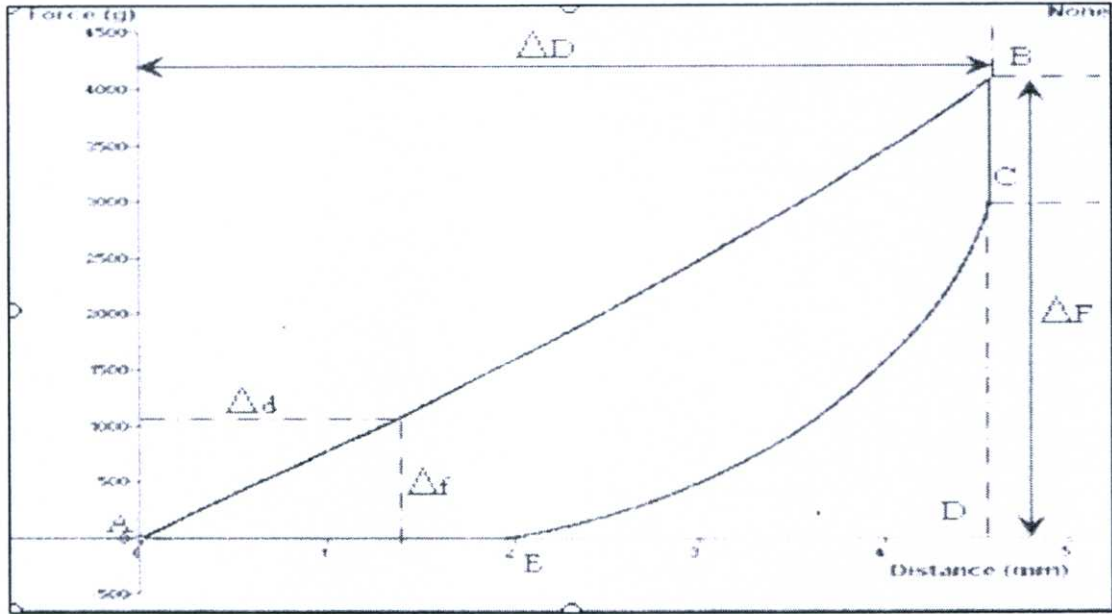
ภาพที่ ค.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทางในการกดที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลจากวิธี Puncture test

สามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้จากสมการดังนี้

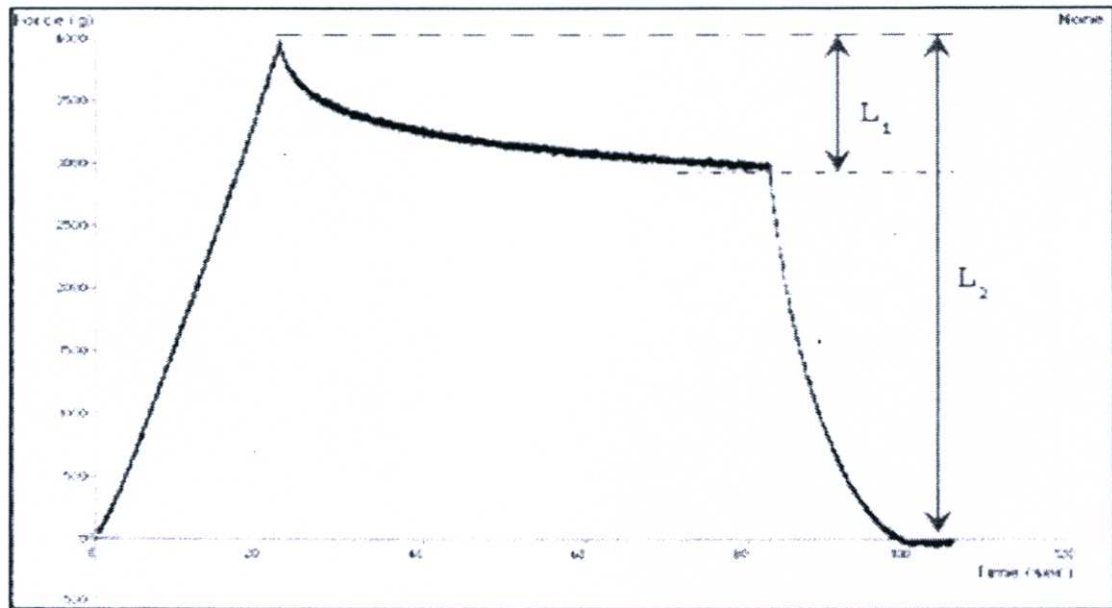
1. ความแน่นเนื้อเริ่มต้น (นิวตัน/มิลลิเมตร) = $\Delta F / \Delta D$
2. ความแน่นเนื้อเฉลี่ย (นิวตัน/มิลลิเมตร) = F_r / D_r
3. แรงที่ทำให้เปลือกทะลุ (นิวตัน) = F_r
4. ความเหนียวของเปลือกส้มโอ (นิวตัน*มิลลิเมตร) = พื้นที่ ABC
5. แรงที่จุดชีวคราก (นิวตัน) = F_B
6. แรงที่ใช้ในการแทงทะลุลงไปในส่วนเปลือกขาวภายในผลส้มโอ (นิวตัน) = ค่าเฉลี่ยของแรงหลังจากจุด F_r
7. พลังงานที่ใช้ในการแทงทะลุลงไปในส่วนเปลือกขาวภายในผลส้มโอ (นิวตัน*มิลลิเมตร) = พื้นที่ $CB_1B_2B_3$
8. แรงที่ทำให้เปลือกเนื้อทะลุ (นิวตัน) = F_r
9. แรงที่ใช้ในการแทงทะลุลงไปในเนื้อส้มโอ (นิวตัน) = ค่าเฉลี่ยของแรงหลังจากจุด F_r
- พลังงานที่ใช้ในการแทงทะลุลงไปในเนื้อ (นิวตัน*มิลลิเมตร) = พื้นที่ DEFG

ค.2 การคำนวณหาค่า Texture ในการทดสอบแบบ Pleat Compression test ของผลส้มโอ

ในการคำนวณหาค่า Texture ในการทดสอบแบบ Pleat Compression test สามารถนำมาหาสมบัติเชิงกลจากภาพที่ ค.2 และ ค.3 ดังนี้



ภาพที่ ค.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทางในการกดที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลจากวิธี Pleat Compression test



ภาพที่ ค.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาในการกดที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลจากวิธี Pleat Compression test

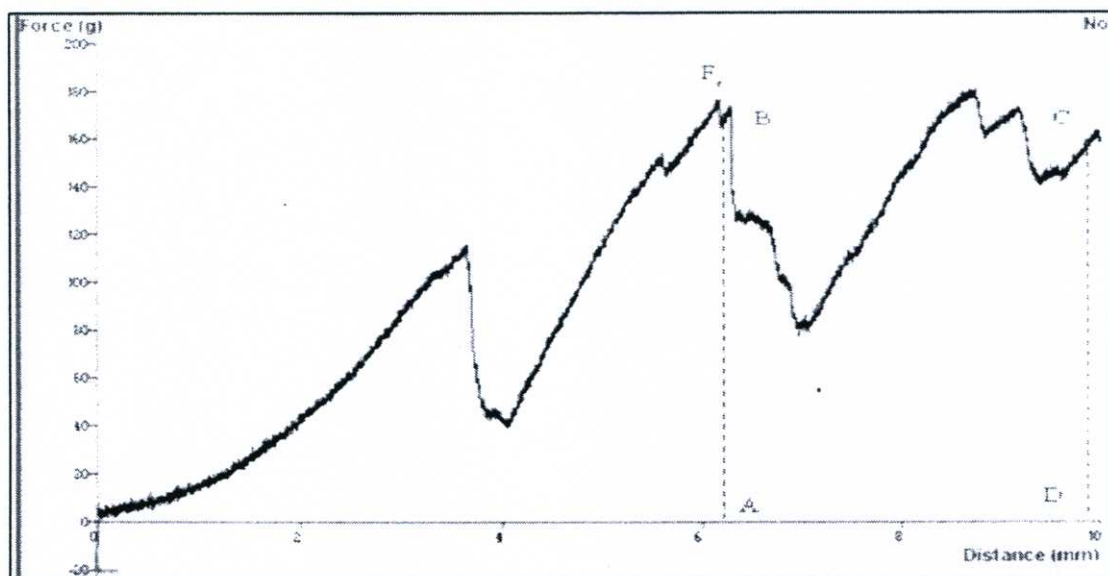
สามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้จากสมการดังนี้

$$1. \text{ความแน่นเนื้อเริ่มต้น (นิวตัน/มิลลิเมตร)} = \Delta f / \Delta d$$

2. ความแน่นเนื้อเฉลี่ย (นิวตัน/มิลลิเมตร) = $\Delta F / \Delta D$
3. การดูดซับพลังงาน (นิวตัน*มิลลิเมตร) = พื้นที่ ABD - พื้นที่ ECD
4. ระดับความยืดหยุ่น (ความสามารถในการคืนรูป) = ED/AD
5. อัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง = AD/ϕ โดยที่ ϕ = เส้นผ่านศูนย์กลางของผลส้มโอ (มิลลิเมตร)

ค.3 การคำนวณหาค่า Texture ในการทดสอบแบบ Puncture test ของเนื้อส้มโอ

ในการคำนวณหาค่า Texture ในการทดสอบแบบ Puncture test สามารถนำมาหาสมบัติเชิงกลจากภาพที่ ค.4 ดังนี้



ภาพที่ ค.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทางในการกดที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเนื้อส้มโอจากวิธี Puncture test

สามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้จากสมการดังนี้

1. แรงที่ทำให้เนื้อส้มโอทะลุ (นิวตัน) = F_r
2. แรงเฉลี่ยที่ใช้ในการแทงทะลุลงไปเนื้อส้มโอ (นิวตัน/มิลลิเมตร) = แรงเฉลี่ยหลังจากจุด F_r
3. ความเหนียวของเนื้อส้มโอ (นิวตัน*มิลลิเมตร) = พื้นที่ ABCD การคลายความเค้น = $L1/L2$

ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ จรูญพงศ์ เทียมประทีป รวิภัทร ตากเจริญสุข จิตรตรา ค้วงช้าง, “คุณภาพของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ”, การประชุมวิชาการ และเสนอผลงานวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 18 ประจำปี 2551, หน้า 27, จังหวัดสงขลา ประเทศไทย, กันยายน 25-26, 2551.
2. Panmanas Sirisomboon, Charoonpong Theamprateep, “Maturity Classification of Kao Nampueng Pomelo Fruit using Visible Range Spectrum”, The 10th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering, “International Conference on Innovations in Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind”, School of Agricultural Engineering, Suranaree University of Technology, pp80-83, Nakhon Ratchasima, Thailand; 1-3 April 2009.



การประชุมวิชาการและแสดงผลงานวิจัย

มหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 18 ประจำปี 2551

การวิจัยกับการแก้ปัญหาวิกฤตชาติ

The 18th Thaksin University Annual Conference : The Research and National Crisis Solutions

วันที่ 25-26 กันยายน 2551

ณ ห้องประชุมภคกร A-B โรงแรมกรีนเวิลด์ พาเลซ อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา

จัดโดย

สถาบันวิจัยและพัฒนา บัณฑิตวิทยาลัย คณะกรรมการกิจกรรมนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา

มหาวิทยาลัยทักษิณ

คุณภาพของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ

Quality of Kao Nampueng Pomelo Pulp at Different Maturity Stages.

ปานมนัส สิริสมบุญ^{1*} จรูญพงศ์ เทียมประทีป² รวีภัทร ลาภเจริญสุข² จิตรตรา ดั่งช้าง²

Panmanas Sirisomboon^{1*} Charoonpong Theamprateep² Rawipat Lapcharensuk² Jitra Duangchang²

บทคัดย่อ

การตรวจวัดสมบัติของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่เปลี่ยนแปลงตามอายุการเก็บเกี่ยว ทดลองกับผลส้มโอที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 180 190 200 210 และ 220 วัน หลังจากดอกบานซึ่งตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเนื้อส้มโออันได้แก่ สี เนื้อสัมผัส ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ของเนื้อส้มโอ พบว่าอายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นเนื้อส้มโอมีสีเข้มขึ้นออกโทนสีชมพู และเนื้อส้มโอนุ่มขึ้น และความเหนียวลดลง แต่เนื้อบริเวณขั้วผลเริ่มแข็งเมื่ออายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น ส่วนค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีค่าลดลงในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 200 และ 210 วัน อาจเกิดจากเป็นช่วงที่มีฝนตกชุก แต่ค่าเพิ่มขึ้นหลังฝนทิ้งช่วงในอายุการเก็บเกี่ยวที่ 220 วัน ตลอดจนปริมาณกรดมีค่าลดลงตามอายุการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น

Abstract

The evaluation of Quality of Kao Nampueng Pomelo Pulp at different maturity was conducted using pomeloes at 180, 190, 200, 210 and 220 days after flower blooming. The change in color, texture, soluble solid and titratable acidity of flesh were evaluated. The results showed that when the maturity stage increased the flesh color was more in pink and the texture was softer and toughness was decreased. However, the flesh near the stem was harder. The soluble solids were decreased at the 200 and 210 days of maturity stages which might be due to heavy rain. It was increased in the 220 day stage of maturity after no rain. The acidity was decreased during increasing of maturity.

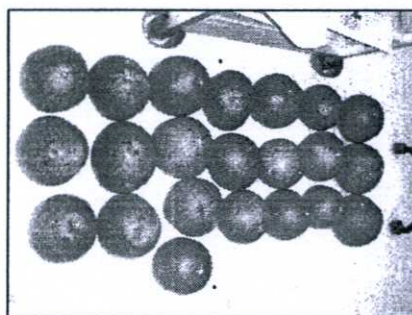
^{1*} รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

² นิสิตบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520

คำนำ

ส้มโอเป็นไม้ผลเศรษฐกิจของไทยอีกชนิดหนึ่งซึ่งชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Citrus maxima* มีชื่อพ้องคือ *C. grandis* ถิ่นกำเนิดอยู่ในแถบ เอเชีย นิยมปลูกแพร่หลายทั่วประเทศ เนื่องจากให้ผลผลิต และผลตอบแทนสูง ตลาดต่างประเทศต้องการมาก มีข้อดี กว่าไม้ผลชนิดอื่นในการส่งออก (ปิยะ เฉลิมกลิ่น, 2551) โดยเฉพาะส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้ง มีรายงานพื้นที่ปลูกในปี 2548 มากกว่า 210,000 ไร่ และมีผลผลิตปีละประมาณ 276,628 ตัน มีการส่งออกประมาณ 6,432 ตัน มูลค่าประมาณ 103 ล้านบาท (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2549) หรือมีมูลค่าโดยรวมประมาณ 4,700 ล้านบาท (กรมศุลกากร, 2549) โดยการเก็บผลส้มโอนั้นเกษตรกรมักสังเกตจากลักษณะ ผิวเปลือกจะเริ่มเปลี่ยนจากสีเขียวเข้ม เป็นสีเขียวอมเหลือง (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2549) หรือนับอายุการเก็บเกี่ยวดอกบานเวลาประมาณ 8 เดือน ทำให้รสชาติของส้มโอไม่แน่นอน อีกทั้งการเก็บเกี่ยวช้าหรือเร็วเกินไปส่งผลกระทบต่อคุณภาพภายในของผลส้มโอ (วิทยา บัวเจริญ, 2546) ซึ่งตัวชี้วัดคุณภาพภายในที่สำคัญของส้มโอ ได้แก่ สี ความหวาน ปริมาณกรด และเนื้อสัมผัสของเนื้อส้มโอ เช่น การศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ และปริมาณกรดของส้ม Florida ตามอายุการเก็บรักษา (Miller and Zude-Sasse, 2004)

ปัจจุบันส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้งเป็นที่ต้องการของต่างประเทศมาก (ปิยะ เฉลิมกลิ่น, 2551) แต่รสชาติไม่สม่ำเสมอที่อาจเกิดจากความอ่อน-แก่ของอายุการเก็บเกี่ยว ทำให้มีการปฏิเสธจากผู้สั่งซื้อต่างประเทศ การส่งกลับ และการกีดกัน ซึ่งผู้สั่งซื้ออ้างว่าไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐานสากล (วิทยา บัวเจริญ, 2546) ดังนั้นการตรวจวัดคุณภาพของเนื้อส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้งที่เปลี่ยนแปลงตามอายุการเก็บเกี่ยว จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการตรวจสอบวัดคุณภาพของผลส้มโอ เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างความมั่นใจให้กับเกษตรกรในการตัดสินใจเก็บเกี่ยวผลส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้งให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค



ภาพที่ 1 สภาพพื้นที่ปลูก และผลส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้งในการทดลอง

อุปกรณ์และวิธีการ

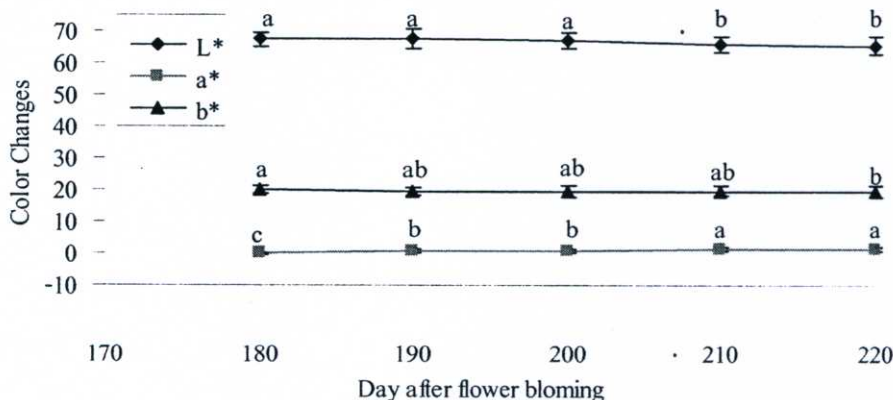
การเตรียมผลส้มโอพันธุ์ชาวน้ำผึ้งเพื่อให้ได้ผลส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ทำโดยนำป้ายพลาสติกผูกติดกับช่อดอกวันที่ดอกบานรวมทั้งหมด 500 ช่อ แล้วปล่อยให้ผลส้มโอเจริญเติบโต ซึ่งเริ่มเก็บผลส้มโอเมื่อผลส้มโอมีอายุการเก็บเกี่ยวที่ 180 190 200 210 และ 220 วัน รวม 5 ครั้งๆ ละ 20 ผล โดยทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อส้มโอ อันได้แก่ สี เนื้อสัมผัส ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ ของเนื้อส้มโอ ซึ่งดำเนินการทดลองดังนี้

1. การวัดสีของเนื้อส้มโอโดยใช้เครื่องวัดสี (Hunter Lab รุ่น Miniscan XE Plus 45/0 LAV Reston, USA.) ในการตรวจวัดสีของเนื้อส้มโอ โดยใช้การวัดแบบ CIELAB ($L^*a^*b^*$)
2. การวัดเนื้อสัมผัสของเนื้อส้มโอโดยใช้เครื่อง Texture Analyzer (Stable Micro System, รุ่น TA.HD. Plus, London, UK) ร่วมกับหัวกดแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. โดยมีความเร็วในการกด 0.2 มม./วินาที แทงลึก 50% ของความหนาของเนื้อส้มโอ
3. การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอ โดยใช้เครื่อง Digital Refractometer (Atago รุ่น PR-32 (0-32%), Japan)
4. การวัดปริมาณกรด ของน้ำส้มโอโดยใช้วิธีการไตเตรทโดยใช้ NaOH 0.1 นอร์มอลไตเตรทจนกระทั่งสมมูลย์ที่ pH เท่ากับ 8.1 แล้วคำนวณปริมาณกรดซัคทริก เนื่องจากในน้ำส้มโอมีปริมาณกรดซัคทริกสูง

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

นำผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง มาหาค่าเฉลี่ยความเบี่ยงมาตรฐาน และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ โดยวิธี Duncan Multiple Range Test แล้วแสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับอายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง ดังนี้

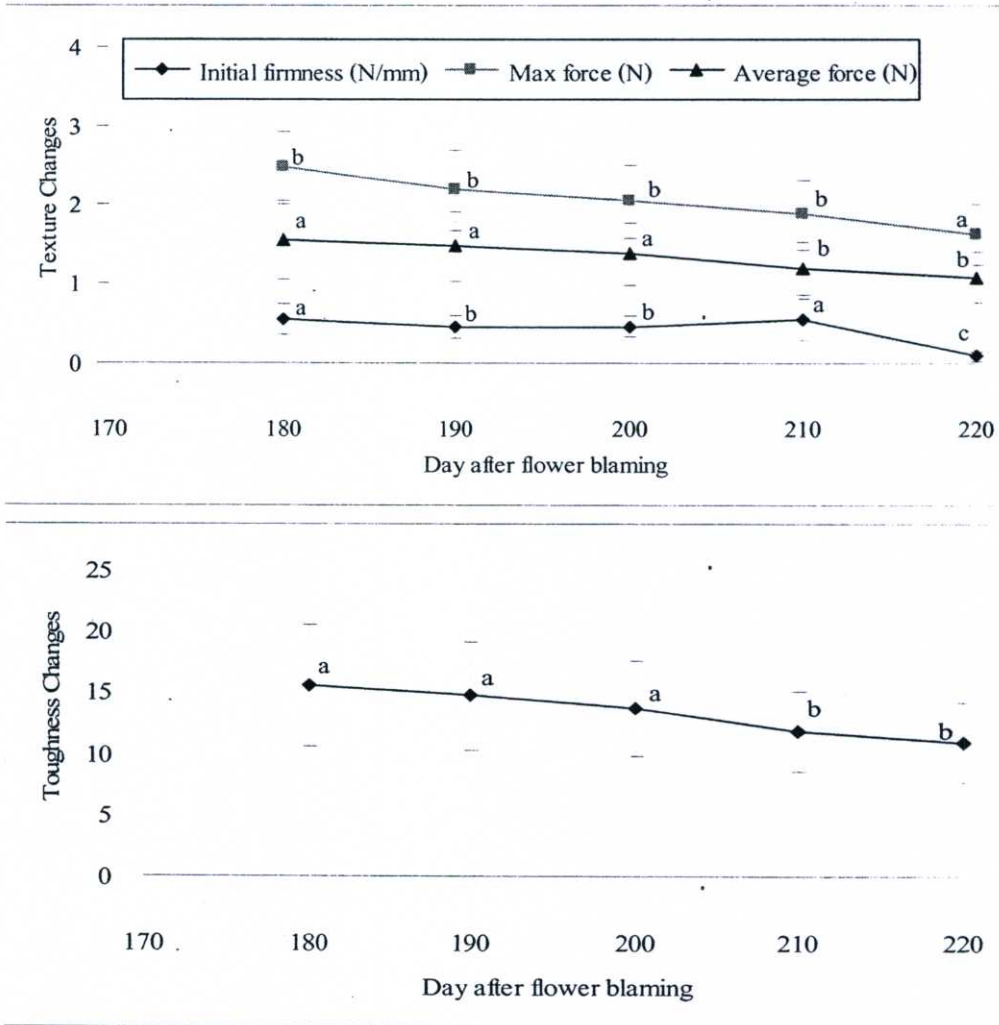
1. ผลการวัดสีของเนื้อส้มโอแต่ละช่วงอายุการเก็บเกี่ยว ในภาพที่ 2 โดยค่า L^* แทนค่าความสว่าง (แถบสีขาวถึงดำ) a^* แทนค่าแถบสีแดงถึงเขียว และ b^* แทนแถบค่าสีเหลืองถึงน้ำเงิน พบว่า ผลส้มโอมีอายุการเก็บเกี่ยวมากขึ้นค่า L^* และ b^* ลดลงอย่างช้าๆ แสดงว่าเนื้อส้มโอมีสีเข้มขึ้น โดยมีพบความแตกต่างอย่างนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ในค่า L^* ที่อายุการเก็บเกี่ยว 180, 190 และ 200 วัน ต่างกับอายุการเก็บเกี่ยว 210 และ 220 วัน และในค่า b^* ที่อายุการเก็บเกี่ยว 180 วัน กับอายุการเก็บเกี่ยว 220 วัน ต่างกับค่า a^* ที่อายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าเนื้อส้มโอมีสีแดงขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างอย่างนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ที่ช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 180 วัน กับ 190 วัน และ 210 220 วัน



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อส้มโอตามอายุการเก็บเกี่ยว

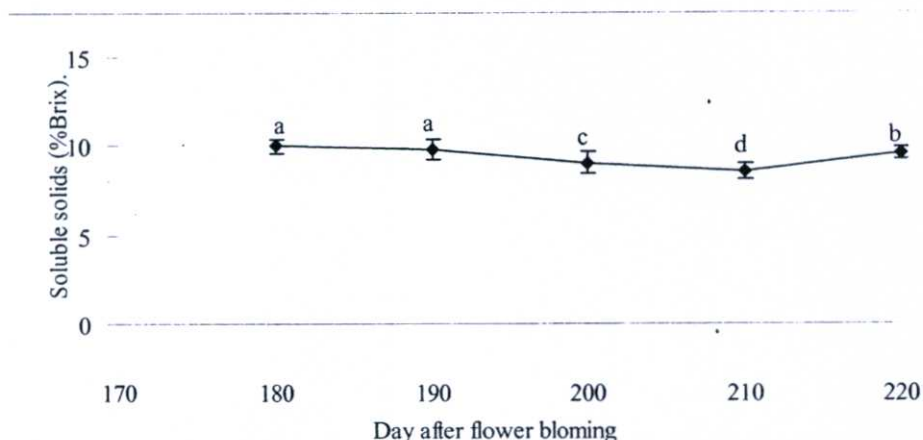
2. ผลการวัดเนื้อสัมผัสของเนื้อส้มโอแต่ละช่วงอายุการเก็บเกี่ยว ในภาพที่ 3 พบว่าทุกค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ โดยค่า Initial firmness ลดลงแสดงว่าความแน่นเนื้อเริ่มต้นของเนื้อส้มโอลดลง

เช่นเดียวกับค่า แรงด้านการแทงทะลุ (Max force) และ แรงด้านทานเฉลี่ย (Average force) ลดลง แสดงว่าเนื้อส้มโอนุ่มขึ้น และ ค่า ความเหนียว (Toughness) ซึ่งหมายถึงพลังงานที่ใช้ในการตัดเนื้อส้มโอให้ขาด แสดงว่าเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งมีความเหนียวลดลง เมื่ออายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น แต่จากการสังเกตอายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นเนื้อส้มโอบริเวณซั้วผลเริ่มแข็ง และแห้งกรอบในช่วงอายุหลังๆ



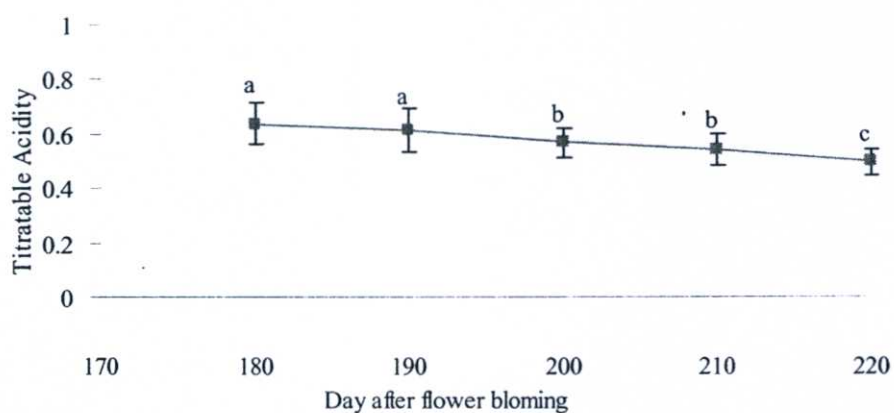
ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของเนื้อส้มโอตามอายุการเก็บเกี่ยว

3. ผลการวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอแต่ละช่วงอายุการเก็บเกี่ยว ในภาพที่ 4 พบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายในช่วงอายุการเก็บเกี่ยวที่ 180 และ 190 วัน ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P > 0.05$ ซึ่งในช่วงอายุการเก็บเกี่ยวที่ 200 และ 210 มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P > 0.05$ คาดว่าเกิดจากสภาวะอากาศในพื้นที่สวนส้มโอที่มีฝนตกชุก ทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอลดลง ต่างกับอายุการเก็บเกี่ยวที่ 220 วัน ซึ่งไม่มีฝนตก ทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P > 0.05$



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำส้มโอตามอายุการเก็บเกี่ยว

4. ผลการวัดปริมาณกรด จากปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ของน้ำส้มโอแต่ละช่วงอายุการเก็บเกี่ยว ในภาพที่ 5 พบว่าปริมาณกรดลดลงตามอายุการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P > 0.05$ โดยค่าการลดลงของปริมาณกรดสังเกตเห็นได้ชัดช่วงอายุการเก็บเกี่ยวทุกๆ 20 วัน ได้แก่อายุการเก็บเกี่ยวที่ 180 กับ 200 วัน และ 200 กับ 220 วัน



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ของน้ำส้มโอตามอายุการเก็บเกี่ยว

สรุปผลการวิจัย

การวัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งตามอายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ แสดงให้เห็นว่ายิ่งอายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นเนื้อส้มโอมีสีเข้มขึ้นออกสีชมพู และมีความแน่นเนื้อเริ่มต้นลดลง เช่นเดียวกับแรงต้านการแทงทะลุกับแรงต้านทานเฉลี่ยลดลง สอดคล้องกับพลังงานที่ใช้ในการตัดเนื้อส้มโอให้ขาดที่มีค่าลดลงเช่นกัน แสดงว่าเนื้อส้มโอนุ่มขึ้น และความเหนียวลดลง แต่เนื้อบริเวณขั้วผลเริ่มแข็งเมื่ออายุการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น ส่วนค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้มีค่าลดลงในช่วงอายุการเก็บเกี่ยว 200 และ 210 วัน อาจเกิดจากเป็นช่วงที่มีฝนตกชุก โดยจากการลองชิมปรากฏเนื้อส้มโอมีรสชาติดีกว่าช่วงแรก แต่ค่าเพิ่มขึ้นหลังฝนทิ้งช่วงในอายุการเก็บเกี่ยวที่ 220 วัน ทำให้ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณกรดมีค่าลดลงตามอายุการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

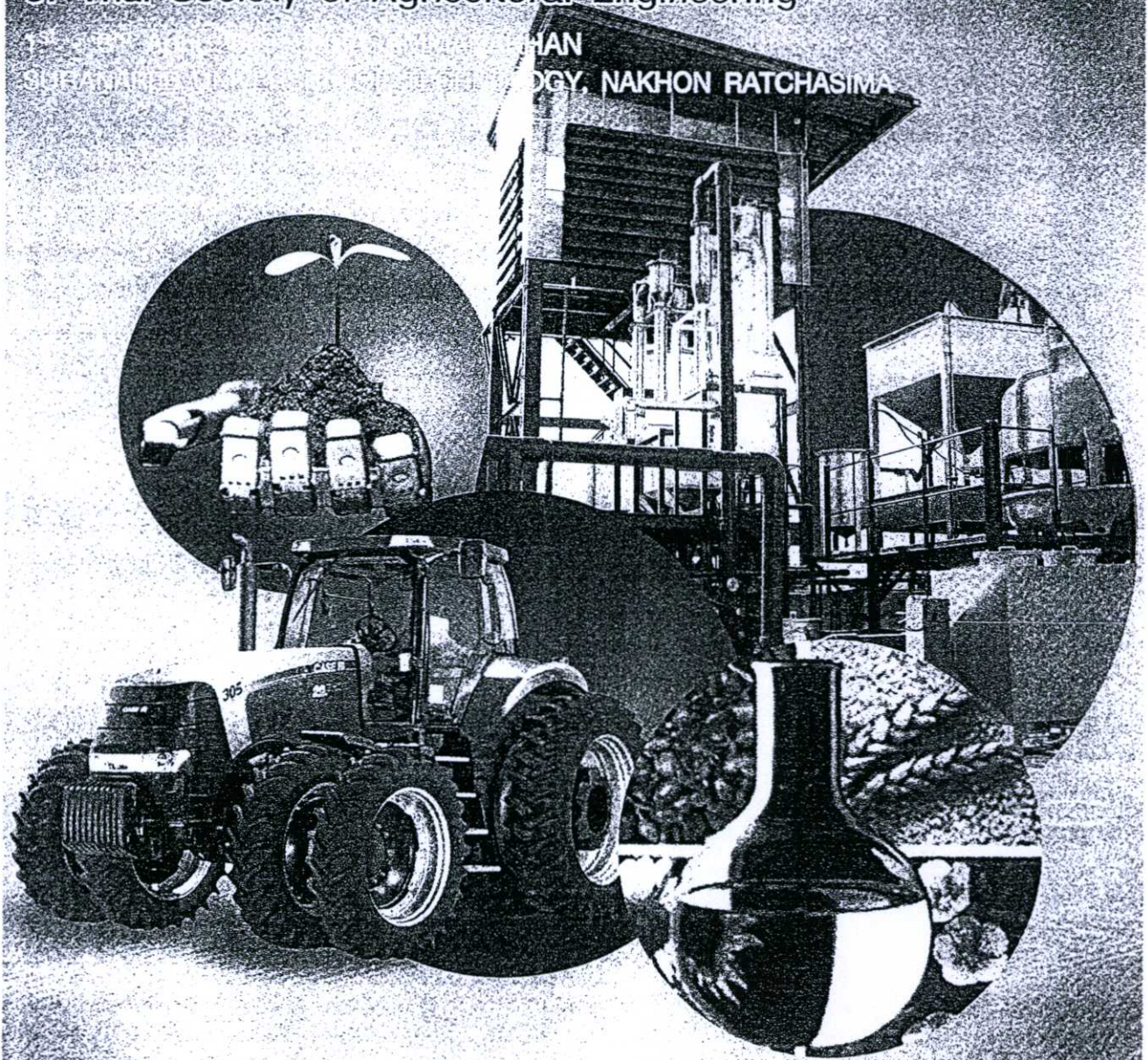
- กรมศุลกากร. 2549. สถิติการนำเข้าส่งออก. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.customs.go.th/Staistic/StatisticIndex.jsp>.
- กรมส่งเสริมการเกษตร. 2549. สถานการณ์ส้มโอ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.doae.go.th/plant/orange.html>.
- ปิยะ เฉลิมกลิ่น. 2551. ส้มโอ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.tistr.or.th/t/publication/page_area_show_bc.asp?i1=65&i2=29
- วิทยา บัวเจริญ. 2546. “คุณภาพไม้ผลของประเทศไทย.” หน้า 31-35. ใน รวบรวบบทความคุณภาพและมาตรฐานทางการเกษตร. กรุงเทพฯ : คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ระบุชื่อ 2551. ส้มโอไม้ผลเศรษฐกิจ. ผลผลิตและการเก็บเกี่ยว. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://web.ku.ac.th/agri/somo2/so0.htm>
- Miller, W. M. and Zude-Sasse, M. 2004. NIR-Based Sensing to Measure Soluble Solids Content of Florida Citrus. *Applied Engineering in Agriculture*. (20). pp.321-327



The 10th Annual Conference

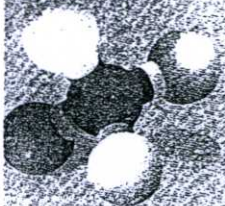
of Thai Society of Agricultural Engineering

13-15 November 2010, SUKHUMVITRAJITRAHAN
SUKHUMVITRAJITRAHAN UNIVERSITY, NAKHON RATCHASIMA



INNOVATIONS

in Agricultural, Food and Renewable Energy
Productions for Mankind



Maturity Classification of Kao Nampueng Pomelo Fruit using Visible Range Spectrum

Panmanas Sirisomboon¹, Charoonpong Theamprateep^{*2}

Abstract

The objective of this study was to classify the maturity of Kao Nampueng Pomelo Fruit using visible range (400-700 nm) reflectance spectrum. The intact pomelo fruit was scanned by spectrophotometer. The maturity studied was 180, 190, 200 (commercial harvesting date), 210 and 220 days after flower blooming. The classification models were developed by Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) and Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) using raw spectra and pretreated spectra including Multiplicative Scatter Correction (MSC) and Savitzky-Golay second derivative. The result showed that the model developed by SIMCA using MSC pretreated spectra could predict the maturity group which was the same as model with the highest correctness of 89.07%. The model developed by second derivative spectra could predict the maturity group which was different from group of the model with the highest correctness of only 42.82%. The model developed by PLS-DA using raw spectra could predict the maturity group which was the same as group of the model with the highest correctness of only 64.67%. The model developed by MSC pretreated spectra could predict the maturity group which was different from group of the model with the highest correctness of 96.67%. The classification method that was suitable in predicting the maturity of Kao Nampueng Pomelo, which was the same group as group of the model, was SIMCA using MSC pretreated spectra. The PLS-DA using MSC pretreated spectra was suitable for predicting the maturity group which was different from group of the model. However, the spectra in visible range could not clearly classify the maturity of Kao Nampueng Pomelo by both methods.

[Keywords] Classification, Maturity, Pomelo, Kao Nampueng, visible range, SIMCA, PLS-DA

I Introduction

Pomelo (*Citrus maxima*) is one of the economical fruit of Thailand. It is grown all over the country because of high yield and high revenue. It is popular in foreign market due to its good taste, thick peel that could protect it from bruise and moisture lost. Kao Num Peung variety pomelo is highly exported (Chaloemkin, 2008) of 11,217.789 ton or 109,218,666 Baht in 2008 (Customs Department, 2009),

To harvest pomeloes, farmers make decision by observing the color of the peel which is turning from green to yellow green (Department of Agricultural Extension, 2006) or by count the date after flower blooming for approximately 8 months. This makes the taste not certain and to harvest too late or too fast affects the internal quality of pomeloes (Buacharoen, 2003). The internal quality indices of pomelo flesh are color, soluble solids (sweetness), acidity and texture. The methods to evaluate the indices are destructive methods which consume times and experts. The external quality indices are such as peel color, density and size of oil gland on the peel which needed high experience in identifying. This research was aimed to apply Soft

Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) and Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) to classify the maturity of pomeloes using the characteristic of visible reflectance spectra (400-700 nm) of intact pomeloes at different maturities. The spectra were obtained from spectrophotometer which is nondestructive method

II Materials and methods

2.1 Samples

The 500 pomeloes (*Citrus maxima* cv. Kao Num Peung) blossoms of fruit were individually tagged on the blooming day and harvested at after 180, 190, 200 (commercial harvesting date), 210 and 220 days for 25 fruits at each harvesting date.

2.2 Spectral acquisition

Visible reflectance spectrum (400-700 nm) of intact pomelo at different maturities were obtained by spectrophotometer (Hunter Lab, Miniscan XE Plus 45/0 LAV, Reston, USA) (Fig. 1 a). Each fruit was scanned at 5 different positions and 3 times at each position (Fig. 1 b).

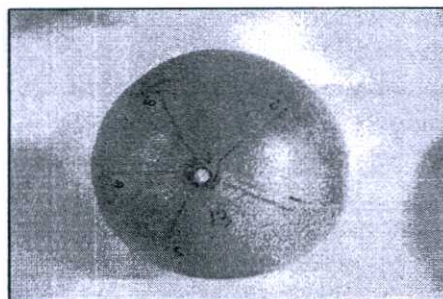
* Corresponding author, Tel.: 0-89170-6028; E-mail address: s9061253@hotmail.com

¹ Associate Professor Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkabang, Bangkok, 10520, Thailand

² Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkabang, Bangkok, 10520, Thailand



a



b

Fig. 1 (a) Scanning of intact pomelo by spectrophotometer
 (b) Positions of scanning

2.3 Pretreatment of spectra

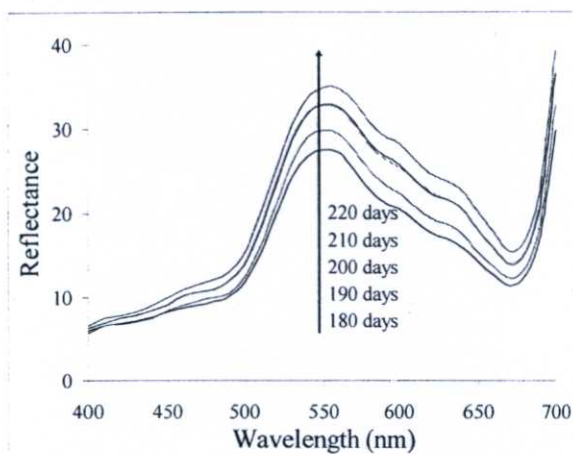
The raw spectra from scanning were pretreated by Multiplicative Scatter Correction (MSC) and Savitzky-Golay second differentiation with two different derivative segments, 10 and 20 nm, with polynomial order of 2 using Unscrambler 9.8[®] (CAMO, Oslo, Norway). Multiplicative Scatter Correction is a specific transformation for spectra. It consists in fitting a separate regression line to each sample spectrum expressed as a function of the average value for each wavelength; the a and b coefficients of that regression line are then used to correct the values of each sample (Camo AS, 1996). The a and b is coefficients of that regression line MSC rotates each spectrum to be fitted as closely as possible to mean/model spectrum, and corrects spectra for spectral noise and background effects which cause baseline shifting and tilting. Savitzky-Golay second differentiation computes derivatives of second order, based on a polynomial approximation of a portion of the curve. It removes the effect of baseline shift.

2.4 Classification models

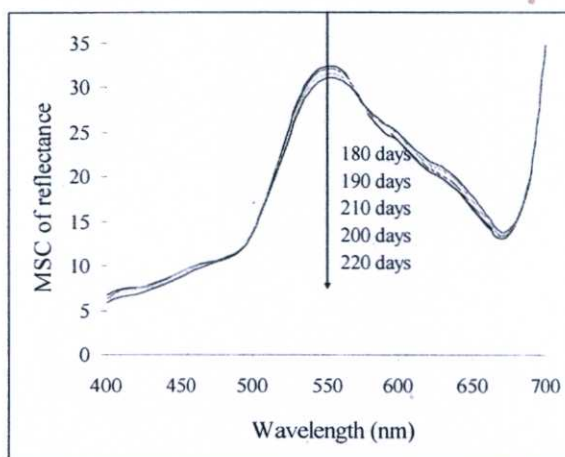
The Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) and Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) performed by Unscrambler 9.8[®] (CAMO, Oslo, Norway), were used to developed the classifying models for the maturities of pomeloes.

III Results and Discussion

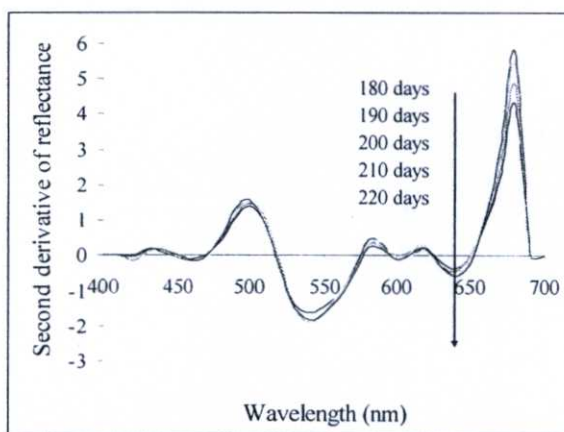
3.1 Average reflectance spectra



a



b



c

Fig. 2 Average reflectance spectra in visible range of intact pomeloes at different maturities (a) raw spectra (b) MSC spectra (c) second derivative spectra

Fig. 2 shows average reflectance spectra in visible range of intact pomeloes at different

maturities (a) raw spectra (b) MSC spectra (c) second derivative spectra. The green color reflectance peak was obviously seen at around 540 nm. The MSC pretreatment could remove the effect of baseline shift and tilting of the raw spectra, while the second derivative pretreatment could remove the base line shift and more reflectance peaks were appealed.

3.2 Result from SIMCA

Table 1 shows the result of pomelo maturity classification by SIMCA. It shows that the model of 180 days after flower blooming developed from MSC spectra had the best performance in self-classification with 98.33 % correctness. The model of 180 days from Savitzky-Golay second differentiation (10 nm derivative segments) pretreatment spectra showed the highest performance in other group classification which led it to be the highest performance in overall classification with 71.85 % of correctness. Among the pretreatment methods, the MSC could improve the performance of self-classification the best. It provided 89.07 % correctness. For prediction of other groups, the model developed from Savitzky-Golay second differentiation (10 nm derivative segments) showed the best performance with 42.82 % correctness.

3.3 Result from PLS-DA

Table 2 shows the result of pomelo maturity classification by PLS-DA. The PLS-DA showed higher overall performance than SIMCA, though it had lower performance in self-prediction. It shows that the model of 210 days after flower blooming developed from raw spectra had the best performance in self-classification with 92.00% correctness. The model of 180 days from MSC pretreatment spectra showed the highest performance in other group classification (100% correctness) which led it to be the highest performance in overall classification with 95.19 % of correctness. The pretreatment methods

could not improve the performance of self-classification, therefore the model from raw spectra showed the best performance. It provided 64.67 % correctness. For prediction of other groups, the model developed from MSC showed the best performance with 96.67 % correctness.

IV Conclusion

The models developed by MSC spectra using Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA) and Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) were recommended for self-classification and for other group classification, respectively. However, the SIMCA and PLS-DA could not clearly classify the maturity of Kao Num Peung pomeloes using the characteristic of visible spectra (400-700 nm) of intact pomeloes at different maturities.

References

- Buacharoen, V., 2003. Quality of fruits in Thailand. In "Collection of qualified and standard articles in agriculture" Faculty of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. p. 31-35. (in Thai).
- Camo, 1996. The Unscrambler 6.0 User's Guide. p 328.
- Chaloemkin, P. 2008. Pummelo (in Thai) [Online]. Accessed from: http://www.tistr.or.th/t/publication/page_area_show_bc.asp?i1=65&i2=29
- Customs Department. 2009. Import - Export Statistics. [Online] Accessed from: <http://www.customs.go.th/Statistic/StatisticResult2550.jsp?page=1&statType=export&month=12&year=2008&productCodeCheck=Y&productCode=08054000001&countryCheck=null&country=>
- Department of Agricultural Extension, 2006. Pomelo situation. (in Thai) [Online] Accessed from: <http://www.doae.go.th/plant/orange.html>

Table 1 Result of pomelo maturity classification by SIMCA

Pretreated spectra	Pod group	No. of pod for prediction		Model					same as model	different from the model
				180	190	200	210	220		
raw spectra	180	60	No. of pods of correct classification	95.00	5.00	10.00	15.00	36.67	95.00	16.67
	190	60		38.33	90.00	11.67	6.67	18.33	90.00	18.75
	200	50		58.00	34.00	72.00	20.00	22.00	72.00	33.50
	210	50		52.00	34.00	28.00	90.00	22.00	90.00	34.00
	220	50		74.00	46.00	46.00	2.00	90.00	90.00	42.00
	Total	270	%Correct	63.70	42.22	31.85	25.56	37.04	87.40	28.98

Table 1 Result of pomelo maturity classification by SIMCA (continue)

Pretreated spectra	Pod group	No. of pod for prediction		Model					same as model	different from the model
Multiplicative Scatter Correction (MSC)	180	60	No. of pods of correct classification	98.33	5.00	40.00	23.33	76.67	98.33	36.25
	190	60		20.00	95.00	35.00	16.67	65.00	95.00	34.17
	200	50		18.00	12.00	78.00	10.00	34.00	78.00	18.50
	210	50		46.00	34.00	50.00	90.00	48.00	90.00	44.50
	220	50		28.00	20.00	46.00	4.00	84.00	84.00	24.50
	Total	270	% Correct	43.33	34.44	48.89	28.15	62.22	89.07	31.58
Savitzky-Golay second differentiation (5,5)	180	60	No. of pods of correct classification	90.00	3.33	18.33	13.33	43.33	90.00	19.58
	190	60		53.33	80.00	31.67	18.33	16.67	80.00	30.00
	200	50		52.00	30.00	62.00	54.00	32.00	62.00	42.00
	210	50		76.00	54.00	66.00	76.00	30.00	76.00	56.50
	220	50		88.00	60.00	86.00	30.00	90.00	90.00	66.00
	Total	270	% Correct	71.85	45.19	50.74	36.67	41.48	79.60	42.82
Savitzky-Golay second differentiation (10,10)	180	60	No. of pods of correct classification	90.00	10.00	15.00	15.00	61.67	90.00	25.42
	190	60		36.67	86.67	11.67	0.00	30.00	86.67	19.58
	200	50		56.00	30.00	66.00	16.00	18.00	66.00	30.00
	210	50		62.00	48.00	36.00	86.00	28.00	86.00	43.50
	220	50		72.00	42.00	46.00	6.00	86.00	86.00	41.50
	Total	270	% Correct	63.33	43.70	33.33	23.33	44.81	82.93	32.00

Table 2 Result of pomelo maturity classification by PLS-DA

pretreated spectra	Pod group	No. of pod for prediction		Model					same as model	different from the model
				180	190	200	210	220		
raw spectra	180	60	No. of pods of correct classification	65.00	100.00	100.00	98.33	100.00	65.00	99.58
	190	60		100.00	48.33	98.33	91.67	95.00	48.33	96.25
	200	50		100.00	92.00	48.00	76.00	98.00	48.00	91.50
	210	50		96.00	92.00	96.00	92.00	94.00	92.00	94.50
	220	50		100.00	96.00	100.00	70.00	70.00	70.00	91.50
	Total	270	% Correct	91.48	84.81	89.26	86.30	91.85	64.67	94.67
Multiplicative Scatter Correction	180	60	No. of pods of correct classification	78.33	98.33	100.00	100.00	100.00	78.33	99.58
	190	60		100.00	38.33	98.33	98.33	98.33	38.33	98.75
	200	50		100.00	90.00	30.00	98.00	98.00	30.00	96.50
	210	50		100.00	82.00	96.00	20.00	82.00	20.00	90.00
	220	50		100.00	100.00	100.00	94.00	38.00	38.00	98.50
	Total	270	% Correct	95.19	80.74	85.93	83.33	84.44	40.93	96.67
Savitzky-Golay second differentiation (5,5)	180	60	No. of pods of correct classification	0.00	100.00	100.00	100.00	98.33	0.00	99.58
	190	60		98.33	1.67	100.00	96.67	85.00	1.67	95.00
	200	50		98.00	100.00	38.00	96.00	82.00	38.00	94.00
	210	50		82.00	98.00	96.00	34.00	56.00	34.00	83.00
	220	50		62.00	100.00	100.00	76.00	70.00	70.00	84.50
	Total	270	% Correct	66.67	77.78	87.78	81.85	79.26	28.73	91.22
Savitzky-Golay second differentiation (10,10)	180	60	No. of pods of correct classification	66.67	100.00	100.00	100.00	100.00	66.67	100.00
	190	60		98.33	0.00	96.67	100.00	93.33	0.00	97.08
	200	50		100.00	100.00	32.00	100.00	90.00	32.00	97.50
	210	50		94.00	100.00	100.00	18.00	68.00	18.00	90.50
	220	50		100.00	100.00	100.00	82.00	30.00	30.00	95.50
	Total	270	% Correct	91.11	77.78	86.67	81.48	77.78	29.33	96.12

ประวัติผู้เขียน

1. ชื่อ นาย จรุงพงษ์ เทียมประทีป

2. หน่วยงานที่สังกัด และที่อยู่ติดต่อได้สะดวก

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขต ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

3. ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2544 – 2545 อนุปริญญา (อ.วท.เทคโนโลยีการเกษตร)

สถาบันราชภัฏสุราษฎร์ธานี

พ.ศ.2546 – 2547 ปริญญาตรี (วท.บ.พัฒนาการเกษตร)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549 - 2552 ปริญญาโท (วศ.ม.วิศวกรรมเกษตร)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

4 ประสบการณ์ทำงานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

1. การศึกษาการเผาถ่านกะลามะพร้าวในถังน้ำมันแบบกึ่งต่อเนื่อง. 2548. (หัวหน้าโครงการ)

จรุงพงษ์ เทียมประทีป, ลือพงษ์ ลือนาม. 2549. การศึกษาดันแบบเตาเผาถ่าน
กะลามะพร้าวโดยการเผาแบบกึ่งต่อเนื่อง. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. สถาบันเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ. หน้า 36-41. (นำเสนอผลงาน)

2. โครงการวิจัยพัฒนาเตาเผาถ่านและการผลิตถ่านซังข้าวโพดในระดับเกษตรกร. 2549.

(ผู้ช่วยนักวิจัย)

ลือพงษ์ ลือนาม, จรุงพงษ์ เทียมประทีป. 2550. การวิจัยพัฒนาเตาดันแบบเผาถ่าน
ซังข้าวโพด. รายงานการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8 ณ
โรงแรมโซฟิเทล ราชออรัลคิด ขอนแก่น. หน้า 199.

3. โครงการศึกษาการเก็บเกี่ยวมันสำปะหลังในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. 2549. (ผู้ช่วยนักวิจัย)

4. โครงการศึกษาและพัฒนาเครื่องขุดมันสำปะหลังสำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. 2549. (ผู้ช่วย
นักวิจัย)

5. โครงการศึกษาการผลิตน้ำส้มควันไม้จากเปลือกทุเรียน. 2550. (ผู้ช่วยนักวิจัย)

6. โครงการศึกษาการผลิตน้ำส้มควันไม้จากไม้มะม่วง. 2550. (ผู้ช่วยนักวิจัย)