



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

ปริญญา

วิศวกรรมเกษตร	วิศวกรรมเกษตร
สาขา	ภาควิชา
เรื่อง	การศึกษาการตรวจสอบคุณภาพภายในผลส้มโอด้วยเทคนิคแบบไม่ทำลาย
	Study of Determination of Internal Quality of Pummelo Using Non-Destructive Techniques
نامผู้วิจัย	นายอาทิตย์ พวงสมบัติ
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, Ph.D.)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	(รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, Ph.D.)
หัวหน้าภาควิชา	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภรต กุญชร ณ อยุธยา, M.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการตรวจสอบคุณภาพภายในผลส้มโอด้วยเทคนิคแบบไม่ทำลาย

Study of Determination of Internal Quality of Pummelo Using Non-Destructive
Techniques

โดย

นายอาทิตย์ พวงสมบัติ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อาทิตย์ พวงสมบัติ 2556: การศึกษาการตรวจสอบคุณภาพภายในผลส้มโอด้วยเทคนิคแบบไม่ทำลาย ปรินญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สาขาวิศวกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, Ph.D. 150 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหาความบริสุทธิ์ของส้มโอพันธุ์ขาวทองดี ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติแบบหลายตัวแปร โดยอาศัยตัวแปรทางกายภาพและเคมี ในการทดลองใช้ส้มโอจำนวน 4 ช่วงอายุคือ ช่วงอายุที่เริ่มเก็บเกี่ยว, ช่วงอายุที่เริ่มสุกพร้อมบริโภค, ช่วงอายุที่สุกพร้อมบริโภค และ ช่วงอายุที่เริ่มแก่และเนื้อเริ่มเกิดอาการเป็นข้าวสาร ซึ่งการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Discriminant analysis สามารถจำแนกช่วงความบริสุทธิ์ได้แม่นยำที่ 85.0 เปอร์เซ็นต์โดยใช้ตัวแปรทั้งหมด และใช้ตัวแปรแบบไม่ทำลายมีความถูกต้องของการจำแนกช่วงความบริสุทธิ์อยู่ที่ 80.0% และในการสร้างสมการทำนายความบริสุทธิ์ด้วยวิธี Partial least squares regression โดยใช้ค่า Soluble solid contents (SSC) / Titratable acidity (TA) เป็นตัวแทนความบริสุทธิ์ ซึ่งในการใช้ตัวแปรทั้งหมดและตัวแปรแบบไม่ทำลายมีค่าความแม่นยำในการทำนายไม่แตกต่างกัน และคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติ f_3 เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญสูงที่สุดในการสร้างสมการทั้งแบบจำแนกความบริสุทธิ์ของส้มโอและทำนายความบริสุทธิ์ของส้มโอ

การใช้เทคนิค Vis/NIR spectroscopy ในการวัดแบบส่งผ่านตัวอย่างเพื่อทำนายค่า SSC และ ค่า TA ภายในของส้มโอตัดแต่งสดพร้อมบริโภคพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง โดยสร้างสมการทำนายค่าแบบ Partial least squares regression รวมทั้งทำการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Pre-processing แบบต่างๆ และการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับค่าที่สนใจด้วยวิธี Interval partial least-squares regression (iPLS) เพื่อให้สมการมีความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งพบว่าสามารถทำนายค่า SSC มีความแม่นยำที่ค่า $r=0.825$ $RMSEP=0.543$ °Brix โดยการปรับแต่งสเปกตรัมแบบ Standard normal variate และในกรณีของค่า TA การเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี iPLS ช่วยในการทำนายค่า TA ให้ดีขึ้นเล็กน้อยที่ค่า $r=0.744$ $RMSEP=0.093\%$ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิค Vis/NIR spectroscopy ร่วมกับกระบวนการ Pre-processing ในการทำนายค่า SSC และ ค่า TA ภายในของส้มโอตัดแต่งสดพร้อมบริโภค

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Arthit Puangsombut 2013: Study of Determination of Internal Quality of Pummelo Using Non-Destructive Techniques. Doctoral of Engineering (Agricultural Engineering), Major Field: Agricultural Engineering, Department of Agricultural Engineering. Thesis Advisor: MR. Siwalak Pathaveerut, Ph.D. 150 pages.

The present study reports the use of multivariate data analysis in combining physical and chemical properties for qualitative and quantitative evaluation of pummelo maturity. Pummelos of “Thong Dee” variety were harvested at four stages of maturity: immature, early mature, late mature and over-mature. The categories of maturity were classified with discriminant analyses on all variables and only nondestructive variables. The accuracy of classification using nondestructive variables (80.0%) was comparable to that using all variables (85.0%). For the estimation of the ratio of soluble solids content to acidity designated as a maturity measure, partial least squares regression models were developed based on either all remaining variables or nondestructive variables. The predictive performances by the two models were not significantly different. The acoustic response characterized by the third resonant frequency was shown to be the most important variable in qualitative and quantitative assessment of pummelo maturity.

Nondestructive techniques based on visible and near-infrared (Vis/NIR) spectroscopy were used for evaluation of the internal quality of fresh-cut Kao Numpung pummelo. The objectives of the study were to investigate the feasibility of using Vis/NIR spectroscopic devices in transmission mode to predict the soluble solids content (SSC) and total acidity (TA) of fresh-cut Kao Numpung pummelo. The determination of SSC and TA could be successfully performed through Vis/NIR spectroscopy using partial least squares regression. Preprocessing methods and interval partial least squares (iPLS) algorithms were analyzed. The optimal SSC model was established by standard normal variate transformation ($r=0.825$ RMSEP=0.543°Brix). The TA prediction model could be simplified by iPLS regression ($r=0.744$ RMSEP=0.093%). The results indicated that Vis/NIR spectrophotometry in combination with preprocessing techniques can be applied to predict the soluble solids and total acidity of fresh-cut Kao Numpung pummelo.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ อาจารย์ ผศ.ดร. ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในการค้นคว้าและวิจัย ตลอดจนการให้คำปรึกษา และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล ที่กรุณาให้คำปรึกษา ตลอดจนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ขอขอบคุณคณะบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนงบประมาณวิจัย ขอขอบพระคุณ โครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อการผลิตและพัฒนา อาจารย์ในสถาบันอุดมศึกษา สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาที่กรุณาสับสนุนทุนการศึกษา และงบประมาณวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ น้อง เพื่อนๆ และคุณแก้วกานต์ พวงสมบัติที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ชี้แนะ และให้การสนับสนุนจนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

อาทิตย์ พวงสมบัติ

พฤษภาคม 2556

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(10)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	49
อุปกรณ์	49
วิธีการ	50
ผลและวิจารณ์	57
สรุปและข้อเสนอแนะ	95
สรุป	95
ข้อเสนอแนะ	97
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	98
ภาคผนวก	108
ภาคผนวก ก	109
ภาคผนวก ข	142

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การแบ่งชั้น (Grading) ส้มโอสำหรับการส่งออก	8
2	ขนาดของส้มโอพันธุ์ทองดี	21
3	ขนาดของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งและขาวแตงกวา	21
4	ช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด	31
5	ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบภายในอาหารกับช่วงอินฟราเรด	35
6	ค่าอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (H/W) และ อัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตร (SG) ของส้มโอทั้ง 4 ช่วงอายุ	58
7	ค่าปริมาณกรดทั้งหมด (TA) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (SSC) และอัตราส่วนค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ต่อ ปริมาณกรดทั้งหมด (SSC/TA) ของส้มโอทั้ง 4 ช่วงอายุ	58
8	ค่า Elasticity ของเปลือกส้มโอด้วยวิธีทดสอบหาคุนสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกล (A/t) และ เครื่อง Universal testing machine (F/D)	60
9	ค่าดัชนีความแน่นเนื้อของเปลือกจากการทดสอบหาคุนสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกล (A/T) ที่ตำแหน่งต่างๆ ของส้มโอทั้ง 4 ช่วงอายุ	60
10	การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มด้วยวิธี Discriminant analysis ในการทดสอบหาคุนสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกล และตำแหน่งการวัดที่เหมาะสม	61
11	การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มอายุด้วยวิธี Discriminant analysis แบบ Cross-Validated โดยใช้ข้อมูลคุนสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกลจากตำแหน่ง 5-8	61
12	ค่าดัชนีความแน่นเนื้อของเปลือกด้วยคุนสมบัติการตอบสนองการถูกกดอัดเชิงกล (F/D) ที่ตำแหน่งต่างๆ ของส้มโอทั้ง 4 ช่วงอายุ	62
13	ค่าจากการทดสอบแบบจำแนกกลุ่มด้วยวิธี Discriminant analysis ในการทดสอบด้วยคุนสมบัติการตอบสนองการถูกกดอัดเชิงกล และ สมบัติทางกายภาพ	63
14	การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มอายุด้วยวิธี Discriminant analysis แบบ Cross-Validated ในการทดสอบด้วยคุนสมบัติการตอบสนองการถูกกดอัดเชิงกล และ สมบัติทางกายภาพจากตำแหน่ง 1-4	63
15	ตารางค่าความหนาของเปลือกส้มโอ	64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	ค่าความถี่ที่ 1 จากการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติของส้อมโอของส้อมโอทั้ง 4 ช่วงอายุ ในตำแหน่งทดสอบที่ต่างกัน	66
17	ค่าความถี่ที่ 2 จากการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติของส้อมโอของส้อมโอทั้ง 4 ช่วงอายุ ในตำแหน่งทดสอบที่ต่างกัน	66
18	ค่าความถี่ที่ 3 จากการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติของส้อมโอของส้อมโอทั้ง 4 ช่วงอายุ ในตำแหน่งทดสอบที่ต่างกัน	66
19	ค่าจุดยอดที่สูงที่สุด 3 จุด จากการแปลงสัญญาณเสียงในรูป Algorithm Fourier transform Response (FFT) ของส้อมโอทั้ง 4 ช่วงอายุ	67
20	ค่าจุดยอดที่สูงที่สุด 3 จุด แปลงให้อยู่ใน Stiffness Coefficient ของส้อมโอทั้ง 4 ช่วงอายุ	67
21	ค่าจากการทดสอบแบบจำแนกกลุ่มด้วยวิธี Discriminant analysis ในการทดสอบด้วยคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติ	68
22	ค่าจากการทดสอบแบบจำแนกกลุ่มด้วยวิธี Discriminant analysis ในการทดสอบด้วยคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติจากการแปลงความถี่เป็นค่า Stiffness coefficient ($F^2 m^{2/3}$)	68
23	การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มอายุด้วยวิธี Discriminant analysis แบบ Cross-Validated ในการทดสอบด้วยคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติจากตำแหน่ง 3-6	69
24	ตารางแสดงค่าสหสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งหมด	71
25	ตารางแสดงการตัดแยกช่วงความบริสุทธิ์ของส้อมโอด้วยวิธี Discriminant analysis โดยใช้ตัวแปรทั้งหมด	72
26	ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า Discriminant score กับตัวแปรที่ใช้ในสมการ (ตัวแปรทั้งหมด)	73
27	ตารางแสดงการตัดแยกช่วงความบริสุทธิ์ของส้อมโอด้วยวิธี Discriminant analysis โดยใช้ตัวแปรแบบไม่ทำลายตัวอย่าง	74
28	ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า Discriminant score กับตัวแปรที่ใช้ในสมการ (ตัวแปรแบบไม่ทำลาย)	75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
29	ตารางแสดงผลที่ได้จากการสร้างสมการ PLSR ในการทำนายค่า SSC/TA	78
30	ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักของตัวแปรในการสร้างสมการ	79
31	ตารางแสดงค่าทางเคมีของชิ้นส้มโอตัดแต่ง	80
32	ค่าจากการสร้างสมการในการทดสอบความแม่นยำของค่า SSC และ TA จากกลุ่ม Training set ทั้ง 10 กลุ่ม	82
33	ตารางแสดงผลที่ได้จากการสร้างสมการ PLSR ในการทำนายค่า SSC และ TA โดยเปรียบเทียบการทำ Pre-processing ของสเปกตรัมเฉลี่ย	85
34	ตารางแสดงผลที่ได้จากการสร้างสมการ PLSR ในการทำนายค่า SSC และ TA โดยเปรียบเทียบการทำ Pre-processing ของสเปกตรัมทั้งหมด	86
35	ตารางแสดงผลที่ได้จากการสร้างสมการ PLSR ในการทำนายค่า SSC โดยการเลือกช่วงความยาวคลื่นแบบ iPLS ของสเปกตรัมเฉลี่ย	88
36	ตารางแสดงผลที่ได้จากการสร้างสมการ PLSR ในการทำนายค่า SSC โดยการเลือกช่วงความยาวคลื่นแบบ iPLS ของสเปกตรัมทั้งหมด	90
37	ตารางแสดงผลที่ได้จากการสร้างสมการ PLSR ในการทำนายค่า TA โดยการเลือกช่วงความยาวคลื่นแบบ iPLS ของสเปกตรัมเฉลี่ย	91
38	ตารางแสดงผลที่ได้จากการสร้างสมการ PLSR ในการทำนายค่า TA โดยการเลือกช่วงความยาวคลื่นแบบ iPLS ของสเปกตรัมทั้งหมด	93

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	ค่า Firmness index ($A/t \times 10^9 \text{ mm/s}^3$)	110
ก2	ค่า Firmness (F/D (N/mm))	114
ก3	ค่าความถี่ธรรมชาติต่อแรงกระทำอันดับที่ 1	119
ก4	ค่าความถี่ธรรมชาติต่อแรงกระทำอันดับที่ 2	123
ก5	ค่าความถี่ธรรมชาติต่อแรงกระทำอันดับที่ 3	128
ก6	ค่าคุณสมบัติทางกายภาพและค่าทางเคมี	132
ก7	ค่าความหนาเปลือก	137
ข1	ค่าทางเคมีของส้มโอดัดแต่งสด	143

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะของสีผิว ต่อมไขมัน และเนื้อของส้มโอแก่ (ก, ข) และผลอ่อน (ค, ง)	15
2	ผลส้มโอที่แก่ได้ที่ สะอาด และมีขั้วติด	16
3	ผลส้มโอที่มีตำหนิด้านกักกันพืช (ก) บาดแผลจากโรค Canker (ข) บาดแผลจากแมลงเจาะ (ค) บาดแผลจากผีเสื้อกลางคืน (ง) คลาบบารเคมีที่ผิวส้มโอ (จ) ผลแตก (ฉ) รูที่กั้นผล	17
4	ผลส้มโอที่มีอาการผลเน่า	18
5	ผลส้มโอที่มีรูปร่างผิดปกติ	18
6	ผลส้มโอที่มีตำหนิ (ก) แผลเป็นจากผิวถูกทำลาย (ข) แผลเป็นจากหนอนขนอนใบ (ค) แผลเป็นจากเพลี้ยไฟ (ง) แผลเป็นจากรอยขีดข่วน (จ) ผลลาย (ฉ) ดาวกระจายหรือแผลเป็นจากต่อมน้ำมันถูกทำลาย	19
7	ผลส้มโอที่มีตำหนิ (ก) ผิวถูกแดดเผา (ข) ผิวมีรอยข้ำ	20
8	แสดงเครื่องทดสอบการกระแทกแบบต่างๆ	24
9	ลักษณะกราฟของการกระทำกระแทก	25
10	การกระจายแรงกระแทกกับเวลาสำหรับระดับความแน่นเนื้อที่แตกต่างกัน	26
11	การกระทำกับสารในแบบต่าง ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	33
12	เทคนิคการวัดตัวอย่าง	37
13	ขนาด Segment และ Gap ที่กำหนดในสเปกตรัมเพื่อคำนวณ Derivative	38
14	สเปกตรัม และ Second derivative ของสเปกตรัม	40
15	NIR สเปกตรัม ที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect ก่อนการปรับแก้ ด้วยวิธี MSC	41
16	NIR สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect หลังการปรับแก้ ด้วยวิธี MSC	41
17	ชุดทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกลซึ่งประกอบด้วยดินน้ำมัน, แม่เหล็กไฟฟ้า, เครื่องวัดความเร่ง (BBN CE501 M101), หัวกระแทก (ประกอบด้วย ลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรและด้ามซึ่งมีน้ำหนัก 10 กรัม), Data Acquisition Unit (NI DAQ 700), คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมและสวิตช์	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	ตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบด้วยชุดเครื่องมือวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกล	52
19	ตำแหน่งการเคาะผลส้มโอ ก) เคาะตำแหน่งซั้วผล ข) เคาะตำแหน่งจุกผล และ ค) เคาะตำแหน่งด้านผล	53
20	ชุดอุปกรณ์วัด Vis/NIR spectroscopy ในโหมด Transmittance ประกอบด้วยหลอดไฟ Halogen tungsten เป็นแหล่งกำเนิดแสงอยู่ด้านบนห่างตัวอย่าง 15 cm ตัวอย่างวางอยู่บนจานหมุนมีรูตรงกลางและด้านล่างมี Integrating sphere เป็นตัวรวมแสงเข้าสู่ Fiber optic ไปยัง Vis/NIR spectrometer และส่งสัญญาณเข้าสู่คอมพิวเตอร์	56
21	ตำแหน่งวางตัวอย่างบนจานหมุน และ ตำแหน่งที่ใช้ในการสแกนตัวอย่างจำนวน 8 ครั้ง โดยจานหมุนวางอยู่บน Integrating Sphere (ก) วิวด้านบน (ข) วิวด้านหน้า	56
22	การทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกลของเปลือกส้มโอได้ค่าความเร่งต่อเวลา (A/t)	59
23	การทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ได้ค่าแรงต่อการเปลี่ยนรูปที่เปลือกส้มโอ (F/D)	59
24	การวัดความหนาเปลือกส้มโอ	64
25	ชุดอุปกรณ์วัดและเก็บสัญญาณเสียงแปลงเป็นความถี่	65
26	สัญญาณเสียงที่สัมพันธ์กับความถี่ของผลส้มโอ	65
27	กราฟแสดงค่า loading plot ของตัวแปรทั้งหมดโดยพล็อตระหว่างสมการ Principal component 1 และ 2	70
28	กราฟแสดงการกระจายตัวของตัวอย่างของแต่ละกลุ่มช่วงความบริสุทธิ์ที่พล็อตระหว่าง Canonical functions 1 และ Canonical functions 2 โดยการใช้ตัวแปรทั้งหมด	76
29	กราฟแสดงการกระจายตัวของตัวอย่างของแต่ละกลุ่มช่วงความบริสุทธิ์ที่พล็อตระหว่าง Canonical functions 1 และ Canonical functions 2 โดยการใช้ตัวแปรแบบไม่ทำลาย	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
30 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SCC/TA ที่ได้จากการทำนาย ด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการทดลอง	79
31 สเปกตรัมของชิ้นส้มโอตัดแต่งจำนวน 184 ชิ้น	81
32 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSC ที่ได้จากการทำนาย ด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมเฉลี่ย	83
33 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TA ที่ได้จากการทำนาย ด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมทั้งหมด	83
34 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSC ที่ได้จากการทำนาย ด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมเฉลี่ย ในการใช้ Pre-processing แบบ SNV	85
35 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TA ที่ได้จากการทำนาย ด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมเฉลี่ย ในการใช้ Pre-processing แบบ MSC	86
36 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSC ที่ได้จากการทำนาย ด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมทั้งหมด ในการใช้ Pre-processing แบบ SNV กับ D^1	87
37 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TA ที่ได้จากการทำนาย ด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมทั้งหมด ในการใช้ Pre-processing แบบ D^2	87
38 กราฟแสดงผลการเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี iPLS ของสเปกตรัมเฉลี่ยของ การทำนายค่า SSC โดยกราฟแท่งแสดงค่า Root mean square error of cross validation (RMSECV) และ กราฟเส้นประแสดงค่า Correlation coefficient (r)	89
39 กราฟ scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSC ที่ได้จากการทำนาย ด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมเฉลี่ย ในการสร้างสมการทำนาย ค่าด้วยวิธี iPLS	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	กราฟแสดงผลการเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี iPLS ของสเปกตรัมทั้งหมดของการทำนายค่า SSC โดยกราฟแท่งแสดงค่า Root mean square error of cross validation (RMSECV) และ กราฟเส้นประแสดงค่า Correlation coefficient (r)	90
41	กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSC ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมทั้งหมด ในการสร้างสมการทำนายค่าด้วยวิธี iPLS	91
42	กราฟแสดงผลการเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี iPLS ของสเปกตรัมเฉลี่ยของการทำนาย TA โดยกราฟแท่งแสดงค่า Root mean square error of cross validation (RMSECV) และ กราฟเส้นประแสดงค่า Correlation coefficient (r)	92
43	กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TA ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมเฉลี่ย ในการสร้างสมการทำนายค่าด้วยวิธี iPLS	92
44	กราฟแสดงผลการเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี iPLS ของสเปกตรัมทั้งหมดของการทำนาย TA โดยกราฟแท่งแสดงค่า Root mean square error of cross validation (RMSECV) และ กราฟเส้นประแสดงค่า Correlation coefficient (r)	93
45	กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TA ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมทั้งหมด ในการสร้างสมการทำนายค่าด้วยวิธี iPLS	94

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

*	=	P-value < 0.05
**	=	P-value < 0.01
a	=	Largest absolute correlation between each parameter and any discriminant function
ANOVA	=	One-way analysis of variance
A/t	=	Acceleration/Time
BPT	=	Bottom peel thickness
°Brix	=	Degree of brix
D ₁	=	First derivative
D ₂	=	Second derivative
f ₁	=	First resonant frequency
f ₂	=	Second resonant frequency
f ₃	=	Third resonant frequency
f m ^{2/3}	=	Stiffness coefficient
F/D	=	Force/Deformation
FFT	=	Fast fourier transform response
H/W	=	Height/ maximum diameter
iPLS	=	Interval partial least squares regression
MPT	=	Middle peel thickness
MSC	=	Multiplicative scatter correction
NIR	=	Near infrared
nm	=	Nanometer
n.s.	=	Not significant at 5% level
PC	=	Principal components
PCA	=	Principal component analysis
PLSR	=	Partial least squares regression
r	=	Correlation coefficient
r ²	=	Coefficient of determination of prediction
RMSECV	=	Root mean square error of cross validation

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

RMSEP	=	Root mean square of error of prediction
S.D.	=	Standard deviation
SEP	=	Standard error of prediction
SG	=	Specific gravity
SNV	=	Standard normal variate
SSC	=	Soluble solids content
SSC/TA	=	Soluble solids content/ Total titratable acidity
TA	=	Total titratable acidity
TPT	=	Top peel thickness
VIF	=	Variance inflation factor
Vis	=	Visible
Vis/NIR	=	Visible/Near infrared

การศึกษาการตรวจสอบคุณภาพภายในผลส้มโอด้วยเทคนิคแบบไม่ทำลาย

Study of Determination of Internal Quality of Pomelo Using Non-Destructive Techniques

คำนำ

ส้มโอเป็นผลไม้เพื่อสุขภาพ มีรสชาติดีคือมีรสหวานหรือหวานอมเปรี้ยวซึ่งขึ้นอยู่กับพันธุ์และมีคุณค่าทางโภชนาการสูงโดยเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่มีวิตามินซีสูง สรรพคุณเป็นยาละลายเสมหะ แก้ไอ บำรุงกระเพาะ ช่วยย่อย แก้อาการท้องอืด ขับลมในกระเพาะอาหาร ช่วยเจริญอาหาร และแก้ปวด ส้มโอเป็นผลไม้ที่มีเปลือกหนา ทำให้สามารถเก็บรักษาได้นานโดยไม่เสียคุณภาพ ทนทานต่อการกระทบกระเทือนระหว่างขนส่งได้ในระยะทางไกลและส้มโอยังเป็นไม้ผลเศรษฐกิจที่ทุกคนรู้จัก เนื่องจากสามารถปลูกได้ทุกภาคของประเทศไทย ซึ่งนอกจากจะนิยมบริโภคกันภายในประเทศแล้ว ยังมีศักยภาพในการส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศทั้งในรูปแบบเป็นผลสด และ แบบผลไม้ตัดแต่งสดพร้อมบริโภค ซึ่งมีปริมาณการส่งออกอยู่ปีละประมาณ 12,000-13,000 ตัน หรือประมาณ 130-140 ล้านบาท (กระทรวงพาณิชย์, 2555) จะเห็นได้ว่าส้มโอเป็นที่นิยมในต่างประเทศซึ่งภาวการณ์ตลาดของส้มโอในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ จีน ฮองกง สิงคโปร์ เป็นต้น ส่วนตลาดทางยุโรปนั้นจะมีเนเธอร์แลนด์ อังกฤษ แคนาดาฯ ซึ่งส้มโอก็สามารถเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาศักยภาพของเกษตรกรไทย

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมผลไม้ตัดแต่งเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วและปริมาณผู้บริโภคที่นิยมรับประทานอาหารเพื่อสุขภาพเพิ่มสูงมากขึ้นจึงทำให้ภาวการณ์ตลาดผลไม้ตัดแต่งเป็นที่น่าสนใจมากขึ้นตามไปด้วย ในสหรัฐอเมริกา มีมูลค่าการซื้อขายผลไม้ตัดแต่งอยู่ที่ 11 พันล้านบาทในปี พ.ศ. 2543 และเพิ่มสูงขึ้นเป็น 15 พันล้านบาทในปี พ.ศ. 2548 ในยุโรปภาวการณ์ตลาดผลไม้ตัดแต่งก็มีมูลค่าสูงขึ้น รวมไปถึงภาวการณ์ตลาดในเอเชียก็มีแนวโน้มในการพัฒนาที่ดี ส้มโอตัดแต่งสดจึงมีความน่าสนใจและเป็นทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าของผลผลิตให้เกษตรกรได้

คุณภาพภายในของผลไม้ถือเป็นสิ่งที่สำคัญ ซึ่งจะช่วยเพิ่มมูลค่าและคุณภาพของผลไม้เพื่อการส่งออก ในปัจจุบันการเก็บเกี่ยวผลส้มโอเกษตรกรต้องอาศัยความชำนาญในการสังเกตสีผิว ต่อม น้ำมัน ขนาด และการนับอายุวันหลังจากดอกบาน ซึ่งยังไม่มีคำแนะนำ และปัญหาที่สำคัญ คือ

การขาดแคลนเทคโนโลยีในการผลิตและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ทำให้ผลผลิตที่ได้ไม่ตรงกับมาตรฐานหรือคัดคุณภาพได้แค่บางส่วนซึ่งยังไม่เพียงพอ การหาคุณภาพภายในด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ (น้ำหนัก, ปริมาตร, เส้นรอบวงของผลไม้, ความหนาแน่น และค่าอิลาสติกของผลไม้), ความถี่ธรรมชาติของผลไม้ และ เทคนิค Near infrared spectroscopy ก็เป็นวิธีที่น่าสนใจในการคัดคุณภาพภายในส้มโอ (ความหวาน ปริมาณกรด คุณสมบัติในเนื้อ และความแน่นเนื้อ) โดยไม่ทำให้ผลไม้อันเกิดการเสียหาย



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้คุณสมบัติทางกายภาพ และ คุณสมบัติทางเคมีของผลส้มโอ (น้ำหนัก ปริมาตร ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง ความถ่วงจำเพาะ ค่าออสติกซิตี้ของเปลือก คุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และปริมาณกรดที่ไตเตรตได้) ในการคัดแยกช่วงความบริสุทธิ์ของส้มโอ
2. เพื่อศึกษาหาคุณสมบัติ หรือ ตัวแปรที่เหมาะสม (คุณสมบัติทางกายภาพ และ คุณสมบัติทางเคมี) สำหรับใช้คัดแยกความบริสุทธิ์ของส้มโอ
3. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบคุณภาพภายในผลส้มโอ (ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้และปริมาณของแข็งที่ละลายได้/ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้) โดยเทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่าง เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างเครื่องเพื่อคัดคุณภาพในการส่งออกส้มโอ
4. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบคุณภาพภายในส้มโอตัดแต่งสดพร้อมบริโภค โดยใช้เทคนิค Visible/Near infrared spectroscopy ในการตรวจสอบปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และ ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้

การตรวจเอกสาร

ลักษณะของส้มโอ

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Citrus maxima Merr.* ชื่อวงศ์ RUTACEAE ลักษณะทั่วไปของส้มโอเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง ลำต้นมีสีน้ำตาล แตกกิ่งก้านสาขาและมีหนามเล็กๆ มีเรือนยอดอยู่สูงประมาณ 8 เมตร ใบเป็นใบเดี่ยวลักษณะเป็นรูปมนรี ปลายใบและโคนใบมน ขอบใบเป็นคลื่นเล็กน้อยพื้นใบสีเขียวและเป็นมัน ท้องใบมีขนสั้น ๆ ใบมีขนาดกว้างประมาณ 3-6 เซนติเมตร ดอกสีขาวอมชมพูยาว 5-10 เซนติเมตร การขยายพันธุ์ใช้การตอนกิ่งหรือการเพาะเมล็ด

พันธุ์ส้มโอ ประเทศไทยมีหลายพันธุ์ บางพันธุ์ก็มีลักษณะใกล้เคียงกันแต่ปลูกคนละท้องที่จึงเรียกชื่อแตกต่างกันไป พันธุ์ส้มโอที่ปลูกเพื่อการค้าแบ่งออกได้ดังนี้

1. พันธุ์การค้าหลัก ได้แก่ ขาวพวง ขาวทองดี ขาวน้ำผึ้ง เป็นต้น
2. พันธุ์การค้าเฉพาะแห่ง ได้แก่ ขาวแป้น ขาวหอม ขาวแตงกวา ท่าข่อย ขาวใหญ่ หอมหาดใหญ่ เจ้าเสวย กรุ่น ขาวแก้ว เป็นต้น

ส้มโอมีช่วงการเก็บเกี่ยวที่ยาวนานคือตั้งแต่ออกดอกจนกระทั่งผลแก่จะใช้เวลา 8 เดือน แต่สามารถเก็บผลได้ตั้งแต่ผลมีอายุ 7 เดือนและยังยืดระยะเวลาเก็บเกี่ยวออกไปถึงอายุประมาณ 10 เดือน (นิรนาม, 2529) ผลแก่เต็มที่จะมีสีเขียวอ่อนหรือเหลืองอมเขียว รูปทรงของผลจะกลมแป้นหรือกลมรี สีเนื้อมีสีขาว เนื้อมีรสหวานอมเปรี้ยวหรืออาจขมเล็กน้อยในบางพันธุ์

ในฤดูที่ดอกออกมากที่สุดอยู่ระหว่างกลางเดือนธันวาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ และอีกครั้งหนึ่งระหว่างเดือนสิงหาคมถึงเดือนกันยายนระยะจากผลิดอกถึงดอกบานใช้เวลา 25-30 วัน และจากดอกบานถึงผลแก่ประมาณ 180-210 วัน

ส้มโอพันธุ์ทองดีมีขนาดของผลโตปานกลาง รูปทรงกลมแป้น ไม่มีจุดที่ขั้วผล ขั้วผลมีจีบเล็กน้อย ก้นผลมีลักษณะเรียบหรือเว้าเล็กน้อย ผิวผลเรียบ สีเขียวเข้ม ต่อม้ำมันที่ผิวมีขนาดเล็ก เวลาจับที่ผิวจะรู้สึกนึ่ม ผลมีจำนวนกลีบประมาณ 12-13 กลีบ และเกาะกันแน่น การแยกกลีบออกจากกันทำได้ยาก กิ่ง (Juice sac) มีสีชมพูอ่อนจนถึงสีชมพูแก่ และเกาะกันแน่น แต่กิ่งนึ่มและฉ่ำน้ำ เวลาแกะกิ่งออกจากกลีบมักและ กิ่งมีรสหวานไม่เปรี้ยว มีเมล็ดมาก ส้มโอพันธุ์นี้ให้ผลผลิตตลอดปี

มีรสชาติหวาน ปลูกกันมากในเขตอำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม พันธุ์นี้เป็นที่นิยมของคนไทย จึงเป็นที่นิยมบริโภคภายในประเทศ (ธวัช, 2533)

ส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง ส้มโอพันธุ์นี้มีผลใหญ่ รูปทรงกลม ไม่มีจุกที่ขั้วผล ก้นผลมีลักษณะเรียบ หรือเว้าเล็กน้อย ผิวมีสีเขียวเข้ม ต่อม้ำมันที่ผิวมีขนาดใหญ่ขึ้นเวลาจับที่ผิวจะรู้สึกแข็ง ส่วนเปลือกค่อนข้างหนา และกึ่งลอกผนังกลีบออกได้ง่าย กุ้งมีสีเหลืองอ่อนจนถึงสีชมพูอ่อน ขนาดใหญ่ เบียดกันแน่น เนื้อมีลักษณะแห้ง รสออกหวานอมเปรี้ยว มีเมล็ดจำนวนน้อย ถ้าเป็นช่วงนอกฤดูจะไม่ มีเมล็ดเลย เป็นพันธุ์ที่ให้ผลผลิตตลอดปี ปลูกกันมากในเขตอำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม สำหรับ พันธุ์ขาวน้ำผึ้งกำลังเป็นที่นิยมของผู้บริโภคในปัจจุบันจึงมีราคาค่อนข้างสูง

ส้มโอเป็นผลไม้ประเภท Non-climacteric เช่นเดียวกับส้มชนิดอื่นๆ มีการเปลี่ยนแปลงทาง สรีรวิทยาค่อนข้างน้อย ที่พอเห็นได้ชัดคือ การเปลี่ยนแปลงสีผิวจากสีเขียวขามเป็นสีเหลืองซึ่งจะเกิด ได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 15-20 องศาเซลเซียส นอกจากนี้เมื่อเก็บเกี่ยวมาแล้วปริมาณกรดภายในผลจะ ลดลงเรื่อยๆ และจะเพิ่มปริมาณ Soluble solids ทำให้รสชาติส้มโอหวานขึ้น ผู้บริโภคที่นิยมรส ค่อนข้างหวานจึงมักเก็บรักษาส้มโอไว้ระยะหนึ่งก่อนรับประทาน แต่ถ้าเก็บไว้นานเกินไปเปลือกส้มจะ เหนียว และรสชาติไม่ค่อยดี คือจะมีรสหวานเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณกรดลดลงมาพร้อมกับปริมาณ Soluble solids ก็ลดลงด้วย นอกจากนี้แล้วเนื้อส้มโอจะฉะ ปอกได้ยาก กุ้งจะแตกง่าย มีน้ำไหล ออกมาจากกุ้ง ทำให้ไม่น่ารับประทาน

1. ข้อกำหนดขั้นมูลฐาน

- 1.1 พันธุ์ ส้มโอพันธุ์เดียวกันต้องมีรูปร่าง สีผิว และสีเนื้ออย่างเดียวกัน
- 1.2 ทรวดทรง ผลที่ดีต้องมีทรวดทรงและขนาดปกติเป็นไปตามพันธุ์ ฤดูกาล และ แหล่งปลูก
- 1.3 ผิวต้องเรียบไม่ขรุขระ ไม่หยาบกร้าน หรือตกราะ ไม่ข้ำ
- 1.4 ความสะอาด ปราศจากฝุ่นละออง สิ่งสกปรก สารเคมี หรือสิ่งแปลกปลอม
- 1.5 ความแก่ มีความแก่พอดี คือไม่แก่หรืออ่อนเกินไป
- 1.6 ผลต้องมีขั้วติด
- 1.7 กลิ่น ไม่มีกลิ่นหรือรสที่นอกเหนือไปจากกลิ่นและรสของส้มโอ
- 1.8 ตำหนิ ปราศจากตำหนิที่เกิดจากการทำลายของโรค แมลง การเก็บเกี่ยว และการปฏิบัติการอื่นๆ หลังการเก็บเกี่ยว

2. ปริมาณน้ำคั้นและสีผิว

2.1 มีปริมาณน้ำคั้นขั้นต่ำเป็นไปตามพันธุ์

2.2 สีของผิวต้องสม่ำเสมอเป็นไปตามพันธุ์ สำหรับส้มโอของไทยผิวเป็นสีเขียว หรือเขียวอ่อนก็อนุโลมได้หากมีปริมาณน้ำส้มตามที่กำหนด ทั้งนี้โดยถือเอาช่วงที่เก็บในแต่ละท้องที่ปลูก เป็นสำคัญ

3. การกำหนดขนาดหรือการแบ่งขนาดของส้มโอมีกเอาเส้นผ่านศูนย์กลางของกึ่งกลางผล หรือเส้นรอบวงของผลเป็นเกณฑ์ เนื่องจากส้มโอไม่มีการกำหนดขนาดเป็นทางการ แต่มีการตกลงกัน ระหว่างผู้ซื้อและผู้ขายว่าควรแบ่งเป็นขนาด ใหญ่ กลาง และเล็ก ซึ่งแต่ละพันธุ์จะแตกต่างกันไป

4. การแบ่งชั้น (Grading) ส้มโอสำหรับการส่งออกจะแบ่งเป็น 3 ชั้นคือ ชั้นพิเศษ ชั้นหนึ่ง และชั้นสองหรือ Extra class, Class I และ Class II ซึ่งคุณสมบัติของส้มโอในแต่ละชั้นดังตารางที่ 1

คุณภาพที่ดีของส้มโอนั้นควรมีสีเขียวอมเหลือง ผิวเรียบไม่ขรุขระปราศจากตำหนิ (เนื่องจาก โรค แมลง และร่องรอยการกระทบกระเทือนอย่างอื่น) เปลือกบาง เนื้อไม่เละหรือฟ้าม เมล็ดน้อย ช่วงตรงกลางผลไม่กว้าง ไม่มีอาการข้าวสาร (อาการภายในกึ่งซึ่งมีเม็ดแข็งและเหนียว) รสหวาน หรือ รสอมเปรี้ยว และไม่ขม (นิรนาม, 2530) ส้มโอที่ปลูกในแต่ละแหล่งมีความแตกต่างกันไปในเรื่องของ พันธุ์ พันธุ์ที่ตลาดต่างประเทศต้องการ คือ พันธุ์ทองดี และพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

ปัจจัยหรือวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้วัดความแก่ของผลส้มโอ สามารถจำแนกได้ดังนี้

1. การนับอายุผลเริ่มนับตั้งแต่หลังวันดอกบานจนกระทั่งผลแก่ เช่น ในส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง จะใช้เวลา 5.5-6 เดือน (มงคล, 2536; วิเศษ, 2540)

2. การวัดปริมาณน้ำตาล เนื่องจากผลไม้หลายชนิดสะสมอาหารในรูปของน้ำตาลเป็นส่วน ใหญ่ยิ่งมีอายุผลมากขึ้นการสะสมน้ำตาลยิ่งมีมากขึ้น การวัดปริมาณน้ำตาลทำได้โดยใช้ Hand Refractometer มี หน่วยเป็น บริกซ์ (Brix) เพื่อวัดหาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Soluble solids content, SSC) จากน้ำคั้นส้มโอ ซึ่งหมายถึงปริมาณสารประกอบต่าง ๆ ที่ละลายน้ำได้ รวมทั้งกรดอินทรีย์ต่าง ๆ แต่ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลเนื่องด้วยส้มโอเป็นผลไม้ ที่มีรสเปรี้ยว มีกรดสะสม อยู่มากการวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้อาจให้ค่าที่ไม่ถูกต้องนักและวิธีนี้จัดเป็นการวัดความแก่

แบบทำลายผลไม้ ซึ่งนำมาใช้ในกรณีที่ต้องการยืนยันความแก่ของผลไม้จากการวัดด้วยวิธีอื่น (มงคล, 2536; จริงแท้, 2542)

3. การวัดปริมาณกรดด้วยการไตเตรต (Titratable acidity, TA) ผลไม้ส่วนใหญ่เมื่อยังอ่อนมักมีรสเปรี้ยวเนื่องจากการสะสมกรดอินทรีย์ต่าง ๆ เมื่อผลเริ่มแก่ปริมาณกรดจะลดลงการวัดปริมาณกรดทำได้โดยการนำน้ำส้มโอมาไตเตรตกับด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ วิธีนี้เป็นการวัดความแก่แบบทำลายเช่นกัน และนำมาใช้ในกรณีที่ต้องการยืนยันผลการตรวจสอบความแก่ของผลจากการวัดด้วยวิธีอื่นเช่นเดียวกับข้อ 2 (มงคล, 2536; จริงแท้, 2542)

4. การวัดหาอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำตาลกับกรด (SSC/TA หรือ B/A ratio) การใช้ปริมาณกรดอย่างเดียวหรือน้ำตาลอย่างเดียวเป็นดัชนีวัดความแก่ของผลไม้อาจมีความสอดคล้องกับวัยของผลไม้ไม่ค่อยดีนัก จากการศึกษาในผลไม้หลายชนิดพบว่าการใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำตาลกับกรดจะมีความสัมพันธ์กับวัยของผลไม้มากกว่า โดยเฉพาะในผลไม้ที่มีการสะสมทั้งน้ำตาลและกรดในปริมาณที่สูง เช่น ส้มโอเป็นต้น (มงคล, 2536; จริงแท้, 2542)

5. การดูที่สีผิวของผลไม้ สีผิวเป็นลักษณะหนึ่งที่ใช้ตรวจวัดความแก่ของผลไม้โดยเมื่อส้มโอแก่สีผิวจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นเขียวอ่อนหรือเขียวอมเหลือง และจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนสีผิวของผล ซึ่งมีค่ามาตรฐานสำหรับส้มโอในแต่ละพันธุ์ที่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้แต่วิธีนี้อาจให้ผลการตรวจวัดที่คลาดเคลื่อนได้ในกรณีที่ผลส้มโอเติบโตในตำแหน่งได้รับแสงแดดโดยตรงดังนั้นเมื่อผลแก่สีผิวอาจไม่เปลี่ยนก็ได้ และในกรณีที่ปลูกส้มโอในเขตร้อน สีผิวของผลที่แก่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากเหมือนในเขตหนาว ด้วยเหตุนี้การตรวจสีผิวจึงไม่ให้ผลถูกต้องทั้งหมด (สุรนนต์ และคณะ, 2531; มงคล, 2536)

6. การสังเกตขนาดต่อมน้ำมัน (Oil gland) เทคนิคนี้เป็นการวัดแบบไม่ทำลายผลไม้และกระทำได้โดยไม่ยุ่งยากแต่ต้องอาศัยความชำนาญของชาวสวนที่มีประสบการณ์เป็นอย่างดีในการตรวจดูความแก่ของผลส้มโอโดยเมื่อผลแก่ขนาดต่อมน้ำมันจะขยายใหญ่ขึ้นและบริเวณปลายผลหรือก้นผล (Stylar end) ต่อมน้ำมันจะแยกห่างออกจากกันด้วยเหตุนี้จึงได้มีการหาขนาดและ/หรือความหนาแน่นของต่อมน้ำมันโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพมาใช้ในการบ่งบอกความแก่ของผลส้มโอซึ่งทำให้ผลการวัดไม่ขึ้นกับตัวบุคคล นอกจากนี้ยังทำให้เกณฑ์การวัดเป็นมาตรฐานมากยิ่งขึ้น (จริงแท้, 2542; กรกฎ และ เพ็ญจิตร, 2543) ต่อมา นพตล (2545) ได้พัฒนาโปรแกรมเพื่อวัดขนาดและความหนาแน่นของต่อมน้ำมันบนผิวผลส้มโอให้เป็นดัชนีบ่งบอกความแก่ของผลส้มโอพบว่าเมื่ออายุผลมาก

ขึ้นขนาดและความหนาแน่นเฉลี่ยของต่อมน้ำมันมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นและลดลงแบบสมการกำลังสอง โดยมีระดับนัยสำคัญ r^2 เท่ากับ 0.86 เท่ากับปริมาณกรดและอัตราส่วนน้ำตาลต่อกรดมีแนวโน้มลดลง และเพิ่มขึ้นตามอายุของผลไม้วัดด้วยสมการเชิงเส้น โดยมีค่า r^2 เท่ากับ 0.96 และ 0.94 ตามลำดับ และ กฤษญา (2548) ได้พัฒนาโปรแกรมเพื่อวัดขนาดและความหนาแน่นของต่อมน้ำมันบนผิวผลส้มโอให้เป็นแบบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถคำนวณหาขนาดของต่อมน้ำมันที่สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ได้

ตารางที่ 1 การแบ่งชั้น (Grading) ส้มโอสำหรับการส่งออก

ชั้น	คุณสมบัติขั้นมูลฐาน	ข้ออนุโลม
พิเศษ (Extra class)	ส้มโอชั้นพิเศษนี้จะต้องประกอบด้วยส้มโอที่คุณภาพเยี่ยม ไม่ว่าจะป็นทรวดทรง รูปร่าง ความแก่และสี ต้องเป็นไปตามพันธุ์ ผลต้องไม่มีตำหนิ ยกเว้นริ้วรอยบางเบาที่ผิวซึ่งจะไม่ทำให้คุณภาพหรือรูปร่างโดยทั่วไปดูด้อยลง	ยอมให้มีผลที่ไม่ผ่านคุณสมบัตินี้แต่ผ่านคุณสมบัติในชั้น 1 ปนมาได้ไม่เกิน 5% โดยจำนวนหรือน้ำหนัก และยอมให้มีผลชั่วหลุดปนมาได้ไม่เกิน 5% ของจำนวนผลทั้งหมด
ชั้นหนึ่ง (Class I)	ส้มโอชั้นนี้ต้องเป็นส้มโอคุณภาพดีมีคุณสมบัติทั่วไป ตรงตามพันธุ์และแหล่งปลูกยอมให้มีตำหนิได้บ้างเช่นทรวดทรงอาจบิดเบี้ยวได้เล็กน้อย ผิวอาจมีริ้วรอยหรือบาดแผลอันเกิดจากการเสียดสี หรือการปฏิบัติต่างๆ สีส้มอาจมีส่วนที่ผิดปกติไปบ้าง แต่โดยสรุปแล้วตำหนิหรือข้อบกพร่องดังกล่าวจะไม่ทำให้รูปร่างโดยรวมหรือคุณภาพในการเก็บรักษาเสียไป	ยอมให้มีผลที่ไม่ผ่านคุณสมบัติชั้น 1 แต่ผ่านคุณสมบัติชั้น 2 ปนมาได้ไม่เกิน 10% โดยจำนวนหรือน้ำหนัก และยอมให้มีผลชั่วหลุดปนมาได้ไม่เกิน 20% ของจำนวนผลทั้งหมด
ชั้นสอง (Class II)	ส้มโอชั้นนี้จะประกอบด้วยส้มโอที่ตกลงมาจากชั้น 1 แต่ผ่านคุณสมบัติทั่วไปขั้นมูลฐาน มีปริมาณน้ำส้มและสีของผลตามปกติของพันธุ์ ยอมให้มีผลมีตำหนิได้มากกว่าชั้น 1 คือทรวดทรงอาจบิดเบี้ยวสีผิดปกติ ผิวหยาบกร้านหรือมีบาดแผลที่ปิดสนิทเป็นต้น โดยมีข้อแม้ว่าอาการผิดปกติดังกล่าวข้างต้นจะไม่มีผลกระทบต่อรูปร่างโดยทั่วไป หรือทำคุณสมบัติในการเก็บรักษาดีต่อไป	ยอมให้มีผลที่ไม่ผ่านคุณสมบัติขั้นมูลฐานนี้ปนมาได้ไม่เกิน 10% ซึ่งอาจเป็นมากที่รอยแผลที่ผิวยังปิดไม่สนิท หรือผลมีอาการเหี่ยวได้ไม่เกิน 5% และยอมให้มีผลที่ชั่วหลุดปนมาได้ไม่เกิน 35% ของจำนวนผลทั้งหมด

การส่งออกผักและผลไม้สดไทยไปสหภาพยุโรป

ผักและผลไม้สดนับเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทยอีกประเภทหนึ่งที่น่าเงินตราเข้าประเทศปีละหลายพันล้านบาททั้งในรูปของผักและผลไม้สดแช่เย็นแช่แข็ง และสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรผู้เพาะปลูกและผู้ส่งออกของไทยได้เป็นอย่างดี ด้วยสภาพดินฟ้าอากาศของประเทศทำให้ประเทศไทยเป็นแหล่งเพาะปลูกผักผลไม้หลากหลายชนิดและเป็นที่ยอมรับในทั้งในประเทศและต่างประเทศ อาทิ ญี่ปุ่น สหภาพยุโรป จีน และฮ่องกง ดังนั้น การเพาะปลูกจึงไม่ได้มุ่งเพียงเพื่อการบริโภคภายในประเทศเท่านั้น แต่ยังมีมุ่งเพื่อการส่งออกไปยังตลาดต่างประเทศด้วย อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าผักและผลไม้สดของไทยจะมีมูลค่าการส่งออกมากในแต่ละปีเมื่อเทียบกับสินค้าอุตสาหกรรม แต่มักประสบปัญหาในกระบวนการผลิตและการส่งออกหลายประการ อาทิ ปัญหาด้านภาษี ปัญหามาตรการกีดกันทางการค้า ปัญหาด้านสุขอนามัย ปัญหาการแข่งขัน และปัญหาการขนส่ง รวมไปถึงปัญหาสินค้าไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน (สิรินาฏ, 2555)

ภาพรวมการส่งออกผลไม้สดของไทย

ภาพรวมการส่งออกผลไม้สดแช่เย็นแช่แข็ง จะเห็นได้ว่า มูลค่าการส่งออกของไทยมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี 2542 จนถึงปี 2552 โดยในปี 2553 ไทยส่งออกผลไม้สดแช่เย็นแช่แข็งไปยังตลาดโลกเป็นมูลค่าทั้งสิ้น 13,199.48 ล้านบาท ลดลงจากปี 2552 ที่มีมูลค่ากว่า 13,754 ล้านบาท ซึ่งจีนนับเป็นตลาดส่งออกผลไม้สดแช่เย็นแช่แข็งของไทยอันดับหนึ่งมาโดยตลอด ตั้งแต่ปี 2547 โดยมูลค่าการส่งออกไปยังตลาดจีนในปี 2553 อยู่ที่ 4,629.31 ล้านบาท คิดเป็นสัดส่วนถึงร้อยละ 35.07 ของมูลค่าการส่งออกผลไม้สดแช่เย็นแช่แข็งของไทยทั้งหมด และตลาดรองจากจีน คือ ฮ่องกง (ร้อยละ 20.44) อินโดนีเซีย (ร้อยละ 12.32) ญี่ปุ่น (ร้อยละ 4.15) และสหรัฐอเมริกา (ร้อยละ 4.13) สำหรับตลาดสหภาพยุโรป (รวม 27 ประเทศ) มูลค่าการส่งออกสินค้าผลไม้สดแช่เย็นแช่แข็งของไทยไปยังตลาดสหภาพยุโรปในปี 2553 เท่ากับ 496 ล้านบาท (ร้อยละ 3.76) ลดลงจากปี 2552 ที่มีมูลค่ากว่า 610 ล้านบาท (ร้อยละ 4.44)

สหภาพยุโรปเป็นตลาดอาหารที่ใหญ่มากตลาดหนึ่งของไทยและเป็นตลาดนำเข้าผักผลไม้สดที่มีศักยภาพของไทย อีกทั้งผู้บริโภคในสหภาพยุโรปยังมีกำลังซื้อที่สูง ดังนั้น สหภาพยุโรปจึงเป็นตลาดที่ไทยต้องพยายามรักษาส่วนแบ่งตลาดไว้ เพราะหากผู้ผลิตและผู้ส่งออกไทยสามารถส่งสินค้าเข้าไปประเทศสมาชิกของสหภาพยุโรปประเทศใดประเทศหนึ่งแล้ว นั่นหมายถึง การเข้าถึงกำลังซื้อของผู้บริโภคทั่วทั้งภูมิภาคยุโรป เนื่องจากสินค้าไทยจะถูกส่งต่อไปยังประเทศสมาชิกอื่น ๆ ได้

โดยไม่ต้องผ่านด่านตรวจและไม่มี การเก็บภาษีนำเข้าอีก ซึ่งนับเป็นช่องทางที่ผู้ประกอบการไทยสามารถ ขยายตลาดได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสหภาพยุโรปเป็นต้นตำรับของมาตรการและอุปสรรคทางการ ค้าที่มีใช้ภาษี (Non-tariff measures and Non-tariff barriers: NTMs และ NTBs) ในรูปแบบต่างๆ โดยเฉพาะในด้านสุขอนามัยและความปลอดภัยของสินค้าอาหารสด จำพวกเนื้อสัตว์ ผักและผลไม้สด ที่ผ่านมาสหภาพยุโรปเข้มงวดกวดขันกับการตรวจสอบสินค้าผักผลไม้สดจากไทยที่จะส่งออกไปยัง ตลาดสหภาพยุโรปมาก

มาตรฐานคุณภาพ (Quality standard) การส่งออกผักและผลไม้สดไทยไปสหภาพยุโรป

มาตรฐานคุณภาพ (เบญจมาศ, 2549) คือระดับของคุณภาพที่ได้รับการพิจารณาแล้วว่า เหมาะสมและเป็นที่ยอมรับของทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ถือเป็นหลักในการเปรียบเทียบหรือกำหนด คุณภาพ ซึ่งมาตรฐานคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรอาจมีหลายระดับ ตั้งแต่ระดับท้องถิ่นไป จนถึงระดับประเทศหรือระดับโลก โดยมาตรฐานคุณภาพที่เกษตรกรผู้ค้าหรือผู้ประกอบการต้อง เกี่ยวข้องและไม่อาจหลีกเลี่ยงได้คือ มาตรฐานคุณภาพระดับโลกหรือระดับสากล ซึ่งมาตรฐานคุณภาพที่ สำคัญของผักและผลไม้เมืองร้อนคือ มาตรฐาน Codex อันเป็นมาตรฐานสากลที่ประเทศไทยในฐานะ เป็นประเทศสมาชิกได้มีบทบาทสำคัญในการเสนอหรือช่วยแก้ไขมาตรฐานคุณภาพของผลไม้และผัก สดได้สำเร็จจนเป็นมาตรฐานนานาชาติ

ข้อกำหนดที่สำคัญในมาตรฐานคุณภาพของผลไม้ที่เกษตรกรและผู้ประกอบการควรรู้และ นำไปใช้ประโยชน์ เป็นต้นว่าข้อกำหนดเรื่องอายุเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม โรคแมลงที่ประเทศของผู้นำเข้า ยอมรับ ชนิดและขนาดของตำหนิ หรือ ความบกพร่องที่จะต้องตัดสินว่าผลผลิตควรถูกคัดออกหรือจัด ให้อยู่ในชั้นคุณภาพใด ตลอดจนขนาดของผลผลิตที่ตลาดหรือผู้บริโภคต้องการ เป็นต้น ซึ่งความรู้ ความเข้าใจเรื่องมาตรฐานคุณภาพจะช่วยให้เกษตรกรพัฒนาผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยวโดยเฉพาะการ คัดผลผลิตให้มีคุณภาพตรงกับความต้องการของตลาดอันจะก่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการ ซื้อขาย ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรและผู้ประกอบการสามารถขยายผลผลิตได้มากขึ้น เป็นการเพิ่มรายได้ ให้แก่เกษตรกรเอง ผู้ประกอบการ และประเทศชาติโดยรวม

การตัดคุณภาพของผลผลิต

มีหลักเกณฑ์มากมายที่ใช้ในการตัดคุณภาพของผลผลิต แต่หลักเกณฑ์สำคัญที่จะต้องพิจารณาอย่างรอบคอบภายใต้กฎเกณฑ์ที่กำหนดไว้คือ อายุการเก็บเกี่ยว ตำหนิหรือข้อบกพร่อง ขนาดของผลผลิต และบรรจุภัณฑ์ ทั้งนี้เพราะอายุการเก็บเกี่ยวและตำหนิหรือข้อบกพร่องเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อรูปลักษณ์และคุณภาพของผลผลิตว่าผลิตผลนั้นเหมาะกับการบริโภคหรือไม่ ส่วนขนาดของผลผลิตและบรรจุภัณฑ์จะเป็นปัจจัยช่วยกระตุ้นหรือเสริมให้ผู้บริโภคสนใจอยากซื้ออยากทดสอบสินค้า ดังนั้นในการตัดคุณภาพของผลผลิตในที่นี้จึงเน้นการตัดสินเรื่องความแก่หรือวัย ตำหนิหรือข้อบกพร่องต่าง ๆ ขนาด และบรรจุภัณฑ์เป็นหลัก

อายุการเก็บเกี่ยว

การบริบูรณ์ (Maturity) คือ การเจริญเติบโตเต็มที่ของสิ่งมีชีวิต เช่น การเจริญเติบโตในทาง Physiological maturity หรือ ความบริบูรณ์ทางสรีรวิทยา ดังนั้น mature จึงแทนคำว่า แก่ ส่วน Immature จึงแทนคำว่าอ่อน ส่วนคำว่า Horticultural maturity คือ ความบริบูรณ์ทางพืชสวนมิใช่ ความบริบูรณ์ทางสรีรวิทยา ความบริบูรณ์ทางพืชสวนคือวัยของพืชหรือส่วนของพืชที่พัฒนามาถึงระดับที่เหมาะสมกับการบริโภคตามความต้องการเฉพาะกรณีของผู้บริโภค (จริงแท้, 2542)

ผลไม้ที่มีคุณภาพจะต้องเป็นผลไม้ที่แก่ได้ที่ คือมีรสชาติเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้นความแก่ (Maturity) หรือวัย หรือ อายุการเก็บเกี่ยวของผลไม้จึงเป็นสิ่งสำคัญลำดับแรกของการตัดคุณภาพ ซึ่งการตัดสินความแก่หรือวัยที่เหมาะสมกับการเก็บเกี่ยว (Maturity indices) ของผลไม้

การพิจารณาว่าผักผลไม้หรือดอกไม้ได้เจริญมาถึงระยะหรือวัยที่จะเก็บเกี่ยวได้ หรือ มีความบริบูรณ์ทางพืชสวนนั้นเป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะในระหว่างการเจริญเติบโตถึงแม้ว่าจะมีการดูแลบำรุงรักษาดีเพียงใด หากเก็บเกี่ยวไม่ถูกวัยแล้ว คุณภาพของผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้อาจจะใช้ไม่ได้เลยก็ได้ เช่น อาจจะอ่อนเกินไปจนผลไม้ไม่ยอมสุก การพิจารณาในเรื่องนี้ต้องมีหลักเกณฑ์หรือเครื่องบ่งชี้หรือที่เรียกกันว่า ดัชนีความบริบูรณ์ (Maturity index) ถ้าใช้เพื่อการเก็บเกี่ยวก็เรียกว่า ดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvesting index) ดัชนีความบริบูรณ์ของพืชแต่ละอย่างแตกต่างกัน และในพืชเดียวกันก็อาจใช้ดัชนีได้หลายอย่าง ในธรรมชาติพืชอาจมีการเปลี่ยนแปลงทำให้ผู้บริโภคทราบว่าพืชนั้นมีความบริบูรณ์สำหรับการบริโภคแล้ว เช่น การเปลี่ยนสีของผลไม้ แต่ดัชนีตามธรรมชาตินี้ไม่ตรงกับความต้องการในการบริโภคของคนก็ได้ นอกจากนั้นดัชนีตามธรรมชาตินี้อาจเกิดขึ้นช้าเกินไป ไม่ทันให้

เกษตรกรเก็บเกี่ยวเพื่อขนส่งไปยังตลาดต่าง ๆ ได้ ดังนั้นจึงมีความพยายามในการศึกษาหาดัชนีความบริสุทธิ์หรือดัชนีการเก็บเกี่ยวซึ่งสามารถบอกถึงเวลาในการเก็บเกี่ยวได้ล่วงหน้า ทำให้เก็บเกี่ยวได้ในระยะที่ถูกต้องและผลผลิตมีคุณภาพ (จริงแท้, 2542)

ดัชนีความบริสุทธิ์นั้นในทางปฏิบัติใช้กันอยู่ในสองระดับคือ ใช้เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเก็บเกี่ยวซึ่งก็เรียกได้ว่าเป็นดัชนีการเก็บเกี่ยว ส่วนการใช้ในอีกระดับคือการใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของผลผลิตที่เก็บเกี่ยวมาแล้วว่ามีความบริสุทธิ์ถูกต้องตามความต้องการ ซึ่งในกรณีนี้เรียกได้ว่าเป็นดัชนีคุณภาพ

ดัชนีที่ดีควรเป็นดัชนีที่สามารถตรวจสอบหรือทำได้ง่าย ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องทำลายผลผลิต ใช้อุปกรณ์ไม่ยุ่งยาก ราคาไม่แพง สามารถปฏิบัติได้ในแปลงปลูก ดัชนีที่ดีจะต้องใช้ได้สำหรับผลผลิตนั้นๆ ในทุกแหล่งปลูกและในทุกๆ ฤดูกาลผลิต

ดัชนีความบริสุทธิ์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายวิธี แต่ไม่มีวิธีใดที่มีคุณสมบัติครบถ้วน โดยเกษตรกรใช้ดัชนีหลายอย่างประกอบกันตัดสินใจในการเก็บเกี่ยวซึ่งทำให้เก็บเกี่ยวได้ถูกต้องตามความบริสุทธิ์ของผลผลิตมากขึ้นวิธีต่าง ๆ นี้แยกได้เป็นกลุ่มใหญ่ ๆ 4 กลุ่มคือ

1. การตรวจสอบโดยใช้ประสาทสัมผัส ได้แก่

- พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะภายนอกด้วยสายตา เช่น ขนาด รูปทรง สีผิวนวล หรือการเปลี่ยนแปลงส่วนใดส่วนหนึ่งของผลผลิต เช่น ต่อม้ำมันที่ผิว และสีเนื้อ เป็นต้น
- ฟังความแตกต่างของเสียงจากการตีต หรือการเคาะ เช่น เสียงทึบ เสียงโปร่ง
- การสัมผัสเพื่อพิจารณาความสากของผิว การกดหรือบีบเพื่อสัมผัสความแข็งและความนุ่ม
- การชิมรสชาติ เช่น รสหวาน รสเปรี้ยว รสฝาด รสขมและรสกลมกล่อม

2. การตรวจสอบทางกายภาพ เช่น

- สภาพที่ขั้วหลุดจากการดึงเบา ๆ
- ความแน่นเนื้อ
- ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

- ปริมาณน้ำคั้น (Juice content)

3. การตรวจสอบทางเคมี

- ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solids) หรือความหวาน
- ปริมาณกรด (Total acidity)
- ปริมาณแป้ง (Starch) และปริมาณน้ำมัน (Oil)
- ปริมาณน้ำหนักแห้ง (Dry weight)

4. การนับอายุ เช่น

การนับอายุจากวันที่ดอกออก วันที่ดอกบาน หรือวันที่ติดผล จนถึงวันที่เก็บเกี่ยว อย่างไรก็ตาม การตัดสินใจว่าอายุการเก็บเกี่ยวของผลิตผลบางชนิดนั้น อาจต้องใช้วิธีดังกล่าวข้างต้นหลายวิธีผสมผสานกัน ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ สามารถทนต่อการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งรวมถึงวิธีการขนส่งโดยจุดมุ่งหมายก็คือเพื่อให้ผลผลิตถึงตลาดปลายทางในสภาพที่ดีนั่นเอง

ตำหนิ

นอกจากความแก่ได้ที่หรือเหมาะสมแล้ว ผลผลิตที่มีคุณภาพจะต้องไม่มีตำหนิหรือหากมีก็เป็นตำหนิที่ยอมรับได้ เพราะชนิดและขนาดของตำหนิ จะเป็นตัวชี้วัดว่าผลผลิตสมควรจะถูกคัดออกหรือได้รับการจัดวางให้อยู่ในชั้นคุณภาพใด ซึ่งมีการแบ่งตำหนิที่ใช้ในการคัดคุณภาพของผลผลิตออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

1. ตำหนิด้านกักกันพืช (Quarantine defects)

หมายถึงตำหนิหรือข้อบกพร่องในผลผลิตที่ไม่ผ่านด้านกักกันพืชของประเทศผู้นำเข้า ซึ่งส่วนใหญ่แล้วมักจะเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับแมลงหรือโรคซึ่งประเทศผู้นำเข้ามีการเข้มงวดกวดขันมาก สำหรับผลไม้ที่มีตำหนิเกี่ยวกับด้านกักกันพืชได้แก่ ผลไม้ที่มีไข่หรือตัวอ่อนแมลงวันผลไม้ (Fruit flies) เพลี้ยหอย (Scale insects) เพลี้ยแป้ง (Mealy bugs) หนอนเจาะขี้ผล และโรคไฟตาซ (Canker) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีโรคหรือแมลงอื่น ๆ ซึ่งประเทศผู้นำเข้าไม่อนุญาต เช่น ออสเตรเลีย ไม่ยอมรับมะม่วงจากประเทศไทยเพราะเรื่องด้วงเจาะเมล็ด (Mango seed weevil) เป็นต้น

2. ตำนานที่รุนแรง (Major defects)

หมายถึงตำหนิหรือข้อบกพร่องที่มีผลกระทบต่อรูปลักษณ์และคุณภาพของผลผลิต จนทำให้ผลผลิตไม่เหมาะสำหรับการบริโภค ซึ่งผลไม้ที่มีตำหนิรุนแรงได้แก่ ผลลีบ ผลที่มีขนาดเล็กเกินไป ผลที่อ่อนหรือแก่เกินไป ผลที่มีบาดแผลกว้างหรือลึกซึ่งกระทบต่อส่วนที่บริโภคได้ ผลช้ำ หรือผลเน่า เป็นต้น ซึ่งปกติแล้วผลไม้ที่มีตำหนิรุนแรงเหล่านี้มักจะไม่นำมาจำหน่ายในตลาดมาตรฐานคุณภาพ คือมักจะถูกคัดออกตั้งแต่แรกพบในการพิจารณาจัดชั้นคุณภาพ

3. ตำนานที่ไม่รุนแรง (Minor defects)

หมายถึงตำหนิหรือข้อบกพร่องที่ไม่มีผลกระทบต่อรูปลักษณ์และคุณภาพของผลผลิต คือ ผลผลิตยังสามารถรับประทานหรือจัดเข้าสู่ชั้นคุณภาพได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะ และขนาดของตำหนินั้น ๆ สำหรับผลไม้ที่มีตำหนิไม่รุนแรง ได้แก่ พวกที่มีรูปร่างบิดเบี้ยวไปบ้าง แผลเป็นที่เกิดจากแมลง หรือรอยขีดข่วน สีผิวไม่สม่ำเสมอ หรือถูกแดดเผา เป็นต้น ซึ่งปกติแล้วผลไม้ที่มีตำหนิไม่รุนแรงดังกล่าวมักจะผ่านข้อกำหนดในเรื่องคุณภาพขั้นต่ำ แต่จะถูกคัดออกหรือจัดอยู่ในชั้นคุณภาพใดก็ขึ้นอยู่กับขนาดของตำหนิหรือบาดแผล

ขนาด

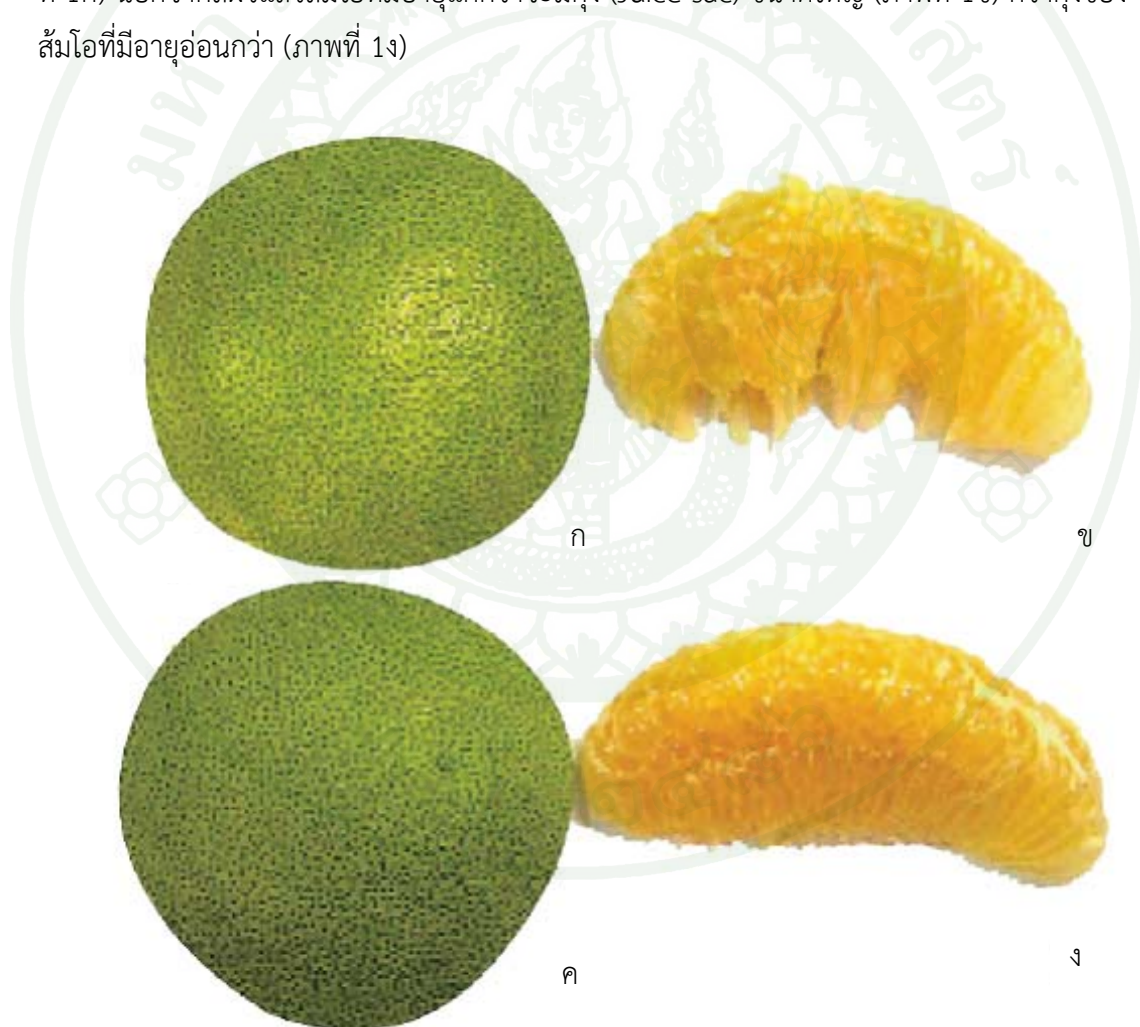
การกำหนดหรือการจัดขนาดของผลไม้ นั้น โดยปกติจะใช้น้ำหนักเป็นเกณฑ์ คือจัดให้พวกที่มีขนาดใกล้เคียงกันเข้าอยู่ในกลุ่มเดียวกัน ส่วนจะจัดเป็นกี่กลุ่มนั้นขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของผลผลิต ความสามารถในการผลิตให้มีขนาดที่สม่ำเสมอและความต้องการของตลาด ผลไม้หลายชนิดอาจมีความกว้าง หรือ ความยาวของผลสอดคล้องกับน้ำหนัก ดังนั้นจึงอาจนำข้อมูลทั้งน้ำหนัก ความกว้าง และความยาวของผลเข้ามาประกอบในการกำหนดขนาด สำหรับขนาดอาจใช้เป็นตัวเลขหรือตัวอักษรก็ได้ขึ้นกับความเห็นชอบร่วมกันของผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่าย ประโยชน์สำคัญในการกำหนดขนาดคือจะช่วยให้การบรรจุหีบห่อให้มีความสม่ำเสมอ ซึ่งจะแสดงถึงความปรารถนาในการผลิต และเป็นการช่วยในการนำเสนอและการขายผลผลิต

อย่างไรก็ตามมีผลไม้บางชนิด เช่น ส้มโอ ซึ่งเป็นผลไม้ที่มีน้ำหนักกับเส้นรอบวงหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของผลสอดคล้องกัน กรณีอาจใช้เพียงน้ำหนักหรือเส้นรอบวงอย่างเดียวอย่างหนึ่งในการกำหนดขนาด ทั้งนี้โดยถือเอาความเหมาะสมในการบรรจุหีบห่อ และความสะดวกในการปฏิบัติ

การคัดคุณภาพส้มโอ

อายุการเก็บเกี่ยว

การตัดสินอายุการเก็บเกี่ยวหรือความแก่ของส้มโอจากลักษณะภายนอกอาจทำได้ด้วยการดูสีผิวและขนาดของต่อมน้ำมัน (Oil gland) ส้มโอที่แก่จะมีสีเขียวจางหรือบางครั้งอาจมีสีเขียวอมเหลือง และมีต่อมน้ำมันขนาดใหญ่ (ภาพที่ 1ก) และโดยเฉพาะต่อมน้ำมันบริเวณก้นผลจะมีขนาดใหญ่่มาก และถ่างออก ส่วนส้มโอที่ยังอ่อนกว่าจะมีผิวสีเขียวเข้ม และมีต่อมน้ำมันขนาดเล็กและละเอียด (ภาพที่ 1ค) นอกจากนี้ส้มโอที่มีอายุแก่กว่าจะมีกึ่ง (Juice sac) ขนาดใหญ่ (ภาพที่ 1ข) กว่ากึ่งของส้มโอที่มีอายุอ่อนกว่า (ภาพที่ 1ง)



ภาพที่ 1 ลักษณะของสีผิว ต่อมน้ำมัน และเนื้อของส้มโอแก่ (ก, ข) และผลอ่อน (ค, ง)

ที่มา: เบญจมาศ (2549)

อย่างไรก็ตามการตัดสินความแก่อาจใช้การวัดความหวานของน้ำคั้นจากผลส้มโอ โดยส้มโอที่แก่เก็บเกี่ยวได้ควรมีความหวานของน้ำคั้นตั้งแต่ 8 องศาบริกซ์ขึ้นไป

ตำหนิ

นอกจากอายุเก็บเกี่ยวหรือวัยที่แก่ได้ที่แล้วผลส้มโอที่จะเข้าสู่มาตรฐานคุณภาพเพื่อการส่งออกจะต้อง สะอาดและมีข้อผลที่ตัดแต่งเรียบร้อย (ภาพที่ 2)



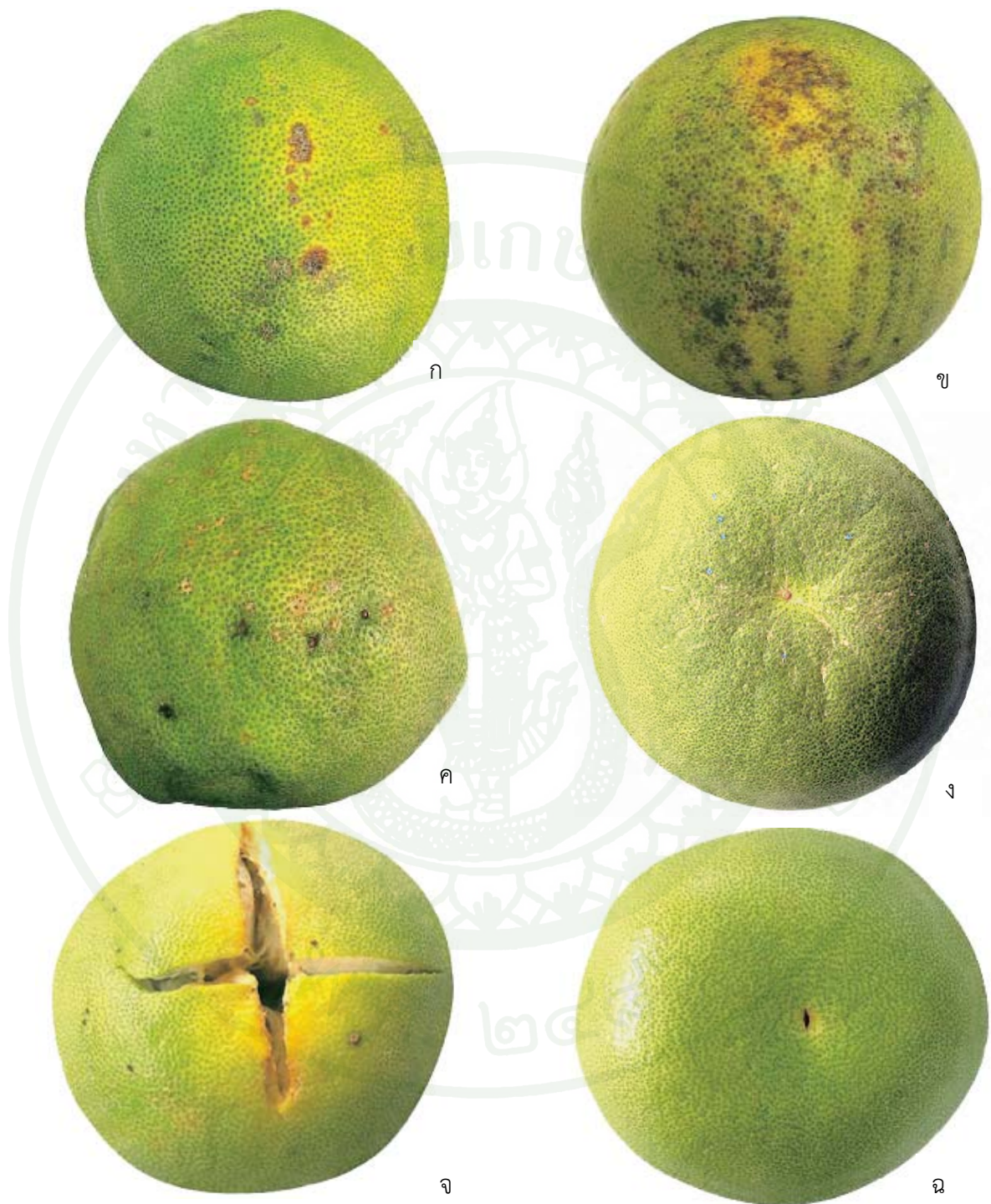
ภาพที่ 2 ผลส้มโอที่แก่ได้ที่ สะอาด และมีข้อตัด

ที่มา: เบญจมาศ (2549)

ส่วนผลที่มีตำหนินั้นชนิดและขนาดของตำหนิจะเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการตัดสินว่าส้มโอจะส่งออกได้หรือไม่ ควรคัดออกหรือควรจัดให้อยู่ในชั้นคุณภาพใด ซึ่งตำหนิที่ใช้สำหรับตัดสินคุณภาพของส้มโอกำหนดไว้ดังนี้ คือ

1. ตำหนิด้านกักกันพืช

ตำหนิที่เกิดจากโรคและแมลงที่ประเทศผู้นำเข้าไม่อนุญาตให้ติดไปกับผลส้มโอได้แก่ ผลที่มีโรคฝาดหรือ Canker (ภาพที่ 3ก) ผลมีตำหนิจากแมลงวันผลไม้ (ภาพที่ 3ข) ตำหนิจากผีเสื้อกลางคืนเจาะวางไข่ (ภาพที่ 3ค) หรือแมลงที่กัดผลที่มีสารเคมีซึ่งประเทศผู้นำเข้าไม่อนุญาต เช่น ฝรั่งเศษห้ามมีสารเคมีจำพวกจุนสีติดที่ผล (ภาพที่ 3ง)



ภาพที่ 3 ผลส้มโอที่มีตำหนิต่างกักกันพืช (ก) บาดแผลจากโรค Canker (ข) บาดแผลจากแมลงเจาะ (ค) บาดแผลจากผีเสื้อกลางคืน (ง) คลาบบสารเคมีที่ผิวส้มโอ (จ) ผลแตก (ฉ) รูที่ก้นผล

ที่มา: เบญจมาส (2549)



ภาพที่ 4 ผลส้มโอที่มีอาการผลเน่า

ที่มา: เบญจมาส (2549)

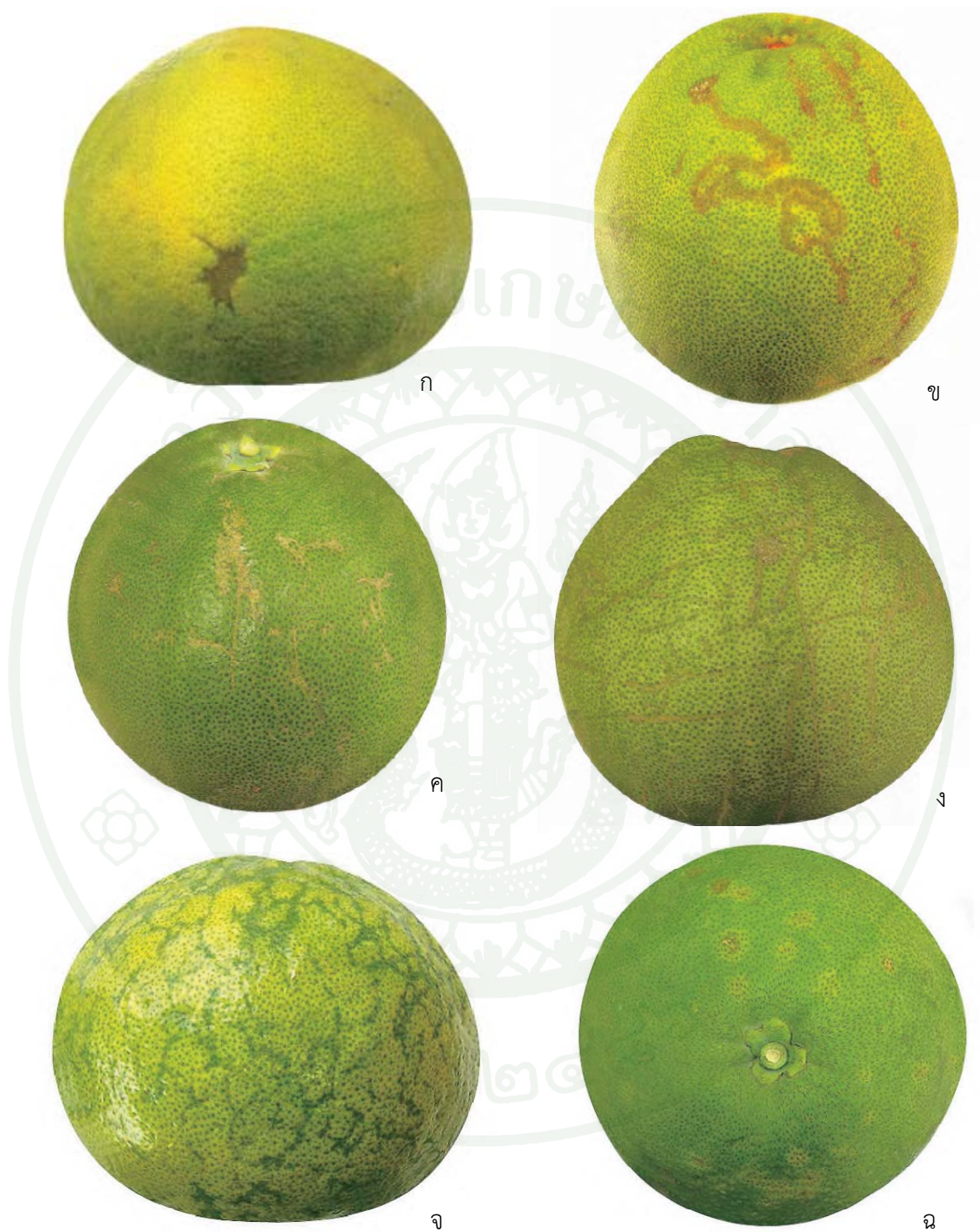
1. ตำหนิที่รุนแรง

ตำหนิที่มีผลกระทบต่อรูปลักษณ์และคุณภาพอย่างรุนแรง จนทำให้ผลผลิตไม่เหมาะสมกับการบริโภค เช่นผลแตก (ภาพที่ 3จ) หรือมีรูที่ก้นผล (ภาพที่ 3ฉ) และผลเน่า (ภาพที่ 4) จะถูกคัดออกทันทีเมื่อพบ



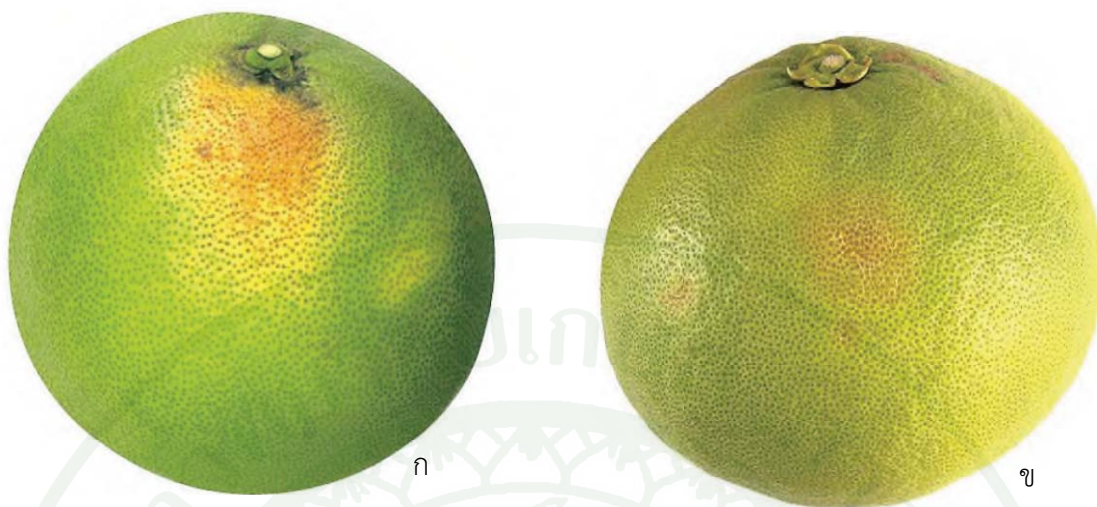
ภาพที่ 5 ผลส้มโอที่มีรูปร่างผิดปกติ

ที่มา: เบญจมาส (2549)



ภาพที่ 6 ผลส้มโอที่มีตำหนิ (ก) แผลเป็นจากผิวถูกทำลาย (ข) แผลเป็นจากหอนขนใบ (ค)
 แผลเป็นจากเพลิงไฟ (ง) แผลเป็นจากรอยขีดข่วน (จ) ผลลาย (ฉ) ดาวกระจายหรือ
 แผลเป็นจากต่อมน้ำมันถูกทำลาย

ที่มา: เบญจมาศ (2549)



ภาพที่ 7 ผลส้มโอที่มีตำหนิ (ก) ผิวถูกแดดเผา (ข) ผิวมีรอยขีด

ที่มา: เบญจมาศ (2549)

2. ตำหนิที่ไม่รุนแรง

คือตำหนิที่ไม่มีผลกระทบต่อรูปลักษณะหรือคุณภาพมากนัก เช่น ผลที่มีรูปร่างผิดปกติ (ภาพที่ 5) ผลเป็นที่ผิวถูกทำลาย (ภาพที่ 6ก) ผลเป็นจากหนอนชอนใบ (ภาพที่ 6ข) และเปลือกไฟ (ภาพที่ 6ค) รอยขีดข่วน (ภาพที่ 6ง) ผลลาย (ภาพที่ 6จ) ต่อมไขมันแตกหรือที่เรียกว่าดาวกระจาย (ภาพที่ 6ฉ) ผิวไหม้จากการถูกแดดเผา (ภาพที่ 7ก) และรอยขีด (ภาพที่ 7ข) ซึ่งตำหนิดังกล่าวหากไม่ลึกลงไปจนถึงเนื้อ และมีพื้นที่ไม่เกิน 10 หรือ 15 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวทั้งหมด ก็อาจจัดให้ผลิตผลนั้นอยู่ในชั้น 1 หรือ 2 ได้ตามลำดับ

ขนาด

การจัดขนาดของส้มโออาจใช้น้ำหนักหรือความยาวเส้นรอบวงของผลเป็นหลัก หรืออาจใช้น้ำหนักและเส้นรอบวง ดังแสดงในตารางที่ 2 และ ตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ขนาดของส้มโอพันธุ์ทองดี

รหัสขนาด	น้ำหนักผล (กรัม)	เส้นรอบวง (นิ้ว)
1	> 1,400	> 18 - 19
2	1,201 - 1,400	> 17 - 18
3	1,001 - 1,200	> 16 - 17
4	801 - 1,000	> 15 - 16
5	600 - 800	13 - 15
6	< 600	< 13

ที่มา: เบญจมาศ (2549)

ส้มโอพันธุ์ทองดีที่มีขนาดเล็กกว่า 600 กรัม จะขายเป็นส้มตกเกรด และราคาถูกมากกว่าส่วนขนาดที่โตกว่า 1,400 กรัม นั้นมีไม่มาก

ตารางที่ 3 ขนาดของส้มโอพันธุ์ขาน้ำผึ้งและขาวแตงกวา

รหัสขนาด	น้ำหนักผล (กรัม)	เส้นรอบวง (นิ้ว)
1	> 2,000	> 23
2	1,501 - 2,000	> 21 - 23
3	1,001 - 1,500	> 18 - 20
4	500 - 1,000	15 - 17
5	< 500	< 15

ที่มา: เบญจมาศ (2549)

ส้มโอพันธุ์ขาน้ำผึ้งและขาวแตงกวาที่มีขนาดเล็กกว่า 500 กรัม มีจำนวนน้อยมาก และมักจะถูกคัดออก ส่วนผลขนาดใหญ่กว่า 2,000 กรัม นั้น แม้จะมีจำนวนน้อย แต่ก็เป็นที่ยอมรับในการซื้อขาย และมักจะถูกจัดให้อยู่พวกที่มีผลขนาดใหญ่

ความแน่นเนื้อ (Firmness)

ความแน่นเนื้อของผลไม้เป็นปัจจัยสำคัญอย่างมากในการจัดการซื้อขายของผักและผลไม้ ความแน่นเนื้อเป็นลักษณะทางกายภาพอย่างหนึ่งซึ่งบ่อยครั้งจะถูกใช้ประเมินคุณภาพของผักผลไม้ (Chen and De Baerdemaeker 1993; Chen *et al.* 1985, 1996; Shmulevich 1998; Nourain *et al.* 2005 Diezma-Iglesias *et al.* 2006) ในผลิตภัณฑ์การเกษตรหลายอย่างความแน่นเนื้อสัมพันธ์กับความสมบูรณ์ของการเจริญเติบโตโดยทั่วไปความแน่นเนื้อของผลไม้ลดลงทีละน้อยเมื่อมันโตเต็มที่ มากขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมันสุกผลไม้ที่เสียหายหรือสุกเกินไปจะนิ่มดังนั้นความแน่นเนื้อสามารถใช้เป็นเกณฑ์สำหรับคัดเลือกผลิตภัณฑ์เกษตรออกเป็นกลุ่มความเติบโตสมบูรณ์ต่าง ๆ ได้ หรือแยกสุกเกินไปและพวกเสียหายจากพวกที่ดี

ความแน่นเนื้อสามารถประเมินได้จาก (Finney, 1969)

1. แรงที่ทำให้ได้การเปลี่ยนรูปที่กำหนดให้ภายในผลิตภัณฑ์นั้น
2. การเปลี่ยนรูปที่เกิดจากแรงมาตรฐาน
3. อัตราส่วนแรงต่อการเปลี่ยนรูปภายในวัสดุระหว่างถูกภาระเชิงกลกระทำ

แนวคิดสำหรับข้อ 1 และ 3 คือยิ่งอ่านค่าได้มากผลิตภัณฑ์ยิ่งแน่นเนื้อมากส่วนข้อ 2 ยิ่งมีการเปลี่ยนรูปน้อยผลิตภัณฑ์ยิ่งแน่นเนื้อมาก ความแน่นเนื้อของผลไม้ควรที่จะถูกวัดภายใต้สภาวะความเครียดน้อยๆ ไม่ให้เกินจุดคลากของผลิตผลและสอดคล้องกับทฤษฎียืดหยุ่น

การบอกความแน่นเนื้อด้วยเครื่อง HIT (Hardness, Immaturity and Texture meter) เป็นวิธีที่ไม่ทำลายหรือทำให้ตัวอย่างผลไม้ที่เอามาทดสอบไม่เสียหายทำให้สามารถตรวจสอบผลไม้ตัวอย่างที่เวลาต่างๆระหว่างการเก็บรักษากระบวนการตรวจสอบระดับความสุกเพื่อการจำหน่ายและเวลาที่ดีที่สุดที่จะบริโภค เครื่อง HIT จะประเมินความแน่นเนื้อจากปริมาณการเปลี่ยนรูปที่กำหนดที่เกิดจากแรงกดภายในช่วงยืดหยุ่นซึ่งจะไม่ทำให้เกิดทั้งความเสียหายและการเปลี่ยนรูปถาวรกับวัสดุตัวอย่าง

การทดสอบแบบ Drop test เป็นการทดสอบโดยปล่อยผลไม้ที่ความสูงระยะหนึ่งตกลงมา กระแทกกับแก้วแรงที่ผิวหน้าเป็นพื้นเรียบซึ่งตรงข้ามกับแบบ Falling mass ที่จะปล่อยพื้นผิวซึ่งติดหัววัดความเร่งไว้กระแทกกับผลไม้ที่อยู่กับที่ อีกแบบหนึ่งคือแบบ Pendulum แบ่งเป็น Simple

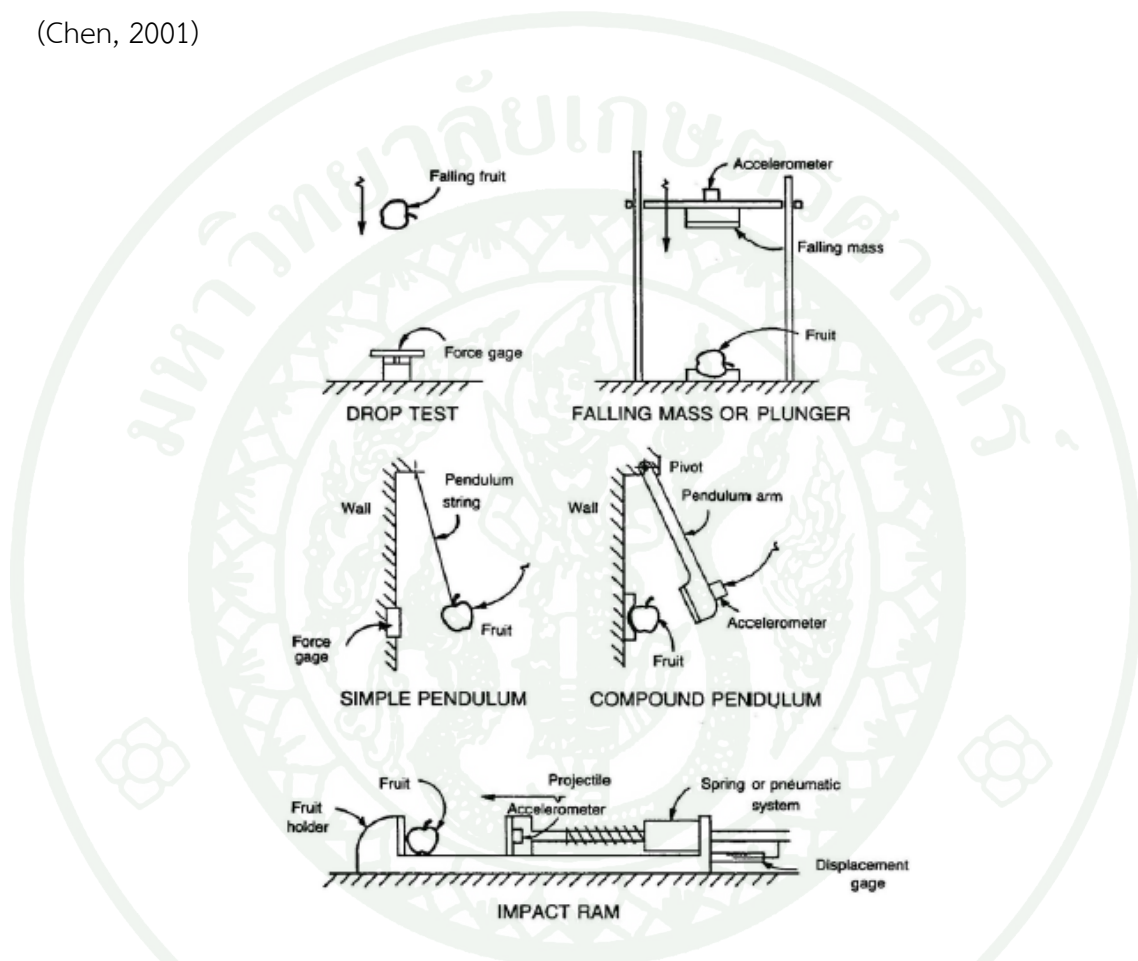
pendulum และ Compound pendulum ซึ่งทั้ง 4 แบบข้างต้นเป็นแบบที่จำเป็นต้องใช้แรงโน้มถ่วงของโลกจึงทำให้ค่าแรงที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่กระทำกับผลไม้จึงจำเป็นต้องสามารถทราบค่าน้ำหนักที่แน่นอนและควบคุมได้ ส่วนแบบ Impact ram เป็นแบบที่ไม่ได้ใช้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกแต่ใช้แรงซึ่งเกิดจากสปริงหรือระบบนิวเมติกไปกระทำกับผลไม้ซึ่งพึงอยู่กับแท่นรับผลไม้จึงทราบค่าแรงที่กระทำกับผลไม้แน่นอนและสม่ำเสมอทุกครั้ง Delwiche *et al.* (1987) ระบุว่าแรงที่ได้จากการนำลูกพีชกระทำกับพื้นผิวเรียบแข็งสามารถวิเคราะห์ทำนายค่าความแน่นเนื้อและบอกถึงระดับความบริบูรณ์ได้จากลักษณะของแรงกระแทก (Peak force/ Peak force to time)² และ F_{295} (295 Hz Spectrum magnitude) มีความสัมพันธ์ดีกับโมดูลัสความยืดหยุ่นและค่าความแน่นเนื้อจาก Penetrometer แต่มีความสัมพันธ์ไม่ดีกับมวลและรัศมีความโค้งของผลไม้ ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้สามารถที่จะแยกแยะลูกพีชที่ยังไม่บริบูรณ์กับบริบูรณ์ได้ แต่จากการทำเครื่องคัดแยกพบปัญหาในเรื่องตำแหน่งลูกพีชที่ตกกระแทกสัมผัสกับแก้วแรงซึ่งไม่มีความแน่นอน Delwiche *et al.* (1989) ได้สร้างระบบการคัดความบริบูรณ์โดยใช้ค่า F/t^2 เมื่อ F = แรงกระแทกสูงสุดที่เกิดขึ้น t = เวลาตั้งแต่เริ่มกระแทกจนถึงเวลาในตำแหน่งที่แรงกระแทกสูงสุด ในการคัดวัสดุเกษตรและลูกแพร์ให้แยกเป็นแข็ง (Hard firm) และนิ่ม (Soft) Zapp *et al.* (1990) ได้พัฒนาผลไม้จำลองทรงกลมเพื่อนำไปสู่การเก็บข้อมูลค่าความเร่งที่เกิดขึ้นในระหว่างการจัดการ, การบรรจุและขนส่งของผักและผลไม้ปรากฏว่าเมื่อทดลองแบบปล่อยผลไม้ตกสัญญาณความเร่งที่เกิดขึ้นมีความใกล้เคียงกับสัญญาณที่ได้จากผลไม้จริง ปัญหาที่ติดตามมาของวิธีการปล่อยผลไม้ตกคือแรงกระแทกที่เกิดขึ้นมีค่าขึ้นอยู่กับปัจจัยของน้ำหนักและรัศมีความโค้งของผลไม้ซึ่งมีค่าแปรปรวนค่อนข้างสูงจึงมีผลกระทบต่อความถูกต้องของการวัดความแน่นเนื้อ

การตอบสนองแรงกระแทกเชิงกล

นักวิจัยพบว่าการกระแทกของผลไม้บนพื้นผิวเรียบแข็งมีความใกล้เคียงกับการกระแทกของทรงกลมยืดหยุ่นและค่าความแน่นเนื้อของผลไม้มีความสัมพันธ์กับการตอบสนองของแรงกระแทก ดังภาพที่ 8

ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมีสมบัติความยืดหยุ่นหนืดซึ่งความยืดหยุ่นหนืดเป็นสมบัติรวมกันระหว่างสมบัติเหมือนของแข็งและสมบัติเหมือนของเหลว (Mohsenin, 1986) ถึงแม้ว่าผลไม้จะมีสมบัติความยืดหยุ่นหนืดแต่ผลกระทบของความหนืดมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการกระทำที่เร็วขึ้นและผลไม้จะมีคุณสมบัติความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ภายใต้การกระทำที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอย่างรวดเร็ว (Chen, 2001) เมื่อมีวัสดุยืดหยุ่นทรงกลมกระทำบนพื้นผิวเรียบแรงที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับ

ความเร็ว มวล รัศมีความโค้ง ยังโมดูลัสและอัตราส่วนปัวซองของของทรงกลม (Chen *et al.*, 1996) ในการทดลองที่ใช้วิธี Drop test แรงกระทำที่ได้เป็นฟังก์ชันของมวลและรัศมีความโค้งของผลไม้ซึ่งมีความแปรปรวนมากในตัวแปรทั้งสองและส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัดความแน่นเนื้อ (Chen *et al.*, 1996) และแรงที่ได้จะมีอิทธิพลมาจากความเร็วและมวลของผลไม้มากกว่าโมดูลัสของผลไม้ (Chen, 2001)



ภาพที่ 8 แสดงเครื่องทดสอบการกระแทกแบบต่างๆ

ที่มา: Peleg (1985)

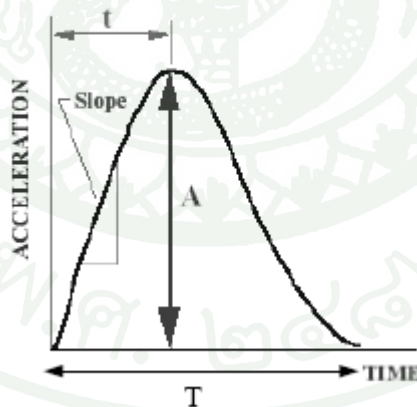
มีวิธีการที่ต่างออกไปคือกระแทกผลไม้ด้วยหัวกระแทกทรงกลมขนาดเล็กซึ่งทราบน้ำหนักที่แน่นอนและรัศมีความโค้งและความเร่งของหัวกระแทก ประโยชน์ของวิธีนี้คือการตอบสนองแรงกระแทกเป็นอิสระจากมวลของผลไม้และมีผลกระทบน้อยมากจากรัศมีความโค้งของผลไม้ Ruiz-Altisent *et al.* (1993) พัฒนาระบบซึ่งใช้ Impact parameter ในการคัดแยกผลไม้ (Apples,

Pears and avocados) ที่ระดับความแน่นเนื้อต่าง ๆ ผลการศึกษา (Chen *et al.*, 1996) เมื่อใช้น้ำหนักหัวกระทกน้อยๆ (ประมาณ 10 กรัม) ชี้ว่า

1. สัญญาณที่ได้มีค่ามากขึ้นเมื่อน้ำหนักน้อยลง (จากน้ำหนัก 50 กรัม เหลือ 10 กรัม)
2. เพิ่มค่าดัชนีความแน่นเนื้อ (A/t)
3. ลดความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ของผลไม้เนื่องจากน้ำหนักกระทกที่น้อย
4. ลดความเสียหายเนื่องจากการกระทก

และยังชี้อีกว่าน้ำหนักน้อยๆ นั้นจะถูกจำกัดอยู่เนื่องจากน้ำหนักของหัววัดความเร่งและความสามารถในการควบคุมความเร็ว ความเร็วมีผลอย่างมากต่อดัชนีความแน่นเนื้อ เมื่อน้ำหนักหัวกระทกน้อย ๆ สายสัญญาณซึ่งต่อกับหัวกระทกจะมีผลต่อการตกกระทกทำให้ตกกระทกไม่ตั้งฉากกับผิวของผลไม้ และยังดึงหัวกระทกให้ตกกระทกช้าลง Chen *et al.* (1996) ได้แสดงการสร้างสูตรคณิตศาสตร์และสรุปว่าเวลาที่ต้องการได้แรงกระทกสูงสุด $t = 47.1D/V$ และดัชนีความแน่นเนื้อ A/t มีค่า $A/t = 0.68FV/Dm_1$ เมื่อ D = การเปลี่ยนรูปมากที่สุดของผลไม้เมื่อถูกกระทก V = ความเร็วของหัวกระทก m_1 = มวลของหัวกระทก A = ความเร่ง F = แรงที่เกิดขึ้น

Impact Acceleration History



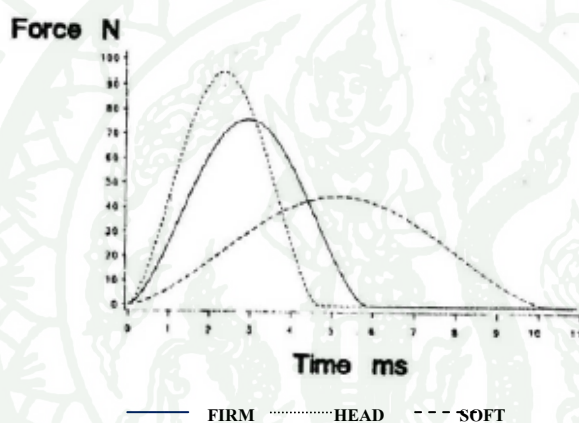
ภาพที่ 9 ลักษณะกราฟของการกระทกกระทก

ที่มา: อุดมศักดิ์ (2547)

การวิเคราะห์ผลในภาพที่ 9 แสดงลักษณะต่างๆไปของกราฟสัญญาณความเร่งที่ได้จากหัววัดความเร่ง กับเวลาระหว่างการกระทกของหัวกระทกกับผลไม้เมื่อเกิดการกระทกหัวกระทกจะกด

ผลไม้เข้าไปในลักษณะความเร่งเพิ่มขึ้นกับเวลาการกระแทกที่เวลา t หลังจากกระแทกความเร่ง มีค่าสูงสุดและลดลงหลังจากนั้น

การกระจายแรงกระแทกกับเวลาของผลไม้ที่มีระดับความแน่นเนื้ออ่อน และ แน่นเนื้อแข็ง ลักษณะกราฟดังภาพที่ 10 เนื่องจากแรงแปรผันตามความเร่งเมื่อน้ำหนักหัวกระแทกคงที่ กราฟทั้ง 3 มีความแตกต่างกันทั้งค่าแรงมากที่สุด ระยะเวลาที่สมนัยกับแรงมากที่สุดและความชันของกราฟความเร่ง (A) ลดลงและเวลา (t) เพิ่มขึ้นและความแน่นเนื้อลดลง จากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจึงมีการกำหนดค่าดัชนีความแน่นเนื้อ (A/t) มาสัมพันธ์กับตัวแปรกำหนดความแน่นเนื้ออื่นๆ เช่น ค่ายังโมดูลัส



ภาพที่ 10 การกระจายแรงกระแทกกับเวลาสำหรับระดับความแน่นเนื้อที่แตกต่างกัน

ที่มา: Delwiche (1987)

McGlone *et al.* (1997) ระบุว่า การตกกระทบของกีวี่ที่มีความสูงต่างๆ ไม่เกิน 50 มิลลิเมตร สามารถใช้ทฤษฎี Impact force analysis (IFA) ทำนายค่าความแน่นเนื้อโดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแน่นเนื้อที่ได้จาก Penetrometer ปรากฏว่ามีความสัมพันธ์ที่ดี Reyes *et al.* (1996) ได้ทำการสร้างหัววัดการกระแทกเพื่อแยกมะละกอเป็น 5 ระดับความสุกซึ่งสามารถแยกได้ ซึ่งมวลและรูปร่างของมะละกอยังไม่ผลต่อหัววัดการกระแทก Gomez *et al.* (2005) พบว่าแรง Impulse response มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของผลแพร์ที่อายุการเก็บรักษาเปลี่ยนไป Gomez *et al.* (2006) พบว่า ความแน่นเนื้อของส้ม “Satsuma” ที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกับสามารถอธิบายได้โดยใช้ค่า Stiffness coefficient ของแรง Impulse response และค่าสัมประสิทธิ์ Elasticity จากการทดสอบ Compression test Jarimopas และ Kitthawee

(2007) ได้ใช้คุณสมบัติ Impact response ในการอธิบายคุณสมบัติความแน่นเนื้อที่เปลี่ยนแปลงตามอายุของมะม่วงได้ แต่อย่างไรก็ตามการใช้คุณสมบัติ Impact response นั้นใช้ได้กับการตัดแยกความแน่นเนื้อของผลไม้ที่มีลักษณะไม่แข็งมาก ซึ่งคุณสมบัติความถี่ธรรมชาติมีความเหมาะสมกว่าในการวัดความแน่นเนื้อของผลไม้ที่มีลักษณะแข็ง (Shmulevich 1998; De Ketelaere *et al.*, 2001)

การวัดความถี่ธรรมชาติ

วัตถุหลาย ๆ อย่างเมื่อเราทุบ ตี ดึง เคาะ หรือกระแทกจะเกิดการสั่นขึ้น เมื่อวัตถุสั่นจะเกิดความถี่เฉพาะตัวของวัตถุซึ่งก็คือ Natural frequency หรือความถี่ธรรมชาตินั่นเอง วัตถุแต่ละชนิดจะมี Natural frequency หรือมีกลุ่มความถี่ที่วัตถุแต่ละชนิดกัน วัตถุบางอย่างสั่นที่ Single natural frequency ในขณะที่วัตถุอื่นอาจมีหลาย Mode ของการสั่น และสามารถสั่นได้ในทุก Mode ของการสั่น ดังนั้นวัตถุจะมี Natural frequency ที่ความถี่เดียว หรือมากกว่า 1 ความถี่ ซึ่งจะเกิดการสั่นเมื่อเราออกแรง เคาะ หรือกระบวนกรรบบกวนด้วยวิธีอื่น ความถี่ธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัตถุหากวัตถุมีความหนาแน่นมากความถี่ก็จะมีค่าสูง แต่ถ้าหากความหนาแน่นน้อยความถี่ก็จะมีค่าน้อย

สมบัติด้านการตอบสนองด้วยความถี่ของผลไม้

การศึกษาการใช้คลื่นเสียงในการตรวจวัดความสุก - แก่ ของผลไม้โดยใช้คลื่นเสียงในระดับ Sonic และ Ultrasonic เป็นวิธีการหนึ่งที่จะวัดความสุก - แก่ ของผลไม้โดยไม่ทำให้ผลไม้เกิดการเสียหาย โดยทั่ว ๆ ไปเกษตรกร และพ่อค้าตลอดจนผู้บริโภคจะวัดหรือคาดคะเนความสุก - แก่ ของผลไม้โดยการสังเกตจากสี การติด การเคาะฟังเสียง

เทคนิคการวัดความถี่ธรรมชาติมีหลักการที่สำคัญ 2 วิธี คือ

1. ทำให้วัสดุหรือผลไม้ที่ต้องการวัดความถี่ธรรมชาติสั่นในช่วงความถี่ที่ครอบคลุมความถี่ธรรมชาติของวัสดุหรือผลไม้ นั้น ๆ แล้ววัดผลตอบสนองของวัสดุต่อช่วงความถี่ ซึ่งโดยทั่วไปจะวัดออกมาในรูปของขนาดการสั่นที่สัมพันธ์กับความถี่ที่เพิ่มขึ้น ความถี่ธรรมชาติของวัสดุหรือผลไม้คือความถี่ธรรมชาติที่วัสดุหรือผลไม้มีการตอบสนองมากที่สุด หรือมีขนาดการสั่นสูงสุด เครื่องมือที่ทำให้ผลไม้สั่นในช่วงความถี่ที่นิยมใช้กันคือ เครื่องสั่น (Vibrator) และเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดการตอบสนองของ

ผลไม้ต่อความถี่คือ เซ็นเซอร์วัดการสั่น (Accelerometer) การทำให้วัสดุสั่นในลักษณะนี้เรียกว่า Forced vibration

2. วิธีการกระตุ้นให้ผลไม้สั่นโดยอิสระตามธรรมชาติในลักษณะที่เรียกว่า Free vibration ซึ่งผลไม้จะสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติหลังการถูกกระตุ้น โดยทั่วไปการกระตุ้นจะใช้วิธีการเคาะเบา ๆ ให้ผลไม้สั่น ความถี่ในการสั่นจะวัดโดยเครื่องวัดเสียง ในกรณีนี้ค่าความถี่ของเสียงก็คือความถี่ธรรมชาติของผลไม้

จะเห็นว่าหลักการหาความถี่ธรรมชาติกระทำโดยใช้อินพุท (Input) ต่อผลไม้แล้ววัดการตอบสนองด้านความถี่ของผลไม้ต่ออินพุทนั้น

ดัชนีความถี่ธรรมชาติ

Abbott *et al.* (1968) ศึกษาเกี่ยวกับการวัดการตอบสนองเชิงความถี่ของผลแอปเปิ้ลต่อการกระตุ้นด้วยสัญญาณสั่นที่มีความถี่เป็นช่วง พบว่าการสั่นสัมพันธ์กับความถี่ที่เปลี่ยนไป มีความถี่ที่เด่นอยู่ 2 ค่าที่ให้ขนาดการสั่นสูงสุด ความถี่ธรรมชาติ (Resonant frequency) ค่าที่ 2 ค่อนข้างคงที่ และ ความถี่ค่าที่ 2 ที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนผกผันกับน้ำหนัก คือ น้ำหนักที่มากกว่าจะให้ f_2 น้อยกว่า ซึ่งเป็นพล็อตระหว่าง f และ $1/m$ ของแอปเปิ้ล 9 ผล ที่เก็บเกี่ยวในวันเดียวกันและนำมาเก็บที่อุณหภูมิห้อง วัดค่า f และ m 3 ครั้ง ระหว่างการเก็บรักษา และพบว่า ความชันของกราฟซึ่งคือ $f^2 m$ จะลดลง เมื่อแอปเปิ้ลเก็บนานขึ้นในห้องเก็บรักษา ดังนั้น $f^2 m$ น่าจะเป็นดัชนีที่ใช้วัดค่าความแก่หรือความสุกของผลไม้ ต่อมานักวิจัยปรับแก้ดัชนีนี้ใหม่โดยแสดงว่าสูตร $f^2 m^{2/3}$ มีความเหมาะสมมากกว่า $f^2 m$ ในเชิงของหน่วยที่วัด

ความสัมพันธ์ของ $f^2 m^{2/3}$ กับอายุเก็บเกี่ยว (Harvesting data) และเวลาในการเก็บเกี่ยว

$f^2 m$ จะลดลงเมื่อเก็บเกี่ยวที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน และ เมื่อเก็บรักษาผลไม้หลังจากเก็บเกี่ยวพบว่า $f^2 m$ ลดลงตามเวลาในการเก็บรักษา และจะลดลงในห้องเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงในอัตรา มากกว่าเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ Terdwongworakul (1995) พบว่า $f^2 m^{2/3}$ ของแอปเปิ้ลลดลงในลักษณะ Exponential ขณะเก็บรักษา และ $f^2 m^{2/3}$ สามารถนำมาใช้แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญเสีย น้ำหนักได้ โดยมีข้อได้เปรียบ คือ หาค่าได้ทันที ในขณะที่การคำนวณ %weight loss จะต้องวัดค่า 2 ครั้งคือ ค่าเริ่มต้นและค่าในขณะที่วัดซึ่งส่วนใหญ่คือ การบันทึกน้ำหนักที่หายไปในช่วงเวลา

ชูศักดิ์ และคณะ (2543) ได้รายงานว่าคุณสมบัติของผลทุเรียนสามารถตรวจสอบโดยวัดความถี่ธรรมชาติโดยการวิเคราะห์ความถี่เสียงและค่า Power spectrum density ที่เกิดจากการเคาะผลทุเรียน ค่าความถี่ที่ตรงกับ Power spectrum density สูงสุดคือค่าความถี่ธรรมชาติที่ใช้ในการกำหนดค่าความสุกแก่ของทุเรียน และ พบปัญหาในการทดลองเมื่อขนาดของผลทุเรียนเปลี่ยนไป ณัฐวุฒิ (2546) ศึกษาหาความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยใช้ความถี่ธรรมชาติและความแข็งแรงก้าน โดยได้เก็บทุเรียนที่มีอายุหลังวันดอกบานตามกำหนด แล้วบันทึกสัญญาณเสียงที่เคาะได้จากทุเรียน พูของทุเรียน จากนั้นตัดก้านออกมาวัดหาค่าความแข็งแรงโดยการบีบก้านผลทุเรียนจากนั้นนำเนื้อทุเรียนบริเวณกลางพูของทุเรียนไปหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อแห้งของแต่ละพู พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อแห้งของทุเรียนแต่ละพูจะมีค่าที่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อแห้งเฉลี่ยจากพูเอกแล้ว ทุเรียนจะแก่เมื่ออายุหลังวันดอกบาน 128 วัน แต่ถ้าหากต้องการให้ทุเรียนพูของผลทุเรียนแก่จะต้องเก็บเกี่ยวหลังวันดอกบานมากกว่า 136 วัน Chen *et al.* (1992) ศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองทาง Acoustic ของผลแอปเปิ้ลโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์การวัดและแบบใช้คนฟัง โดยการเคาะแบบใช้เครื่องมือเคาะกับใช้นิ้วชี้ตี และการจับยึดที่แตกต่างกันคือ การจับยึดโดยแขวนที่ก้านผล วางผลด้วยทรงกระบอกและวางบนถ้วย ผลที่ได้จากการเปลี่ยนตำแหน่งการเคาะไม่ค่อยมีผลกับ Resonant frequencies ในตำแหน่ง Peak ที่หนึ่งกับสองแต่จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดในตำแหน่งที่สาม การจับยึดโดยใช้นิ้วคนจะได้ค่าน้อยที่สุด ส่วนการจับยึดในวิธีอื่นๆ จะได้ค่าที่คล้ายๆกัน Sugiyama *et al.* (1994) ทำการวัดหาความแน่นเนื้อของผล Muskmelon โดยวิธี Acoustic impulse transmission เพื่อดูลักษณะการสั้นของผลตัวอย่าง หลังจากถูกกระแทก และประมาณหา Ripeness index โดยการทดลองได้ใช้ลูกตุ้มที่มีการปรับตำแหน่งองศาที่แตกต่างกันเคาะลงบนผล Muskmelon ในหลายๆ ตำแหน่ง แต่กำหนดตำแหน่ง Microphone ในตำแหน่งที่กำหนดไว้จากผลการทดลองตำแหน่งองศาของลูกตุ้มที่ดี คือ 45 องศา Galili *et al.* (1998) ได้พัฒนาวิธีทาง Acoustic สำหรับการทดสอบแบบไม่ทำลายเพื่อใช้ทดสอบผล Avocado เพื่อหา Firmness index, Internal damping และ Centeroid ของผลการตอบสนองความถี่ โดยใช้แรงกระตุ้นและใช้ Flexible piezoelectric sensor เป็นตัวตรวจวัด ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองทาง Acoustic ได้นำไปเปรียบเทียบกับวิธี Destructive penetration โดยการทดลองได้ใช้หัวเคาะทำจากอลูมิเนียม และอลูมิเนียมหุ้มยางในหลายๆ ขนาด ผลที่ได้ก็คือ หัวเคาะที่ไม่หุ้มยางจะได้ค่าความถี่ที่สูงกว่า และค่า Peak ที่สูงที่สุดใน Frequency spectrum จะง่ายที่สุดเมื่อนำมาตรวจหาความแน่นเนื้อ

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความถี่ธรรมชาติ

ชนิดของ Sensor ให้ค่า f_2 ต่างกัน ถ้าใช้ Sensor วัดการสั่นคนละชนิด ตำแหน่งที่วัด สัญญาณบนผลไม้จะมีผลกระทบต่อสัญญาณน้อยมาก ในเชิงของความถี่ของสัญญาณเมื่อวางแอปเปิ้ล ในลักษณะต่าง ๆ กัน หรือใช้ตำแหน่งที่สัมพันธ์ระหว่าง Sensor และสัญญาณการสั่นอินพุท ต่าง ๆ กัน เช่นให้ Input ด้านข้างวัดสัญญาณจะไม่เปลี่ยนแปลง

รูปร่างผลไม้ก็มีการศึกษาพบว่า มีผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติ โดยผลไม้ที่มีผลค่อนข้างกลม การวัดค่าความถี่ตำแหน่งต่าง ๆ บนผลจะค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ผลไม้ที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงกลม ค่าความถี่ที่วัดได้จากตำแหน่งต่าง ๆ จะแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยดังนั้นจึงควรวัดหลาย ๆ ตำแหน่งแล้วนำค่าเฉลี่ยมาใช้

หลักพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้

การศึกษาการทดสอบแบบไม่ทำลายสำหรับผลไม้และผักเริ่มมีขึ้นในปี 1970 ที่ประเทศญี่ปุ่น โดยเป็นการวัดสีที่ผิวผลิตภัณฑ์ ด้วยแสง หลังจากนั้นก็ได้มีการศึกษาเพิ่มมากขึ้นและได้มีการนำเทคนิคแบบต่างๆ มาใช้มากขึ้น เช่น Delayed light emission (DLE), Infrared (IR), Fluorescence, Sound response, และ Impact fore response ใช้หาความบริสุทธิ์ ของผลไม้ และคุณสมบัติอื่นๆ ในปี 1980 เทคนิค Near infrared spectroscopy (NIR) ได้ถูกใช้ในการทำนายค่าองค์ประกอบทางเคมีในผลิตภัณฑ์หลายๆ ชนิด คือ Peaches, Japanese pear, Apples, Satsuma oranges และ ผลิตภัณฑ์อื่นๆ (Sumio, 2002) ซึ่งอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared) เป็นคลื่นแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 780 - 2500 นาโนเมตร (นิพนธ์, 2545) โดยมีหลักการดังนี้คือเมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ แล้วสารเกิดการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง Near infrared ทำให้โมเลกุลของสารเกิดการสั่นที่ความถี่สูง ในการสั่นของพันธะต่างๆ จะเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละพันธะ รวมทั้งตำแหน่งของโมเลกุลและช่วงการดูดกลืนแสงก็เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละหมู่ฟังก์ชันด้วย ดังนั้นเมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นตรงกับพันธะในโมเลกุลก็จะเกิดการสั่นและดูดกลืนรังสีไว้ ทำให้มีพลังงานมากกว่าปกติ จากเดิมที่โมเลกุลอยู่ในสภาวะพื้น (Ground vibration level) เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจะอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited vibration level) อย่างไรก็ตามเมื่อโมเลกุลกลับสู่สภาวะพื้นก็จะปล่อยพลังงานที่รับเพิ่มเข้าไปออกมาในรูปพลังงานความร้อน 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 C-H พบในน้ำมัน (นิพนธ์, 2545)

การดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดของโมเลกุลสารอินทรีย์ ช่วงคลื่นอินฟราเรดสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 3 ช่วง ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด

ช่วงคลื่น	ช่วงความยาวคลื่น (μm)	เลขคลื่น (cm^{-1})
อินฟราเรดย่านใกล้ (Near IR, NIR)	0.78 – 2.5	12,800 – 4,000
อินฟราเรดย่านกลาง (Mid IR or fundamental IR)	2.5 – 50	4,000 – 200
อินฟราเรดย่านไกล (Far IR)	50 – 1,000	200 – 10

ที่มา: นิพนธ์ (2545)

ช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared หรือ Overtone region) มีความยาวคลื่นในช่วง 780–2,500 นาโนเมตร แยกการดูดกลืนคลื่นแสงเกิดจากโอเวอร์โทน และมักพบว่าช่วงการดูดกลืนแสงที่ได้ค่อนข้างต่ำ มีประโยชน์ในการวิเคราะห์หาปริมาณของกลุ่มฟังก์ชันนัล และศึกษาโครงสร้างโมเลกุล

ช่วงอินฟราเรดย่านกลาง (Middle infrared หรือ Fundamental region) มีความยาวคลื่นในช่วง 2,500–50,000 นาโนเมตร สเปกตรัมที่ได้ค่อนข้างยุ่งยาก เพราะโครงสร้างของโมเลกุลที่สมบูรณ์ การวิเคราะห์จึงต้องใช้วิธีเปรียบเทียบกับสเปกตรัมที่ทราบโครงสร้างแล้ว ใช้ในการวิเคราะห์พวกกลุ่มฟังก์ชันนัล

ช่วงอินฟราเรดย่านไกล (Far infrared) มีความยาวคลื่นในช่วง 50,000–1,000,000 นาโนเมตร ช่วงนี้ไม่ค่อยที่จะได้ใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากสเปกตรัมไม่ได้เกิดจากการสั่นหรือการหมุนของ

โมเลกุล แต่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการทรานสิชันที่เกี่ยวกับการหมุนของโมเลกุล (วิชัย และคณะ, 2527)

หลักการของเครื่อง Near infrared spectroscopy (NIR)

ส่วนประกอบหลักและการออกแบบเครื่องมือ Spectrometer แต่ละประเภทจะมีความคล้ายคลึงกัน โดย NIR นั้นจะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแสง ตัวเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ ตำแหน่งที่วางตัวอย่าง เครื่องตรวจจับและบันทึกผล

1. แหล่งกำเนิดรังสีในช่วง NIR นั้นโดยส่วนใหญ่จะใช้หลอดทั้งสแตนเพราะราคาถูกและใช้งานได้ทันที แล้วใช้ตัวฟิลเตอร์ช่วยกรองแสงในช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการออกเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างร้อนจนเกินไป หรือใช้ LED เป็นแหล่งกำเนิดโดยค่าความยาวคลื่นที่ได้จะขึ้นกับสารที่ใช้ทำตัว LED อย่างไรก็ตาม LED ไม่สามารถให้ความยาวคลื่นในช่วง 1,700-2,500 นาโนเมตรได้ ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมนำไปใช้งาน แต่ก็เหมาะสำหรับเครื่องมือแบบพกพาเพราะต้องการกำลังไฟฟ้าน้อย มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและพลังงานของผลลัพท์ที่ได้ก็ไม่เพิ่มสูงขึ้นแม้จะมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของแหล่งกำเนิด

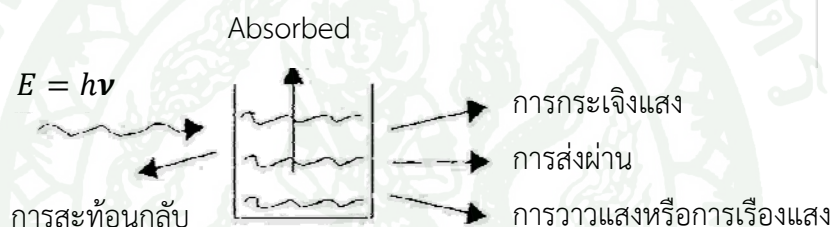
2. โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) ช่วยในการกระจายแสงโดยอาศัยเกรตติง และควบคุมให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการด้วยช่องผ่านแสงเข้า (Entrance slit) และช่องผ่านแสงออก (Exit slit) ตัวอย่างจะมีการดูดกลืน หรืออินยอมน์ให้รังสีทะลุผ่านหรือสะท้อนกลับนั้น ขึ้นกับรูปแบบและองค์ประกอบของตัวอย่าง เช่น ของแข็ง ของเหลว อิมัลชัน สารแขวนลอย

3. ตำแหน่งที่วางตัวอย่างจะต้องได้รับการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบของการวิเคราะห์และปริมาณของอนุภาคที่ใช้วิเคราะห์ เช่น ถ้วยสำหรับใส่ตัวอย่างจะเหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่เป็นตะกอนแห้งหรือในกรณีที่มีปริมาณมากถ้วยเหล่านี้จะมีการหมุนเป็นต้น เซลล์สำหรับใส่ตัวอย่างเหล่านี้จะต้องทำจากวัสดุที่ยอมให้แสงในช่วง NIR สามารถทะลุผ่านได้ เช่น ควอตซ์ หรือแก้ว และมีระยะทางเดินของแสงที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่าง

4. อุปกรณ์สำหรับตรวจจับ (Detector) ใช้ในการตรวจจับปริมาณแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการทาง Photoconductive effect การเลือกเครื่องตรวจจับนั้นขึ้นกับช่วงความยาวคลื่นและการออกแบบตัวแปรต่างๆ ของ Spectrometer ซึ่งซิลิกอนจะเหมาะสมสำหรับแสงในช่วงความ

ยาวคลื่นที่มองเห็นได้และ NIR ช่วงความยาวคลื่นสั้น (400-1,100 นาโนเมตร) ในขณะที่ลีดซัลไฟด์ หรือเซเลเนียม

หลักการของสเปกโตรสโคปี คือ เมื่อลำแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้าไปยังสารละลาย หรือวัตถุ จะมีแสงบางส่วนที่จะถูกดูดกลืน (Absorbed) บางส่วนผ่านทะลุออกไป (Transmitted) บางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ (Reflected) บางส่วนเกิดการวาวแสงหรือการเรืองแสง (Fluorescence or Phosphorescence) และบางส่วนอาจเกิดการกระเจิงแสง (Scattered) ดัง แสดงในภาพที่ 11 (นิพนธ์, 2545)



ภาพที่ 11 การกระทำกับสารในแบบต่าง ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: นิพนธ์ (2545)

สเปกโตรสโคปีมีกฎของการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กฎ ดังนี้คือ

1. กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) กล่าวว่า “เมื่อแสงสีเดียว (Monochromatic light) ซึ่งก็คือแสงความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว (Homogeneous) สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน” (วิชัย และคณะ, 2527)

2. กฎของเบียร์ (Beer's law) กล่าวไว้ว่า “เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปรโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น” (วิชัย และคณะ, 2527)

ในทางปฏิบัติปริมาณความเข้มข้นของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่ลำแสงส่องผ่าน จึงต้องรวมกฎทั้งสองเข้าด้วยกันเรียกว่ากฎของเบียร์ – แลมเบิร์ต เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \mathcal{E}bc \quad (1)$$

เนื่องจาก T (Transmittance) เท่ากับ

$$T = \frac{I_0}{I} \quad (2)$$

เพราะฉะนั้น

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \mathcal{E}bc = \log \frac{1}{T} \quad (3)$$

เมื่อ I = ความเข้มของแสงความยาวคลื่นเดียว

\mathcal{E} = สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงปกติเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นและอุณหภูมิ

I_0 = ความเข้มของแสงก่อนผ่านตัวกลาง เมื่อ $b = 0$

b = ความหนาของตัวกลางในหน่วยเซนติเมตร

c = ความเข้มข้นของสารในหน่วย โมล/ลิตร

A = ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

โมเลกุลของสารแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์กับช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันเนื่องจากการจัดเรียงโครงสร้างของโมเลกุลต่างกัน นอกจากนั้นในแต่ละโมเลกุลจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นมากกว่า 1 ช่วง เช่นโมเลกุลของน้ำ (H_2O) ที่มีมากในผลิตภัณฑ์อาหาร มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น 4 ช่วง คือ 760, 970, 1,450 และ 1,940 นาโนเมตร ดังนั้นถ้าทำการทดสอบที่ช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวจะสามารถหาความสัมพันธ์ของน้ำภายในตัวอย่างได้ (Osborne *et al.*, 1993) นอกจากนั้นในผลิตภัณฑ์อาหารยังมีองค์ประกอบอื่นๆ ที่สำคัญ เช่น โปรตีน ไขมัน แสงในตารางที่ 5

ในการตรวจวัดตัวอย่างด้วยเครื่อง NIR spectroscopy ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของสเปกตรัมที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance: $A = -\log 1/T$) และความยาวคลื่น (นาโนเมตร) โดยเครื่อง NIR นั้นจะมีการต่อเชื่อมกับโปรแกรมสำเร็จรูปทางคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบภายในอาหารกับช่วงอินฟราเรด

องค์ประกอบ	โมเลกุลที่เกี่ยวข้อง	ช่วงที่เกี่ยวข้อง	
		ความยาวคลื่น (nm)	เลขคลื่น (cm^{-1})
น้ำ	- OH	1,920 – 1,950,	5,208 – 5,128,
		1,400 – 1,450	7,142 – 6,896
โปรตีน	- NH	2,080 – 2,220,	4,807 – 4,504,
		1,560 – 1,670	6,410 – 5,988
ไขมัน	Methylene, - CH, - CH ₂ , - CH ₃	2,300 – 2,350,	4,347 – 4,255,
		1,680 – 1,760	5,952 – 5,681
คาร์โบไฮเดรต	- CO, - OH combination	2,060 – 2,150	4,854 – 4,651

ที่มา: นิพนธ์ (2545)

ปัจจุบันได้มีการเอาเทคนิค Visible (Vis) และ Near infrared spectroscopy มาใช้ในการตรวจสอบผักและผลไม้เพิ่มมากขึ้น Kavdir *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ Visible (Vis) และ Near infrared spectroscopy ในการทดสอบคุณภาพของแตงกวา จุดประสงค์เพื่อวัดค่าความแน่น เนื้อ สี และผิว และน้ำหนักแห้ง โดยการใช้ Vis/NIR spectroscopy โดยใช้ช่วงคลื่น 550–1,100 นาโนเมตร และสร้างสมการทำนายค่าด้วยวิธี Partial least squares ต่อมา Fu *et al.* (2007) ได้เปรียบเทียบวิธีการทดสอบแบบ Transmission mode และ Reflectance mode ในช่วงคลื่น Vis/NIR spectroscopy สำหรับตรวจสอบอาการ Brown heart ในลูกแพร์ โดยใช้ช่วงคลื่นอยู่ที่ 400-1028 นาโนเมตร Teerachaichayut *et al.* (2007) ได้ศึกษาวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายในการตรวจสอบอาการเนื้อแก้วในมังคุด โดยใช้ช่วงคลื่น Short wavelength near infrared (SW-NIR) transmittance spectroscopy โดยใช้ช่วงคลื่น 640-980 นาโนเมตร Sohn *et al.* (2000) ใช้เทคนิค NIR วัดคุณภาพของแอปเปิ้ลเพื่อตรวจสอบคุณภาพภายในของแอปเปิ้ล คือ ความหวาน ปริมาณกรด และความแน่นเนื้อ โดยสแกนผลแอปเปิ้ล ในช่วงความยาวคลื่น 1,100-2,500 นาโนเมตร Sohn *et al.* (2001) ได้ทำการพัฒนาสมการ Calibration เพื่อตรวจสอบความหวานของแอปเปิ้ลพันธุ์ฟูจิ ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของแหล่งเพาะปลูกและปีที่เก็บเกี่ยวแล้ววิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Brix ของน้ำคั้น ผลสรุปว่า สามารถใช้เทคนิค NIR ในการประเมินความหวานของแอปเปิ้ลได้ และแหล่งเพาะปลูกรวมถึงปีที่เก็บเกี่ยว มีอิทธิพลต่อการทำสมการ Calibration และ Mutsuo *et*

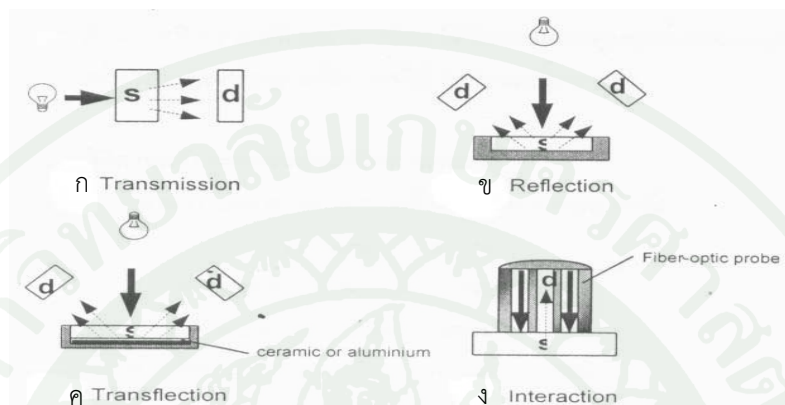
al. (1979) ได้ทำการศึกษาโดยใช้แสงเพื่อวัดค่าสีของมะเขือเทศ พบว่าที่ความยาวคลื่น 660, 620 และ 550 นาโนเมตร แสงมีความสัมพันธ์กับสีของมะเขือเทศ ซึ่งประกอบไปด้วยคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์อย่างมาก และสามารถใช้เป็นดัชนีในการวัดการเปลี่ยนแปลงของสีในระหว่างการสุกของมะเขือเทศได้ Kawano *et al.* (1992) ศึกษาการวัดปริมาณน้ำตาล โดย Near infrared spectroscopy ด้วย Fiber optic probe ในผลพีชพันธุ์ Shimizu Hakuto โดยวัดในช่วงความยาวคลื่น 680 – 1,235 นาโนเมตร ผลพบว่าจากสเปกตรัมที่ปรับแต่งด้วย Second derivative ที่ค่า Brix สูง กลาง และ ต่ำ พบความยาวคลื่นที่ 906 นาโนเมตรมีการดูดกลืนแสงอย่างชัดเจน และให้เป็นความยาวคลื่นของน้ำตาลตัวแรก ในสมการ Calibration ค่า Correlation coefficient สูงสุดอยู่ที่ 0.97 และ ความยาวคลื่นที่ใช้สร้างสมการได้จากสเปกตรัม Second derivative คือ 906, 878, 870 และ 889 นาโนเมตร และ เทคนิค NIR มีความแม่นยำที่จะวัดปริมาณน้ำตาลในผลพีช Kawano *et al.* (1995) ศึกษาถึงอุณหภูมิต่อการวัดค่า Brix ของพีช โดยใช้ เทคนิค NIR ในช่วงคลื่น 680 – 1,235 นาโนเมตร โดยควบคุมอุณหภูมิของผลไม้ ที่อุณหภูมิ 21, 26 และ 31 องศาเซลเซียสพบว่าสเปกตรัมที่ได้มีผลกระทบจากอุณหภูมิของตัวอย่าง เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นการดูดกลืนแสงที่ 841 และ 966 นาโนเมตร จะมีความมากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเกิดอิทธิพลได้ง่ายต่อน้ำ ดังนั้นน้ำจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

เทคนิคในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

เป็นการจัดวางตัวอย่างเพื่อให้ได้สเปกตรัมที่สัมพันธ์กับปริมาณค่าทางเคมีที่สนใจโดยใช้เทคนิค NIR ได้แก่ (ศุมาพร, 2545)

1. Transmission เป็นการวัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมาในด้านตรงกันข้ามกับด้านที่แสงตกกระทบ ดังภาพที่ 12ก
2. Reflection แสงตกกระทบที่พื้นผิวของตัวอย่าง วัดปริมาณแสงที่สะท้อนออกมา โดยรวมถึงแสงที่สะท้อนจากเนื้อตัวอย่างส่วนที่ใกล้ผิวตัวอย่างได้อีกด้วย ดังภาพที่ 12ข
3. Transflection แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบตัวอย่าง ผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบแผ่นเซรามิก ทอง หรืออะลูมิเนียมในชั้นใต้สุดแล้วสะท้อนกลับมายัง Detector ดังภาพที่ 12ค

4. Interaction ใช้ในกรณี Fiber optics probe แสงจากแหล่งกำเนิดแสงย่าน NIR ส่งผ่านลงมายังตัวอย่างในวงแหวนด้านนอกแล้วแสงที่สะท้อนออกมาจากเนื้อตัวอย่างถูกส่งไปยัง Detector บริเวณส่วนกลาง Fiber optics probe ดังภาพที่ 12ง



ภาพที่ 12 เทคนิคการวัดตัวอย่าง

ที่มา: ศุมาพร (2545)

การแปลงข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ (Pretreatment of spectral data)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสเปกตรัมมากได้แก่ ความชื้น และขนาดของอนุภาค ซึ่งทำให้สเปกตรัมที่ได้ มีความแตกต่างกัน เนื่องมาจากการกระเจิงแสง และความแตกต่างที่เป็นผลมาจากความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการวัด ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความแตกต่างในผลเชิงบวก (Additive scattering) ทำให้สเปกตรัมเพิ่มขึ้นตามตลอดช่วงความยาวคลื่น หรือผลเชิงคูณ (Multiplicative scattering) สเปกตรัมเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสูงขึ้น

นอกจากนี้สเปกตรัมที่ได้จากการดูดกลืนแสง ในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ เป็นสเปกตรัมที่มีการเหลื่อมซ้อนทับกันอยู่ (Overlapping band) ดังนั้น ในการวิเคราะห์จึงควรนำไปปรับแต่งด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ก่อน เพื่อให้สเปกตรัมมีความเด่นชัดมากขึ้น และลดความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง วิธีการที่นิยมใช้มี 3 วิธี คือ

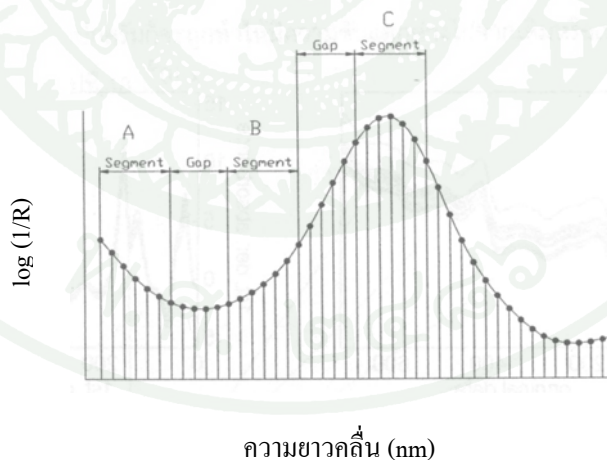
1. Derivative transformation

1.1 First derivative การคำนวณ Derivative หรือ ความชันของสเปกตรัม สามารถทำได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{First derivative} &= \text{Slope} \\ &= B - A \end{aligned} \quad (4)$$

โดยที่ A และ B คือ ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของ Segments ที่มีช่วงเท่ากันและอยู่ติดกัน

ในการคำนวณต้องกำหนดขนาดของ Segment และ Gap ก่อน ซึ่งขนาด Segment คือ ขนาดของความยาวคลื่นที่เราทำการเฉลี่ย ให้ได้ค่าใหม่เพื่อเป็นตัวแทนขึ้นมาหนึ่งจุด แล้วทำการข้ามช่วงความยาวคลื่นไปเท่ากับขนาดของ Gap เพื่อเริ่มนับเป็นจุดแรกในการคำนวณ Segment ต่อไป ตัวอย่างดังในภาพที่ 13 เป็นสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นที่แต่ละจุดห่างกัน 2 นาโนเมตร มีขนาด Segment และ Gap เท่ากับ 12 และ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยที่ จุด A คือ จุดที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยในช่วงความยาวคลื่น 12 นาโนเมตร (ขนาด Segment) จากนั้นข้ามไป 10 นาโนเมตร (ขนาด Gap) แล้วจึงเฉลี่ยอีกครั้งในช่วงความยาวคลื่น 12 นาโนเมตร เพื่อให้เป็นจุด B แล้วนำค่า A ลบจากค่า B ผลที่ได้นำไปแทนค่าสเปกตรัมที่จุดเริ่มต้นของ Segment แรก ซึ่งการคำนวณจะกระทำทุก Segment ต่อเนื่องกันไปจนตลอดความยาวคลื่น ต่อจากนั้นก็ขยับ Segment ไปทางขวา 1 จุด หรือ 2 นาโนเมตร แล้วคำนวณซ้ำเหมือนที่กล่าวมาจนเสร็จสิ้น



ภาพที่ 13 ขนาด Segment และ Gap ที่กำหนดในสเปกตรัมเพื่อคำนวณ Derivative

ที่มา: อนุพันธ์ (2545)

First derivative ใช้ได้ผลกับตัวอย่างที่มีเนื้อสม่ำเสมอ และมีการกระจายของอนุภาคสม่ำเสมอทั่วถึง นอกจากนั้นแล้ว First derivative ของสเปกตรัมจะช่วยแก้ปัญหาที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น

1.2 Second derivative คือ การคำนวณผลลบของค่าที่ได้จาก First derivative ที่ติดกันนั่นเอง หรือเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัม มาจากสูตรดังนี้

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

ซึ่งเขียนแทนด้วย

$$d^2 \log(1/R) \quad (5)$$

สามารถคำนวณได้จาก

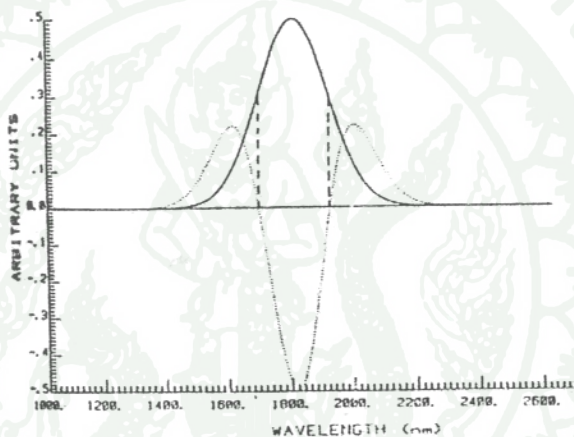
$$\begin{aligned} \text{Second derivative} &= \text{Change in slope} \\ &= \text{First derivative แรก} - \text{First derivative ถัดมา} \\ &= (C - B) - (B - A) \\ &= C - 2B + A \end{aligned} \quad (6)$$

โดยที่ A, B และ C เป็นค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของ Segments ที่ติดกัน และมีช่วงเท่ากัน

การคำนวณคล้ายกับ First derivative โดยในการคำนวณค่า Second derivative ของจุดแรกต้องหาค่า C ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมในช่วงที่สาม หรือ C ในภาพที่ 14 แล้วคำนวณผลลบของค่าเฉลี่ยใน Segment แรก และ Segment ที่สอง ซึ่งก็คือ B-A แล้วคำนวณผลลบของค่าเฉลี่ยใน Segment ที่สองและ Segment ที่สาม ซึ่งก็คือ C-B แล้วนำผลลบค่าแรกมาลบออกจากผลลบค่าที่สอง ตามสมการ ค่าผลลบสุดท้ายที่ได้นำไปแทนค่าสเปกตรัมที่จุดแรกของ Segment แรก และคำนวณผลลบตามสมการไปจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ต่อจากนั้นจึงเลื่อนไปทางขวา ยาว 1 จุด หรือ 2 นาโนเมตร แล้วทำการหาซ้ำจนเสร็จสมบูรณ์

การใช้ Second derivative จะช่วยลดผลกระทบจากการกระเจิงแสงทั้งที่เป็นผลเชิงบวกที่ทำให้ขนาดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น และผลเชิงลบที่ทำให้ขนาดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่น Second derivative ใช้ได้ดีกับตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ ผสมผสานกันอยู่

First derivative ให้ความหมายเป็นค่าความยาวคลื่นที่แต่ละความยาวคลื่น ซึ่งทำให้แปลความหมายยากกว่า Second derivative ซึ่งได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจาก Second derivative จะให้จุดยอดตรงกับจุดยอดของสเปกตรัมเดิม แม้ว่ากลับหัว ดังภาพที่ 14

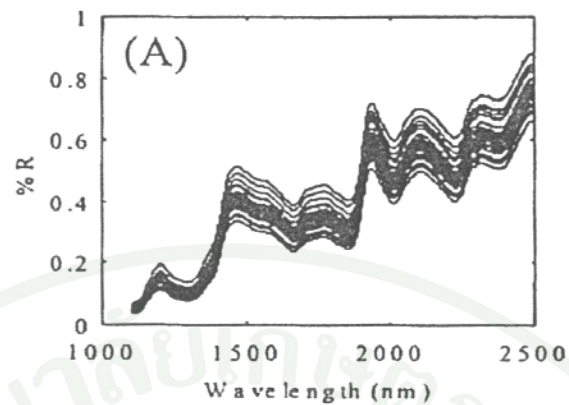


ภาพที่ 14 สเปกตรัม และ Second derivative ของสเปกตรัม

ที่มา: Hruschka (1987)

2. Multiplicative scatter correction (MSC)

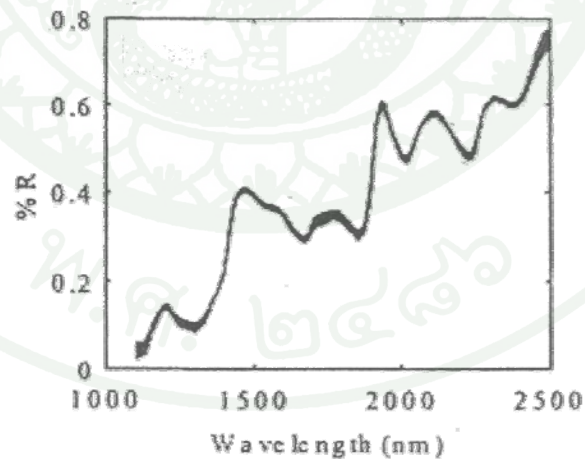
เป็นวิธีการที่ช่วยลดผลจากการกระเจิงของแสง ซึ่งโดยทั่วไปการกระเจิงของแสงทำให้ความชันของสเปกตรัมโดยรวมเปลี่ยนไปดังภาพที่ 15 คล้ายกับว่าสเปกตรัมถูกทำให้หมุนรอบจุดที่ความยาวคลื่นต่ำสุด



ภาพที่ 15 NIR สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect ก่อนการปรับแก้ด้วย MSC

ที่มา: Boyworth and Booksh (2001)

วิธีการ MSC คือ ทำการหามุมสเปกตรัมของแต่ละตัวอย่างให้มาตรงกับสเปกตรัมเฉลี่ย มีขั้นตอนคือ ในแต่ละตัวอย่างต้องหาค่าคงที่ค่าหนึ่งมาลบออกจากสเปกตรัมเพื่อลดผลที่เกิดจากการเลื่อนตัวของสเปกตรัม และต้องหาค่าคงที่ค่าหนึ่งมาหาร ค่า $\log(1/R)$ ของทุกๆ จุดเพื่อปรับความชันของสเปกตรัมที่เปลี่ยนไป ได้สเปกตรัมดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 NIR สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect หลังการปรับแก้ด้วย MSC

ที่มา: Boyworth and Booksh (2001)

3. Standard normal variate (SNV)

เป็นวิธีการกำจัดอิทธิพลของการกระเจิงแสงออกจากสเปกตรัม เป็นการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard normal variate, SNV) โดยเป็นวิธีที่มักจะใช้คู่กับการปรับแนวโน้มของเส้นสเปกตรัม (Detrending) โดยใช้การปรับแก้ด้วย SNV แล้วจึงตามด้วยการปรับแก้แนวโน้มหรือการลดความโน้มเอียงเส้นสเปกตรัมทั้งนี้เพื่อปรับแก้ผลที่เกิดจากการกระเจิงแสงที่มักส่งผลกระทบเป็นแบบผลคูณต่อการดูดกลืนแสงจากวิธี SNV เพื่อปรับแก้เพิ่มเติมโดยเป็นวิธีที่ลดความแปรปรวนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของเส้นสเปกตรัม (Baseline shift) วิธีการปรับแนวโน้มจะใช้ต่อจากวิธี SNV เสมอจะไม่ถูกมาใช้เพียงวิธีเดียว

เป็นการนำค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมของตัวอย่างนั้นๆ มาลบออกจากค่าสเปกตรัมที่แต่ละความยาวคลื่นตลอดช่วง และปรับแก้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานให้เท่ากับหนึ่งโดยนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณจากค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมตลอดช่วงมาหารค่าสเปกตรัมหรือค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความยาวคลื่น

$$A_{i(SNV)} = \frac{(A_i - \bar{a}_i)}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^p (A_{ij} - \bar{a}_i)^2}{(p-1)}}} \quad (7)$$

โดยที่ A_{ij} คือ ค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น j (ความยาวคลื่นมีทั้งหมด p ความยาวคลื่น) ของตัวอย่าง i และ \bar{a}_i คือ ค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนตลอดช่วงสเปกตรัมของตัวอย่าง i

การปรับแก้แนวโน้มของสเปกตรัมเริ่มจากการคำนวณสร้างสมการแนวโน้มในรูปแบบโพลีโนเมียลอันดับสาม ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยสี่สแควร์ (Linear least square regression) หรือหาสมการที่เป็นตัวแทนเส้นสเปกตรัมได้ดีที่สุด หลังจากนั้นนำค่าของสมการโพลีโนเมียลที่ได้ในแต่ละความยาวคลื่นไปลบออกจากค่าการดูดกลืนแสงที่ปรับแก้ด้วยวิธี SNV

การจำแนกกลุ่มด้วยเทคนิค Discriminant Analysis (DA)

การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มด้วยเทคนิค Discriminant Analysis เป็นวิธีการทางสถิติ ที่ใช้วิเคราะห์จำแนกกลุ่มตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป ด้วยการวิเคราะห์จากตัวแปรตาม 1 ตัว และตัวแปรอิสระ ตั้งแต่ 1 ตัวขึ้นไป การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้นอกจากจะสามารถจำแนกความแตกต่างระหว่างกลุ่มได้แล้ว ยังสามารถบอกธรรมชาติบางอย่างของการจำแนกกลุ่มได้ด้วย เช่น บอกได้ว่าตัวแปรใดจำแนกได้ดี มากกว่ากัน นั่นคือ สามารถบอกประสิทธิภาพ หรือน้ำหนักในการจำแนกของตัวแปรเหล่านั้น การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มเป็นการใช้ตัวแปรพยากรณ์หรือตัวแปรอิสระที่ร่วมกันพยากรณ์ตัวแปรตาม

การวิเคราะห์ข้อมูลจาก Near Infrared Spectral

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง NIR จะอยู่ในรูปของสเปกตรัม ส่วนข้อมูลของค่าคุณลักษณะและคุณภาพวิเคราะห์ได้จากวิธีแบบ Conventional นำข้อมูลที่ได้จากทั้ง 2 ส่วนมารวมเข้าด้วยกัน แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งขั้นตอนวิเคราะห์ข้อมูลประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือขั้นตอนการวิเคราะห์หาสมการ Calibration เพื่อใช้เป็น Model ในการวัดค่าคุณลักษณะคุณภาพต่างๆ ตามที่ต้องการตรวจสอบ ส่วนขั้นที่ 2 เป็นขั้นตอนการทดสอบความแม่นยำของสมการ Calibration ที่สร้างขึ้น ในขั้นตอนนี้จะเรียกว่าขั้นตอนการทำ Validation เพื่อเลือกสมการที่มีความเหมาะสม และสามารถทำนายค่าได้แม่นยำมากที่สุด เมื่อได้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือแล้วจึงจะนำสมการ Calibration ที่ได้ไปใช้ทำนายค่าคุณลักษณะที่ต้องการศึกษาจากสเปกตรัม NIR ที่ทำการวัดมาได้

การสร้างสมการ Calibration

การหาตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่จะทำการวิเคราะห์คุณภาพ มีวิธีการหา 2 วิธีหลัก คือ

1. Wavelength selection

เป็นวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระ เฉพาะความยาวคลื่นที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่จะทำการวิเคราะห์เทคนิคในการคัดเลือกมีหลายแบบเช่น

1.1 เลือกจากความถี่ความชำนาญ หรือเอกสารอ้างอิงที่บ่งบอกถึงช่วงความยาวคลื่นที่คาดว่าจะสัมพันธ์กับค่าที่จะทำการวิเคราะห์

1.2 อาจจะใช้เทคนิคทางสถิติในการคัดเลือกความยาวคลื่นที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์ เช่น Multiple regression หรือการสร้าง Correllelogram

การสร้าง Correllelogram เป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แกน X คือ ความยาวคลื่น กับ แกน Y คือ ค่า Correlation อย่างง่ายของความสัมพันธ์ระหว่าง Optical data ณ ความยาวคลื่นนั้น กับค่าวิเคราะห์ที่หามาได้ด้วยวิธี Reference measurement ซึ่งจะช่วยให้นักวิจัยสามารถคัดเลือกความยาวคลื่นที่มีความเป็นไปได้ที่จะสัมพันธ์กับค่าที่วิเคราะห์

วิธีการสร้างสมการ Calibration แบบ Wavelength selection อาศัยหลัก และวิธีการทางสถิติ มาช่วยในการสร้างสมการ เช่น Simple linear regression, Multiple linear regression เป็นต้น

แต่การเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดไม่ใช่เรื่องง่าย และอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ ค่าข้อมูลที่ไม่ถูกต้องอาจเกิดปัญหาทำให้ได้ค่าทำนายที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าแท้จริง อันเนื่องมาจากความผิดพลาดจากการสร้างสมการ หรือเกิดปัญหาเมื่อจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการน้อย และทำให้ได้สมการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไปในสมการทำให้ได้ข้อมูลที่ไม่น่าเชื่อถือ

1.2.1 Simple linear regression หมายถึง สมการ Regression ที่ประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) เพียงตัวเดียวในสมการ โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดหรืออธิบายความหมายของข้อมูลให้ได้มากที่สุด เส้นตรงที่ได้นี้เรียกว่า Linear regression สมการของ Linear regression คือ $y = b_0 + b_1X$

โมเดลของ Linear regression คือ $Y = b_0 + b_1X + e$ (8)

โดย b_0 = ค่าคงที่ ณ จุดตัดแกน Y

b_1 = ค่าคงที่ Regression หรือ ค่าความชันของกราฟ

e = ผลต่างระหว่างค่า $Y - y$ = เรซิดัล (Residual) หรือค่าความคลาดเคลื่อน

ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$b_0 = \sum \bar{Y} - b\bar{X} \quad (9)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (10)$$

โดย n = จำนวนตัวอย่าง (Observation)

การสร้างสมการด้วยวิธี Simple linear regression จะพิจารณาโดยให้มีค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) น้อยที่สุดโดยพิจารณาจากค่าความแปรปรวนที่เกิดจากการประมาณค่า Y ภายใต้อ่า X (Minimize sum of square error: SSE)

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_1 X_i)^2 \quad (11)$$

การวัดความน่าเชื่อถือของการประมาณโดยใช้สมการ Regression วัดได้จาก Standard Error of Calibration (SEC) หรือ Residual standard deviation ($S_{y,x}$ หรือ SEC) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$SEC = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_1 X_i)^2}}{n-2} = \sqrt{\frac{SSE}{n-2}} \quad (12)$$

หรือวัดจาก Root Mean Square Error of Calibration (RMSEC) ซึ่งคำนวณจาก

$$RMSEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i)^2}{n-2}} \quad (13)$$

โดยที่ $y_i = b_0 + b_1 X_i$ และ $Y_i = b_0 + b_1 X_i$

นอกจากนี้ยังมีการวัดระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) โดยวัดจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์หรือ Correlation coefficient (R, r) โดยมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 ถ้ามีค่า R สูงหมายถึง ถ้าตัวแปรอิสระ (X) เปลี่ยนแปลงจะมีอิทธิพลมากกับตัวแปรตาม ถ้าค่า $R = 0$ แสดงว่าตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กัน ค่า R คำนวณได้จาก

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n X_i^2 - n \bar{X}^2)(\sum_{i=1}^n Y_i^2 - n \bar{Y}^2)}} \quad (14)$$

การสร้างสมการ Calibration โดยใช้ Simple linear regression หรือ Single term linear regression ในเทคนิค NIR เป็นการเลือกใช้ค่าการดูดกลืนแสงที่สัมพันธ์กับค่าที่ต้องการวิเคราะห์ เพียงความยาวคลื่นเดียวซึ่งทำให้ค่า R ที่ได้มีค่าต่ำจึงไม่นิยมนำมาใช้ในการสร้างสมการ Calibration

1.2.2 Multiple linear regression (MLR) เป็นวิธีการใช้ตัวแปรอิสระ (X) มากกว่าหนึ่งตัวในการประมาณค่าตัวแปรตาม (Y) จะทำให้สมการที่ได้ลดความผิดพลาดในการประมาณค่าลงได้ หากพิจารณาในเรื่องการใช้เทคนิค NIRS ในการหาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของ ตัวอย่างก็หมายถึงการพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงที่หลายความยาวคลื่นนั่นเอง สมการ Regression คือ

$$\text{สมการ Regression} \quad y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k \quad (15)$$

$$\text{โมเดล Regression} \quad y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k + e \quad (16)$$

ซึ่ง $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ = สัมประสิทธิ์รีเกรชันบางส่วน (Partial regression coefficient) วิธีกำลังสองน้อยที่สุดนำมาใช้ในการพิจารณาในการสร้างสมการโดยค่า SSE คำนวณได้จาก

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_j X_i)^2 \quad (17)$$

$$SEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_j X_i)^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{SSE}{n-k-1}} \quad (18)$$

โดย

n = จำนวนตัวอย่าง

i = 1, 2, 3,n

j = 1, 2, 3,k

k = จำนวนตัวแปรอิสระที่มีอยู่ในสมการ Calibration

2. Full spectrum analysis

Full spectrum analysis เป็นวิธีการคัดเลือกหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม (Selective wavelength) จากความยาวคลื่นทั้งหมดที่มีในสเปกตรัมมาสร้างสมการ Calibration ดังวิธีข้างต้น บางครั้งอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ ถ้ามีการสร้างสมการที่ไม่ถูกต้องอาจเกิดปัญหาทำให้ได้ค่าที่ทำนายต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่แท้จริง (Underestimation) อันเนื่องมาจากการเกิดความคลาดเคลื่อนจากการสร้างสมการ (Interference) หรือเกิดปัญหาเมื่อมีจำนวนตัวอย่างที่นำมาใช้ในการสร้างสมการทำนายน้อยและทำให้ได้สมการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไปในสมการ ทำให้ข้อมูลไม่น่าเชื่อถือ (Over fitting) การใช้ข้อมูลทั้งหมดที่มีในทุกความยาวคลื่นของสเปกตรัม (Full spectrum) น่าจะเป็นหนทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตามปัญหาที่มีอยู่คือการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไป การใช้วิธีทางสถิติในการจัดกลุ่มแยกประเภทตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกัน และทำการสร้างตัวแปรใหม่ที่เกิดมาจากตัวแปรเดิมจะช่วยทำให้แก้ปัญหาดังกล่าวได้ วิธีการทางสถิติที่นิยมใช้ได้แก่

2.1 Principal components regression (PCR)

การทำ PCR จะเริ่มจากการทำ Principal component analysis (PCA) กับข้อมูลที่เป็นตัวแปรอิสระที่ได้มาจากข้อมูลของสเปกตรัมเพื่อสร้างองค์ประกอบหรือตัวแปรใหม่ที่เรียกว่า New Factors ก่อนแล้วจึงนำค่าของตัวแปรใหม่ที่สร้างขึ้นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่ได้มาได้จากวิธี Reference Methods เพื่อสร้างสมการ Calibration โดยใช้หลักการของ MLR

2.2 Principal component analysis (PCA)

PCA เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดจำนวนของตัวแปรอิสระ ในกรณีที่ตัวแปรอิสระมีเป็นจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น วัดค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมที่ 700 ความยาวคลื่นจำนวนสเปกตรัมดังกล่าว คือจำนวนของตัวแปรอิสระนั่นเอง การลดจำนวนของตัวแปรมีวิธีการคือแบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่เรียกว่า แฟกเตอร์ หรือ องค์ประกอบ แฟกเตอร์ที่สร้างขึ้นอีกนัยหนึ่งก็คือผลรวมของค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นที่น้ำหนักแตกต่างกัน แฟกเตอร์จะมีได้หลายแฟกเตอร์ โดยแต่ละแฟกเตอร์จะแตกต่างกันที่น้ำหนักของแต่ละค่าสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งประกอบกันเป็นแฟกเตอร์นั้นๆ แฟกเตอร์แรกจะถูกสร้างขึ้นมาให้สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าสเปกตรัมได้มากที่สุด แฟกเตอร์ที่สองอธิบายความแปรปรวนที่เหลือซึ่งจะทำให้แฟกเตอร์แต่ละแฟกเตอร์ แทบจะไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน (Non-Co linearity) ซึ่งเป็น

ข้อดีสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ เมื่อทำการหาแพกเตอร์เรียบร้อยแล้ว นำแพกเตอร์ที่ได้มาทำ Regression กับค่าทางเคมีโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด ทำให้ได้ค่า Chemical loading หรือ Calibration coefficient

2.3 Partial least squares regression (PLSR)

PLSR เป็นวิธีการที่คล้ายกับ PCR แต่ต่างกันตรงที่วิธี PCR กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมจะเป็นอิสระจากกระบวนการทำสมการถดถอยของสมการทำนาย ซึ่งใน PLSR ทั้งสองกระบวนการจะถูกเชื่อมโยงเข้าไว้ด้วยกันโดยมีการนำค่าองค์ประกอบทางเคมีมาคิดในกระบวนการหาแพกเตอร์ด้วย ซึ่ง Kasemsamran (2005) ได้อธิบายถึง PLSR ว่าเป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบหลายตัวแปร โดยการสร้างแพกเตอร์แบบสมการเชิงเส้นตรงจากข้อมูลของสเปกตรัมเริ่มต้น และนำแพกเตอร์ที่ได้ไปใช้ในการสร้างสมการถดถอย โดยแพกเตอร์ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยวิธีสถิติ PLSR ต้องสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล และเกี่ยวข้องกับการประเมินค่าทางเคมีในเวลาเดียวกันวัตถุประสงค์ของ PLSR เพื่อต้องการลดจำนวนข้อมูลสเปกตรัมให้ได้เฉพาะข้อมูลสเปกตรัมที่มีความสำคัญกับการทำนายค่าทางเคมีที่สนใจเท่านั้น เพื่อให้สามารถประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น

3. Interval partial least-squares regression (iPLS)

iPLS เป็นวิธีการคัดเลือกหาความยาวคลื่นที่เหมาะสม (Selective wavelength) จากความยาวคลื่นทั้งหมดที่มีในสเปกตรัมมาแบ่งเป็นช่วงๆ แล้วทำการวิเคราะห์ในแต่ละช่วงด้วยการวิเคราะห์แบบ PLSR มาสร้างแพกเตอร์แบบสมการเชิงเส้นตรง และนำแพกเตอร์ที่ได้ไปใช้ในการสร้างสมการถดถอย ซึ่งสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) และ Root mean square error of cross-validation (RMSECV) ในแต่ละช่วงได้ Nørgaard *et al.* (2000) ได้ทำการเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี iPLS โดยการแบ่งช่วงความยาวคลื่นออกเป็นช่วงๆ จำนวน 20 ช่วงเท่าๆ กัน แล้วทำการสร้างสมการด้วยวิธี PLSR ในทุกช่วงความยาวคลื่น แล้วทำการเลือกช่วงความยาวคลื่นโดยการเลือกช่วงที่มีค่า r ที่สูง และค่า RMSECV น้อยกว่าค่า RMSECV เฉลี่ยทั้งหมดของทุกช่วงรวมกัน ซึ่งทำให้เลือกช่วงที่มีความสัมพันธ์กับค่าที่เราต้องการทำนายได้ดียิ่งขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ส้มโอพันธุ์ขาวทองดี 4 ช่วงอายุคือ 6½, 7, 7½ และ 8 เดือน จำนวน 120 ผล
2. ขึ้นส้มโอตัดแต่งสดพร้อมปริโภค พันธุ์ขาวน้ำผึ้ง จำนวน 184 ชิ้น
3. ชุดทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกล
4. อุปกรณ์การทดสอบทางเคมี
5. Vernier caliper
6. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล
7. โปรแกรม OOIBase32
8. โปรแกรม SPSS และ The Unscrambler
9. คอมพิวเตอร์ประมวลผล
10. เครื่อง Digital hand refractometer (MTD-045nD)
11. เครื่องทดสอบ Compression test UTM (Instron Series 5569)
12. ชุดอุปกรณ์วัดและเก็บสัญญาณเสียงแปลงเป็นความถี่
13. ชุดอุปกรณ์วัด Vis/NIR spectroscopy

วิธีการ

การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มช่วงความเจริญเติบโตของส้มโอพันธุ์ขาวทองดี

1. การหาคุณสมบัติทางกายภาพ โดยหาคุณสมบัติทางกายภาพของส้มโอพันธุ์ขาวทองดี จำนวน 120 ผลโดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มช่วงความเจริญเติบโต คือ 6½ เดือน (ช่วงอายุที่เริ่มเก็บเกี่ยว, Immature), 7 เดือน (ช่วงอายุที่เริ่มสุกพร้อมบริโภค, Early-mature), 7½ เดือน (ช่วงอายุที่สุกพร้อมบริโภค, Late-mature), และ 8 เดือน (ช่วงอายุที่เริ่มแก่และเนื้อเริ่มเกิดอาการเป็นข้าวสาร, Over-mature) (เขาวรัตน์, 2545) จำนวนกลุ่มๆ ละ 30 ผล เพื่อให้มีการกระจายตัวของข้อมูล แต่จะอยู่ในช่วงอายุที่เกษตรกรทำการเก็บเกี่ยว เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ตรงกับท้องตลาดที่วางขายกันโดยทั่วไป โดยสมบัติทางกายภาพที่ทำการศึกษามี ความสูง, เส้นรอบวง, น้ำหนัก, ปริมาตร อัตราส่วนระหว่างความสูงกับเส้นผ่านศูนย์กลาง (H/W), ความถ่วงจำเพาะ (SG) และ ความหนาเปลือก (ด้านบน (TPT) จะวัดที่ความสูง ¾ ของผล, ด้านข้าง (MPT) จะวัดที่ความสูง ½ ของผล และ ด้านล่าง (BPT) จะวัดที่ความสูง ¼ ของผล)

การหาค่าความถ่วงจำเพาะ

$$SG = \frac{w^1}{w^2 - w^3} \quad (19)$$

w^1 = ชั่งน้ำหนักตัวอย่างในอากาศ

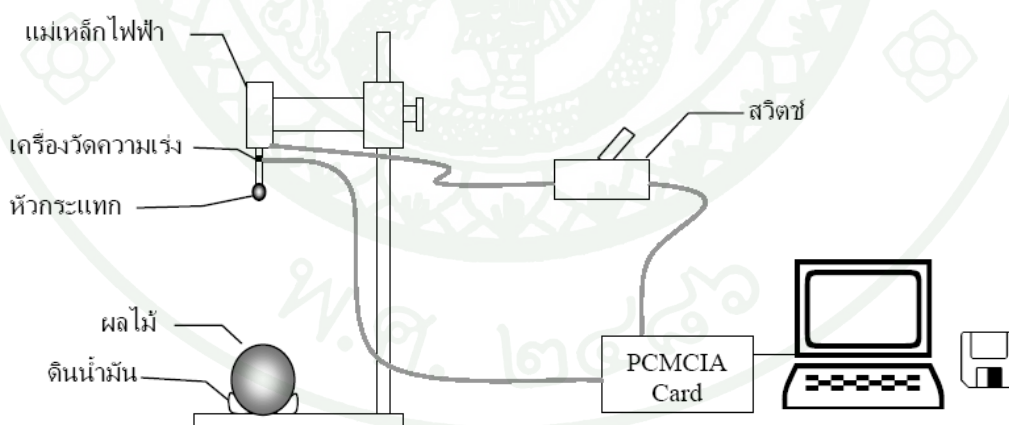
w^2 = ชั่งน้ำหนักภาชนะใส่น้ำพร้อมจุ่มตัวอย่างลงในน้ำ

w^3 = ชั่งน้ำหนักภาชนะใส่น้ำ

2. หาค่า Elasticity ของเปลือกส้มโอ โดยทำการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกลซึ่งเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย ด้วยชุดเครื่องมือวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกล (ภาพที่ 17) ซึ่งประกอบด้วยหัวกระแทกทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm เชื่อมต่อกับเครื่องวัดความเร่ง (BBN CE501 M101) และด้ามซึ่งมีน้ำหนัก 10 กรัม ห่างจากผิวของตัวอย่าง 2 cm ควบคุมการทำงานด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อทำการทดสอบสัญญาณจะถูกส่งผ่านไปยังการ์ด Data Acquisition Unit (NI DAQ 700) เพื่อนำไปประมวลผลในคอมพิวเตอร์ และในการทดลองจะทำการทดสอบผลส้มโอจำนวน 9 จูกรอบผล (เหมือนกับเกษตรกรที่ใช้ในการหาความสุกแก่

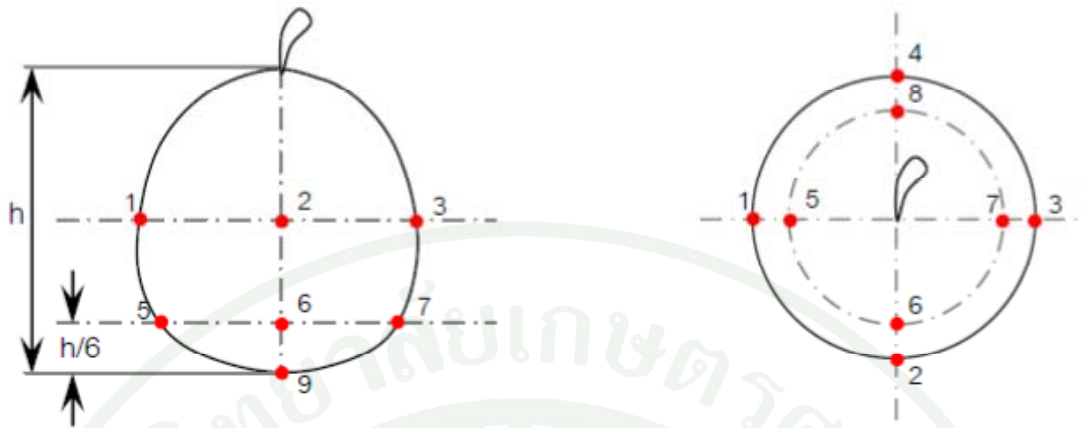
ของส้มโอ) แบ่งวัด 4 ด้านในแนวเส้นศูนย์สูตร 4 จุดห่างกัน 90° ตรงกลางผลโดยวางส้มโอในลักษณะปกติ คือวางให้ซั้วอยู่ด้านบน อีก 4 จุดบนเส้นรอบวงห่างจากก้นผลขึ้นมา $1/6$ ความสูงผลห่าง 90° และที่ก้นผลอีก 1 จุด (ภาพที่ 18) จะไม่ทำการวัดตรงด้านบนของผลส้มโอเนื่องจากมีเส้นใยมากกว่า ส่วนอื่นซึ่งบางผลจะมีมาก บางผลจะมีน้อยไม่เท่ากัน เพื่อทำการบันทึกค่าความเร่งสูงสุด (A) เวลา ณ. ความเร่งสูงสุด (t) และคุณสมบัติเชิงกลของเปลือก (A/t)

3. หาค่า Elasticity ของเปลือกส้มโอ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) (Model 5569 Single Column, Instron Corp. Canton, MA) โดยห้ทุกขนาดเดียวกับวิธีการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกล เป็นลักษณะห้วกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ตำแหน่งในการทดสอบเปลือกส้มโอจะเป็นตำแหน่งเดียวกับวิธีการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกล ทำการทดสอบด้วยอัตราเร็ว 25 mm/min (Jarimopas และ Kitthawee, 2007) จนถึงแรงกระทำที่จุดแตกหัก (Rupture force) ในการทดสอบเปลือกส้มโอ ซึ่งส้มโอจะถูกวางอยู่บนภาชนะบรรจุทรายละเอียดที่มีความชันพอเหมาะเพื่อเป็นตัวยึดส้มโอไม่ให้ขยับ ในช่วงที่ทำการทดสอบ ในการหาค่า Elasticity ของเปลือกส้มโอ (F/D) จะใช้ค่ากึ่งกลางความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับค่าของการเปลี่ยนรูปที่เปลือกส้มโอที่ได้จากการทดสอบ ด้วยเครื่อง Universal testing machine (Jarimopas และ Kitthawee, 2007)



ภาพที่ 17 ชุดทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกล ซึ่งประกอบไปด้วยดินน้ำมัน, แม่เหล็กไฟฟ้า, เครื่องวัดความเร่ง (BBN CE501 M101), หัวกระแทก (ประกอบด้วยลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรและด้ามซึ่งมีน้ำหนัก 10 กรัม), Data acquisition unit (NI DAQ 700), คอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมและสวิตช์

ที่มา: อุดมศักดิ์ (2547)



ภาพที่ 18 ตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบด้วยชุดเครื่องมือวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกล

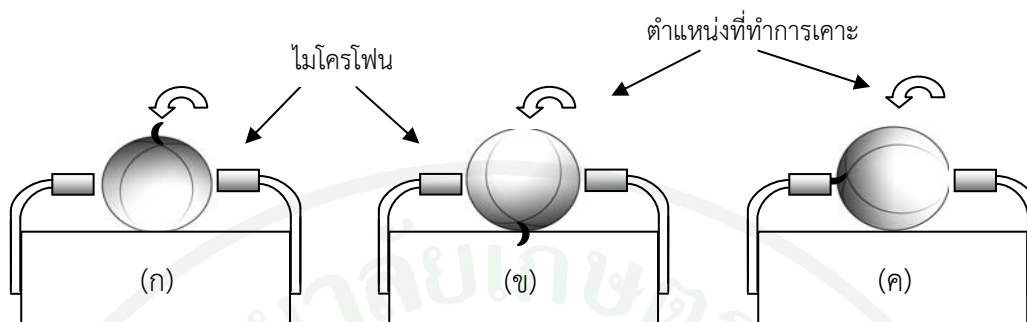
4. หาค่าคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติของส้มโอ (Acoustic impulse response) โดยชุดอุปกรณ์วัดและเก็บสัญญาณเสียงแปลงเป็นความถี่ ทำการวัดความถี่ธรรมชาติของส้มโอ โดยจุดที่ทำการเคาะกับไมโครโฟนจะอยู่ที่มุมต่างกัน 90 องศา และการวางผลส้มโอในการเคาะจะมี 3 ลักษณะคือ เคาะตำแหน่งขั้วผล เคาะตำแหน่งก้นผล และ เคาะตำแหน่งด้านข้างผล ซึ่งตำแหน่งด้านข้างผลจะเคาะ 4 ด้าน ดังภาพที่ 19 และทำการเก็บสัญญาณเสียงด้วยคอมพิวเตอร์ จากนั้นนำสัญญาณเสียงที่ได้ไปแปลงสัญญาณในรูป Algorithm fourier transform response (FFT) แล้วทำการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของเสียง เป็นขนาดการสั่นในรูป Amplitude ratio ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ เลือกค่าความถี่ที่มีขนาด Amplitude ที่สูงเรียงลงมา 3 ค่า ทำการหา Stiffness coefficient จากค่าความถี่ กับ ค่าน้ำหนัก

$$\text{Stiffness coefficient} = f^2 m^{2/3} \quad (20)$$

โดย

f = ความถี่

m = น้ำหนัก



ภาพที่ 19 ตำแหน่งการเคาะผลส้มโอ ก) เคาะตำแหน่งข้างผล ข) เคาะตำแหน่งจุกผล และ ค) เคาะตำแหน่งด้านข้างผล

5. หาค่าทางเคมีของผลส้มโอ โดยการวัดปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้ (Total titratable acidity, TA) ตามวิธี AOAC (1990) และการวัดหาปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Soluble solids content, SSC) จากน้ำคั้นโดยเครื่อง Digital refractrometer (PR-32, Palette Series, Atago Co., Ltd., Tokyo, Japan)

การหาปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้ในน้ำผลไม้โดยวิธีการไตเตรท ตามวิธี AOAC (1990) มีวิธีการดังต่อไปนี้

1. ใส่น้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่
2. บีบคั้นน้ำคั้นชมพู่ 2 มิลลิลิตรใส่ลงไปลงในขวดรูปชมพู่ที่ใส่น้ำกลั่นไว้
3. หยดฟีนอล์ฟทาลีน เพื่อเป็นอินดิเคเตอร์ ให้เห็นจุดยุติไป 2 หยด
4. นำไปไตเตรทกับ 0.1 N. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จนกระทั่งถึงจุดยุติ คือ ตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน
5. อ่านปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ แล้วคำนวณหาปริมาณกรดทั้งหมด จากสูตร

$$\text{ปริมาณกรดทั้งหมด (\%)} = \frac{\text{ปริมาตร NaOH (mL)} \times \text{ความเข้มข้น NaOH (N)} \times 0.064 \times 100}{\text{ปริมาตรของน้ำผลไม้ (mL)}} \quad (21)$$

6. หาความสัมพันธ์จากตัวแปรทั้งหมดที่ทำการทดลองมาข้างต้นเพื่อนำไปใช้ในการสร้างสมการจำแนกช่วงความบริสุทธิ์ของส้มโอด้วยวิธีวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Discriminant analysis และหาตัวแปรที่มีความสำคัญในการแบ่งแยกช่วงความบริสุทธิ์ของส้มโอ

7. หาความสัมพันธ์ของตัวแปรกับความบริสุทธิ์ของส้มโอจากตัวแปรทั้งหมดเพื่อนำไปใช้เป็นตัวแปรแทนความบริสุทธิ์ เพื่อสร้างสมการทำนายความบริสุทธิ์ของส้มโอจากตัวแปรที่เหลือทั้งหมดด้วยวิธีวิเคราะห์ทางสถิติ Partial least squares regression แบบ Full cross validation

การหาคุณภาพภายในส้มโอตัดแต่งสดด้วยวิธี Near infrared spectroscopy

1. นำชิ้นส้มโอตัดแต่งสดจำนวน 184 ชิ้นที่ทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 25° องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 60 % ก่อนการทดสอบเป็นเวลา 6 ชั่วโมงมาทำการสแกนด้วยชุดทดสอบ Visible and near infrared (Vis/NIR) spectrometer (ภาพที่ 20) ซึ่งประกอบด้วยหลอด Tungsten halogen (15 V/150 W, Philips, Eindhoven, the Netherlands) เป็นแหล่งกำเนิดแสงซึ่งติดตั้งอยู่ด้านบนห่างจากผิวของตัวอย่าง 15 cm โดยตัวอย่างถูกวางอยู่บนภาชนะมีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm เพื่อให้แสงส่องผ่านไปยัง Integrating sphere (Mikropack Inc., ISP-80-8-REFL, Ostfildern, Germany) ที่อยู่ด้านล่างเพื่อรวมแสงส่งไปยัง Vis/NIR spectrometer (Model HR4000, Ocean Optics Inc., Dunedin, FL). โดยผ่านทางเส้น Optical fiber (600 mm core diameter) และทำการกระจายแสงไปยัง Charge-coupled device (CCD) photodiode array ภายใน Vis/NIR spectrometer การวัดการดูดกลืนจะอยู่ในรูปการวัดการส่งผ่าน (Transmission mode) โดยมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 350–1,040 nm และมี Sampling rate อยู่ที่ 2 nm ก่อนทำการทดสอบจะทำการสแกน Teflon disc หนา 10 mm เพื่อใช้สเปกตรัมของ Teflon เป็นสเปกตรัมอ้างอิง และจะถูกใช้ในการคำนวณหาค่าการดูดกลืนแสง เพราะ Teflon มีคุณสมบัติการดูดกลืนที่ต่ำ และ มีการกระเจิงของแสงคล้ายกับตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ (Gómez *et al.* 2006). ซึ่งจะสแกนอีกครั้งทุกๆ 10 ตัวอย่างที่ทำการทดสอบ การทดลองจะทำภายในกล่องทึบแสงเพื่อป้องกันแสงภายนอกเข้ามารบกวน สเปกตรัมที่ได้จะถูกจัดเก็บโดยโปรแกรม OOIBase32 software (Ocean Optics Inc.) โดยในหนึ่งชิ้นทำการสแกน 8 ครั้งโดยวิธีการหมุนในแนวระดับทุก 45 องศา (ภาพที่ 21)

2. หาค่าทางเคมีของกลีบส้มโอ โดยการวัดปริมาณกรดทั้งหมดที่ไตเตรตได้ (Total titratable acidity, TA) ตามวิธี AOAC (1990) และการวัดหาปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (soluble

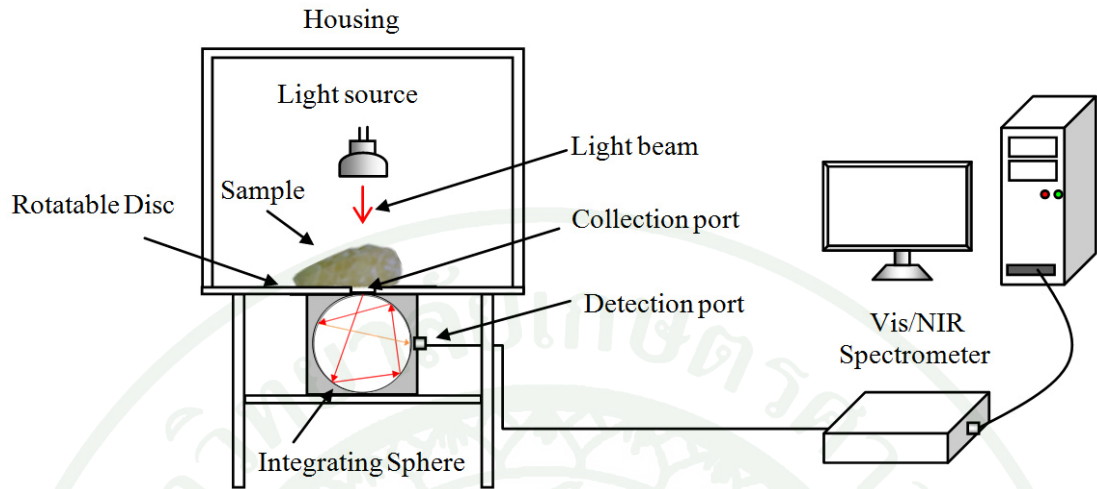
solids content, SSC) จากน้ำคั้นโดยเครื่อง Digital refractrometer (PR-32, Palette Series, Atago Co., Ltd., Tokyo, Japan)

3. นำสเปกตรัมที่ได้มาทำการสร้างสมการ Calibration ด้วยวิธี PLSR แบบ Full cross validation โดยสเปกตรัมของตัวอย่างทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่ม Calibration และ กลุ่ม Prediction ซึ่งในกลุ่ม Calibration จะเป็นกลุ่มที่นำไปสร้างสมการในการทำนาย ส่วนกลุ่ม Prediction จะเป็นกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการที่ถูกสร้างขึ้นจากกลุ่ม Calibration ในการแบ่งตัวอย่างของแต่ละกลุ่มนั้นจะเป็นอัตราส่วน กลุ่ม Calibration 2 ส่วนต่อ กลุ่ม Prediction 1 ส่วนโดยทำการจัดเรียงค่าทางเคมีจากน้อยไปหามากขึ้นอยู่กับค่าเคมีแต่ละตัว ทำการเลือกกลุ่ม Calibration 2 ตัวอย่างและเลือก กลุ่ม Prediction 1 ตัวอย่าง เรียงลำดับจนครบทั้งหมดโดยมีข้อแม้ว่าค่าที่น้อยที่สุดและมากที่สุดต้องอยู่ในกลุ่ม Calibration และทำการสร้างสมการ PLSR แบบ full cross validation เพื่อทำนายค่า SSC และ TA โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนคือ

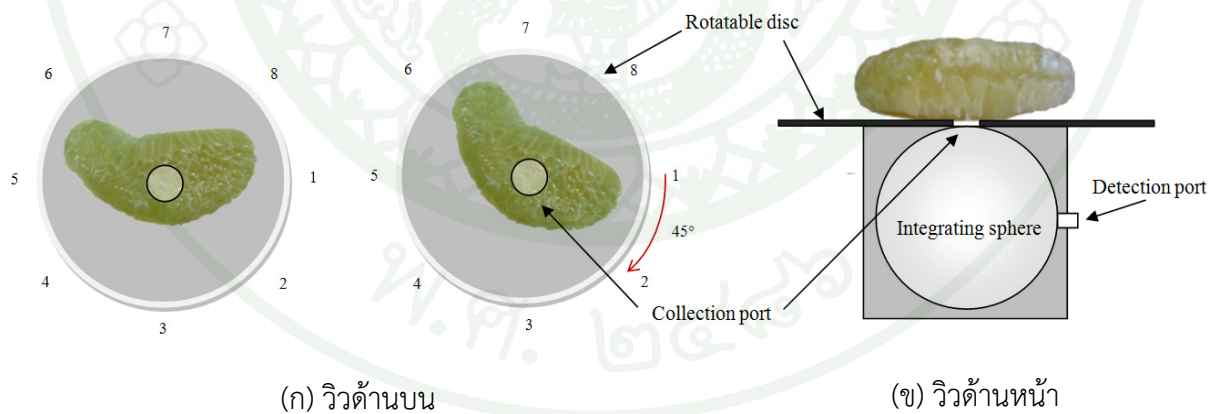
3.1 ทำการสร้างสมการด้วยการนำสเปกตรัมมาแปลงด้วย Pre-processing แบบต่างๆ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบหา Pre-processing ที่เหมาะสม โดยมี Pre-processing ที่ใช้ในการทดสอบคือ

1. SNV Standard normal variate
2. MSC Multiplicative scatter correction
3. D^1 First derivative
4. D^2 Second derivative
5. SNV, D^1 Standard normal variate + First derivative
6. SNV, D^2 Standard normal variate + Second derivative
7. MSC, D^1 Multiplicative scatter correction + First derivative
8. MSC, D^2 Multiplicative scatter correction + Second derivative

3.2 ทำการเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี iPLS เพื่อหาช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการสร้างสมการ โดยมีขั้นตอนคือ แบ่งความยาวคลื่นออกเป็น 20 ช่วงความยาวคลื่นเท่าๆ กัน แล้วนำมาสร้างสมการ PLSR ในทุกช่วงความยาวคลื่น ในการเลือกช่วงความยาวคลื่นไปใช้ในการสร้างสมการนั้นจะดูช่วงความยาวคลื่นที่มีค่า r สูง และ ค่า RMSECV มีค่าต่ำกว่าค่า RMSECV เฉลี่ยของทั้งหมดทุกช่วงความยาวคลื่น (Nørggaard *et al.*, 2000) ซึ่งค่า r และ RMSECV จะเป็นตัวช่วยในการเลือกช่วงความยาวคลื่นในการสร้างสมการ PLS



ภาพที่ 20 ชุดอุปกรณ์วัด Vis/NIR spectroscopy ในโหมด Transmittance ประกอบด้วยหลอดไฟ Halogen tungsten เป็นแหล่งกำเนิดแสงอยู่ด้านบนห่างตัวอย่าง 15 cm ตัวอย่างวางอยู่บนจานหมุนมีรูตรงกลางและด้านล่างมี Integrating sphere เป็นตัวรวมแสงเข้าสู่ Fiber optic ไปยัง Vis/NIR spectrometer และส่งสัญญาณเข้าสู่คอมพิวเตอร์



ภาพที่ 21 ตำแหน่งวางตัวอย่างบนจานหมุน และ ตำแหน่งที่ใช้ในการสแกนตัวอย่างจำนวน 8 ครั้ง โดยจานหมุนวางวางอยู่บน Integrating Sphere : (ก) วิวด้านบน: (ข) วิวด้านหน้า

ผลและวิจารณ์

1. การหาช่วงความบริบูรณ์ส้มโอพันธุ์ขาวทองดีด้วยการวิเคราะห์แบบหลายตัวแปร

จากผลการทดลองส้มโอพันธุ์ขาวทองดีในช่วงความบริบูรณ์ คือ 6½, 7, 7½ และ 8 เดือน (6½ = Immature, 7 = Early-mature, 7½ = Late-mature และ 8 = Over-mature) จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่างและน้ำหนักของผลโดยทำการวัดในรูปอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (H/W) และ ความถ่วงจำเพาะ (SG) พบว่า H/W และ SG ของทั้ง 4 ช่วงอายุมีค่าไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 6) โดยที่ H/W มีค่าประมาณ 0.857 – 0.879 และ SG มีค่าประมาณ 0.780 – 0.799

ค่าทางเคมีที่ทำการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ One-way analysis of variance (ANOVA) พบว่าปริมาณ SSC ในน้ำคั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (ตารางที่ 7) โดยมีค่าไม่แตกต่างกันมากมีค่าประมาณ 10.25 – 11.36°Brix ส่วนค่าของ TA ในน้ำคั้น พบว่าปริมาณของ TA มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในอายุ 6 ½ - 7 เดือน และจะลดลงแบบคงที่อย่างช้าๆ ซึ่งตรงกับหลายการทดลองที่ผ่านมา (เขาวรัตน์ 2545; Wattanavichean and Aroonyadet 2003) การลดลงของ TA เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของน้ำภายในจากขนาดของผลส้มโอ และอีกส่วนหนึ่งเกิดจากการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบของกระบวนการหายใจในช่วงที่เจริญเติบโตซึ่งผลไม่มีการพัฒนามากขึ้น (Baldwin, 1996) อัตราส่วน SSC/TA จะเพิ่มขึ้นตามอายุของส้มโอ แสดงถึงขณะที่ผลส้มโอยังอ่อนอยู่จะมีรสเปรี้ยวและรสเปรี้ยวของผลนั้นจะลดลงอย่างช้า ๆ พร้อมกับมีรสหวานมากขึ้นเพราะปริมาณกรดลดลงตลอดการเจริญเติบโต

ค่า Elasticity ของเปลือกกับช่วงความบริบูรณ์ (Maturity stage) ของส้มโอจากการทดสอบทั้ง 4 ช่วงอายุของส้มโอพบว่า ด้วยวิธีทดสอบหาคณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกลของเปลือกส้มโอ (ภาพที่ 22) ได้ค่าความเร่งต่อเวลา (A/t) ดังตารางที่ 8 และ ทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine (ภาพที่ 23) ได้ค่าแรงต่อการเปลี่ยนรูปที่เปลือกส้มโอ (F/D) ดังตารางที่ 8 ผลการทดลองที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกันและมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้มีความสัมพันธ์กันความบริบูรณ์ค่อนข้างน้อย (F-value = 25.07 และ 24.38)

ตารางที่ 6 ค่าอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (H/W) และ อัตราส่วนน้ำหนักต่อปริมาตร (SG) ของส้มโอทั้ง 4 ช่วงอายุ

ช่วงอายุ	H/W		SG	
	Mean	Std. Deviation	Mean	Std. Deviation
6½	0.857 ^{ab}	±0.038	0.780 ^a	±0.049
7	0.853 ^a	±0.037	0.791 ^a	±0.062
7½	0.879 ^c	±0.037	0.780 ^a	±0.041
8	0.875 ^{bc}	±0.042	0.799 ^a	±0.049
F-value	3.38		0.97	

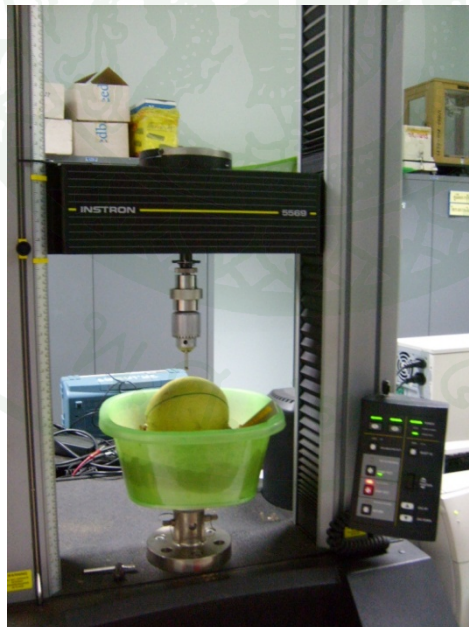
ตารางที่ 7 ค่าปริมาณกรดทั้งหมด (TA) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (SSC) และอัตราส่วนค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ต่อ ปริมาณกรดทั้งหมด (SSC/TA) ของส้มโอทั้ง 4 ช่วงอายุ

ช่วงอายุ	SSC/TA (°Brix/%)		TA (%)		SSC (°Brix)	
	Mean	Std. Deviation	Mean	Std. Deviation	Mean	Std. Deviation
6½	14.40 ^a	±2.78	0.77 ^a	±0.12	10.80 ^b	±1.09
7	18.22 ^b	±1.49	0.57 ^b	±0.05	10.25 ^a	±0.47
7½	20.77 ^c	±2.64	0.52 ^c	±0.06	10.75 ^b	±0.74
8	24.45 ^d	±2.67	0.47 ^d	±0.05	11.36 ^c	±0.64
F-value	92.28		89.39		10.57	

จากตารางที่ 8 จะเห็นได้ว่าที่ 6½ นั้นจะมีค่า A/T น้อยที่สุดและแตกต่างจากกลุ่มอื่นชัดเจน และจากตำแหน่งที่ใช้ในการกระแทกที่ได้ในช่วงกลุ่มที่ 7, 7½ และ 8 จะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่มีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนจากกลุ่มอายุ 6½ และจะมีลักษณะเดียวกับกับค่า F/D



ภาพที่ 22 การทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกลของเปลือกส้มโอได้ค่าความเร่งต่อเวลา (A/t)



ภาพที่ 23 การทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ได้ค่าแรงต่อการเปลี่ยนรูปที่เปลือกส้มโอ (F/D)

ตารางที่ 8 ค่า Elasticity ของเปลือกส้มโอด้วยวิธีทดสอบหาคณสมบัติการตอบสนองต่อแรง
กระแทกเชิงกล (A/t) และ เครื่อง Universal testing machine (F/D)

ช่วงอายุ	A/t (x 10 ⁹ mm/s ³)		F/D (N/mm)	
	Mean	Std. Deviation	Mean	Std. Deviation
6½	0.523	±0.128	5.784	±0.809
7	0.720	±0.109	7.481	±0.918
7½	0.665	±0.086	7.099	±0.674
8	0.732	±0.145	7.874	±0.982
F-value	25.07		24.38	

จากตำแหน่งในการทดสอบจากตาราง คือ (1-4), (5-8), (1-8) และ (1-9) เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการกระแทก พบว่าตำแหน่งที่ (1-8) จะเหมาะสมที่สุดเพราะมีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มช่วงอายุและมีค่า F-value สูงที่สุดเท่ากับ 29.432 จากการวิเคราะห์ ANOVA (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 ค่าดัชนีความแน่นเนื้อของเปลือกจากการทดสอบหาคณสมบัติการตอบสนองต่อแรง
กระแทกเชิงกล (A/T) ที่ตำแหน่งต่างๆ ของส้มโอทั้ง 4 ช่วงอายุ

อายุ (เดือน)	ตำแหน่ง (1-4) ด้านข้างผล	ตำแหน่ง (5-8) ด้านข้างกันผล	ตำแหน่ง (1-8) ด้านข้างผล	ตำแหน่ง (9) ด้านกันผล	ตำแหน่ง (1-9) ด้านกันผล
6½	0.523±0.11 ^a	0.531±0.11 ^a	0.527±0.10 ^a	0.587±0.19 ^a	0.534±0.10 ^a
7	0.720±0.09 ^c	0.672±0.11 ^b	0.696±0.09 ^c	0.786±0.17 ^b	0.706±0.09 ^c
7½	0.665±0.06 ^b	0.621±0.06 ^b	0.643±0.06 ^b	0.726±0.16 ^b	0.652±0.06 ^b
8	0.732±0.12 ^c	0.764±0.14 ^c	0.748±0.12 ^d	0.721±0.15 ^b	0.745±0.12 ^c
F-value	28.829	25.074	29.432	7.380	27.725

วิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมเบื้องต้นของการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองการ
กระแทกเชิงกลในการจำแนกกลุ่มอายุของส้มโอโดยทำการวิเคราะห์แบบจำแนกกลุ่มด้วยวิธี
Discriminant analysis โดยใช้ตัวแปร A/T, A, T, H/W และ SG โดยที่จะแบ่งวิเคราะห์ตาม
ตำแหน่งที่ทำการทดสอบดังนี้คือ 1-4 (ด้านข้างผล) , 5-8 (ด้านข้างห่างจากกันผลขึ้นมา 1/6 ความ
สูง), 1-8, 9 (ด้านกันผล) และ 1-9 จากการวิเคราะห์ การจำแนกกลุ่มที่ดีที่สุดเท่ากับ 55.2% โดยใช้

ตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวแปรคือ A/T, A, H/W และ SG ซึ่งตำแหน่งที่ให้ค่าดีที่สุดคือ 5-8 ซึ่งให้ค่าการวิเคราะห์สูงสุดในทุกการสร้างสรรค์การจำแนกกลุ่ม ดังนั้นตำแหน่งในการทดสอบควรใช้ตำแหน่ง 5-8 (ด้านข้างห่างจากกันผลขึ้นมา 1/6 ความสูง) ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มด้วยวิธี Discriminant analysis ในการทดสอบหาคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกล และตำแหน่งการวัดที่เหมาะสม

ตัวแปร	ตำแหน่ง1-4	ตำแหน่ง5-8	ตำแหน่ง1-8	ตำแหน่ง9	ตำแหน่ง1-9
A/T, A, T, SG, H/W	51.5	54.4	52.6	44.2	50.6
A/T, A, T	46	54.2	48.6	39.2	48.6
A/T, A, SG, H/W	49.6	55.2	52.1	46.7	52.1
A/T, SG, H/W	50.2	54.8	50.8	45	50.8

การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มอายุแบบ Cross-validated ทำนายถูก 55.2% พบว่ากลุ่มอายุ 6½ เดือนมีความถูกต้องในการทำนายสูงที่สุด 65.8% กลุ่มอายุ 7 เดือนมีความถูกต้องในการทำนายต่ำที่สุด 47.5% (ตารางที่ 11)

ตารางที่ 11 การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มอายุด้วยวิธี Discriminant analysis แบบ Cross-validated โดยใช้ข้อมูลคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงกระแทกเชิงกลจากตำแหน่ง 5-8

	กลุ่มอายุ (เดือน)	เปอร์เซ็นต์การจำแนกกลุ่ม				รวม
		6½	7	7½	8	
การจำแนกกลุ่มแบบ Cross-validated	6½	65.8	11.7	16.7	5.8	100.0
	7	13.3	47.5	15.8	23.3	100.0
	7½	19.2	19.2	50.0	11.7	100.0
	8	13.3	14.2	15.0	57.5	100.0

จากตำแหน่งในการทดสอบจากตาราง คือ (1-4), (5-8), (1-8) และ (1-9) ตำแหน่งที่เหมาะสมในการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองการถูกกดอัดเชิงกลในการจำแนกกลุ่มอายุของส้มโอ คือ ตำแหน่งที่ (1-4) จะเหมาะสมที่สุดเพราะทำการทดสอบแค่ 4 จุด และมีค่า F-value จากการ

วิเคราะห์ ANOVA สูงที่สุด คือ 44.575 ซึ่งค่าที่ได้จะมีลักษณะเหมือนกันกับการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองการกระแทกเชิงกล (ตารางที่ 12)

ตารางที่ 12 ค่าดัชนีความแน่นเนื้อของเปลือกด้วยคุณสมบัติการตอบสนองการถูกกดอัดเชิงกล (F/D) ที่ตำแหน่งต่างๆ ของส้มโอทั้ง 4 ช่วงอายุ

อายุ (เดือน)	ตำแหน่ง (1-4) ด้านข้างผล	ตำแหน่ง (5-8) ด้านข้างก้นผล	ตำแหน่ง (1-8) ด้านก้นผล	ตำแหน่ง (9) ด้านก้นผล	ตำแหน่ง (1-9)
6½	5.7836±0.70 ^a	5.5473±0.98 ^a	5.6654±0.80 ^a	8.8186±2.00 ^a	6.0158±0.83 ^a
7	7.4813±0.83 ^c	6.9845±1.11 ^b	7.2329±0.94 ^b	10.8606±1.38 ^b	7.6360±0.94 ^b
7½	7.0988±0.55 ^b	6.6031±0.53 ^b	6.8510±0.49 ^b	10.3151±1.17 ^b	7.2359±0.47 ^b
8	7.8740±0.86 ^d	7.8215±1.38 ^c	7.8477±1.07 ^c	10.1199±1.63 ^b	8.1002±1.11 ^c
F-value	44.575	24.382	34.852	9.019	31.608

วิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมเบื้องต้นของการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองการถูกกดอัดเชิงกลในการจำแนกกลุ่มอายุของส้มโอโดยทำการวิเคราะห์แบบจำแนกกลุ่มด้วยวิธี Discriminant analysis โดยใช้ตัวแปร F/D, F, D, H/W และ SG โดยที่จะแบ่งวิเคราะห์ตามตำแหน่งที่ทำการทดสอบดังนี้คือ 1-4 (ด้านข้างผล) , 5-8 (ด้านข้างห่างจากก้นผลขึ้นมา 1/6 ความสูง), 1-8, 9 (ด้านก้นผล) และ 1-9 จากการวิเคราะห์ การจำแนกกลุ่มที่ดีที่สุดเท่ากับ 61.3% โดยใช้ตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวแปรคือ F/D, D, H/W และ SG ซึ่งตำแหน่งที่ให้ค่าดีที่สุดคือ 1-4 ในการวิเคราะห์ปรากฏว่าตำแหน่ง 1-4, 5-8 และ 1-8 ให้ค่าในการทดสอบใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 13) ดังนั้นตำแหน่งในการทดสอบควรใช้ตำแหน่ง 1-8 (ด้านข้าง และ ด้านข้างห่างจากก้นผลขึ้นมา 1/6 ความสูง) เพื่อให้การทดสอบเป็นไปในแนวทางเดียวกับการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองการกระแทกเชิงกล

การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มอายุแบบ Cross-validated ทำนายถูก 61.3% พบว่ากลุ่มอายุ 6½ เดือน มีความถูกต้องในการทำนายสูงที่สุด 80.8% กลุ่มอายุ 7½ เดือนมีความถูกต้องในการทำนายต่ำที่สุด 47.5% (ตารางที่ 14)

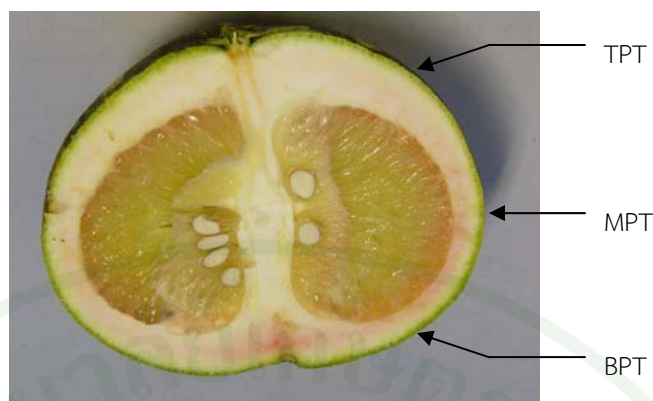
ตารางที่ 13 ค่าจากการทดสอบแบบจำแนกกลุ่มด้วยวิธี Discriminant analysis ในการทดสอบด้วยคุณสมบัติการตอบสนองการถูกกดอัดเชิงกล และ สมบัติทางกายภาพ

ตัวแปร	ตำแหน่ง 1-4	ตำแหน่ง 5-8	ตำแหน่ง 1-8	ตำแหน่ง 9	ตำแหน่ง 1-9
F/D, F, D, G, H/W	59.2	59.8	59.9	50	55.3
F/D, F, D	56.9	57.3	55.9	48.3	53.3
F/D, D, G, H/W	61.3	57.9	58.4	52.5	54.6
D, G, H/W	55	54	54.7	51.7	54

การหาความหนาของเปลือกด้านบน (TPT) ด้านข้าง (MPT) ด้านล่าง (BPT) กับช่วงความบริบูรณ์ (Maturity stage) ของส้มโอ (ภาพที่ 24) จากการลองพบว่าความหนาของเปลือกมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยไม่สัมพันธ์กับกับช่วงความบริบูรณ์แสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 14 การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มอายุด้วยวิธี Discriminant analysis แบบ Cross-validated ในการทดสอบด้วยคุณสมบัติการตอบสนองการถูกกดอัดเชิงกล และ สมบัติทางกายภาพจากตำแหน่ง 1-4

	กลุ่มอายุ (เดือน)	เปอร์เซ็นต์การจำแนกกลุ่ม				รวม
		6½	7	7½	8	
การจำแนกกลุ่มแบบ Cross-validated	6½	80.8	5.0	12.5	1.7	100.0
	7	5.0	56.7	11.7	26.7	100.0
	7½	6.7	25.0	47.5	20.8	100.0
	8	10.8	12.5	16.7	60.0	100.0



ภาพที่ 24 การวัดความหนาเปลือกส้มโอ

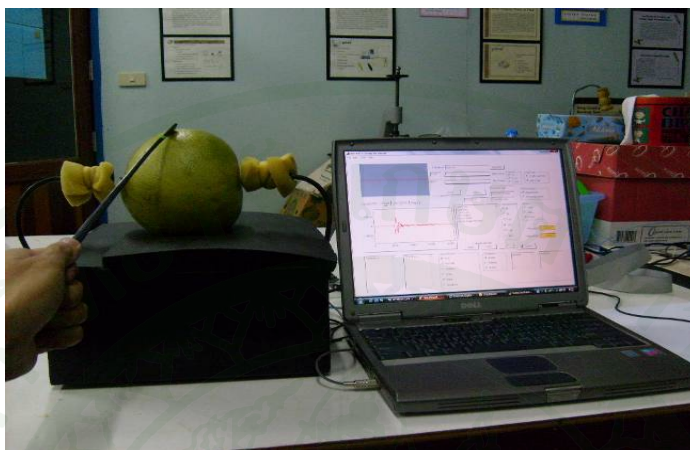
ตารางที่ 15 ตารางค่าความหนาของเปลือกส้มโอ

	TPT		MPT		BPT	
	Mean	Std. Deviation	Mean	Std. Deviation	Mean	Std. Deviation
6½	18.51 ^a	±3.20	12.04 ^a	±2.23	14.67 ^a	±3.20
7	18.99 ^a	±4.78	12.71 ^a	±2.63	15.61 ^a	±3.16
7½	20.49 ^a	±4.09	12.67 ^a	±2.74	15.69 ^a	±3.55
8	19.72 ^a	±6.41	11.51 ^a	±3.05	15.24 ^a	±3.66
F-value	0.91		1.35		0.56	

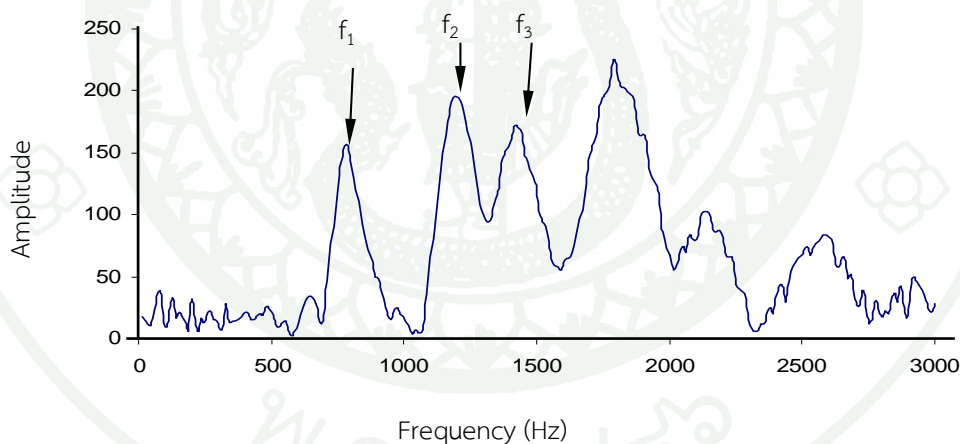
ทำการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติ (Acoustic impulse response) ในส้มโอพันธุ์ขาวทองดี 4 ช่วงความถี่โดยใช้ชุดอุปกรณ์วัดและเก็บสัญญาณเสียง แปลงเป็นความถี่ที่เกิดกับไมโครโฟน (ภาพที่ 25) ซึ่งตัวโปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณเสียง และ แปลงสัญญาณเสียงเป็นความถี่ในรูป Algorithm fourier transforms response (FFT) โปรแกรมจะสามารถจับจุดยอดที่สูงสุด 3 จุด (ภาพที่ 26) ค่าความถี่ที่ได้จะอยู่ในช่วง 1-2,000 Hz พบว่าเมื่ออายุของส้มโอมากขึ้นความถี่ธรรมชาติที่วัดได้จะมีค่าลดลง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในความถี่ที่ 3 (ตารางที่ 16)

จากการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ ANOVA ในตำแหน่งการเคาะที่แตกต่างกันพบว่า ความถี่ที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับช่วงความถี่ของส้มโอในทุกตำแหน่งที่ทำการทดสอบ (ตารางที่ 16) ในความถี่ที่ 2 เริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่ออายุความถี่เพิ่มขึ้น และเห็นชัดเจนเมื่อเคาะทดสอบด้านข้างผล (ตารางที่ 17) และ ความถี่ 3 มีการเปลี่ยนแปลงความถี่

ที่ชัดเจนในตำแหน่งทดสอบด้านซ้ายผล และ ด้านข้างผล (ตารางที่ 18) ซึ่งเมื่อดูค่า F-value ของแต่ละตำแหน่งแล้วด้านข้างผลเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการใช้ทดสอบ



ภาพที่ 25 ชุดอุปกรณ์วัดและเก็บสัญญาณเสียงแปลงเป็นความถี่



ภาพที่ 26 สัญญาณเสียงที่สัมพันธ์กับความถี่ของผลส้มโอ

ตารางที่ 19 พบว่าเมื่ออายุของส้มโอมากขึ้นความถี่ธรรมชาติที่วัดได้จะมีค่าลดลง ซึ่งเห็นได้ในทั้ง 3 ความถี่ทดสอบ และจะเห็นได้ชัดเจนในความถี่ที่ 3 ซึ่งความถี่ที่ 1 จะมีค่าอยู่ในช่วง 700-800 Hz, ความถี่ที่ 2 จะมีค่าอยู่ในช่วง 900-1,300 Hz และความถี่ที่ 3 จะมีค่าอยู่ในช่วง 1,100-1,800 Hz

ตารางที่ 16 ค่าความถี่ที่ 1 จากการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติของส้อมโอ ของส้อมโอทั้ง 4 ช่วงอายุ ในตำแหน่งทดสอบที่ต่างกัน

อายุเก็บเกี่ยว (เดือน)	ตำแหน่งซ้ายผล (Hz)	ตำแหน่งกันผล (Hz)	ตำแหน่งด้านข้างผล (Hz)
6½	786±129 ^b	823±164 ^b	783+46 ^c
7	781±143 ^b	830+186 ^b	760+64 ^b
7½	737±70 ^a	755+66 ^a	744+65 ^b
8	700±102 ^a	706±72 ^a	699+82 ^a
F-value	7.497	10.978	8.946

ตารางที่ 17 ค่าความถี่ที่ 2 จากการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติของส้อมโอ ของส้อมโอทั้ง 4 ช่วงอายุ ในตำแหน่งทดสอบที่ต่างกัน

อายุเก็บเกี่ยว (เดือน)	ตำแหน่งซ้ายผล (Hz)	ตำแหน่งกันผล (Hz)	ตำแหน่งด้านข้างผล (Hz)
6½	1,231±131 ^c	1,224±202 ^c	1,262+108 ^d
7	1,192+180 ^c	1,226+203 ^c	1,185+109 ^c
7½	1,040+150 ^b	1,015+133 ^b	1,051+93 ^b
8	959±158 ^a	941±115 ^a	943+101 ^a
F-value	35.885	39.154	56.807

ตารางที่ 18 ค่าความถี่ที่ 3 จากการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติของส้อมโอ ของส้อมโอทั้ง 4 ช่วงอายุ ในตำแหน่งทดสอบที่ต่างกัน

อายุเก็บเกี่ยว (เดือน)	ตำแหน่งซ้ายผล (Hz)	ตำแหน่งกันผล (Hz)	ตำแหน่งด้านข้างผล (Hz)
6½	1,728±212 ^d	1,577±202 ^c	1,752+196 ^d
7	1,566+300 ^c	1,541+232 ^c	1,558+137 ^c
7½	1,243+140 ^b	1,286+138 ^b	1,264+94 ^b
8	1,119±154 ^a	1,168±108 ^a	1,164+107 ^a
F-value	91.947	64.115	112.676

ตารางที่ 19 ค่าความถี่สูงสุด 3 จุด จากการแปลงสัญญาณเสียงในรูป Algorithm fourier transform response (FFT) ของส้มโอทั้ง 4 ช่วงอายุ

อายุเก็บเกี่ยว (เดือน)	ตำแหน่งซั้วผล (Hz)	ตำแหน่งก้นผล (Hz)	ตำแหน่งด้านข้างผล (Hz)
6½	783 ^a ±46	1,262 ^a ±108	1,752 ^a ±196
7	760 ^{ab} ±64	1,185 ^b ±109	1,558 ^b ±137
7½	744 ^b ±65	1,051 ^c ±93	1,264 ^c ±94
8	699 ^c ±82	943 ^d ±101	1,164 ^d ±107
F-value	8.95	56.81	112.68

ทำการแปลงความถี่ให้อยู่ในรูปของ Stiffness coefficient คือ $f^2 m^{2/3}$ (ตารางที่ 20) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าระหว่างความถี่ธรรมชาติ และ $f^2 m^{2/3}$ พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ดีกับความบริสุทธิ์ของส้มโอ ซึ่งความถี่ธรรมชาติเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์มากกว่าค่า $f^2 m^{2/3}$ โดยดูจากค่า F-value ในตารางที่ 20 และ ซึ่งคล้ายกับการทดลองของ Lu and Abbott (1997) ที่ว่าค่าความถี่ที่ 2 ยกกำลังสองมีความสัมพันธ์ที่ดีกับค่ายังค์มอดูลัสของแอปเปิล และ Nourain *et al.* (2005) แสดงให้เห็นว่าความแน่นเนื้อมีความสัมพันธ์กับค่าความถี่ธรรมชาติของส้มโอ

ตารางที่ 20 ค่าจุดยอดที่สูงที่สุด 3 จุด แปลงให้อยู่ใน Stiffness coefficient ของส้มโอทั้ง 4 ช่วงอายุ

	$f_1^2 m^{2/3}$ ($\times 10^7 \text{ Hz}^2 \text{ g}^{2/3}$)	S.D.	$f_2^2 m^{2/3}$ ($\times 10^7 \text{ Hz}^2 \text{ g}^{2/3}$)	S.D.	$f_3^2 m^{2/3}$ ($\times 10^7 \text{ Hz}^2 \text{ g}^{2/3}$)	S.D.
6½	5.73 ^a	±0.56	14.99 ^a	±2.34	29.14 ^a	±6.24
7	5.94 ^a	±0.77	14.59 ^a	±2.42	25.26 ^b	±4.29
7½	5.68 ^a	±0.54	11.40 ^b	±1.42	16.48 ^c	±1.79
8	5.06 ^b	±0.63	9.27 ^c	±1.20	14.20 ^d	±1.81
F-value	7.71		53.99		94.49	

วิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมเบื้องต้นของการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติ ในการจำแนกกลุ่มอายุของส้มโอโดยทำการวิเคราะห์แบบจำแนกกลุ่มด้วยวิธี Discriminant analysis โดยใช้ตัวแปร f_{1-3} , H/W และ SG โดยที่จะแบ่งวิเคราะห์ตามตำแหน่งที่ทำการทดสอบดังนี้คือ 1 (เคาะด้านซั้วผล), 2 (เคาะด้านก้นผล), 1-2, 3-6 (เคาะด้านข้างผล) และ 1-6

ดังภาพที่ 19 จากการวิเคราะห์ การจำแนกกลุ่มที่ดีที่สุดเท่ากับ 59.8 % โดยใช้ตัวแปรทั้งหมด 5 ตัวแปรคือ f_{1-3} , H/W และ SG ซึ่งตำแหน่งที่ให้ค่าที่ดีที่สุดคือ 3-6 ซึ่งให้ค่าการวิเคราะห์สูงสุดในทุกการสร้างสรรค์การจำแนกกลุ่ม ดังนั้นตำแหน่งในการทดสอบควรใช้ตำแหน่ง 3-6 (เคาะด้านข้างผล) (ตารางที่ 21) และจากการแปลงความถี่เป็นค่า Stiffness coefficient ($f^2 m^{2/3}$) ค่าการวิเคราะห์สูงสุดจากการสร้างสรรค์การจำแนกกลุ่ม ตำแหน่งที่ให้ค่าที่ดีที่สุดคือ 3-6 ดังตารางที่ 22

ตารางที่ 21 ค่าจากการทดสอบแบบจำแนกกลุ่มด้วยวิธี Discriminant analysis ในการทดสอบด้วยคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติ

acoustic	1	2	1-2	3-6	1-6
f_{1-3} , SG, H/W	56.3	45.4	54.4	59.8	58.3
f_{1-3} , H/W	52.1	43.3	49.4	53.4	52.6
f_{1-3} , SG	55.0	48.8	53.5	57.9	57.4
f_{1-3}	49.6	46.7	49.2	52.2	51.3

การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มอายุแบบ Cross-validated ทำนายถูก 59.8% (ตารางที่ 21) พบว่ากลุ่ม 7½ เดือน มีความถูกต้องในการทำนายสูงที่สุด 72.1% กลุ่มที่ 2 มีความถูกต้องในการทำนายต่ำที่สุด 35% (ตารางที่ 23) โดยใช้ตัวแปร F_{1-3} , SG, H/W

ตารางที่ 22 ค่าจากการทดสอบแบบจำแนกกลุ่มด้วยวิธี Discriminant analysis ในการทดสอบด้วยคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติจากการแปลงความถี่เป็นค่า Stiffness coefficient ($f^2 m^{2/3}$)

acoustic	1	2	1-2	3-6	1-6
$f^2 m^{2/3}_{1-3}$, G, H/W	54.2	42.9	50.2	59.5	55.6
$f^2 m^{2/3}_{1-3}$, H/W	53.8	37.1	45.8	52.8	52.8
$f^2 m^{2/3}_{1-3}$, G	52.1	43.3	49.4	59.3	54.1
$f^2 m^{2/3}_{1-3}$	54.6	40.0	49	53.8	52.2

ตารางที่ 23 การวิเคราะห์จำแนกกลุ่มอายุด้วยวิธี Discriminant analysis แบบ Cross-validated ในการทดสอบด้วยคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติจากตำแหน่ง 3-6

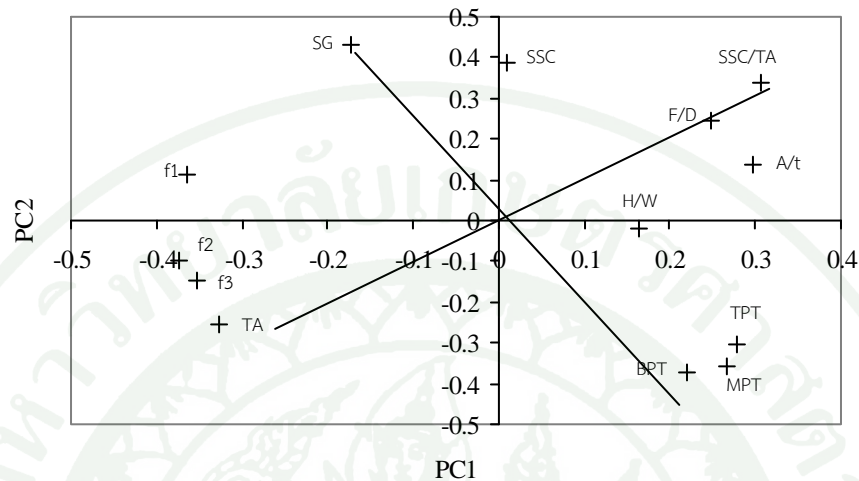
	กลุ่มอายุ (เดือน)	เปอร์เซ็นต์การจำแนกกลุ่ม				รวม
		6½	7	7½	8	
การจำแนกกลุ่มแบบ Cross-validated	6½	62.1	21.7	8.8	7.5	100.0
	7	32.5	35.0	21.7	10.8	100.0
	7½	0.4	8.8	72.1	18.8	100.0
	8	0.4	7.9	21.7	70.0	100.0

ตัวแปรความถี่ธรรมชาติอันดับที่ 3 เป็นตัวแปรที่ดีที่สุดในการนำไปใช้ตัดแยกช่วงความบริสุทธิ์ จากค่า F-value ที่ได้ ซึ่งสัมพันธ์เป็นผลไม้ที่มีเปลือกค่อนข้างแข็งทำให้ตอบสนองต่อแรงที่มากระทำได้ดี และตัวแปร SSC/TA เป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ที่ดีเช่นกัน (F-value = 92.28) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ถูกนำมาทำนายความบริสุทธิ์ของผลไม้อยู่เสมอ (Keutgen and Pawelzik , 2007) การวัดค่า SG, TPT, MPT และ BPT พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ในการแบ่งแยกความบริสุทธิ์ของส้มโอ และ A/t และ F/D ก็เป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับความบริสุทธิ์ของส้มโอจากค่า F - value

ความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละตัวแปร

การหาความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละตัวแปรโดยการวิเคราะห์ Principal component analysis (PCA) ได้แสดงเป็นค่า Loading plot ของทั้ง 13 ตัวแปรซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัวในรูปของกราฟการกระจายตัวโดยการพล็อตระหว่าง Principal component 1 (PC1) กับ Principal component 2 (PC2) (ภาพที่ 27) และใช้การวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างแต่ละตัวแปรเป็นคู่ๆ (ตารางที่ 24) จากภาพที่ 26 ค่า TA จะจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับคุณสมบัติเกี่ยวกับเสียง (f_1 , f_2 และ f_3) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์เป็นเชิงบวก ส่วนคุณสมบัติเกี่ยวกับรสชาติ (SSC/TA) อยู่กลุ่มเดียวกันกับค่าการทดสอบ Elasticity ที่เปลือก (F/D และ A/t) และกลุ่มของ TA กับการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติ จะมีความสัมพันธ์กับกลุ่มการทดสอบ Elasticity ที่เปลือกกับคุณสมบัติเกี่ยวกับรสชาติแต่เป็นความสัมพันธ์ในเชิงลบ ความถ่วงจำเพาะ SG มีความสัมพันธ์กับกลุ่มความหนา

เปลือก (TPT, MPT และ PPT) ในเชิงลบ ซึ่งโดยทั่วไปความหนาเปลือกจะมีผลกับขนาดของส้มโอจึงทำให้มีความสัมพันธ์กับค่าความถ่วงจำเพาะ



ภาพที่ 27 กราฟแสดงค่า Loading plot ของตัวแปรทั้งหมดโดยพล็อตระหว่างสมการ Principal component 1 และ 2

ตารางที่ 24 ตารางแสดงค่าสเปกตรัมพื่นซ์ของตัวแปรทั้งหมด

	A/t	F/D	f ₁	f ₂	f ₃	H/W	SG	TPT	MPT	BPT	TA	SSC	SCC/TA
	(x10 ⁹ mm/s ³)	(N/mm)	(Hz)	(Hz)	(Hz)			(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(°Brix)	(°Brix/%)
A/t	1.000												
F/D	0.871	1.000											
f ₁	-0.358	-0.241	1.000										
f ₂	-0.429	-0.361	0.788	1.000									
f ₃	-0.398	-0.371	0.642	0.923	1.000								
H/W	0.139	0.159	-0.144	-0.174	-0.231	1.000							
SG	-0.047	0.191	0.475	0.211	0.098	-0.134	1.000						
TPT	0.265	0.117	-0.630	-0.345	-0.264	0.338	-0.654	1.000					
MPT	0.302	0.094	-0.467	-0.172	-0.089	0.179	-0.718	0.719	1.000				
BPT	0.293	0.091	-0.562	-0.361	-0.268	0.266	-0.744	0.700	0.767	1.000			
TA	-0.507	-0.518	0.487	0.680	0.720	-0.263	-0.099	-0.169	-0.033	-0.096	1.000		
SSC	0.196	0.325	0.141	-0.103	-0.110	0.063	0.492	-0.267	-0.390	-0.428	-0.213	1.000	
SCC/TA	0.532	0.583	-0.426	-0.666	-0.704	0.276	0.206	0.105	-0.087	-0.025	-0.904	0.494	1.000

การจำแนกช่วงความเจริญของส้มโอ

การจำแนกความเจริญใช้วิธีวิเคราะห์แบบ Discriminant analysis ใช้การวิเคราะห์เป็นแบบ Leave-one-out cross validated ซึ่งแบ่งเป็น 4 ช่วงความเจริญ (6½ = Immature, 7 = Early-mature, 7½ = Late-mature และ 8 = Over-mature) ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 25 การสร้างสมการ Discriminant โดยใช้ตัวแปรทั้งหมดมีค่าความแม่นยำ 85 เปอร์เซ็นต์ ในการจำแนกความเจริญของส้มโอ กลุ่ม Early-mature ทำนายได้แม่นยำที่สุด และทำนายได้แม่นยำน้อยที่สุดคือกลุ่ม Over-mature ในภาพที่ 28 เป็นกราฟแสดงการกระจายตัวของตัวอย่างของแต่ละกลุ่มช่วงความเจริญที่ได้ถูกทำนายโดยสมการ Discriminant ซึ่งในสมการ Discriminant function 1 สามารถอธิบายความแปรปรวนได้ 91.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีตัวแปร f_3 , SSC/TA และ f_2 เป็นตัวแปรสำคัญในการสร้างสมการและเป็นตัวแปรที่ให้ค่า F-value สูง ซึ่งอธิบายค่าความสัมพันธ์ในตารางที่ 26 ซึ่งเป็นตารางแสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรในแต่ละสมการ Discriminant ส่วนสมการ Discriminant function 2 สามารถตัดแยกความเจริญของช่วง Late-mature กับ Over-mature ได้โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือ A/t, f_1 , SG และ TPT ส่วนสมการ Discriminant function 3 มีตัวแปรที่สำคัญ F/D, MPT, H/W และ BPT

ตารางที่ 25 ตารางแสดงการคัดแยกช่วงความเจริญของส้มโอด้วยวิธี Discriminant analysis โดยใช้ตัวแปรทั้งหมด

ตัวแปรทั้งหมด	เปอร์เซ็นต์การคัดแยก	กลุ่มที่ถูกทำนาย				Total	
		Immature	Early-mature	Late-mature	Over-mature		
	กลุ่มจริง						
A/t, F/D, SG, f_1 , f_2 , f_3 , H/W, TPT, MPT, BPT and SSC/TA	Immature	83.3	25	5	0	0	30
	Early-mature	96.7	1	29	0	0	30
	Late-mature	83.3	0	1	25	4	30
	Over-mature	76.7	0	0	7	23	30
Total		85.0	26	35	32	27	120

ตารางที่ 26 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า Discriminant score กับตัวแปรที่ใช้ในสมการ (ตัวแปรทั้งหมด)

ตัวแปร	Discriminant function		
	1	2	3
f_3	-0.620 ^a	-0.190	0.150
SSC/TA	0.549 ^a	-0.309	0.006
f_2	-0.437 ^a	0.105	0.375
A/t	0.243	-0.563 ^a	0.419
f_1	-0.166	0.199 ^a	0.136
SG	0.035	-0.170 ^a	0.060
TPT	0.045	0.123 ^a	0.003
F/D	0.249	-0.473	0.478 ^a
MPT	-0.019	0.157	0.306 ^a
H/W	0.090	0.174	-0.231 ^a
BPT	0.025	0.057	0.199 ^a
Explained variance (%)	91.1	6.5	2.5
Significance	**	**	*

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 99 %

a ตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุดกับสมการ Discriminant function

การใช้ตัวแปรแบบไม่ทำลายในการสร้างสมการ (A/t, f_1 , f_2 , f_3 , H/W และ SG) ความแม่นยำที่ได้ลดลงเหลือเพียง 80 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 27) แต่สมการ Discriminant function 1 สามารถอธิบายความแปรปรวนได้ดีที่ 90.6 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 29) และ กลุ่ม Late-mature ทำนายได้แม่นยำที่สุด (86.7 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งในส่วนของสมการ Discriminant function 3 ไม่มีนัยสำคัญกับการคัดแยกช่วงความบริบูรณ์ (ตารางที่ 28) นั่นคือ สามารถใช้แค่ 2 Discriminant function ในการคัดแยกช่วงความบริบูรณ์ของส้มโอก็เพียงพอในการคัดแยกแบบใช้ตัวแปรไม่ทำลาย และ เมื่อดูจากกราฟ Scatter plot ก็สามรถอธิบายความแปรปรวนของทุกกลุ่มได้โดยที่สมการ Discriminant function 1 สามารถแยกความบริบูรณ์ได้ 3 ช่วงอายุ (Immature, Early-mature และ Late-

mature ร่วมกับ Over-mature) โดย f_3 เป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดในสมการ (ตารางที่ 28) ในระหว่างกลุ่ม Late-mature กับ Over-mature ถูกคัดแยกโดย Discriminant function 2 โดยมีตัวแปร A/t เป็นตัวแปรที่สำคัญในการสร้างสมการ การสร้างสมการ Discriminant โดยอาศัยตัวแปรทั้ง 6 ตัว มีความเป็นไปได้ซึ่งช่วยลดตัวแปรลงจากการใช้ตัวแปรทั้งหมด

ตารางที่ 27 ตารางแสดงการคัดแยกช่วงความเจริญของส้มโอด้วยวิธี Discriminant analysis โดยใช้ตัวแปรแบบไม่ทำลายตัวอย่าง

ตัวแปร แบบไม่ ทำลาย	เปอร์เซ็นต์ การคัดแยก	กลุ่มที่ถูกทำนาย				Total	
		Immature	Early- mature	Late- mature	Over- mature		
	กลุ่มจริง						
$f_1, f_2, f_3,$	Immature	80.0	24	6	0	0	30
SG,	Early-mature	76.7	4	23	2	1	30
H/W	Late-mature	86.7	0	1	26	3	30
and A/t	Over-mature	80.0	0	0	6	24	30
Total		80.8	28	30	34	28	120

การใช้คุณสมบัติเกี่ยวกับเสียงเพียงอย่างเดียวในการสร้างสมการ Discriminant ให้ค่าความแม่นยำที่ 65 เปอร์เซ็นต์ f_3 ยังคงเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดในการคัดแยกช่วงความเจริญทั้ง 2 กรณี Chen and De Baerdemaeker (1993) กล่าวว่า f_3 เป็นตัวแปรที่สำคัญในการนำไปใช้คัดแยก สับปะรด อย่างไรก็ตามส้มโอมีความแตกต่างจากสับปะรด ในรูปของความหนาเปลือกและในด้านอื่นๆ และลักษณะการสั้นของส้มโอก็ยังจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม ในช่วง Late-mature กับ Over-mature ยังคงถูกคัดแยกด้วยสมการ Discriminant function 2 มีตัวแปร A/t เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ในช่วงอายุ Early-mature จะมีความเจริญเพิ่มขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงภายในผลมากจึงถูกคัดแยกได้โดยคุณสมบัติเกี่ยวกับเสียงได้ง่าย ส่วนในช่วงของ Late-mature กับ Over-mature อายุนี้ส้มโอมีการเปลี่ยนแปลงภายในคงที่ แต่การเปลี่ยนแปลงจะเกิดที่เปลือกจึงมีผลกับการทดสอบ ด้วยคุณสมบัติความแน่นเนื้อ

ตารางที่ 28 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า Discriminant score กับตัวแปรที่ใช้
ในสมการ (ตัวแปรแบบไม่ทำลาย)

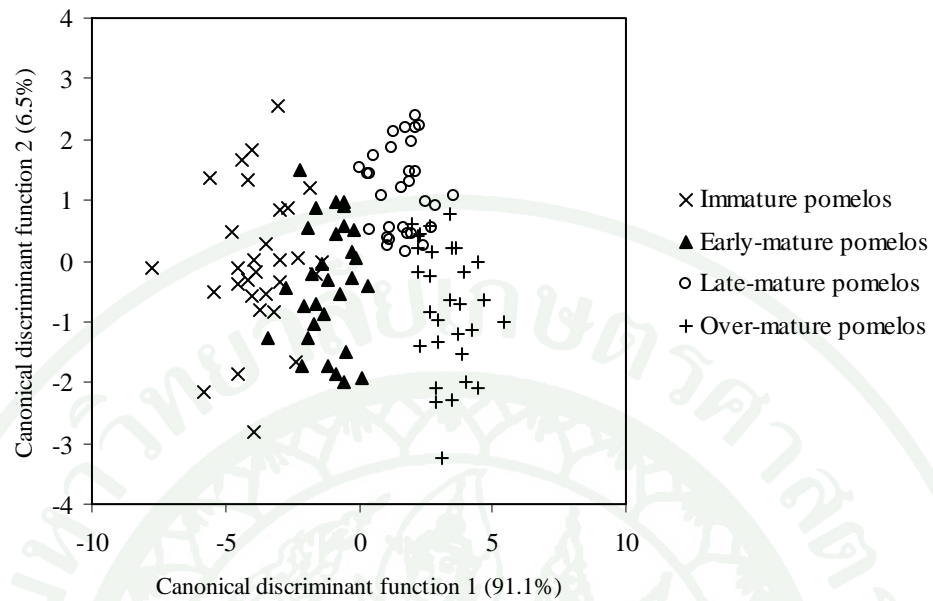
Parameter	Discriminant function		
	1	2	3
f_3	-0.769 ^a	0.222	0.160
f_2	-0.541 ^a	-0.088	0.532
A/t	0.300	0.717 ^a	0.304
SG	0.043	0.206 ^a	0.012
f_1	-0.205	-0.219	0.250 ^a
H/W	0.111	-0.229	-0.231 ^a
Explained variance (%)	90.6	7.1	2.6
Significance	**	**	n.s.

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %

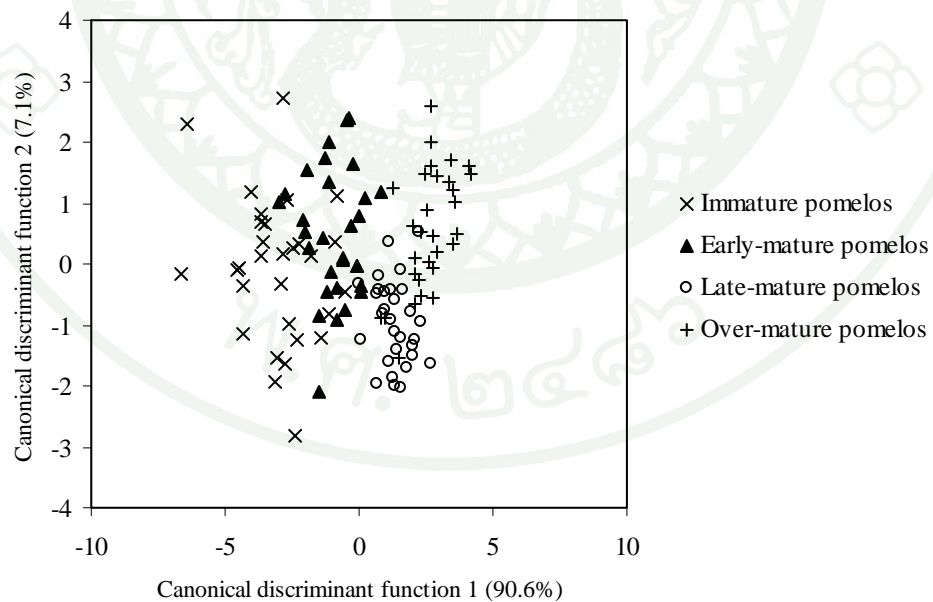
** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 99 %

n.s. ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

a ตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุดกับสมการ Discriminant function



ภาพที่ 28 กราฟแสดงการกระจายตัวของตัวอย่างของแต่ละกลุ่มช่วงความบริบูรณ์ที่พล็อตระหว่าง Canonical functions 1 และ Canonical functions 2 โดยการใช้ตัวแปรทั้งหมด



ภาพที่ 29 กราฟแสดงการกระจายตัวของตัวอย่างของแต่ละกลุ่มช่วงความบริบูรณ์ที่พล็อตระหว่าง Canonical functions 1 และ Canonical functions 2 โดยการใช้ตัวแปรแบบไม่ทำลาย

การทำนายความบริสุทธิ์ของส้มโอ

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาตัวแปรที่เหมาะสมจะเป็นตัวแทนของความบริสุทธิ์คือ SSC/TA ซึ่งเป็นค่าทางเคมีที่ได้จากส้มโอ ดังนั้นในการวิเคราะห์เชิงปริมาณจึงใช้ตัวแปร SSC/TA เป็นตัวแปรอ้างอิงในการสร้างสมการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLSR

ในการสร้างสมการทำนายค่า PLSR ต้องมีการตรวจสอบความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรว่ามีความสัมพันธ์กันเองหรือไม่ (Multicollinearity) ซึ่งเป็นสาเหตุให้สมการไม่เที่ยงตรงเนื่องจากตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเองทำให้ค่าในการทำนายที่ได้มีค่าสูง หรือ ต่ำเกินจริง (Kleinbaum *et al.*, 1998) การตรวจหาค่า Multicollinearity จะใช้สมการ Multiple linear regression โดยให้ค่า SSC/TA เป็นตัวแปรตาม และมีค่า Variance inflation factor (VIF) เป็นตัวชี้วัด ค่า VIF จะเป็นบ่งบอกค่าความแปรปรวนสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักของแต่ละตัวแปรในสมการ (Kleinbaum *et al.*, 1998) ผลที่ได้พบว่ามีตัวแปรที่มีค่า VIF สูงคือ f_2 และ f_3 (10.4 และ 9.1)

ในการวิเคราะห์ PLSR โดยใช้ตัวแปรทั้งหมดที่ถูกถ่วงน้ำหนักโดยหารด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าที่ได้แสดงในตาราง โดยมีค่า $r = 0.82$, $SEP = 2.527$ °Brix/% และ $bias = -0.209$ ในภาพที่ 30 เป็นกราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการทดลอง ตารางที่ 29 แสดงถึงสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักของแต่ละตัวแปรในการสร้างสมการ calibration เป็นค่าที่บอกความสำคัญของตัวแปรแต่ละตัวในสมการ ตัวแปร f_2 และ f_3 มีค่ามากที่สุด คุณสมบัติเกี่ยวกับเสียงเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมในการคัดแยกความบริสุทธิ์ของส้มโอมากกว่าคุณสมบัติด้านอื่น และคุณสมบัติเกี่ยวกับความแน่นเนื้อ (F/D และ A/t) เป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมรองลงมา (ตารางที่ 30) จากการทดลองสนับสนุนงานวิจัยที่ว่า คุณสมบัติเกี่ยวกับเสียงเหมาะสมในการคัดแยกความบริสุทธิ์กับผลไม้มิ่มีลักษณะแข็งกว่าคุณสมบัติเกี่ยวกับความแน่นเนื้อที่เหมาะสมกับผลไม้มิ่มีลักษณะอ่อนนุ่ม (Shmulevich, 1998) ผลไม้มิ่มีลักษณะแข็งจะให้คุณสมบัติเสียงที่ชัดเจนเมื่อมีแรงมากระทำ ส่วนผลไม้มิ่มีลักษณะอ่อนนุ่มเมื่อมีแรงมากระทำสัญญาณเสียงที่ได้จะอ่อนและจำเป็นต้องมีการควบคุมระดับแรงที่ใช้ไม่เกิดความเสียหายกับผลไม้

การสร้างสมการ PLSR ด้วยตัวแปรแบบไม่ทำลายมีค่าความแม่นยำที่ $r = 0.786$, $SEP = 2.738$ °Brix/% และ $bias = -0.370$ (ตารางที่ 29) จากสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักในตารางที่ 30 ค่า f_3 ยังคงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการสร้างสมการ จากการไม่นำตัวแปรแบบทำลายมารวมสร้างสมการทำ ให้ค่า SG กลับมีค่าสูงกว่าค่า f_2 และ A/t ในการใช้ตัวแปรแบบไม่ทำลายนั้นให้ค่าในการทำนาย

แม่นยำดีพอกันกับการใช้ตัวแปรทั้งหมด อย่างไรก็ตามเมื่อใช้แต่คุณสมบัติเกี่ยวกับเสียงในการสร้างสมการพบว่าค่าในการนำนายความบริสุทธิ์ไม่แม่นยำมีค่า $r = 0.695$, $SEP = 3.176$ °Brix/% และ $bias = -0.514$

ตารางที่ 29 ตารางแสดงผลที่ได้จากการสร้างสมการ PLSR ในการทำนายค่า SSC/TA

Predictor variables	r	RMSECV	No. of Factor	r	r ²	RMSEP	SEP	Bias
A/t, F/D, SG, f ₁ , f ₂ , f ₃ , H/W, TPT, MPT, BPT และ SSC/TA	0.822	2.511	2	0.819	0.665	2.504	2.527	-0.209
ตัวแปรแบบไม่ทำลาย (f ₁ , f ₂ , f ₃ , SG, H/W และ A/t)	0.817	2.548	2	0.786	0.602	2.728	2.738	-0.370
ตัวแปรคุณสมบัติเกี่ยวกับ เสียง (f ₁ , f ₂ และ f ₃)	0.695	3.173	2	0.695	0.460	3.178	3.176	-0.514

หมายเหตุ r = correlation coefficient

r² = Coefficient of determination of prediction

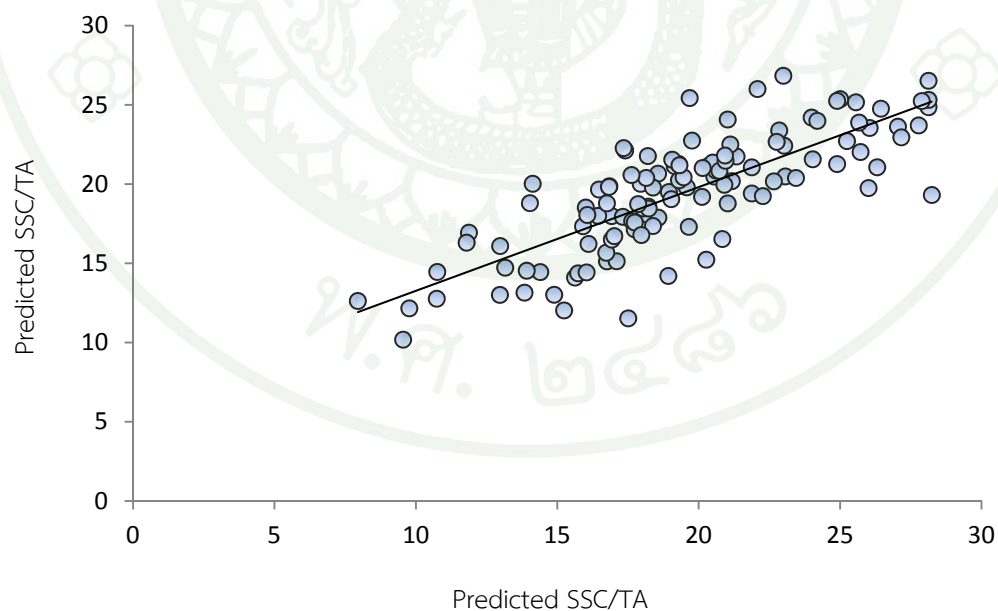
RMSECV = Root mean square error of cross validation

RMSEP = root mean square error of prediction

SEP = Standard error of prediction

ตารางที่ 30 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ถ่วงน้ำหนักของตัวแปรในการสร้างสมการ

Variables	Weighted Coefficients	
	10 variables	Non-destructive variables
f_3	-1.244	-1.441
f_2	-1.019	-1.047
F/D	0.931	-
A/t	0.848	1.290
SG	0.698	1.383
H/W	0.674	0.960
MPT	-0.530	-
f_1	-0.501	-0.285
BPT	-0.411	-
TPT	0.037	-



ภาพที่ 30 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SCC/TA ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการทดลอง

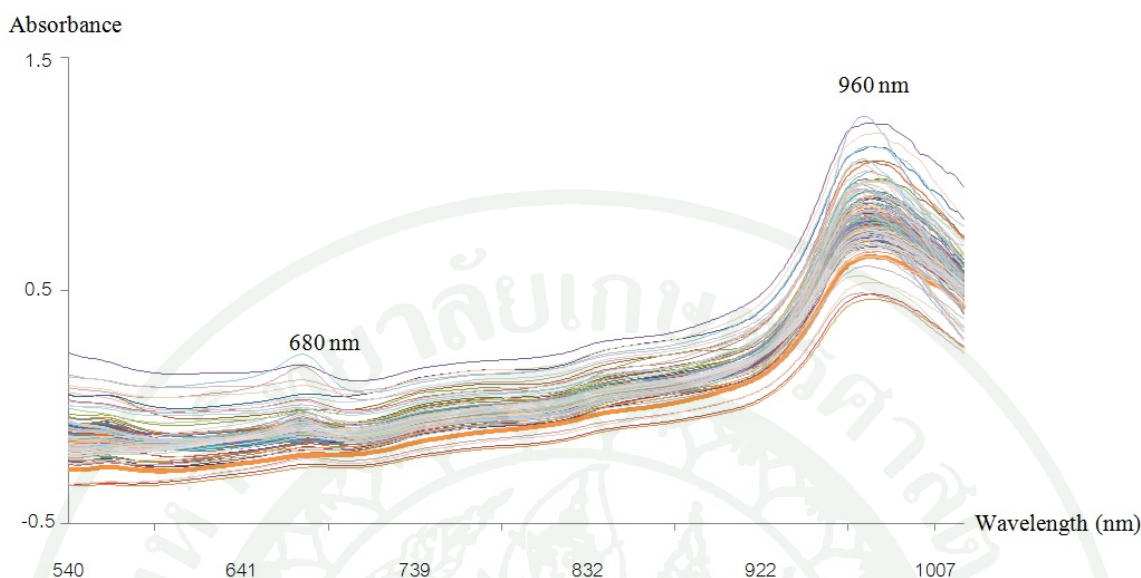
2. การหาคุณภาพภายในส้มโอตัดแต่งสดพร้อมบริโภคร่วมด้วยวิธี Vis/NIR spectroscopy

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทั้งหมด 184 ชิ้น โดยแบ่งเป็นกลุ่ม Calibration จำนวน 123 และ กลุ่ม Prediction 61 ชิ้น โดยแบ่งกลุ่มจากการกระจายตัวของค่าทางเคมี ข้อมูลทางสถิติเบื้องต้นได้แสดงในตารางที่ 31 ทั้งในกลุ่ม Calibration และ กลุ่ม Prediction โดยมีค่า SSC 9.65 – 13.4 °Brix ในกลุ่ม Calibration และ 9.7 – 13.35 °Brix ในกลุ่ม Prediction ส่วนมีค่า TA 0.54 – 0.76% ในกลุ่ม Calibration และ 0.54 – 0.78% ในกลุ่ม Prediction

ตารางที่ 31 ตารางแสดงค่าทางเคมีของชิ้นส้มโอตัดแต่ง

	characteristic	S.D.	Mean	Maximum	Minimum	No. of samples
Calibration set	SSC (°Brix)	0.95	11.37	13.4	9.65	123
	TA (%)	0.12	0.76	1.15	0.54	123
Prediction set	SSC (°Brix)	0.93	11.38	13.35	9.7	61
	TA (%)	0.14	0.78	1.02	0.54	61

สเปกตรัมของความเข้มแสง (Log [1/R]) ที่ทะลุผ่านของตัวอย่างส้มโอตัดแต่งสดในช่วงความยาวคลื่นที่ทำการทดลองระหว่าง 540 ถึง 1,040 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 31 แสดงสเปกตรัมของแต่ละตัวอย่างที่ทำการเฉลี่ยทั้ง 8 ซ้ำ และทำการปรับแต่งเพื่อลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี Moving average filter พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงที่สำคัญ 2 ช่วง คือ ช่วงค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นแสง 680 และ 960 นาโนเมตร ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในช่วงความยาวคลื่น 680 นาโนเมตรตรงกับค่าการดูดกลืนของคลอโรฟิลล์ซึ่งมีในผักและผลไม้สีเขียวทั่วไป (Gómez et al., 2006) และ ความยาวคลื่น 960 นาโนเมตรเป็นการดูดกลืนแสงสูงสุดซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนของน้ำและคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นส่วนประกอบของแป้งที่เกี่ยวข้องกับสถานะการสั่นขององค์ประกอบกลุ่ม OH ของน้ำ (Xie et al., 2009) ที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในตัวอย่างส้มโอตัดแต่ง น้ำเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญมากของผลไม้ และ ผัก ซึ่งยังดูดกลืนรังสี NIR ได้ดี (Nicolai et al., 2007) ในความยาวคลื่นประมาณ 960 – 990 nm (Williams and Norris, 2001)



ภาพที่ 31 สเปกตรัมของชิ้นส้มโอตัดแต่งจำนวน 184 ชิ้น

เนื่องจากผิวหน้าสัมผัสของชิ้นตัวอย่างมีลักษณะที่ไม่เรียบเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นการลดอิทธิพลดังกล่าวอาจจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความแม่นยำมากขึ้น จากสเปกตรัมที่ได้ในแต่ละผลสามารถอธิบายได้ง่ายๆ คือ สามารถแบ่งออกได้เป็น 10 กลุ่ม Training sets ก็จะมีดังนี้คือ การสแกนมุมที่ 1, การสแกนมุมที่ 2, การสแกนมุมที่ 3, การสแกนมุมที่ 4, การสแกนมุมที่ 5, การสแกนมุมที่ 6, การสแกนมุมที่ 7, การสแกนมุมที่ 8, แบบใช้ทั้งหมด และ แบบเฉลี่ย

จากการสร้างสมการในการทดสอบความแม่นยำของค่า SSC และ TA จากกลุ่ม Training set ทั้ง 10 กลุ่มในตารางที่ 32 พบว่าค่าในการทำนาย TA มีค่าค่อนข้างต่ำและเมื่อนำไปเฉลี่ยแล้วค่าที่ได้ไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก ($r=0.594$ $RMSEP=0.111\%$) แต่เมื่อใช้สเปกตรัมทั้งหมดกลับมีค่าในการทำนายมากขึ้น ($r=0.741$ $RMSEP=0.097\%$) โดยในภาพที่ 32 เป็นกราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับค่าที่วัดได้จริงจากการทดลอง เป็นผลเนื่องจากค่า TA ของตัวอย่างมีจำนวนค่อนข้างน้อยจึงจำเป็นต้องใช้จำนวนข้อมูลที่มากขึ้นในการทดสอบ ในการทำนาย SSC มีค่าปานกลางและเมื่อใช้สเปกตรัมทั้งหมดกลับมีค่าที่ได้ไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก ($r=0.783$ $RMSEP=0.577$ °Brix) และเมื่อนำไปเฉลี่ยสเปกตรัมแล้วมีค่าในการทำนายดีมากขึ้น ($r=0.825$ $RMSEP=0.543$ °Brix) แสดงในภาพที่ 33 เป็นกราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับค่าที่วัดได้จริง ซึ่งอาจเป็นเพราะการเฉลี่ย

สเปกตรัมช่วยลดอิทธิพลจากตัวอย่างได้ดีพอสมควรแต่ความแม่นยำยังไม่สามารถนำไปใช้ได้จริงจึงจำเป็นต้องมีการอิทธิพลจากปัจจัยต่าง ๆ และเพิ่มประสิทธิภาพของสมการทำนายค่าด้วยวิธีอื่นเพิ่มเติม เช่น Pre-processing วิธีต่าง ๆ และ การเลือกช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมกลับค่าทางเคมีที่เราสนใจ

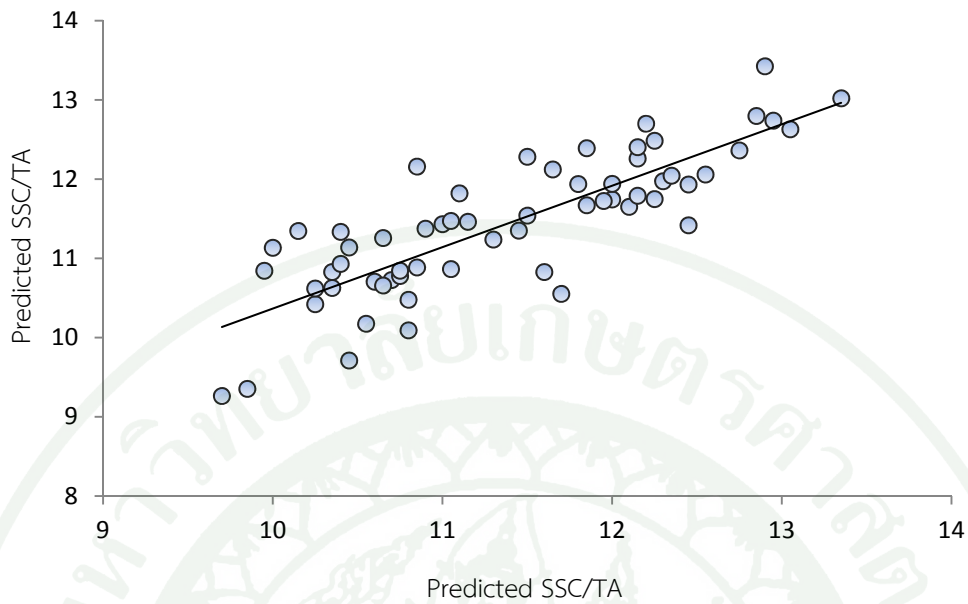
ตารางที่ 32 ค่าจากการสร้างสมการในการทดสอบความแม่นยำของค่า SSC และ TA จากกลุ่ม Training set ทั้ง 10 กลุ่ม

Training * set	SSC			TA		
	PLS factor	r ^a	RMSEP ^b (°Brix)	PLS factor	r ^a	RMSEP ^b (%)
1	6	0.636	0.737	4	0.598	0.119
2	6	0.664	0.702	4	0.536	0.122
3	6	0.666	0.697	5	0.569	0.117
4	11	0.649	0.711	4	0.552	0.118
5	5	0.618	0.735	4	0.480	0.127
6	10	0.785	0.541	4	0.371	0.140
7	10	0.761	0.611	5	0.449	0.129
8	10	0.713	0.658	4	0.501	0.125
All	14	0.783	0.577	14	0.741	0.097
averaged	14	0.825	0.534	12	0.594	0.110

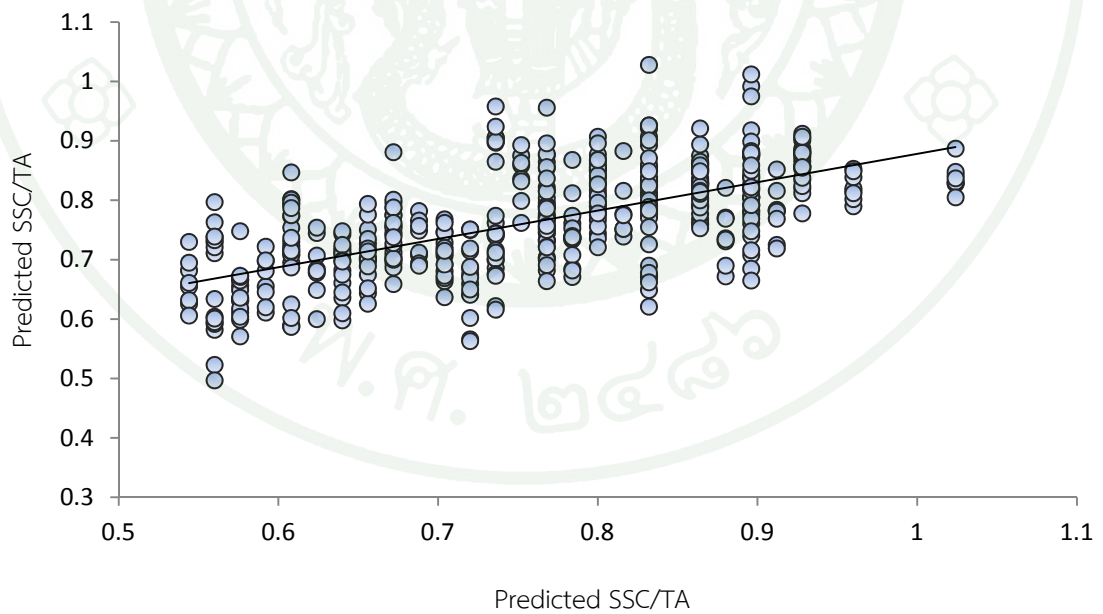
หมายเหตุ * 1 = Spectra obtained from position 1

^a r = correlation coefficient

^b RMSEP = root mean square error of prediction



ภาพที่ 32 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSC ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ กับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกโตรมิเตอร์



ภาพที่ 33 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TA ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ กับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกโตรมิเตอร์ทั้งหมด

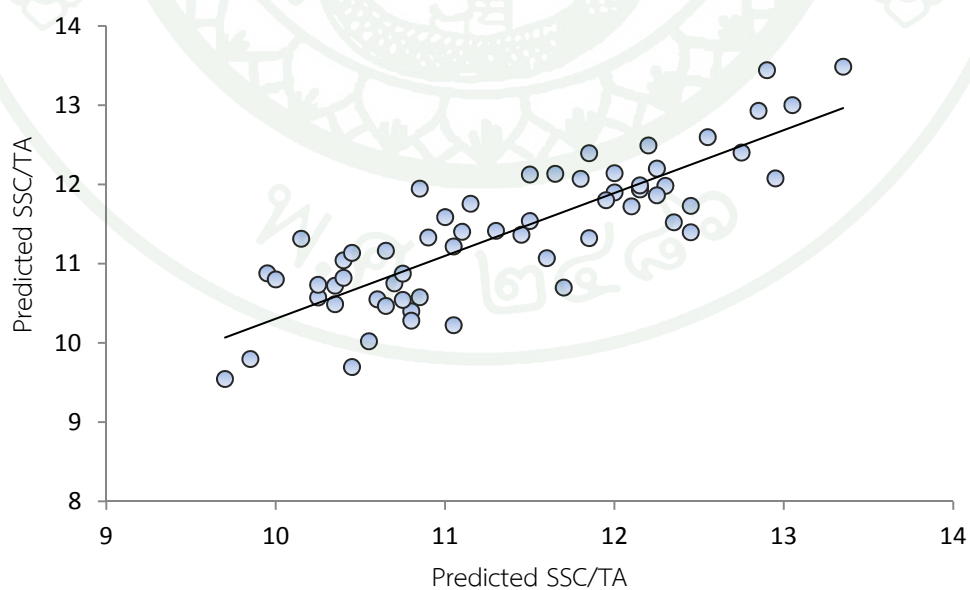
ผลจากการใช้กระบวนการ Pre-processing ที่แตกต่างกันในการสร้างสมการ

การสร้างสมการ Calibration แบบ PLSR ด้วยกระบวนการ Pre-processing ต่างๆ ของค่า SSC และ TA แสดงในตารางที่ 33 และ 34 ซึ่งแบ่งเป็นตารางที่ใช้สเปกตรัมทั้งหมด (Raw spectrum) และ ใช้สเปกตรัมเฉลี่ยจากการสแกน 8 ครั้ง (Averaged spectrum) ซึ่งในส่วนของการสร้างสมการทำนาย SSC ได้ค่าความแม่นยำที่ดีที่สุดจากการ Preprocessing แบบ SNV ในการใช้ตัวอย่างเป็นแบบ Averaged spectrum ให้ค่า $r = 0.841$, $RMSEP = 0.508$ °Brix และ PLS factor เท่ากับ 13 (ตารางที่ 33) และ แสดงกราฟ Scatter plot ในภาพที่ 34 ซึ่งมีค่าดีกว่าของ Wang *et al.* (2011) ในพุทรา ($r = 0.73$ และ $RMSEP = 3.517$ Brix) แต่น้อยกว่า Gómez *et al.* (2006) ในส้ม Mandarin ที่ $r = 0.94$ และ $RMSEP = 0.33$ °Brix; Shao *et al.* (2007) ในมะเขือเทศที่ $r = 0.90$ และ $RMSEP = 0.19$ °Brix ; Sun *et al.* (2009) ในลูกแพร์ที่ $r = 0.957$ และ $RMSEP = 0.53$ °Brix และ โดย Moghimi *et al.* (2010) ในผลกีวี ที่ $r = 0.93$ และ $RMSEP = 0.259$ °Brix ซึ่งผลที่ได้จากการสร้างสมการ Calibration ของ SSC มีค่าดีกว่าของ TA อย่างไรก็ตามความแม่นยำของสมการก็ยังไม่เพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้ ในส่วนของการสร้างสมการทำนาย TA ใช้ Preprocessing แบบ MSC (Averaged spectrum) ให้ค่าในการทำนายดีคือ $r = 0.693$, $RMSEP = 0.084$ % และ PLS Factor เท่ากับ 9 และแสดงกราฟ Scatter plot ในภาพที่ 35 ซึ่งก็ยังไม่เพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งค่าของสมการที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ควรมีค่า $r = 0.91 - 0.95$ (Williams , 2001)

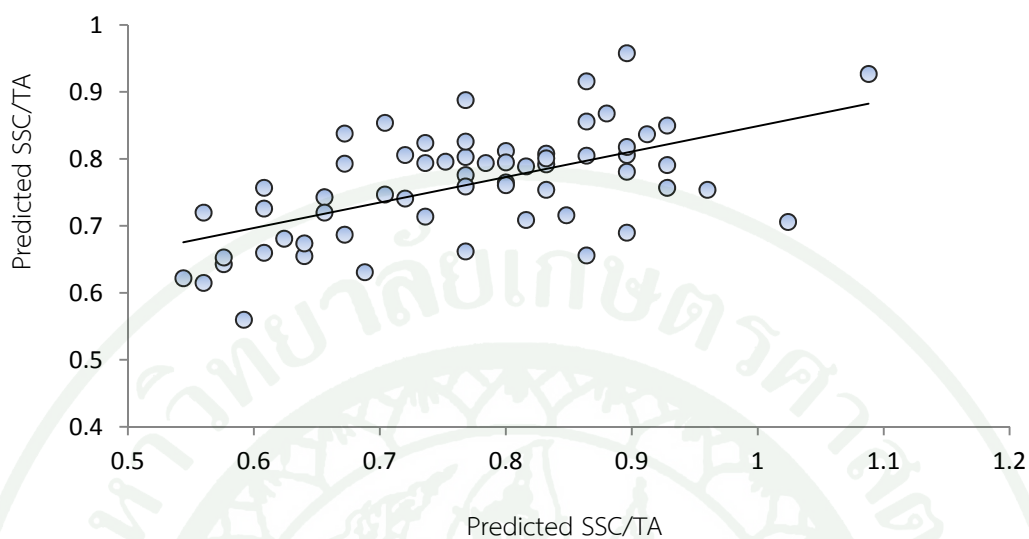
เมื่อพิจารณาในส่วนของสมการที่ใช้สเปกตรัมทั้งหมดในการทำนายค่า SSC ได้ค่าดังตารางที่ 34 ซึ่งค่าที่ได้นั้นต่ำกว่าการใช้แบบเฉลี่ยสเปกตรัมเล็กน้อย โดยใช้การ Preprocessing แบบ SNV ร่วมกับ D^1 ให้ค่า $r = 0.791$, $RMSEP = 0.566$ °Brix และ PLS factor เท่ากับ 11 แสดงกราฟ Scatter plot ในภาพที่ 36 และ สมการทำนายค่า TA ให้ค่าในการทำนายดีที่สุดคือ ให้ค่า $r = 0.733$, $RMSEP = 0.098$ % และ PLS factor เท่ากับ 11 Preprocessing แบบ D^2 และแสดงกราฟ Scatter plot ในภาพที่ 37

ตารางที่ 33 ตารางแสดงผลที่ได้จากการสร้างสมการ PLSR ในการทำนายค่า SSC และ TA โดยเปรียบเทียบการทำ Pre-processing ของสเปกตรัมเฉลี่ย

Pre-processing	SSC			TA		
	PLS factor	r	RMSEP (°Brix)	PLS factor	r	RMSEP (%)
Averaged spectrum	14	0.825	0.534	12	0.594	0.110
SNV	13	0.841	0.508	4	0.582	0.111
MSC	12	0.838	0.513	9	0.693	0.084
D ¹	11	0.804	0.567	9	0.612	0.109
D ²	9	0.780	0.620	7	0.645	0.106
SNV, D ¹	10	0.816	0.546	12	0.569	0.120
SNV, D ²	11	0.806	0.593	7	0.655	0.105
MSC, D ¹	10	0.819	0.542	12	0.569	0.120
MSC, D ²	11	0.807	0.592	7	0.656	0.105



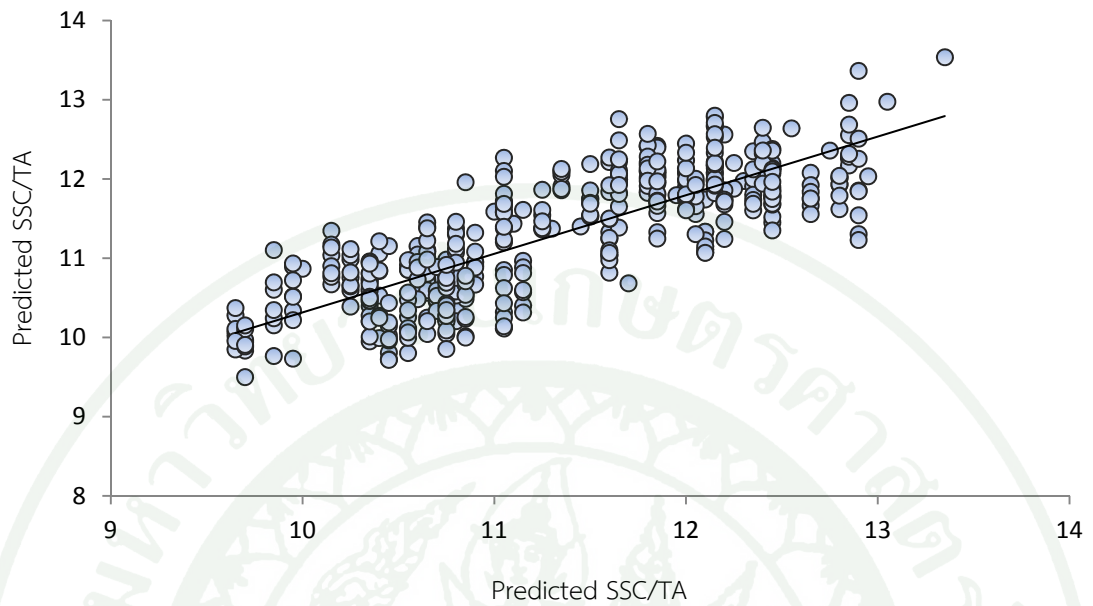
ภาพที่ 34 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSC ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมเฉลี่ย ในการใช้ Pre-processing แบบ SNV



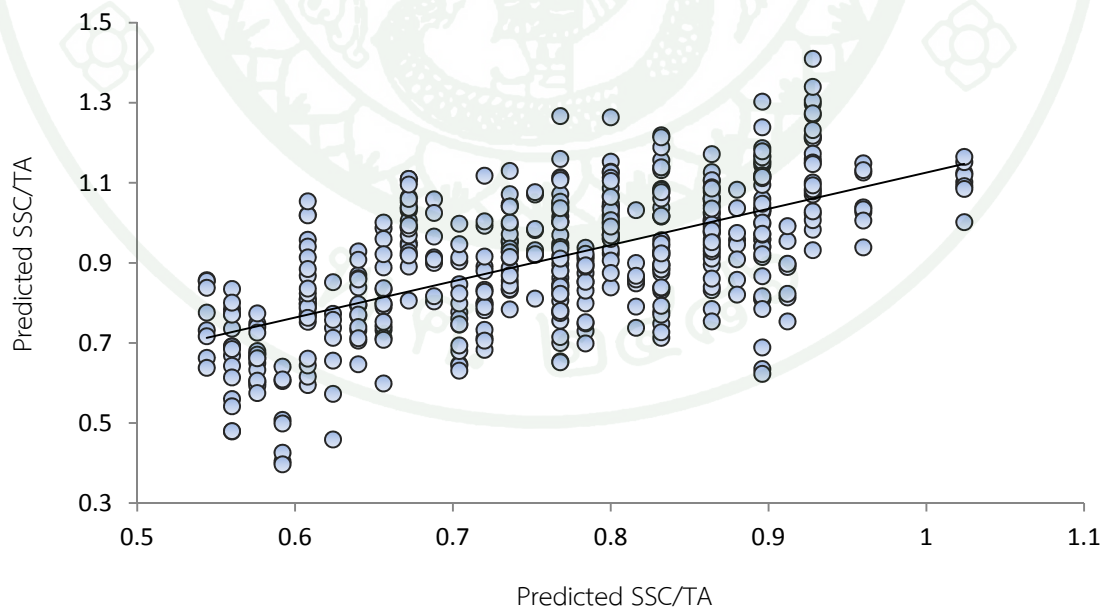
ภาพที่ 35 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TA ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ กับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมเฉลี่ย ในการใช้ Pre-processing แบบ MSC

ตารางที่ 34 ตารางแสดงผลที่ได้จากการสร้างสมการ PLSR ในการทำนายค่า SSC และ TA โดยเปรียบเทียบการทำ Pre-processing ของสเปกตรัมทั้งหมด

Pre-processing	SSC			TA		
	PLS factor	r	RMSEP ($^{\circ}$ Brix)	PLS factor	r	RMSEP (%)
Raw spectrum	14	0.783	0.577	14	0.741	0.097
log(1/T)						
SNV	13	0.792	0.570	15	0.707	0.102
MSC	13	0.796	0.567	16	0.699	0.103
D ¹	11	0.772	0.584	14	0.689	0.106
D ²	11	0.745	0.618	11	0.733	0.098
SNV, D ¹	11	0.791	0.566	13	0.681	0.106
SNV, D ²	12	0.765	0.617	11	0.707	0.102
MSC, D ¹	10	0.773	0.588	14	0.676	0.107
MSC, D ²	12	0.744	0.634	11	0.706	0.102



ภาพที่ 36 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSC ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมทั้งหมด ในการใช้ Pre-processing แบบ SNV กับ D^1



ภาพที่ 37 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TA ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมทั้งหมด ในการใช้ Pre-processing แบบ D^2

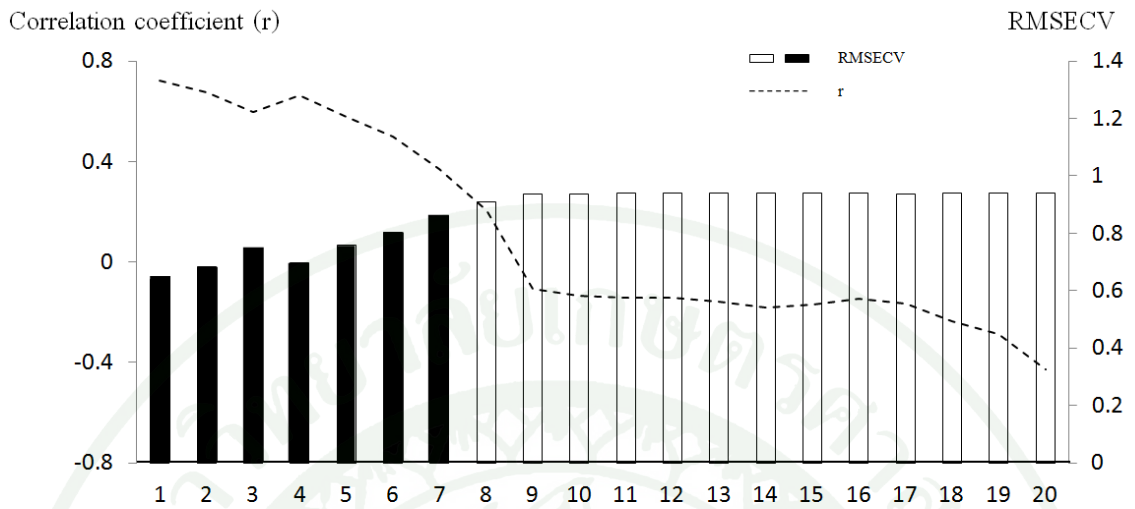
ผลจากการเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี iPLS ในการสร้างสมการ

ในการเลือกช่วงความยาวคลื่นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างสมการ Calibration โดยช่วยลดความยาวคลื่นหรือตัวแปรที่ไม่จำเป็นออกจากสมการ การใช้ iPLS ในการเลือกช่วงความยาวคลื่นนั้นจะทำการแบ่งความยาวคลื่นออกเป็น 20 ช่วงความยาวคลื่นเท่าๆ กัน แล้วนำมาสร้างสมการ PLSR ในทุกช่วงความยาวคลื่น ในการเลือกช่วงความยาวคลื่นไปใช้ในการสร้างสมการจะดูที่ค่า r ที่มีค่าสูง และค่า RMSECV มีค่าต่ำกว่าค่า RMSECV เฉลี่ยของทั้งหมดทุกช่วง (Nørggaard *et al.*, 2000) ซึ่งค่า r และ RMSECV จะเป็นตัวช่วยในการเลือกช่วงความยาวคลื่นในการสร้างสมการ PLSR

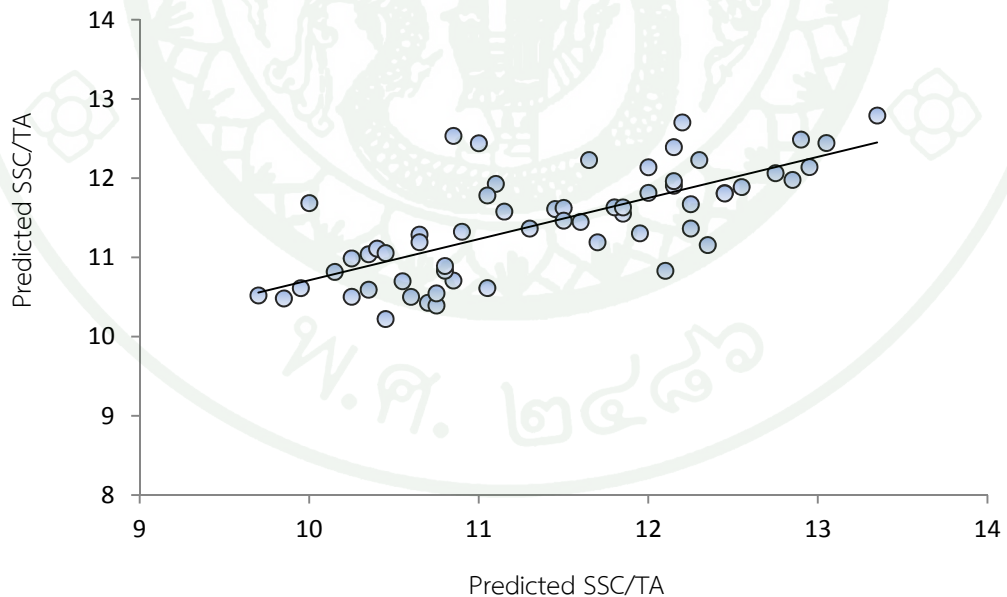
ในการสร้างสมการทำนายค่า SSC โดยการเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี iPLS ในการสร้างสมการมีค่าความแม่นยำน้อยกว่าเดิม แต่ช่วยปรับปรุงสมการในการทำนาย TA ให้ดีขึ้น ช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ในการสร้างสมการทำนาย SSC ดังภาพที่ 38 เป็นภาพที่ได้จากการใช้สเปกตรัมเฉลี่ย โดยกราฟแท่งแสดงถึงค่า RMSECV ที่ได้จากการสร้างสมการ PLS ในแต่ละช่วงความยาวคลื่น และกราฟเส้นประแสดงถึงค่า r ของแต่ละช่วงความยาวคลื่นเช่นกัน จากภาพมีช่วงความยาวคลื่นสามารถนำไปสร้างสมการคือ ช่วงที่ 1 ถึง 7 (540-720nm) เพราะว่ามีค่า RMSECV ต่ำกว่า RMSECV เฉลี่ยของทุกช่วงและมีค่า r สูง ในการสร้างสมการจากทั้ง 7 ช่วงให้ค่าความแม่นยำดังตารางที่ 35 และค่าในการทำนายที่ดีที่สุดมีค่า $r = 0.723$, RMSEP = 0.639 °Brix และ PLS factor เท่ากับ 6 และแสดงกราฟ Scatter plot ในภาพที่ 39 ซึ่งใช้ช่วงความยาวคลื่นที่ 1-2 กับ 4 ในการสร้างสมการแต่ยังมีค่าความแม่นยำน้อยกว่าใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด แต่ใช้ PLS factor จำนวนน้อยกว่า

ตารางที่ 35 ตารางแสดงผลที่ได้จากการสร้างสมการ PLSR ในการทำนายค่า SSC โดยการเลือกช่วงความยาวคลื่นแบบ iPLS ของสเปกตรัมเฉลี่ย

Intervals	PLS factor	Wavelength bands (nm)	r	RMSEP (%)
1	4	540-556	0.722	0.640
4	10	619-644	0.665	0.698
1-2	3	540-572	0.650	0.706
1, 4	5	540-556, 619-644	0.708	0.653
1-2, 4	6	540-572, 619-644	0.723	0.639
1-7	6	540-720	0.681	0.679
1-20	14	540-1021	0.825	0.534



ภาพที่ 38 กราฟแสดงผลการเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี iPLS ของสเปกตรัมเฉลี่ยของการทำนายค่า SSC โดยกราฟแท่งแสดงค่า Root mean square error of cross validation (RMSECV) และ กราฟเส้นประแสดงค่า Correlation coefficient (r)

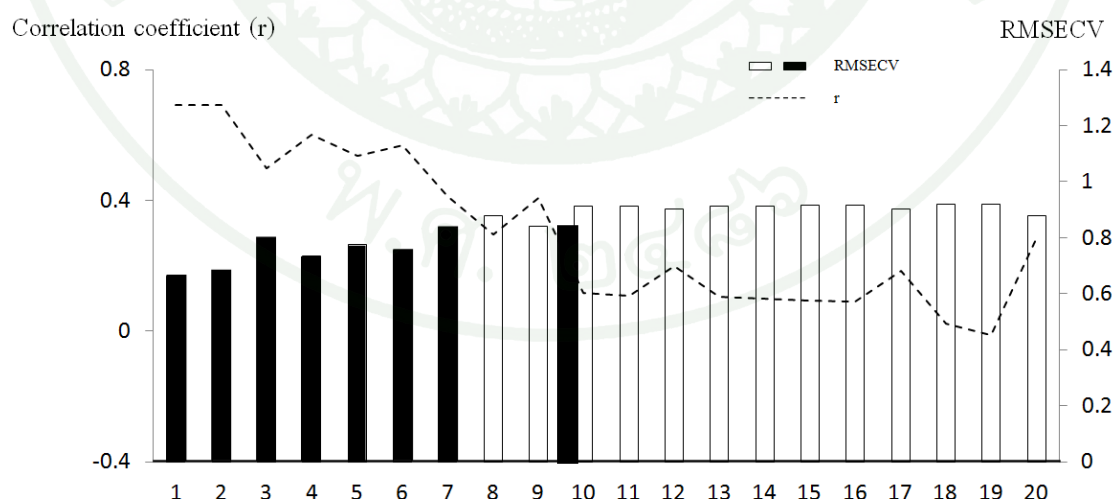


ภาพที่ 39 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSC ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมเฉลี่ย ในการสร้างสมการทำนายค่าด้วยวิธี iPLS

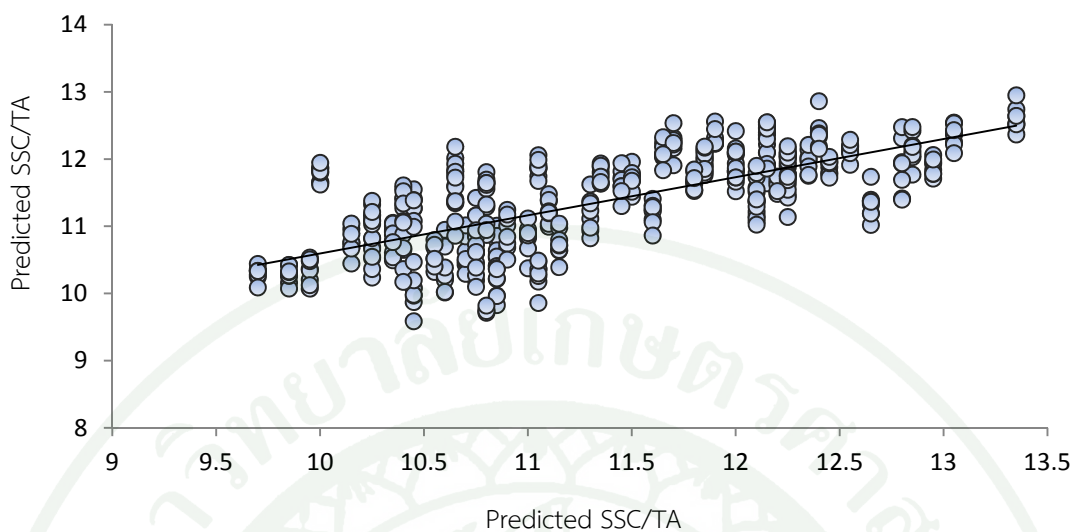
การใช้สเปกตรัมทั้งหมดในการเลือกช่วงความยาวคลื่นแบบ iPLS มีช่วงความยาวคลื่นที่สามารถนำไปสร้างสมการคือ ช่วงที่ 1-7 และ 9 (ภาพที่ 40) ช่วงความยาวคลื่นส่วนใหญ่จะเหมือนกับในกลุ่มสเปกตรัมเฉลี่ย (540-720 และ 734-760nm) และค่าในการทำนายที่ดีที่สุดเป็นการใช้ช่วงความยาวคลื่นจาก iPLS ได้ค่า $r = 0.727$, $RMSEP = 0.629$ °Brix และ PLS factor เท่ากับ 10 และแสดงกราฟ scatter plot ในภาพที่ 41 โดยใช้ช่วงความยาวคลื่นที่ 1-2, 4, 6 แต่ยังมีค่าความแม่นยำน้อยกว่าใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด แต่ใช้ PLS factor จำนวนน้อยกว่าดังแสดงในตารางที่ 36

ตารางที่ 36 ตารางแสดงผลที่ได้จากการสร้างสมการ PLSR ในการทำนายค่า SSC โดยการเลือกช่วงความยาวคลื่นแบบ iPLS ของสเปกตรัมทั้งหมด

Intervals	PLS factor	Wavelength bands (nm)	r	RMSEP (%)
1-2	7	540-572	0.695	0.658
1-2, 4, 6	10	540-572, 619-644, 671-686	0.727	0.629
1-2, 4, 6, 9	10	540-572, 619-644, 671-686, 734-760	0.726	0.632
1-7	7	540-720	0.703	0.651
1-7, 9	10	540-720, 734-760	0.706	0.651
1-20	14	540-1021	0.783	0.577



ภาพที่ 40 กราฟแสดงผลการเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี iPLS ของสเปกตรัมทั้งหมดของการทำนายค่า SSC โดยกราฟแท่งแสดงค่า Root mean square error of cross validation (RMSECV) และ กราฟเส้นประแสดงค่า Correlation coefficient (r)

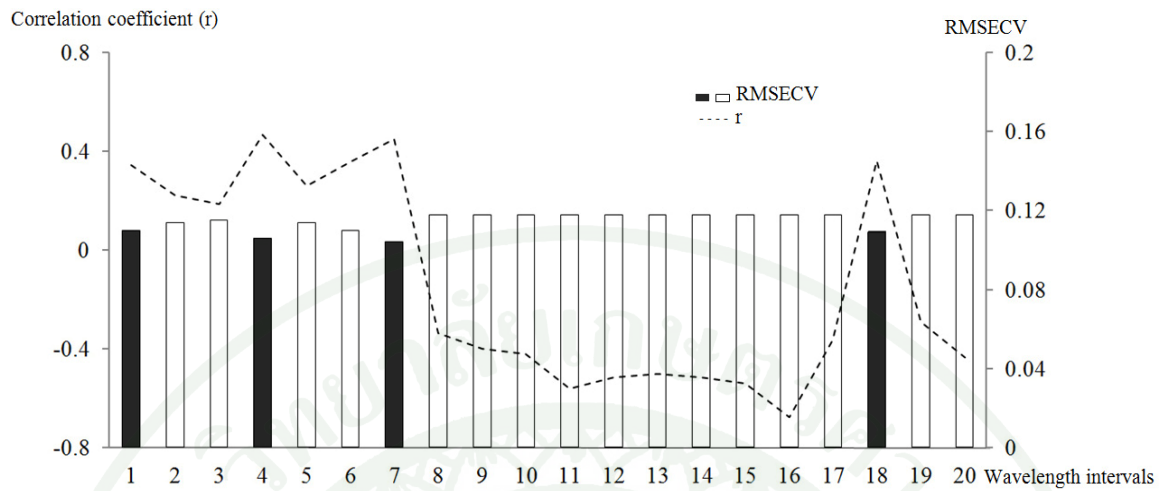


ภาพที่ 41 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SSC ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ กับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมทั้งหมด ในการสร้างสมการทำนายค่าด้วยวิธี iPLS

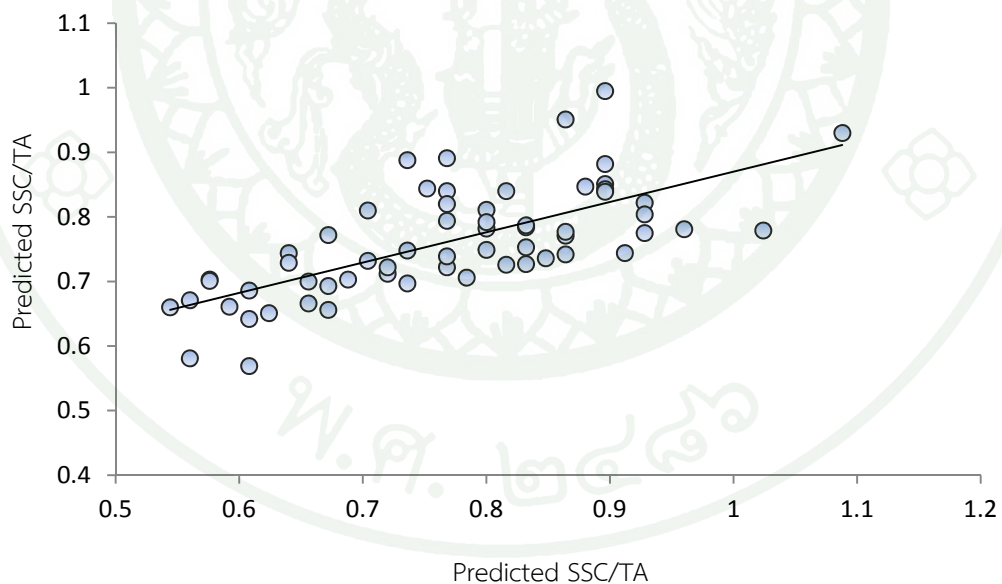
ในการสร้างสมการทำนายค่า TA ช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ในการสร้างสมการทำนาย TA ดังภาพที่ 42 เป็นภาพที่ได้จากการใช้สเปกตรัมเฉลี่ย จากภาพมีช่วงความยาวคลื่นสามารถนำไปสร้างสมการคือ ช่วงที่ 1, 4, 7 และ 18 (540-556, 619-644, 696-720, และ 958-979 nm) ในการสร้างสมการจากทั้ง 4 ช่วงไปสร้างสมการให้ค่าความแม่นยำดังตารางที่ 37 และค่าในการทำนายดีที่สุดมีค่า $r = 0.744$, RMSEP = 0.093 % และ PLS factor เท่ากับ 11 และแสดงกราฟ Scatter plot ในภาพที่ 43 ซึ่งใช้ทั้ง 4 ช่วงรวมกันในการสร้างสมการ

ตารางที่ 37 ตารางแสดงผลที่ได้จากการสร้างสมการ PLSR ในการทำนายค่า TA โดยการเลือกช่วงความยาวคลื่นแบบ iPLS ของสเปกตรัมเฉลี่ย

Intervals	PLS factor	Wavelength bands (nm)	r	RMSEP (%)
1	5	540-556	0.604	0.112
4	13	619-644	0.394	0.132
7	4	696-720	0.321	0.132
18	5	958-979	0.358	0.128
1, 4, 7	12	540-556, 619-644, 696-720	0.651	0.107
1, 4, 7, 18	11	540-556, 619-644, 696-720, 958-979	0.744	0.093
1-20	12	540-1021	0.594	0.110



ภาพที่ 42 กราฟแสดงผลการเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี iPLS ของสเปกตรัมเฉลี่ยของการทำนาค่า TA โดยกราฟแท่งแสดงค่า Root mean square error of cross validation (RMSECV) และ กราฟเส้นประแสดงค่า Correlation coefficient (r)



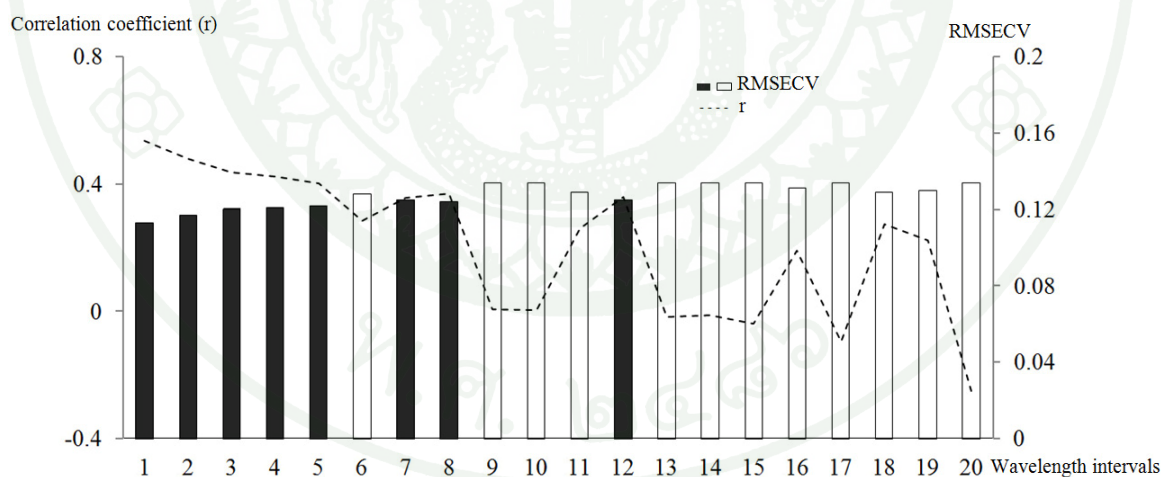
ภาพที่ 43 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TA ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการกับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมเฉลี่ย ในการสร้างสมการทำนายค่าด้วยวิธี iPLS

การใช้สเปกตรัมทั้งหมดในการเลือกช่วงความยาวคลื่นแบบ iPLS มีช่วงความยาวคลื่นสามารถนำไปสร้างสมการคือ ช่วงที่ 1-5, 7-8, และ 12 (ภาพที่ 44) ช่วงความยาวคลื่นส่วนใหญ่จะ

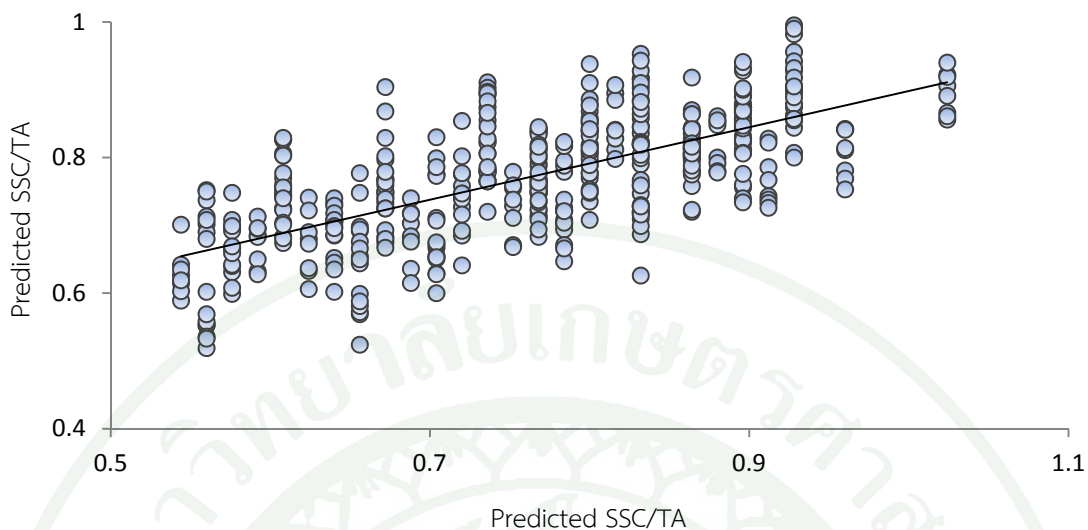
คล้ายกับในกลุ่มสเปกตรัมเฉลี่ย (540-556, 619-644, and 696-720) และค่าในการทำนายดีที่สุดสุด เป็นการใช้ช่วงความยาวคลื่นจาก iPLS ทั้งหมดรวมกันได้ค่า $r = 0.725$, RMSEP = 0.100 % และ PLS factor เท่ากับ 18 (ตารางที่ 38) และแสดงกราฟ Scatter plot ในภาพที่ 45

ตารางที่ 38 ตารางแสดงผลที่ได้จากการสร้างสมการ PLSR ในการทำนายค่า TA โดยการเลือกช่วง ความยาวคลื่นแบบ iPLS ของสเปกตรัมทั้งหมด

Intervals	PLS factor	Wavelength bands (nm)	r	RMSEP (%)
1	9	540-556	0.622	0.114
1- 5	18	540-670	0.677	0.106
1- 5, 7- 8	16	540-670, 696-746	0.701	0.103
1- 5, 7- 8, 12	18	540-670, 696-746, 819-842	0.725	0.100
1-20	14	540-1021	0.741	0.097



ภาพที่ 44 กราฟแสดงผลการเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี iPLS ของสเปกตรัมทั้งหมดของการทำนายค่า TA โดยกราฟแท่งแสดงค่า Root mean square error of cross validation (RMSECV) และ กราฟเส้นประแสดงค่า Correlation coefficient (r)



ภาพที่ 45 กราฟ Scatter plot แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TA ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ กับค่าวัดได้จริงจากการใช้สเปกตรัมทั้งหมด ในการสร้างสมการทำนายค่าด้วยวิธี iPLS

ในการสร้างสมการทำนายค่า SSC จากการเลือกช่วงความยาวคลื่นแบบ iPLS ไม่สามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำของสมการทำนายค่าได้แต่ช่วยลดจำนวน PLS Factor ในการสร้างสมการลง ในส่วนของการสร้างสมการทำนายค่า TA ค่าที่ดีที่สุดจากการเลือกช่วงความยาวคลื่นแบบ iPLS จะเป็นแบบใช้สเปกตรัมเฉลี่ยแต่ก็มีค่าใกล้เคียงกับสมการที่สร้างจากกลุ่มที่ใช้สเปกตรัมทั้งหมด ซึ่งกระบวนการ iPLS นั้นช่วยในการเลือกช่วงความยาวคลื่น และ ความยาวคลื่นที่ได้ก็จะมีความสัมพันธ์กับค่าทางเคมีของตัวอย่าง ที่ช่วงความยาวคลื่น 958-979 nm แสดงถึงการดูดกลืนน้ำและคาร์บอนไฮเดรตซึ่งที่เกี่ยวข้องกับสถานะการสั่นขององค์ประกอบกลุ่ม OH ของน้ำ ช่วงความยาวคลื่น 619-644 และ 696-720 nm เป็นช่วงคลื่นที่เกี่ยวข้องกับค่า 680 nm ซึ่งแสดงถึงการดูดกลืนแสงของ Chlorophyll (Liu *et al.*, 2010) และช่วงความยาวคลื่น 540-556 nm แสดงการดูดกลืนของสีรงควัตถุของตัวอย่างช่วงความยาวคลื่น 819 - 842 nm แสดงถึงการดูดกลืนของน้ำในกลุ่ม OH ฟังก์ชัน (781, 821, 913 and 982 nm; Wang *et al.*, 2011)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ความบริสุทธิ์ของส้มโอพันธุ์ขาวทองดีสามารถทำนายได้ด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติแบบหลายตัวแปรโดยอาศัยตัวแปรทางกายภาพ และเคมี ในการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Discriminant analysis ซึ่งการใช้ตัวแปรทั้งหมด (A/t, F/D, SG, f_1 , f_2 , f_3 , H/W, TPT, MPT, BPT และ SSC/TA) ให้ความถูกต้องของการจำแนกช่วงความบริสุทธิ์อยู่ที่ 85.0 เปอร์เซ็นต์ และใช้ตัวแปรแบบไม่ทำลาย (f_1 , f_2 , f_3 , SG, H/W และ A/t) มีความถูกต้องของการจำแนกช่วงความบริสุทธิ์อยู่ที่ 80.0%

ตัวแปร f_3 , SSC/TA และ f_2 เป็นตัวแปรที่เหมาะสมและมีนัยสำคัญมากที่สุดในการในจำแนกความบริสุทธิ์ ซึ่งตัวแปร f_3 เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญที่สุดในการคัดแยกช่วงความบริสุทธิ์ของส้มโอแบบไม่ทำลายตัวอย่าง และ ตัวแปร SSC/TA เป็นตัวแปรทางเคมีที่มีนัยสำคัญที่สุดในการคัดแยกช่วงความบริสุทธิ์ของส้มโอแบบทำลายตัวอย่าง

ในการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อการกระแทกเชิงกลและการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองการกดอัดเชิงกลของเปลือกส้มโอพบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทดสอบเป็นตำแหน่ง 1-8 (ด้านข้างผล และ ด้านข้างห่างจากก้นผลขึ้นมา 1/6 ความสูง) และในการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อแรงด้วยความถี่ธรรมชาติของส้มโอพบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการทดสอบเป็นตำแหน่งการเคาะด้านข้างผล

ตัวแปร SSC/TA ถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนของความบริสุทธิ์เพราะค่า F-test มีค่าสูงในแต่ละช่วงความบริสุทธิ์ และ SSC/TA ถูกทำนายด้วยสมการ Partial least squares regression โดยใช้ตัวแปรทั้งหมด (A/t, F/D, SG, f_1 , f_2 , f_3 , H/W, TPT, MPT, BPT และ SSC/TA) มีค่าในการทำนายมีความแม่นยำสูง โดยมีค่า r เท่ากับ 0.814, SEP เท่ากับ 2.527 °Brix/% และ bias เท่ากับ -0.209 ส่วนสมการของตัวแปรแบบไม่ทำลายสามารถทำนาย SSC/TA มีแม่นยำค่อนข้างใกล้เคียงกันกับใช้ทั้งตัวแปรทั้งหมด และคุณสมบัติเกี่ยวกับเสียง f_3 เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญสูงที่สุดในการสร้างสมการทั้งสองสมการ

เทคนิค Vis/NIR spectroscopy ในการทำนายค่าทางเคมีของส้มโอตัดแต่งสดพร้อมบริโภคน้ำส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งโดยการวัดแบบส่งผ่านตัวอย่าง ซึ่งสามารถทำนายค่า SSC ได้ดีกว่าการค่า TA ($r=0.825$ RMSEP=0.543 °Brix, $r=0.741$ RMSEP=0.097%) เทคนิคการปรับแต่งแบบ SNV ก่อน

การประมวลผลและตัวอย่างสเปกตรัมเฉลี่ยมีเหมาะสมสำหรับการทำนายของ SSC ในกรณีของค่า TA ใช้สเปกตรัมทั้งหมดในการทำนายให้ความแม่นยำกว่าแบบสเปกตรัมเฉลี่ย การเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี iPLS ช่วยในการทำนายค่า TA ให้ดีขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามทั้งสองสมการที่ได้ยังไม่มี ความแม่นยำที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริง



ข้อเสนอแนะ

การทดสอบหาความบริสุทธิ์ของส้มโอควรมีการเพิ่มตัวแปรที่ไม่ทำลายแบบอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น ขนาดต่อมน้ำมัน พื้นที่ผิวของต่อมน้ำมัน ความหนาแน่นของต่อมน้ำมัน สีผิวของส้มโอ หรือ ความมันวาวของเปลือกส้มโอ เพื่อให้สมการมีความแม่นยำมากขึ้น

เนื่องจากการทดลองหาคุณภาพภายในส้มโอตัดแต่งสดพร้อมบริโภค ผิวของกลีบส้มโอมีลักษณะที่ไม่เรียบเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งมีผลกระทบต่อสเปกตรัมที่ได้ จึงต้องมีการปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติม ในส่วนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำลอง และหาวิธีการลดผลกระทบจากการกระเจิงของแสงเนื่องจาก พื้นผิวที่ขรุขระของชั้นส้มโอ ด้วยวิธี Pre-processing รวมถึงการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับ ค่าทางเคมีที่สนใจแบบอื่นๆ ที่ช่วยลดอิทธิพลดังกล่าวได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรกฎ วัฒนวิเชียร และ เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ. 2543. การวัดความแก่ของผลส้มโอ. รายงานการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมฉบับสมบูรณ์. ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, กรุงเทพฯ. 59 น.
- กฤษฏา อรุณยะเดช. 2548. การพัฒนาโปรแกรมเพื่อคัดแยกต่อมน้ำมันจากผิวผลส้มโอแบบอัตโนมัติด้วยเทคนิคซีดีเริ่มแบ่งแบบปรับค่าได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- กระทรวงพาณิชย์. 2555. สถิติการนำเข้า-ส่งออกสินค้า. แหล่งที่มา: <http://www2.ops3.moc.go.th/>, 2 กรกฎาคม 2555.
- จรัสแท้ ศิริพานิช. 2542. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 396 น.
- ชูศักดิ์ ขวประดิษฐ์. 2543. รายงานการวิจัยการตรวจสอบความสุก-แก่ของผลทุเรียนโดยใช้คลื่นเสียง. ใน รายงานการวิจัยโครงการวิจัยเพื่อพัฒนาการผลิตและการตลาดทุเรียนเพื่อการส่งออก. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.
- ณัฐฤติ เนียมสอน. 2546. การหาดัชนีความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยใช้ความถี่ธรรมชาติและความแข็งแรงก้าน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ธวัช บุญยทวี. 2533. ส้มโอเพื่อการส่งออก. ชมรมไม้ผลแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- นพดล อรุณยะเดช. 2545. การวิเคราะห์ความแก่ของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- นิพนธ์ ตังคนานุรักษ์. 2545. หลักพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้สเปกโตรสโกปี, น. 39-61. ใน การอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. 27-28 พฤศจิกายน 2545. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นิรนาม. 2529. การเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม. ฝ่ายวิชาการ ธนาคารกสิกรไทย สรุปข่าวธุรกิจ, 17(3) : 1-16
- นิรนาม. 2530. โครงการศึกษาการใช้วิชาการที่เหมาะสมสำหรับผักและผลไม้สดเพื่อการส่งออกเสนอต่อกรมพาณิชย์สัมพันธ์. 240 น.
- เบญจมาศ รัตนชินกร. 2549. การคัดคุณภาพผลไม้เมืองร้อนเพื่อการส่งออก. สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร. กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.
- มงคล หลิม. 2536. การผลิตส้ม. ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา. 108 น.
- เยาวรัตน์ วงศ์ศรีสกุลแก้ว. 2545. การเติบโตและพัฒนาการของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งและลักษณะสำคัญของผลพันธุ์อื่นๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วิชัย รวีตระกูล, โกศลย์ คูสำราญ, พิเชษฐ วิริยะจิตรา, สุรัชย์ นิมจิรวัดน์ และ อภิชาติ สุขสำราญ. 2527. การประยุกต์สเปกโตรสโกปีในเคมีอินทรีย์, กรุงเทพฯ. 298 น.
- วิเศษ อัครวิทยากุล. 2540. การปลูกส้มโอ. โครงการหนังสือเกษตรชุมชน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 112 น.

- ศุมาพร เกษมสำราญ. 2545. ขั้นตอนการสร้างสมการประเมินค่าทางเคมีและทดสอบสมการ ในเทคนิคสเปกโตรสโคปีย่านใกล้อินฟราเรด, น. 131-151. ใน การอบรมเชิงปฏิบัติการ การควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการ แข่งขันในเวทีการค้าโลก. 27-28 พฤศจิกายน 2545. สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลผลิต ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สิรินาฏ พรศิริประทาน. 2555. การส่งออกผักและผลไม้สดไทยไปสหภาพยุโรป. ส่วนงานส่งเสริม สารสนเทศและเผยแพร่วิชาการ. สถาบันระหว่างประเทศเพื่อการค้าและการพัฒนา, กรุงเทพฯ.
- สุรนนต์ สุภัทรพันธุ์, สมศักดิ์ วั่งโน และ สายชล เกตุษา. 2531. การผลิตและการใช้อาหาร. พิมพ์ ครั้งที่ 5 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช, กรุงเทพฯ. 614 น.
- อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. 2545. การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์, น. 67-98. ใน การ อบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. 27-28 พฤศจิกายน 2545. สถาบัน คั้นคว่ำและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อุดมศักดิ์ กิจทวี. 2547. การรับรู้ความแน่นเนื้อของผลมะม่วงภายใต้การกระทำกระแทก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- A.O.A.C. 1990. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analysis Chemistry. 15th ed. The Association of Official Analysis Chemists. Arlington, Virginia.
- Abbott, J.A., Bachman, G.S., Childers, N.F., Fitzgerald J.V., and Matusik, F.J. 1968. Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables. **Food Technology**. 22: 101-112.

- Baldwin, E.A. 1996. Citrus fruit, pp. 122-123. *In* Seymour G, Taylor J, Tucker G.A., eds. **The biochemistry of fruit ripening**. Chapman and Hall, London.
- Boysworth, M.K. and Booksh, K.S. 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
- Chen, H. and De Baerdemaeker, J. 1993. Modal analysis of the dynamic behavior of pineapples and its relation to fruit firmness. **Transactions of the ASAE** 36: 1439–1444.
- Chen, P. 2001. Application of elastic theory to high-speed impact sensing of fruits, pp 21-26. *In* **Proceeding of the IFAC/CIGR Workshop on Control Applications in Post-harvest and Processing Technology**. 3-5 October 2001. Tokyo, Japan.
- _____, Chen, S. and Tang, S. 1985. Instrument for testing the response of fruits to impact. **ASAE Paper** 85-3537.
- _____, Ruiz-Altisent, M. and Barreiro, P. 1996. Effects of impaction mass on firmness sensing of fruits. **Transactions of the ASAE**. 39(3): 1019-1023.
- _____, Sun, Z. and Huang, L. 1992. Factors Affecting Acoustic Responses of Apples. **Transactions of the ASAE** 35(6): 1915-1920.
- De Ketelaere, B., Ruiz-Altisent, M., Correa, E. C., De Baerdemaeker, J., and Barreiro, P. 2001. Reliability of vibration Measurements and Impact Response Characteristics for the Quality Assessment of Tomatoes, pp. 487–492. *In* **Paper presented at 6th international symposium on fruit, nut and vegetable production engineering**. Potsdam, Germany.

- Delwiche, M.J. 1987. Theory of fruit firmness fortng by impact forces. **Transactions of the ASAE**. 30(4): 1160-1166.
- _____, McDonald, T. and Bowers, S.V. 1987. Determination of Peach Firmness by Analysis of Impact Forces. **Transactions of the ASAE**. 30(1): 249-254.
- _____, Shaoqi, T. and Mehlschau, J.J. 1989. An impact force response fruit firmness sorter. **Transactions of the ASAE**. 32(1): 321-326.
- Diezma-Iglesias, B., Valero, C., Garcia-Ramos, F.J. and Ruiz-Altisent, M. 2006. Monitoring of firmness evolution of peaches during storage by combining acoustic and impact methods. **Journal of Food Engineering**. 77(4): 926-935.
- Finney, E.E. Jr. 1969. Defining and measuring attributes of texture in fruits and vegetables. **Agricultural Engineering**. 50(8): 462-465.
- Fu, X.P., Ying, Y.B., Lu, H.S. and Xu, H.R. 2007. Comparison of diffuse reflectance and transmission mode of visible-near infrared spectroscopy for detecting brown heart of pear. **Journal of Food Engineering**. 83: 317-323.
- Galili, N., Shmulevich, I. and Benichou, N. 1998. Acoustic Testing of Avocado For Fruit Ripeness Evaluation. **Transaction of the ASAE** 41(2): 399-407.
- Gómez, A. H., He, Y., and Pereira, A. G. 2006. Non-destructive measurement of acidity, soluble solids and firmness of Satsuma mandarin using Vis/NIR spectroscopy techniques. **Journal of Food Engineering**. 77: 313-319.
- _____, Wang, J. and Pereira, A.G. 2005. Impulse response of pear fruit and its relation to Magness-Taylor firmness during storage. **Postharvest Biology and Technology**. 35(2): 209-215.

- 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.
- Jarimopas, B. and Kitthawee, U. 2007. Firmness Properties of Mangoes. **International Journal of Food Properties**. 10(4): 899 – 909.
- 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.
- Kavdir, I., Lu, R., Ariana, D. and Ngouajio, M. 2007. Visible and near-infrared spectroscopy for nondestructive quality assessment of pickling cucumbers. **Postharvest Biology and Technology**. 44(2): 165-174.
- Kawano, S., Iwamoto, M. and Abe, H. 1995. Development of a calibration equation with temperature compensation for determining the Brix value in intact peaches. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 3: 211-218.
- _____, _____ and Watanabe, H. 1992. Determination of Sugar Content in Intact Peaches by Near Infrared Spectroscopy with Fiber Optics in Interactance Mode. **Journal of the Japanese Society for Horticultural Science**. 61(2): 445-451.
- Keutgen, A. and Pawelzik, E. 2007. Modifications of taste-relevant compounds in strawberry fruit under NaCl salinity. **Food Chemistry**. 105(4): 1487–1494.
- Kleinbaum, D.G., Kupper, L.L., Muller, K.E. and Nizam, A. 1998. *In Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods*, 3rd Ed., p. 241, Duxbury Press, Pacific Grove, CA.

- Liu, Y.D., Sun, X.D., Zhang, H.L. and Aiguo, O.Y. 2010. Nondestructive measurement of internal quality of Nanfeng mandarin fruit by charge coupled device near infrared spectroscopy. **Computers and Electronics in Agriculture**. 71: S10–S14.
- Lu, R. and Abbott, J. A. 1997. Finite Element Modeling of Transient Modeling of Transient Responses of Apples to Impulse Excitation. **Transactions of the ASAE**. 40(5): 1395-1406.
- McGlone, V.A., Joran, R.B. and Schaare, P.N. 1997. Mass and drop-height influence on kiwifruit firmness by impact force. **Transactions of the ASAE**. 40(5): 1421-1428.
- Moghimi, A., Aghkhani, M.H., Sazgarnia, A., and Sarmad, M. 2010. Vis/NIR spectroscopy and chemometrics for the prediction of soluble solids content and acidity (pH) of kiwifruit. **Biosystems Engineering**. 106: 295-302.
- Mohsenin, N.N. 1986. Physical Properties of Plant and Animal Materials. **Gordon and Breach Science Publishers**, New York.
- Mutsuo, I. and Sumio, K. 1979. Spectrophotometric measuring method for surface color of uneven colored tomatoes. **Nippon Shokuhin Kogyo Gakkashi**. 26: 4.
- Nicolaï, B.M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K.I. and Lammertyn, J. 2007. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. **Postharvest Biology and Technology**. 46: 99-118.
- Nourain J., Ying, Y.B., Wand J.P., Rao, X.Q. and Yu, C.G. 2005. Firmness evaluation of melon using its vibration characteristic and finite element analysis. **Journal of Zhejiang University “Science”**. 6B(6): 483-490.

- Nørgaard, L., Saudland, A., Wagner, J., Nielsen, Jp., Munck, L. And Engelsen, S.B. 2000. Interval partial least-squares regression (iPLS): A comparative chemometric study with an example from near-infrared spectroscopy. **Applied Spectroscopy**. 54: 413-419.
- Osborne, B.G., T. Fearn. and P.H. Hindle. 1993. Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis. **Longman Science & Technology**: 227.
- Peleg, K. 1985. **Produce Handling, Packaging and Distribution**. The AVI Publishing Company Inc., Westport Connecticut.
- Reyes, M.U., Paull, R.E. Williamson, M.R. and Gautz, L.D. 1996. Ripeness determination of solo' papaya (*Carica papaya* L.) by impact force. **Applied Engineering in Agriculture**. 12(6): 703-708.
- Ruiz-Altisent, M., Jaren, C. and Correa, P. 1993. Fruit quality sensing : Post-harvest ripeness. Paper No. 935-25. *In Proceeding of the 4th International symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering*. Valencia-Zaragoza, Spain.
- Shao, Y., He, Y., Gómez, A.H., Pereir, A.G., Qiu, Z., And Zhanga, Y. 2007. Visible/near infrared spectrometric technique for nondestructive assessment of tomato 'Heatwave' (*Lycopersicum esculentum*) quality characteristics. **Journal of food engineering**. 81: 672-678.
- Shmulevich, I. 1998. A review firmness quality measurements in fruits and vegetables. *Sensoral* 98, pp. 291–322. *In Paper presented at international workshop on sensing quality of agricultural products*, Montpellier, France.

- Sohn, M.R., Kwon, Y.K. and Cho, R.K. 2001. Development of robust calibration for determination sweetness of Fuji apple fruit using near infrared reflectance spectroscopy. **Near Infrared Analysis** 2(1): 55-58.
- Sohn, M.R., Park, W.C. and Cho, R.K. 2000. Near infrared spectroscopy for non-invasive measuring of internal quality of apple fruit. **Near Infrared Analysis** 1(1): 27-30.
- Sugiyama, J., Otake, K., Hayashi, S. and Usui S. 1994. Firmness Measurement of Muskmelon By Acoustic Impulse Transmission. **Transaction of the ASAE** 37(4): 1235-1241
- Sumio, K. S. 2002. Procedure of Calibration and Validation in NIR spectroscopy, pp. 135-137. *In* Thanapase, W., A. Terdwongworakul and T. Suwansichoan., eds. **Control Agricultural Product by Near Infrared Spectroscopy for Competitive in World Market**. Kasetsart Agricultural and Agro-Inrial Product Improvement Instityte, Kasetsart University Bangkok.
- Sun, T., Lin, H.J., Xu, H.R. and Ying, Y.B. 2009. Effect of fruit moving speed on predicting soluble solids content of 'Cuiguan' pear (*Pomaceae pyrifolia* Nakai cv. Cuiguan) using PLS and LS-SVM regression. **Postharvest Biology and Technology**. 51: 86-90.
- Teerachaichayut, S., Kil, K.Y., Terdwongworakul, A., Thanapase, W. and Nakanishi, Y. 2007. Non-destructive prediction of translucent flesh disorder in intact mangosteen by short wavelength near infrared spectroscopy. **Postharvest Biology and Technology**. 43: 202-206.
- Terdwongworakul, A. 1995. **Design of a prototype apple grader employing acoustic resonance sensing**, Ph.D. Thesis, Slisoe College, Cranfield University.

- Wang, J., Nakano, K., and Ohashi, S. 2011. Nondestructive evaluation of jujube quality by visible and near-infrared spectroscopy. **LWT- Food Science and Technology**. 44: 1119-1125.
- Wattanavichean, K. And Aroonyadet, N. 2003. Assessment of fruit maturity in 'Kao Nampheung' pummelo using image processing of oil glands. **Thai Journal of Agricultural Science**. 36(2): 120-140.
- Williams, P. 2001. Implementation of Near-Infrared Technology, pp. 163-165. *In* P. Williams & K.H. Norris., Eds. **Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries, second ed.** St. Paul, MN: The American Association of Cereal Chemists.
- Williams, P. and Norris, K.H. 2001. Variables affecting near infrared spectroscopic analysis, pp. 171-185. *In* P. Williams & K.H. Norris., Eds. **Near infrared Technology in the Agriculture and Food Industries, second ed.** St. Paul, MN: The American Association of Cereal Chemists.
- Xie, L.J., Ying, Y.B. and Ying, T.J. 2009. Rapid determination of ethylene content in tomatoes using visible and short wave near-infrared spectroscopy and wavelength selection. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**. 97: 141-145.
- Zapp, H.R., Ehlert, S.H., Brown, G.K., Armstrong, P.R. and Sober, S.S. 1990. Advanced instrumented sphere (IS) for impact measurements. **Transactions of the ASAE**. 33(3): 995-960.



ภาคผนวก



ตารางผนวกที่ ก1 ค่า Firmness index ($A/t \times 10^9 \text{ mm/s}^3$)

ตัวอย่าง	A/t_1	A/t_2	A/t_3	A/t_4	A/t_5	A/t_6	A/t_7	A/t_8	A/t_9
1	0.613	0.662	0.694	0.587	0.503	0.616	0.673	0.616	0.712
2	0.498	0.484	0.512	0.501	0.536	0.515	0.500	0.530	0.543
3	0.502	0.562	0.488	0.506	0.563	0.515	0.533	0.484	0.445
4	0.521	0.501	0.488	0.502	0.507	0.456	0.479	0.552	0.631
5	0.730	0.548	0.744	0.535	0.456	0.637	0.598	0.744	0.653
6	0.399	0.546	0.572	0.165	0.553	0.578	0.679	0.507	0.518
7	0.671	0.517	0.552	0.586	0.574	0.587	0.610	0.465	0.422
8	0.502	0.433	0.571	0.596	0.488	0.575	0.622	0.607	0.759
9	0.424	0.226	0.435	0.411	0.366	0.348	0.384	0.301	0.268
10	0.417	0.398	0.335	0.281	0.424	0.463	0.454	0.445	0.441
11	0.585	0.732	0.673	0.629	0.486	0.522	0.486	0.494	0.377
12	0.474	0.572	0.521	0.418	0.463	0.417	0.451	0.473	0.415
13	0.848	0.623	0.554	0.585	0.638	0.609	0.603	0.728	0.838
14	0.694	0.600	0.250	0.616	0.649	0.649	0.607	0.668	0.745
15	0.526	0.603	0.609	0.582	0.537	0.473	0.477	0.467	0.566
16	0.663	0.887	0.678	0.503	0.511	0.504	0.486	0.461	0.486
17	0.566	0.627	0.435	0.515	0.735	0.657	0.754	0.685	0.830
18	0.518	0.496	0.528	0.475	0.477	0.590	0.649	0.515	0.650
19	0.602	0.557	0.627	0.540	0.701	0.671	0.617	0.637	1.126
20	0.622	0.415	0.526	0.553	0.447	0.505	0.391	0.398	0.384
21	0.395	0.477	0.451	0.456	0.439	0.518	0.437	0.361	0.518
22	0.660	0.627	0.687	0.735	0.560	0.591	0.558	0.634	0.611
23	0.842	0.666	0.686	0.664	0.885	0.876	0.719	0.833	0.866
24	0.356	0.374	0.328	0.349	0.361	0.387	0.377	0.345	0.415
25	0.305	0.374	0.363	0.404	0.342	0.311	0.337	0.305	0.357
26	0.355	0.348	0.393	0.347	0.461	0.458	0.454	0.432	0.437
27	0.335	0.325	0.507	0.449	0.377	0.509	0.440	0.520	0.460
28	0.570	0.496	0.470	0.466	0.551	0.547	0.516	0.576	0.817

ตารางผนวกที่ ก1(ต่อ)

ตัวอย่าง	A/t ₁	A/t ₂	A/t ₃	A/t ₄	A/t ₅	A/t ₆	A/t ₇	A/t ₈	A/t ₉
29	0.440	0.444	0.580	0.488	0.502	0.428	0.557	0.525	0.532
30	0.561	0.686	0.575	0.528	0.563	0.661	0.589	0.559	0.795
31	0.665	0.749	0.725	0.539	0.669	0.766	0.704	0.612	0.619
32	0.695	0.768	0.642	0.648	0.571	0.682	0.448	0.623	0.804
33	0.582	0.538	0.576	0.570	0.594	0.574	0.647	0.742	0.732
34	0.699	0.653	0.652	0.717	0.634	0.685	0.679	0.699	0.735
35	0.783	0.809	0.805	0.672	0.648	0.781	0.644	0.538	0.625
36	0.615	0.742	0.812	0.629	0.844	0.762	0.842	0.783	1.180
37	0.594	0.657	0.677	0.756	0.645	0.652	0.793	0.705	0.894
38	0.798	0.824	0.691	0.761	0.751	0.640	0.732	0.834	0.911
39	0.718	0.592	0.598	0.812	0.764	0.614	0.604	0.728	0.864
40	0.552	0.604	0.684	0.677	0.644	0.580	0.592	0.573	0.708
41	0.870	0.950	0.806	0.761	0.690	0.850	0.907	0.728	1.117
42	0.735	0.823	0.754	0.721	0.553	0.664	0.598	0.564	1.016
43	0.795	0.917	0.827	0.795	0.725	0.641	0.751	0.641	0.944
44	0.728	0.709	0.694	0.803	0.705	0.677	0.563	0.687	0.785
45	0.669	0.725	0.663	0.786	0.737	0.763	0.697	0.783	0.671
46	0.709	0.761	0.661	0.839	0.655	0.602	0.580	0.543	0.621
47	0.583	0.627	0.581	0.533	0.534	0.541	0.502	0.508	0.506
48	0.658	0.532	0.554	0.640	0.465	0.483	0.488	0.504	0.690
49	0.822	0.857	0.791	0.892	0.958	0.854	0.918	0.839	0.695
50	0.834	0.717	0.654	0.721	0.631	0.723	0.671	0.758	0.765
51	0.515	0.589	0.629	0.638	0.323	0.421	0.507	0.594	0.490
52	0.743	0.790	0.740	0.715	0.705	0.685	0.644	0.627	0.681
53	0.974	1.119	0.834	0.753	0.932	0.859	0.938	0.847	0.794
54	0.669	0.782	0.747	0.654	0.688	0.732	0.721	0.685	0.770
55	0.645	0.674	0.586	0.672	0.623	0.553	0.627	0.606	0.667
56	0.782	0.740	0.598	0.824	0.852	0.934	0.723	0.809	0.859

ตารางผนวกที่ ก1(ต่อ)

ตัวอย่าง	A/t ₁	A/t ₂	A/t ₃	A/t ₄	A/t ₅	A/t ₆	A/t ₇	A/t ₈	A/t ₉
57	0.701	0.756	0.763	0.872	0.737	0.698	0.683	0.753	0.958
58	1.004	1.005	0.771	0.761	0.726	0.758	0.640	0.627	1.037
59	0.552	0.604	0.720	0.587	0.455	0.521	0.628	0.562	0.669
60	0.753	0.701	0.839	0.805	0.564	0.666	0.654	0.635	0.777
61	0.662	0.647	0.750	0.624	0.677	0.624	0.707	0.657	0.684
62	0.759	0.763	0.776	0.839	0.676	0.699	0.632	0.727	0.666
63	0.756	0.645	0.634	0.867	0.528	0.569	0.581	0.603	0.682
64	0.427	0.498	0.506	0.588	0.413	0.525	0.507	0.496	0.696
65	0.540	0.676	0.695	0.588	0.402	0.644	0.479	0.608	0.859
66	0.645	0.617	0.666	0.635	0.618	0.614	0.549	0.508	0.782
67	0.696	0.828	0.661	0.714	0.725	0.768	0.699	0.756	0.720
68	0.748	0.833	0.640	0.711	0.689	0.777	0.643	0.743	0.651
69	0.624	0.743	0.741	0.748	0.563	0.563	0.752	0.696	0.492
70	0.571	0.595	0.610	0.579	0.563	0.661	0.643	0.625	0.732
71	0.646	0.646	0.706	0.740	0.557	0.485	0.567	0.693	0.681
72	0.677	0.757	0.680	0.685	0.604	0.662	0.665	0.605	0.894
73	0.582	0.618	0.562	0.557	0.498	0.544	0.510	0.498	0.697
74	0.787	0.860	0.862	0.639	0.704	0.787	0.764	0.668	0.856
75	0.620	0.627	0.630	0.613	0.562	0.562	0.593	0.553	0.507
76	0.563	0.600	0.609	0.722	0.520	0.620	0.609	0.564	0.686
77	0.663	0.751	0.639	0.590	0.622	0.596	0.568	0.569	0.712
78	0.734	0.611	0.628	0.803	0.607	0.619	0.686	0.856	0.573
79	0.738	0.736	0.627	0.696	0.617	0.571	0.647	0.607	1.263
80	0.639	0.590	0.669	0.633	0.628	0.636	0.626	0.587	0.504
81	0.665	0.625	0.575	0.708	0.601	0.604	0.521	0.583	0.720
82	0.620	0.630	0.577	0.522	0.565	0.622	0.672	0.512	0.760
83	0.562	0.651	0.790	0.792	0.650	0.595	0.723	0.711	0.932
84	0.659	0.654	0.700	0.713	0.591	0.630	0.643	0.680	0.864

ตารางผนวกที่ ก1(ต่อ)

ตัวอย่าง	A/t ₁	A/t ₂	A/t ₃	A/t ₄	A/t ₅	A/t ₆	A/t ₇	A/t ₈	A/t ₉
85	0.554	0.772	0.643	0.552	0.564	0.725	0.640	0.549	0.512
86	0.615	0.645	0.512	0.691	0.639	0.711	0.561	0.584	0.870
87	0.597	0.625	0.545	0.773	0.755	0.684	0.651	0.579	0.569
88	0.852	0.811	0.740	0.644	0.671	0.678	0.724	0.662	0.634
89	0.563	0.589	0.682	0.684	0.491	0.520	0.562	0.593	0.616
90	0.625	0.699	0.740	0.605	0.719	0.594	0.655	0.747	0.958
91	0.859	0.902	0.949	0.905	0.937	0.888	1.072	0.718	0.744
92	0.766	0.813	0.695	0.730	0.791	0.792	0.970	0.900	0.841
93	0.863	0.802	0.747	0.624	0.767	0.621	0.676	0.724	0.637
94	0.640	0.981	0.973	1.051	0.743	0.739	1.008	0.840	0.825
95	0.689	0.787	0.696	0.935	0.837	0.793	0.927	0.882	0.792
96	0.728	0.852	0.758	0.994	0.816	0.837	0.867	0.839	0.807
97	0.825	0.796	0.979	0.739	0.838	0.877	0.978	0.856	0.796
98	0.748	0.620	0.518	0.561	0.658	0.597	0.567	0.606	0.545
99	0.854	0.797	0.672	0.667	0.879	0.715	0.938	0.806	0.700
100	0.662	0.727	0.821	0.741	0.789	0.809	0.732	0.768	0.726
101	0.679	0.795	0.514	0.718	0.784	0.764	0.760	0.666	0.772
102	0.504	0.602	0.506	0.569	0.630	0.861	0.541	0.637	0.483
103	0.643	0.738	0.837	0.760	0.701	0.801	0.861	0.839	0.921
104	0.748	0.661	0.728	0.856	0.852	0.728	0.749	0.775	0.916
105	0.902	0.801	0.610	0.706	0.867	1.059	0.774	0.974	0.727
106	0.718	0.761	0.562	0.751	0.682	0.767	0.597	0.740	0.474
107	0.683	0.645	0.607	0.565	0.835	0.661	0.535	0.797	0.470
108	0.441	0.447	0.565	0.522	0.425	0.383	0.492	0.488	0.650
109	0.503	0.610	0.511	0.516	0.570	0.655	0.616	0.608	0.894
110	1.061	0.885	0.878	0.986	0.964	0.766	0.680	0.774	0.760
111	0.648	0.747	0.689	0.664	0.725	0.836	0.751	0.754	0.691
112	0.565	0.744	0.590	0.638	0.673	0.633	0.655	0.673	0.600

ตารางผนวกที่ ก1(ต่อ)

ตัวอย่าง	A/t ₁	A/t ₂	A/t ₃	A/t ₄	A/t ₅	A/t ₆	A/t ₇	A/t ₈	A/t ₉
113	0.432	0.520	0.513	0.489	0.458	0.438	0.454	0.392	0.632
114	0.621	0.634	0.759	0.657	0.516	0.598	0.590	0.483	0.390
115	0.930	0.667	0.597	0.838	1.084	0.863	0.801	0.864	0.657
116	1.081	0.815	0.968	0.897	0.966	0.981	1.102	0.947	0.836
117	0.744	0.835	0.861	0.848	0.844	0.877	1.025	0.880	0.867
118	0.832	0.841	0.559	0.748	0.849	0.967	0.875	0.839	0.803
119	0.752	0.791	0.861	0.756	0.844	0.743	0.911	0.723	0.666
120	0.706	0.900	0.869	0.719	0.839	0.830	0.713	0.693	1.006

ตารางผนวกที่ ก2 ค่า Firmness (F/D (N/mm))

ตัวอย่าง	F/D ₁	F/D ₂	F/D ₃	F/D ₄	F/D ₅	F/D ₆	F/D ₇	F/D ₈	F/D ₉
1	5.442	6.162	6.567	5.786	5.781	6.161	6.494	5.401	8.271
2	4.919	4.706	5.096	4.991	4.720	4.708	4.623	5.222	7.519
3	6.404	6.202	6.505	6.300	6.396	6.112	5.872	6.320	9.740
4	5.756	6.342	6.640	6.161	5.613	5.113	6.296	5.050	8.453
5	6.816	6.529	7.460	6.748	6.984	6.227	6.249	7.032	10.927
6	5.540	5.677	5.899	5.631	5.039	5.778	5.691	5.105	9.080
7	6.352	6.582	5.749	6.061	7.106	6.687	6.451	6.083	10.947
8	4.084	3.907	5.036	6.018	4.340	4.440	5.489	5.431	11.407
9	4.545	5.000	4.560	3.807	3.178	4.148	3.702	3.951	5.466
10	5.296	5.239	5.628	4.875	4.526	4.943	4.784	4.876	6.722
11	5.493	7.717	4.702	5.035	4.636	4.542	3.666	4.379	8.481
12	6.715	6.468	6.520	5.880	6.015	5.774	6.062	5.119	7.065
13	6.336	6.633	6.046	6.275	6.962	6.341	6.024	4.664	12.249
14	6.773	6.245	6.416	6.740	7.066	7.551	7.468	7.117	10.862
15	5.997	6.233	5.731	5.301	5.476	5.118	5.322	4.838	10.968
16	5.624	7.001	5.534	4.814	4.954	5.071	4.557	4.112	7.204

ตารางผนวกที่ ก2(ต่อ)

ตัวอย่าง	F/D ₁	F/D ₂	F/D ₃	F/D ₄	F/D ₅	F/D ₆	F/D ₇	F/D ₈	F/D ₉
17	6.135	6.287	6.379	6.107	7.068	7.433	7.040	7.131	11.698
18	5.717	5.400	5.540	5.193	5.203	5.229	5.697	5.027	8.143
19	6.540	6.853	6.243	6.250	6.147	7.006	6.844	6.989	13.507
20	6.493	5.996	5.705	5.901	6.508	5.548	5.019	5.807	8.341
21	3.734	4.521	5.252	4.669	4.038	4.593	4.138	3.659	7.336
22	6.392	5.510	6.398	6.142	4.966	5.359	5.673	5.444	10.068
23	7.272	7.623	6.144	6.986	7.619	7.586	5.786	11.203	5.873
24	6.248	5.382	5.631	5.484	4.898	4.939	5.487	4.971	6.903
25	6.463	6.679	7.396	6.467	5.756	5.124	5.708	5.836	7.188
26	4.722	4.710	4.383	4.798	4.368	4.607	4.876	4.627	6.535
27	4.778	5.337	4.975	4.872	5.013	4.929	5.221	5.109	7.959
28	5.507	5.199	5.613	5.418	5.699	5.719	5.090	5.008	8.813
29	4.758	5.419	5.536	5.723	4.941	4.392	4.897	4.924	8.232
30	5.411	5.347	5.909	5.238	5.565	5.839	5.484	5.937	8.601
31	7.453	7.309	6.604	6.587	7.979	7.439	6.405	6.330	12.204
32	8.337	8.939	8.420	8.172	8.230	8.318	8.706	7.833	11.140
33	7.922	7.236	7.011	7.165	7.123	7.317	6.582	6.361	10.138
34	7.314	7.069	6.882	7.968	7.090	6.370	6.622	6.866	11.772
35	8.277	7.875	7.994	7.576	6.440	7.355	6.216	6.149	9.134
36	7.185	7.726	9.100	6.781	7.488	7.369	8.009	7.809	12.406
37	6.641	6.224	7.235	7.654	7.079	6.127	6.408	6.502	10.276
38	8.449	7.644	7.122	7.560	7.355	6.635	5.944	8.266	11.344
39	7.375	6.205	6.511	6.954	7.135	5.844	6.193	6.772	11.390
40	5.837	6.490	7.276	6.789	5.782	5.569	6.147	6.714	8.954
41	8.212	8.801	8.040	7.401	7.081	7.969	9.207	8.562	11.817
42	7.765	7.345	6.671	7.854	6.875	7.116	6.742	6.703	9.907
43	7.369	7.523	8.503	7.289	7.480	6.885	7.600	6.235	11.479
44	7.506	7.381	7.649	7.634	7.252	6.530	6.700	7.054	11.969

ตารางผนวกที่ ก2(ต่อ)

ตัวอย่าง	F/D ₁	F/D ₂	F/D ₃	F/D ₄	F/D ₅	F/D ₆	F/D ₇	F/D ₈	F/D ₉
45	7.763	8.782	8.207	8.274	8.148	8.761	7.658	9.516	11.449
46	8.490	9.095	8.028	8.738	8.200	7.351	7.326	7.324	10.117
47	6.004	6.490	6.089	5.389	5.375	5.078	4.480	5.095	7.622
48	6.779	6.337	6.610	6.810	5.762	4.957	5.374	5.429	10.294
49	8.037	8.493	8.128	7.840	10.151	8.175	8.437	8.521	13.500
50	7.461	6.893	6.200	6.935	6.544	6.190	6.126	6.927	9.634
51	6.528	6.721	6.879	6.522	5.252	5.601	5.470	5.392	8.539
52	7.471	7.488	7.366	7.645	6.451	6.326	5.860	6.210	11.500
53	9.918	10.207	10.281	9.780	10.187	9.891	10.469	9.241	13.349
54	7.427	7.507	6.205	7.078	7.565	7.703	7.315	6.869	10.973
55	7.154	6.032	6.060	6.626	5.892	6.002	5.455	6.187	10.353
56	7.960	8.055	7.762	7.936	7.916	7.993	8.139	8.924	11.044
57	6.730	7.227	6.824	7.286	6.827	6.595	7.382	6.337	12.932
58	9.623	7.714	8.243	8.219	7.965	7.566	7.802	6.764	10.345
59	6.296	6.466	7.198	6.499	5.022	5.271	6.001	5.189	9.593
60	7.074	8.198	7.672	8.200	7.030	7.162	7.031	6.112	10.645
61	7.139	6.764	7.425	6.873	7.352	6.887	8.099	6.307	11.027
62	8.369	7.675	8.035	8.520	7.592	7.434	6.895	7.120	10.601
63	8.261	6.583	7.382	8.949	6.287	6.128	5.894	6.672	11.573
64	7.496	8.026	7.724	8.072	7.001	6.882	6.528	6.628	8.251
65	7.762	9.178	8.441	7.419	6.527	7.503	7.298	6.902	10.337
66	6.977	6.939	6.696	6.547	6.001	6.285	6.205	6.599	10.497
67	6.425	7.809	6.810	7.113	7.711	7.755	9.121	7.666	10.631
68	7.127	7.084	6.998	7.153	7.290	6.840	6.427	6.570	12.784
69	7.856	7.491	7.915	8.633	6.462	6.649	7.155	7.317	8.032
70	6.574	6.908	6.756	7.329	6.871	6.726	6.720	5.983	9.302
71	7.171	7.326	7.770	7.055	6.279	5.879	6.256	6.312	10.031
72	6.774	7.440	7.260	6.970	6.151	6.553	6.404	6.263	11.032

ตารางผนวกที่ ก2(ต่อ)

ตัวอย่าง	F/D ₁	F/D ₂	F/D ₃	F/D ₄	F/D ₅	F/D ₆	F/D ₇	F/D ₈	F/D ₉
73	6.325	6.661	6.164	6.040	5.206	5.499	5.320	5.691	10.204
74	7.680	7.690	7.298	6.464	7.458	6.500	7.446	6.557	10.332
75	6.169	6.426	6.329	5.783	6.223	5.324	6.594	5.917	9.492
76	6.674	6.960	7.564	7.193	6.731	6.365	7.598	6.439	9.849
77	6.514	6.849	5.988	6.005	5.698	5.552	5.946	6.113	9.057
78	6.752	6.214	6.567	7.089	6.000	6.622	6.266	7.318	9.749
79	7.202	7.528	6.478	7.268	6.928	6.558	6.014	5.959	9.347
80	6.330	6.199	6.799	6.836	6.524	5.939	6.174	5.896	9.934
81	7.473	6.575	5.820	6.810	6.571	6.566	5.757	6.739	12.330
82	7.279	7.233	6.438	6.210	6.730	6.675	6.368	6.427	9.620
83	7.259	7.390	8.264	8.044	6.471	6.399	7.339	7.699	11.680
84	6.206	6.204	6.836	7.326	6.227	5.877	6.157	6.370	11.337
85	6.517	7.092	7.248	6.616	6.843	6.864	6.812	6.214	8.930
86	7.866	7.637	7.770	7.760	7.499	7.394	6.654	7.409	11.964
87	6.894	6.218	6.920	6.910	6.635	6.696	5.802	6.777	8.662
88	7.572	7.824	6.976	7.267	7.326	7.411	6.629	6.209	10.816
89	7.142	5.861	6.534	6.440	5.747	6.089	6.160	5.464	11.074
90	7.069	7.021	7.530	6.766	7.369	6.836	7.083	7.323	10.977
91	8.402	7.127	9.213	8.551	8.486	8.238	8.864	9.317	9.912
92	9.030	7.334	8.366	8.106	10.626	9.606	9.472	9.789	11.253
93	7.938	7.426	6.425	7.256	7.763	7.157	7.065	7.475	9.390
94	7.526	8.232	8.389	8.456	7.993	7.665	8.971	8.646	11.377
95	7.797	8.643	8.424	7.764	8.564	8.750	8.861	9.126	9.466
96	8.991	9.110	8.832	9.139	9.306	9.727	9.143	8.709	11.660
97	9.389	9.279	10.351	8.985	9.509	10.128	9.769	9.731	12.942
98	7.047	6.413	6.098	5.544	5.918	5.732	5.585	5.241	8.553
99	9.056	8.995	7.589	8.288	9.978	9.567	8.892	7.966	11.318
100	8.220	7.515	7.744	8.298	7.507	7.326	7.844	7.138	7.872

ตารางผนวกที่ ก2(ต่อ)

ตัวอย่าง	F/D ₁	F/D ₂	F/D ₃	F/D ₄	F/D ₅	F/D ₆	F/D ₇	F/D ₈	F/D ₉
101	7.423	8.730	7.002	6.136	7.335	8.286	7.736	6.949	9.867
102	5.933	6.543	6.294	6.559	5.698	5.332	5.467	5.945	8.275
103	7.095	7.969	8.209	8.613	7.331	8.341	8.952	9.075	10.116
104	7.609	8.107	7.906	8.750	7.335	6.922	7.663	7.782	12.281
105	8.844	7.717	7.150	8.112	9.210	8.745	7.728	8.482	10.164
106	8.102	8.571	7.187	8.095	7.416	7.485	7.002	6.845	9.697
107	6.967	7.395	7.606	7.920	7.478	6.757	6.730	7.404	9.281
108	7.858	7.836	7.939	7.646	5.706	6.537	7.033	6.422	7.805
109	7.094	6.622	6.711	6.714	6.496	6.072	6.343	6.427	8.935
110	9.723	9.198	8.094	8.799	8.386	8.245	7.629	9.058	11.221
111	8.227	8.470	7.565	7.951	8.796	9.553	8.101	8.338	10.313
112	7.045	7.032	7.391	7.616	7.824	7.754	7.292	7.837	9.608
113	5.363	5.599	5.707	5.263	4.325	4.382	4.562	4.241	6.182
114	7.964	8.029	7.794	8.053	6.223	6.694	6.095	5.465	8.012
115	8.585	7.397	6.700	8.875	8.146	7.450	8.269	8.776	10.705
116	9.435	8.331	8.845	9.582	8.847	7.347	8.834	8.511	12.773
117	8.107	9.248	9.140	8.859	10.089	10.340	10.833	9.928	11.980
118	8.330	7.927	7.370	8.028	8.964	8.852	8.785	8.790	12.147
119	7.648	8.156	7.539	8.166	8.651	8.330	8.096	8.116	11.278
120	8.781	8.148	7.700	6.847	5.955	7.599	6.348	6.309	9.216

ตารางผนวกที่ ก3 ค่าความถี่ธรรมชาติต่อแรงกระทำอันดับที่ 1

ตัวอย่าง	ช่วงผล1 (Hz)	กั้นผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
1	1280.5	1585.5	796.5	773	788.5	788.5
2	710.5	702.5	718	695	695	710.5
3	726	718.5	757.5	741.5	750	773
4	718.5	734	671	749.5	585.5	734
5	718.5	890.5	820	804	820	796.5
6	812	828	828	812	812	804
7	835.5	828	835.5	859	843	843
8	773	687	656	679	726	695
9	742	812	796	749.5	812	953
10	804	749.5	820	812	413.5	796
11	703	703	749.5	796	718.5	726
12	742	750	734	929.5	741.5	742
13	687	828	702.5	788.5	765	757
14	773	788.5	796	733.5	804	796
15	820	812	828	796.5	804	804
16	734	741.5	757	749.5	773	796
17	702.5	781	796	695	726	804
18	748.5	1038.5	788.5	718	741.5	796
19	765.5	794.5	733.5	796	796	796
20	1148	976	796	796	1062	804
21	796	812	796	788.5	796	812
22	640	687	671	960.5	656	796
23	734	796	788.5	788.5	773	796
24	734	765	781	796	796	953
25	812	906	812	796	835.5	812
26	780.5	757.5	796	733.5	733.5	788.5
27	734	765.5	937	905.5	773	788.5
28	828	859	859	859	851	819.5

ตารางผนวกที่ ก3(ต่อ)

ตัวอย่าง	ข้อผล1 (Hz)	ข้อผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
29	819.5	796	796	796	796	796
30	773	796	796	796	804	796
31	757.5	796	640.5	671.5	585.5	742
32	36	804	781	796.5	820	835.5
33	788.5	788.5	781	781	781	757.5
34	702.5	757	781	780.5	796	788.5
35	726.5	914	898	734	819.5	741.5
36	750	874.5	757.5	757.5	781	773
37	687	679	632.5	656	671.5	640
38	718.5	1218.5	757.5	734	749.5	757.5
39	671.5	663.5	687	687	687	687
40	765.5	1085.5	765.5	820	750	749.5
41	663.5	1038.5	702.5	687	687	851
42	757.5	1085.5	703	726	718.5	710.5
43	757.5	796	765	765	773	796
44	937	929	812	812	796	835.5
45	781	773	788.5	749.5	929	796
46	874.5	843	882.5	859	843	968.5
47	710.5	726	765	859	710.5	734
48	718.5	734	734	734	734	710.5
49	872.5	703	632.5	624.5	648	632.5
50	663.5	921	663.5	663.5	617	648
51	757.5	679	742	742	757.5	765
52	757.5	780.5	780.5	796.5	780.5	757.5
53	859	812	859	843	851	851
54	999.5	788.5	804	820	828	804
55	710.5	679	679	726	702.5	663.5
56	765	757.5	773	781	796.5	780.5

ตารางผนวกที่ ก3(ต่อ)

ตัวอย่าง	ช่วงผล1 (Hz)	กั้นผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
57	687	718.5	749.5	1046.5	742	749.5
58	1241.5	702.5	726	718.5	718.5	734
59	757.5	999.5	804.5	773	687	788.5
60	835.5	859	851	849.5	882.5	859
61	679	718	695	703	695	703
62	726.5	750	765	750	750	749.5
63	788.5	788.5	804	796	788.5	788.5
64	781	773	765	750	773	765
65	804	828	820	812	812	804
66	734	750	750	742	757.5	750
67	609	609	617	609	609	609
68	750	750	750	750	757.5	781
69	750	750	742	726	742	726
70	671.5	718	710.5	710.5	703	702.5
71	781	796	796	788.5	796	788.5
72	765	765	757.5	765	750	757.5
73	750	750	750	757.5	750	742
74	796	812	796	804	804	804
75	671.5	679	671	671	671	671
76	671	663.5	687	687	679	687
77	640	632.5	640	640.5	640	632.5
78	585.5	742	593	593	593	593
79	694.5	734	734	718	718	718
80	820	835.5	820	828	820	820
81	718	734	726	734	734	726
82	687	702.5	687	687	702.5	679
83	742	718	750	742	734	742
84	648	718	695	687	702.5	687

ตารางผนวกที่ ก3(ต่อ)

ตัวอย่าง	ข้อผล1 (Hz)	ข้อผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
85	788.5	812	781	788.5	796	781
86	843	874.5	843	851	859	867
87	796	812	804	804	788.5	804
88	812	820	812	812	796	804
89	780.5	788.5	773	796.5	765.5	765
90	843	843	843	835.5	835.5	835.5
91	616.5	609	593.5	585.5	585.5	609
92	656	648	648	640	640.5	648
93	625	656	499.5	640	625	492
94	460.5	601	562	601	554	562
95	562	624.5	640	617	609	609
96	640	695	687	687	687	687
97	593	656	648	640	656	656
98	562	656	648	656	663.5	656
99	679	718	593	687	671	671
100	703	718.5	695	710.5	710.5	703
101	655.5	523	531	531	531	468.5
102	734	742	734	734	734	742
103	687	695	695	687	687	687
104	765.5	749.5	750	757.5	750	757.5
105	687	671	687	663.5	656	687
106	757.5	750	765	734	742	750
107	835.5	812	820	834	851	827.5
108	812	827.5	804	828	812	812
109	835.5	781	835.5	835.5	843	812
110	819.5	820	812	835.5	812	812
111	703	710.5	710.5	703	718	687
112	726	710.5	703	710.5	726	742

ตารางผนวกที่ ก3(ต่อ)

ตัวอย่าง	ข้อผล1 (Hz)	ข้อผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
113	663.5	679	663.5	671	663.5	648
114	742	750	757.5	742	750	750
115	671	671.5	648	663.5	663.5	663.5
116	781	781	781	757.5	765	788.5
117	796	796.5	773	773	765.5	773
118	768	679	687	695	679	734
119	804	794	802.5	804	796.5	796
120	663.5	664	679.5	663.5	655.5	656

ตารางผนวกที่ ก4 ค่าความถี่ธรรมชาติต่อแรงกระทำอันดับที่ 2

ตัวอย่าง	ข้อผล1 (Hz)	ข้อผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
1	1413.5	1906	1343.5	1265	1343	1374.5
2	1148	1046	1140	1288.5	1132.5	1156
3	1249.5	1359	1328	1375	1218.5	1202.5
4	1241.5	1171.5	953	1203	937	1054
5	1335.5	1492	1218.5	1421.5	1343	1390
6	1195	1257.5	1203	1218.5	1343	1468.5
7	1398	1242	1343.5	1499.5	1413.5	1233.5
8	1233.5	929.5	1140	1109	882	812
9	1070	1015.5	1351	1078	1038.5	1531
10	1132.5	1117	1101	1078	827.5	1312
11	1023	1288.5	1296.5	1500	1000	1335.5
12	1085.5	1250	1218.5	1421.5	1179.5	1328
13	1046.5	1328	1242	1132.5	1507.5	1203
14	1257	1179	1367	1273	1312	1281
15	1273	1179	1156	1312.5	1312	1429
16	1257.5	1367	1234	1187	1226	1375

ตารางผนวกที่ ก4(ต่อ)

ตัวอย่าง	ชั่วผล1 (Hz)	กั้นผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
17	1187	1046	1304.5	804	1218.5	1328
18	1234	1375	1046	1124.5	1140	1304.5
19	1242	1108.5	1093.5	1163.5	1375	1281
20	1593.5	1531	1437.5	1546.5	1702.5	1421.5
21	1187	1187	1382.5	1257.5	1351.5	1406
22	1012.5	906	1085.5	1226.5	1203	1500
23	1328	1195	1351.5	1328	1077.5	1343
24	1085.5	1015	1109	1366.5	1203	1366.5
25	1453	1117	1155.5	1437	1101	1218
26	1226	1328	1242	1187	1101.5	1140
27	1304.5	1179.5	1359	1491.5	1328	1328
28	1328	1125	1593.5	1132.5	1359	1296.5
29	1195	1062	1351.5	1328	1476.5	1195
30	1195	1414	1296.5	1328	1289	1328
31	1101	1124.5	913.5	1117	748.5	913.5
32	1195	1163.5	1218.5	1257.5	1202.5	1179.5
33	1163.5	1054.5	1124.5	1241.5	1234	1226
34	1007.5	1023	1140	1195	1218.5	1015
35	1179	1265.5	1515	913.5	1124.5	1265.5
36	1187	1218.5	1054	1132.5	1359	1205.5
37	898	1249.5	1093.5	905.5	1038.5	867
38	1359	1632.5	1070	1069.5	1163.5	1109
39	1015	1351	1226	960.5	1156	976
40	1093	1484	1015	1288.5	1116.5	984
41	1179	1281	1242	1234	1335.5	1445
42	1109	1382.5	1320	1226	1218.5	1062
43	1070	1023	1202.5	1351.5	1218	1179
44	1249.5	1257.5	1226	1343	1249.5	1374.5

ตารางผนวกที่ ก4(ต่อ)

ตัวอย่าง	ช่วงผล1 (Hz)	กั้นผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
45	1210.5	1085.5	1218.5	1070	1304	1257.5
46	1515	1218	1452.5	1265	1156	1319.5
47	1195	1171.5	1375	1117	1054.5	1037
48	1007.5	1265	945	1093.5	984	1117
49	1273	991.5	929	827.5	1093.5	1405.5
50	1140.5	1304.5	1038.5	1163.5	1070	1507.5
51	1320	968.5	1641.5	1085.5	1118	1273
52	1140.5	1398	1327.5	1226	1327.5	1257.5
53	1359	1038.5	1265	1625	1359	1390.5
54	1343.5	1437	1523	1195	1257.5	1195
55	1140.5	1330.5	1101.5	1022	1195	937
56	1265.5	1085.5	1179	1179.5	1257.5	1187
57	1077.5	1155.5	1171.5	1406	1156	1319.5
58	1570	1273	1343.5	1070	1054	1038.5
59	1155.5	1375	1194.5	1242	983.5	1304
60	1234	1187	1273	1322.5	1304.5	1273
61	773	968.5	1023	960.5	898	968.5
62	937.5	1078	1156	1046.5	1015.5	976.5
63	1140.5	1085.5	1062	1140.5	1241.5	1062
64	1062	976	991.5	1062	1085.5	1085.5
65	1210.5	1101	1187	1015	1116.5	1078
66	1187	1187	1093	1038.5	944.5	1101.5
67	906	843.5	937	882.5	750	929
68	1085.5	1171.5	898	1070	1226.5	1124.5
69	960.5	1164	1125	1093	1038.5	1023
70	1070	960.5	890.5	1000	1015.5	1007.5
71	1179.5	1156	1203	1171	1070	1117
72	1125	1156	1171.5	1062	1046.5	1101

ตารางผนวกที่ ก4(ต่อ)

ตัวอย่าง	ช่วงผล1 (Hz)	กั้นผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
73	1101	1007	1062	1070	1070	1062
74	1250	976	984	1101	1210.5	1179.5
75	984	843.5	976	898	1023	906
76	1046.5	1030.5	1202.5	1273	992	983.5
77	796	796.5	1038.5	1171.5	890	913.5
78	905.5	960.5	828	890	867	734
79	1090.5	906	1148	1085.5	1140	1069.5
80	1085.5	1007	1093	1328	1117	1124.5
81	1046.5	937	1062	1015	1007.5	1015
82	1069.5	921.5	851	874.5	968.5	968
83	921.5	1030.5	1273	991.5	1085.5	992
84	843.5	859	890	874.5	812	960.5
85	937	1015	1085.5	1163.5	1132	1249.5
86	1234	1069.5	1108.5	1062	1030.5	1038.5
87	1015.5	1210.5	1234	1109	1242	1093.5
88	1124.5	890	1093.5	1007.5	1070	992
89	898	991.5	992	1093	960.5	1085.5
90	1226	1163.5	1335.5	1234	1195	1109
91	1093	788.5	765	765	827.5	710.5
92	1037.5	944.5	843	843	882.5	984
93	1054	999.5	788.5	773	937	765.5
94	702.5	867	921.5	921.5	812	671.5
95	624.5	796.5	828	820	859	835.5
96	851	952.5	999.5	1163.5	968	929
97	679	913.5	937	937	898	1015
98	593	750	858.5	921	952.5	875
99	1069.5	1093	851	874.5	945	952.5
100	1093	804.5	898	929.5	1015	875

ตารางผนวกที่ ก4(ต่อ)

ตัวอย่าง	ช่วงผล1 (Hz)	กั้นผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
101	804.5	827.5	710.5	664	624.5	726
102	1117	1054.5	999.5	945	1015	913.5
103	1046.5	968.5	937	976	945	1007.5
104	991.5	1116.5	1085.5	1038.5	1015.5	1015
105	921	851.5	1023	976	945	851
106	983.5	1062	1031	1054	1085.5	1030.5
107	1249.5	1062	1109	1101	1085.5	1054
108	1148	1054	1070	1093	1054	1093
109	976	890.5	1109	1109	1140.5	984
110	1062.5	1109	1007.5	1093	992	1054
111	1007.5	859	952.5	976	921.5	1077.5
112	1078	890	984	976	1038.5	937
113	952.5	1054	945	835.5	1023	789
114	991.5	952.5	1093.5	913.5	968.5	1023
115	843	812	859	804	812	921.5
116	1023	1093	984	1031	976.5	1062
117	1062.5	937	984	921.5	898	1077.5
118	858.5	857.5	827.5	890.5	843.5	952.5
119	999.5	1077.5	929.5	1124.5	1187.5	1069.5
120	843.5	781	944.5	812	898	781

ตารางผนวกที่ ก5 ค่าความถี่ธรรมชาติต่อแรงกระทำอันดับที่ 3

ตัวอย่าง	ช่วงผล1 (Hz)	กั้นผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
1	1226.5	2078	1877	1921.5	1976	1953
2	1679	1257.5	1671	1687	1367	1562
3	1601.5	1710.5	1687	2093.5	1531	1396.5
4	1507.5	1507.5	1343	1546.5	1429.5	1296
5	1863	1726	1687.5	1968.5	1875	2046.5
6	1857	1570	1867	1812	1859	2218.5
7	2093.5	1593.5	2257	2593	1999.5	2093
8	2163.5	1312	1687	1537	1210.5	1124.5
9	1640	1328	1663.5	1460.5	1328	1960.5
10	1657.5	1570	1757.5	1476.5	1366.5	1781
11	1546.5	1702.5	1859	1859	1578	1859
12	1476	1718.5	1687	1929.5	1757.5	1687
13	1500	1664	1773	1913.5	1859	1687
14	1912	2046	1874.5	1679	1859	1656
15	1773	1609	1375	1601.5	1874.5	1835.5
16	1687	1679	1616.5	1499.5	1679	1773
17	1515	1375	1874.5	1038.5	1562	1875
18	1687	1500	1335.5	1546.5	1562	1687
19	1843.5	1587.5	1515.5	1624.5	1867	1679
20	2101	1898	1960.5	2335.5	2390	2054
21	1828	1476.5	1616.5	1585.5	1679	1859
22	1539	1242	1468.5	1827.5	1492	2187
23	1859	1507.5	1890	2320	1453	1953
24	1624.5	1351.5	1375	2195	1515	1749.5
25	2038.5	1562	1382.5	1859	1507.5	1390.5
26	1601	1546.5	1835.5	1960.5	1773	1445
27	1687	1437.5	1867	2335.5	1773	1859
28	1859	1616.5	2234	1656	1718.5	1663.5

ตารางผนวกที่ ก5(ต่อ)

ตัวอย่าง	ช่วงผล1 (Hz)	กั้นผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
29	1617	1453	1859	1859	2335.5	1617
30	1843.5	1687	1781	1859	1781	2062
31	1434	1429	1062.5	1507.5	1038.5	1484
32	1585.5	1499.5	1405.5	1671.5	1491.5	1531
33	1406	1460.5	1554.5	2054.5	1585.5	1515.5
34	1367	1351	1578	1577.5	1663.5	1374.5
35	1820	1523	1796.5	1289	1593	1617
36	1616.5	1484	1765	1421.5	1764.5	1460.5
37	1250	1476	1554.5	1273	1453	1203
38	1664	1828	1664	1484	1749.5	1546.5
39	1578	1476	1578	1265	1484	1265
40	1328	1726	1507.5	1741.5	1484	1484
41	1562	1624.5	1578	1695	1929.5	1960.5
42	1304.5	1695	1640	1820	1827.5	1437
43	1562.5	1390	1593	1601	1343.5	1414
44	1578	1546.5	1796	1617	1788.5	1757.5
45	1640.5	1468.5	1538.5	1328	1780.5	1632
46	1765.5	1492	1960.5	1523	1421.5	1765
47	1523	1312.5	1804	1436	1523	1414
48	1249.5	1749.5	1194.5	1492	1234	1382.5
49	1804	1156	1109	1198	1429	1694.5
50	1405.5	1679	1414	1616.5	1475.5	1695
51	1484	1234	1593.5	1374.5	1484	1538.5
52	1749.5	1953	1827.5	1530.5	1702.5	1710.5
53	1687	1578	1750	1828	1796.5	1679
54	1867	1921	2148	1624.5	1593.5	1507.5
55	1304.5	1710.5	1312	1265.5	1515	1242
56	1734	1320	1390	1453	1742	1570

ตารางผนวกที่ ก5(ต่อ)

ตัวอย่าง	ช่วงผล1 (Hz)	กั้นผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
57	1437.5	1382.5	1476	1804	1453	1867
58	2249.5	1523	1835.5	1499.5	1538.5	1390.5
59	1445	1718	1421.5	1531	1367	1577.5
60	1588.5	1515.5	1566.5	1601	1703	1773
61	1000	1171.5	1125	1117	1109	1195
62	1156	1273	1390.5	1257.5	1367	1234
63	1226.5	1338.5	1140	1257.5	1320	1242
64	1250	1250	1148	1367	1234	1250
65	1320	1484	1499.5	1109	1351	1148
66	1312	1296.5	1250	1281	1140	1273
67	1101	1109	984	1124.5	1077.5	1117
68	1453	1320	1077.5	1249.5	1304.5	1250
69	1250	1320	1366.5	1320	1343	1320
70	1250	1312	1202.5	1242	1296.5	1343.5
71	1335.5	1437	1312	1437	1499.5	1562
72	1296.5	1429	1366.5	1398	1249.5	1320
73	1242	1343	1273	1304.5	1312	1249.5
74	1398	1249.5	1179.5	1218.5	1421.5	1343.5
75	1156	1250	1304.5	1242	1164	1101.5
76	1124.5	1171.5	1280.5	1374.5	1312	1320
77	1007	999.5	1241.5	1249.5	1163.5	1101.5
78	1226	1241.5	1101	1093	1015	1093
79	1257.5	1249.5	1453	1273	1241.5	1232.5
80	1390	1171.5	1226	1390.5	1312	1445
81	1179.5	1320	1171.5	1242	1304	1273
82	1203	1226	1125	1101.5	1125	1163.5
83	1234	1398	1343.5	1241.5	1366.5	1280.5
84	1085.5	1125	1046.5	1070	1023	1148

ตารางผนวกที่ ก5(ต่อ)

ตัวอย่าง	ช่วงผล1 (Hz)	กั้นผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
85	1093	1460.5	1234	1312.5	1367	1398
86	1343.5	1304.5	1304.5	1531	1226	1171.5
87	1382.5	1320	1359	1296.5	1406	1359
88	1375	1484	1390.5	1414	1242	1328
89	1210.5	1171.5	1054	1374.5	1249.5	1367
90	1437.5	1351.5	1398	1429.5	1413.5	1382.5
91	1218.5	944.5	945	937	1015	835.5
92	1155.5	1179.5	1093	1031	1164	1085.5
93	1234	1335.5	976	1015	1171.5	960.5
94	773	1163.5	1093.5	1241.5	1202.5	1163.5
95	765.5	1101	1031	1015	1218.5	1171.5
96	1054	1054.5	1132.5	1429.5	1093.5	1101
97	945	1163.5	1179.5	1218.5	1054.5	1234
98	671	867	1007	1093	1187	1054
99	1234	1234	1062	1101	1109	1413.5
100	1234	1093	1109	1046.5	1254.5	1179
101	1093.5	1202.5	905.5	921.5	726.5	898
102	1210.5	1281	1343	1109	1171.5	1046.5
103	1210.5	1226	1124.5	1218	1116.5	1093.5
104	1226	1288.5	1437	1249.5	1093	1171.5
105	1116.5	984	1288.5	1148	1179	1281
106	1179	1218.5	1109	1179.5	1281	1202.5
107	1351	1171.5	1374.5	1257.5	1327.5	1179.5
108	1226.5	1241.5	1241.5	1445	1249	1492
109	1179.5	1249.5	1281	1210.5	1374.5	1179
110	1195	1187	1234	1335.5	1116.5	1289
111	1140	1077.5	1218.5	1054	1179.5	1202.5
112	1249.5	1155.5	1257.5	1117	1359	1132.5

ตารางผนวกที่ ก5(ต่อ)

ตัวอย่าง	ช่วงผล1 (Hz)	กั้นผล2 (Hz)	ด้าน3 (Hz)	ด้าน4 (Hz)	ด้าน5 (Hz)	ด้าน6 (Hz)
113	1093	1171.5	1093.5	1007.5	1335.5	905.5
114	1117	1132.5	1390	1187	1117	1359
115	1054	1163.5	1046.5	953	1210.5	1054
116	1093	1327.5	1101	1273	1124.5	1125
117	1202.5	1327.5	1249.5	1249.5	1148	1155.5
118	1117	1132.5	1007	1281	1124.5	1210.5
119	1226	1195	1226	1398	1476	1413.5
120	1015.5	1171.5	1210.5	1250	1140	1015

ตารางผนวกที่ ก6 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพและค่าทางเคมี

ตัวอย่าง	ความสูง (cm)	เส้นรอบวง (cm)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	SG	TA (%)	SSC (°Brix)
1	12.2	43.0	876.17	1241.0	0.706	0.712	10.85
2	12.9	43.1	908.13	1271.0	0.715	0.664	11.13
3	11.7	41.9	934.19	1113.0	0.839	0.696	13.68
4	11.4	44.1	985.38	1215.0	0.811	0.680	11.20
5	12.0	43.9	1004.21	1252.0	0.802	0.696	11.90
6	11.1	41.3	842.27	1039.0	0.811	0.760	11.88
7	10.5	41.0	801.30	984.0	0.814	0.704	12.33
8	12.8	45.8	1060.05	1463.0	0.725	0.656	11.10
9	11.4	41.5	810.48	1082.0	0.749	0.800	10.38
10	11.3	40.1	806.47	983.0	0.820	0.680	11.78
11	12.7	46.2	977.54	1444.0	0.677	1.024	10.00
12	10.5	43.0	883.27	1099.0	0.804	0.680	10.70
13	12.6	46.4	1100.32	1497.3	0.735	0.672	10.78
14	11.4	42.8	913.99	1123.0	0.814	0.784	12.63
15	11.2	46.3	944.42	1335.0	0.707	1.136	9.03

ตารางผนวกที่ ก6(ต่อ)

ตัวอย่าง	ความสูง (cm)	เส้นรอบวง (cm)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	SG	TA (%)	SSC (°Brix)
16	12.0	43.0	864.14	1206.0	0.717	0.816	8.78
17	12.1	43.4	993.70	1228.0	0.809	0.768	10.78
18	12.2	42.7	938.86	1228.0	0.765	0.840	9.98
19	11.9	42.4	887.56	1160.0	0.765	0.848	10.00
20	11.3	41.7	832.03	1058.0	0.786	1.024	9.78
21	11.5	42.3	806.15	1084.0	0.744	0.808	8.68
22	12.7	45.5	1115.82	1447.0	0.771	0.784	10.18
23	12.0	43.3	977.75	1221.0	0.801	0.704	11.20
24	11.1	40.4	846.06	993.0	0.852	0.656	10.98
25	10.6	40.2	832.79	936.0	0.890	0.704	11.58
26	10.4	40.7	762.05	971.0	0.785	0.752	10.83
27	11.4	40.1	820.88	1009.0	0.814	0.712	10.60
28	10.8	39.2	724.22	900.0	0.805	0.776	10.80
29	11.8	41.8	871.53	1128.0	0.773	0.728	10.08
30	11.4	42.0	852.28	1087.0	0.784	0.800	10.53
31	12.2	46.7	1090.03	1393.6	0.782	0.592	10.30
32	12.2	43.7	967.46	1195.4	0.809	0.656	10.50
33	12.5	44.0	1015.45	1309.8	0.775	0.480	10.00
34	12.4	45.3	1009.16	1309.1	0.771	0.576	10.50
35	13.1	46.6	1112.07	1439.9	0.772	0.560	10.40
36	12.1	47.8	1015.92	1506.9	0.674	0.576	10.90
37	12.3	48.6	1229.51	1600.3	0.768	0.528	9.80
38	11.7	46.5	1056.67	1369.0	0.772	0.560	10.20
39	12.3	46.6	1122.52	1468.4	0.764	0.512	9.70
40	12.3	44.8	984.68	1284.5	0.767	0.544	9.60
41	13.8	48.0	1226.05	1715.8	0.715	0.528	10.70
42	12.1	45.7	1112.06	1398.5	0.795	0.576	9.25

ตารางผนวกที่ ก6(ต่อ)

ตัวอย่าง	ความสูง (cm)	เส้นรอบวง (cm)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	SG	TA (%)	SSC (°Brix)
43	12.2	44.0	1029.39	1277.4	0.806	0.544	10.65
44	10.8	42.3	939.37	1085.9	0.865	0.576	9.65
45	12.3	42.5	935.15	1194.1	0.783	0.560	10.10
46	11.5	41.8	969.47	1085.3	0.893	0.768	10.85
47	11.8	43.4	904.95	1192.5	0.759	0.576	9.75
48	11.6	45.6	1071.32	1320.4	0.811	0.560	10.05
49	14.6	53.0	1460.24	2157.1	0.677	0.512	10.30
50	13.6	48.9	1236.13	1705.1	0.725	0.544	10.00
51	12.4	41.7	888.06	1144.5	0.776	0.576	9.80
52	11.8	43.4	934.60	1185.2	0.789	0.592	10.50
53	12.4	43.6	988.85	1093.5	0.904	0.640	11.10
54	11.9	43.0	937.98	1024.6	0.915	0.528	10.75
55	13.0	47.0	1184.45	1540.9	0.769	0.544	10.00
56	12.5	45.9	1077.06	1410.0	0.764	0.576	10.50
57	12.2	47.0	1125.42	1195.1	0.942	0.544	10.75
58	12.5	46.0	1105.26	1378.3	0.802	0.528	10.85
59	11.1	41.0	790.85	1014.2	0.780	0.544	9.65
60	11.0	41.6	824.48	1034.5	0.797	0.576	10.35
61	13.1	45.5	1092.41	1536.0	0.711	0.496	10.40
62	12.8	45.0	1094.18	1420.4	0.770	0.512	10.55
63	11.6	42.8	905.94	1159.8	0.781	0.576	9.70
64	11.1	44.5	1060.43	1210.4	0.876	0.464	11.55
65	12.0	41.4	928.75	1102.2	0.843	0.544	11.15
66	12.3	43.7	1024.78	1276.9	0.803	0.624	11.95
67	13.9	50.4	1429.70	1904.0	0.751	0.464	10.60
68	12.4	44.2	982.35	1311.0	0.749	0.544	10.50
69	12.7	44.9	1094.15	1400.1	0.781	0.464	10.70

ตารางผนวกที่ ก6(ต่อ)

ตัวอย่าง	ความสูง (cm)	เส้นรอบวง (cm)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	SG	TA (%)	SSC (°Brix)
70	13.0	46.6	1187.50	1561.1	0.761	0.496	10.50
71	12.3	41.7	904.08	1147.0	0.788	0.544	10.35
72	12.1	42.6	960.45	1214.8	0.791	0.560	10.90
73	12.1	42.7	905.30	1192.3	0.759	0.560	10.00
74	12.5	43.1	983.21	1289.3	0.763	0.576	10.45
75	13.6	49.1	1290.12	1719.2	0.750	0.576	10.15
76	12.3	45.2	1096.49	1383.0	0.793	0.464	9.70
77	13.3	50.2	1369.28	1777.2	0.770	0.448	9.80
78	14.4	51.7	1386.25	2066.9	0.671	0.480	9.95
79	12.2	45.3	1076.39	1351.0	0.797	0.480	11.25
80	12.0	41.6	867.73	1108.8	0.783	0.528	11.10
81	12.8	44.3	1023.42	1364.2	0.750	0.624	10.50
82	12.6	45.7	1105.22	1431.0	0.772	0.544	9.90
83	11.5	45.0	1078.95	1318.9	0.818	0.560	10.80
84	13.7	46.2	1162.90	1600.8	0.726	0.464	9.90
85	11.9	43.0	989.94	1206.3	0.821	0.512	11.60
86	11.2	40.6	846.32	1002.2	0.844	0.640	12.20
87	12.5	42.8	977.70	1214.9	0.805	0.448	11.65
88	11.5	43.8	969.76	1207.4	0.803	0.576	11.60
89	12.3	42.9	925.41	1211.5	0.764	0.496	10.85
90	12.4	40.9	883.47	1085.9	0.814	0.432	12.20
91	14.8	55.0	1738.46	2302.4	0.755	0.384	10.80
92	13.5	45.8	1224.94	1524.7	0.803	0.496	10.95
93	14.0	47.8	1307.49	1722.1	0.759	0.416	11.00
94	13.9	49.7	1259.59	1863.2	0.676	0.416	10.70
95	14.6	50.0	1489.19	1947.1	0.765	0.384	10.80
96	12.1	46.0	1146.57	1406.3	0.815	0.496	11.90

ตารางผนวกที่ ก6(ต่อ)

ตัวอย่าง	ความสูง (cm)	เส้นรอบวง (cm)	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (ml)	SG	TA (%)	SSC (°Brix)
97	13.8	49.8	1531.53	1890.8	0.810	0.464	11.60
98	12.6	44.9	1079.40	1399.5	0.771	0.480	11.05
99	12.5	43.4	1055.05	1300.5	0.811	0.448	11.45
100	12.3	42.5	944.72	1200.6	0.787	0.416	11.25
101	16.1	53.0	1663.11	2251.5	0.739	0.448	10.30
102	11.0	42.8	875.17	1110.0	0.788	0.528	10.20
103	13.2	45.4	1118.84	1479.0	0.756	0.416	10.50
104	11.4	43.0	984.17	1166.3	0.844	0.432	11.25
105	12.4	45.7	1196.19	1440.5	0.830	0.464	11.55
106	11.6	41.4	946.71	1107.1	0.855	0.432	12.00
107	10.6	36.7	667.10	781.0	0.854	0.528	11.15
108	10.6	38.5	781.80	872.7	0.896	0.496	13.05
109	9.9	38.8	730.35	842.3	0.867	0.592	12.40
110	12.1	42.0	946.11	1088.9	0.869	0.448	12.60
111	12.9	45.2	1161.87	1420.4	0.818	0.448	11.50
112	12.3	42.1	949.36	1153.0	0.823	0.416	11.30
113	11.9	42.2	925.95	1168.5	0.792	0.464	11.15
114	10.4	42.0	885.64	1156.4	0.766	0.512	11.40
115	12.8	47.5	1200.31	1610.2	0.745	0.528	11.10
116	10.8	41.6	855.58	1056.3	0.810	0.592	11.65
117	11.7	42.8	952.73	1185.4	0.804	0.496	12.00
118	12.5	44.5	1116.43	1369.6	0.815	0.416	11.60
119	11.7	40.5	881.35	1062.6	0.829	0.512	11.65
120	13.4	48.3	1167.83	1657.0	0.705	0.528	11.05

ตารางผนวกที่ ก7 ค่าความหนาเปลือก

ตัวอย่าง	ความหนาด้านบน (mm)	ความหนาด้านข้าง (mm)	ความหนาด้านล่าง (mm)
1	22.71	14.89	17.47
2	26.00	14.97	18.89
3	18.89	11.51	11.39
4	17.38	11.27	12.43
5	16.97	11.90	12.96
6	16.96	9.64	13.76
7	14.41	10.36	10.12
8	20.83	14.48	20.16
9	15.46	12.14	14.32
10	15.64	10.68	13.44
11	24.60	16.98	18.28
12	16.62	10.67	11.20
13	20.16	15.94	18.47
14	20.12	12.34	11.84
15	18.83	13.83	18.83
16	19.71	14.53	18.11
17	17.98	10.22	14.89
18	21.10	11.07	18.85
19	20.16	12.07	18.13
20	16.13	10.46	13.22
21	22.42	12.07	13.30
22	21.73	12.95	16.93
23	17.00	13.29	16.30
24	11.88	8.66	10.27
25	12.83	6.15	9.47
26	18.25	11.72	10.97
27	17.04	11.12	10.82
28	17.62	10.29	16.02

ตารางผนวกที่ ก7(ต่อ)

ตัวอย่าง	ความหนาด้านบน (mm)	ความหนาด้านข้าง (mm)	ความหนาด้านล่าง (mm)
29	17.81	12.38	16.19
30	21.07	12.67	13.19
31	17.55	10.11	14.83
32	18.07	9.75	13.89
33	16.28	11.60	14.01
34	17.78	11.64	16.91
35	18.85	13.74	11.77
36	24.34	19.02	21.92
37	19.09	13.53	18.49
38	18.88	12.11	14.67
39	14.47	11.98	14.47
40	18.23	12.69	17.82
41	28.72	16.14	18.74
42	17.85	11.94	14.33
43	14.24	12.17	13.69
44	14.78	13.13	12.58
45	18.84	15.58	17.70
46	13.29	8.67	10.71
47	18.30	13.13	14.52
48	14.76	9.83	14.07
49	31.60	19.33	25.30
50	31.49	13.28	16.21
51	18.46	13.06	19.13
52	15.24	9.82	13.52
53	18.60	15.28	12.30
54	15.92	11.82	14.49
55	25.34	13.35	17.88
56	21.54	15.47	16.19

ตารางผนวกที่ ก7(ต่อ)

ตัวอย่าง	ความหนาด้านบน (mm)	ความหนาด้านข้าง (mm)	ความหนาด้านล่าง (mm)
57	18.07	13.67	16.88
58	18.57	8.95	11.15
59	14.66	9.97	16.56
60	15.94	10.65	13.56
61	25.53	17.46	23.66
62	22.31	13.97	15.90
63	17.40	11.38	13.94
64	11.87	7.04	7.94
65	19.72	9.84	11.81
66	17.44	13.37	13.01
67	26.50	16.23	21.17
68	17.82	14.57	16.49
69	22.30	12.23	15.05
70	20.56	13.15	18.62
71	23.21	12.39	16.18
72	18.48	13.26	13.67
73	18.73	11.40	16.48
74	21.46	14.11	13.27
75	24.11	15.10	18.39
76	17.65	12.76	11.83
77	25.98	13.60	18.80
78	31.43	21.79	21.94
79	19.74	10.68	13.35
80	19.77	10.70	15.50
81	25.40	12.99	19.67
82	17.77	12.25	17.98
83	18.00	11.86	11.94
84	18.83	14.19	20.58

ตารางผนวกที่ ก7(ต่อ)

ตัวอย่าง	ความหนาด้านบน (mm)	ความหนาด้านข้าง (mm)	ความหนาด้านล่าง (mm)
85	15.58	9.84	14.05
86	13.24	9.78	11.61
87	21.32	11.20	14.50
88	19.06	10.51	13.34
89	23.47	11.96	16.07
90	20.10	10.44	13.85
91	26.35	15.51	18.22
92	18.19	10.04	17.03
93	28.37	13.01	15.99
94	29.80	17.81	20.30
95	22.04	13.00	17.81
96	19.75	11.96	16.84
97	20.84	15.72	16.55
98	20.34	13.71	17.85
99	22.47	9.16	14.43
100	25.65	12.14	14.43
101	39.66	17.45	22.31
102	19.60	11.75	13.72
103	22.60	14.72	18.54
104	18.66	9.03	13.20
105	19.15	9.94	13.83
106	12.35	10.50	9.33
107	12.14	7.42	10.78
108	13.19	5.09	7.97
109	11.14	6.49	8.76
110	7.81	9.70	9.31
111	18.72	10.13	12.61
112	22.38	10.70	15.50

ตารางผนวกที่ ก7(ต่อ)

ตัวอย่าง	ความหนาด้านบน (mm)	ความหนาด้านข้าง (mm)	ความหนาด้านล่าง (mm)
113	18.21	10.51	17.26
114	14.40	8.98	12.99
115	14.18	13.59	18.81
116	19.15	11.06	14.02
117	18.49	10.54	19.21
118	16.54	11.40	15.51
119	14.28	9.01	13.42
120	25.29	15.41	20.52



ตารางผนวกที่ ข ค่าทางเคมีของส้มโอตัดแต่งสด

ตัวอย่าง	SSC (°Brix)	Total Titratable Acidity (%)
1	10.65	0.656
2	10.65	0.656
3	10.60	0.640
4	10.55	0.544
5	10.40	0.592
6	10.35	0.560
7	10.85	0.560
8	10.50	0.608
9	10.80	0.640
10	11.00	0.688
11	10.85	0.688
12	10.80	0.624
13	10.90	0.608
14	10.95	0.784
15	11.15	0.672
16	10.75	0.640
17	10.70	0.576
18	10.85	0.608
19	10.30	0.752
20	10.70	0.608
21	10.75	0.752
22	12.10	0.768
23	11.55	0.752
24	11.25	0.768
25	10.35	0.560
26	10.45	0.560
27	10.45	0.560
28	10.45	0.560

ตารางผนวกที่ ข1(ต่อ)

ตัวอย่าง	SSC (°Brix)	Total Titratable Acidity (%)
29	10.70	0.656
30	10.75	0.640
31	11.05	0.704
32	10.60	0.656
33	12.45	0.880
34	12.35	0.800
35	12.20	0.864
36	12.25	0.848
37	9.950	0.736
38	10.10	0.752
39	9.65	0.720
40	11.80	0.832
41	11.85	0.880
42	12.80	0.752
43	12.20	0.816
44	12.25	0.816
45	11.95	0.848
46	11.05	0.896
47	10.75	0.832
48	10.85	0.832
49	10.25	0.768
50	9.95	0.720
51	10.20	0.784
52	10.75	0.768
53	10.75	0.720
54	10.90	0.768
55	10.85	0.768
56	11.15	0.912

ตารางผนวกที่ ข1(ต่อ)

ตัวอย่าง	SSC (°Brix)	Total Titratable Acidity (%)
57	11.10	0.880
58	9.85	0.784
59	9.95	0.704
60	9.85	0.784
61	9.95	0.768
62	11.50	0.928
63	11.85	0.864
64	11.85	0.864
65	10.40	0.688
66	10.35	0.688
67	10.15	0.720
68	10.60	0.656
69	12.35	0.896
70	12.10	0.896
71	12.75	0.912
72	12.90	0.896
73	12.85	0.832
74	12.55	0.912
75	10.35	0.832
76	10.40	0.816
77	10.55	0.656
78	10.35	0.784
79	12.85	0.816
80	13.40	0.768
81	12.65	0.864
82	12.95	0.864
83	11.70	0.896
84	12.95	0.800

ตารางผนวกที่ ข1(ต่อ)

ตัวอย่าง	SSC (°Brix)	Total Titratable Acidity (%)
85	12.90	0.768
86	12.15	0.800
87	12.00	0.896
88	12.05	0.896
89	11.80	0.832
90	11.80	0.800
91	12.15	0.832
92	11.00	0.896
93	11.05	0.864
94	10.00	0.864
95	9.95	0.576
96	9.85	0.576
97	9.70	0.576
98	9.70	0.544
99	11.60	0.640
100	11.00	0.576
101	11.60	0.544
102	11.30	0.608
103	11.35	0.704
104	11.70	0.640
105	11.50	0.672
106	10.80	0.704
107	11.90	0.768
108	12.10	0.864
109	11.85	0.864
110	12.30	0.768
111	11.35	0.608
112	11.65	0.608

ตารางผนวกที่ ข1(ต่อ)

ตัวอย่าง	SSC (°Brix)	Total Titratable Acidity (%)
113	11.10	0.640
114	12.00	0.832
115	10.35	0.736
116	12.95	0.704
117	12.40	0.672
118	12.45	0.672
119	12.25	0.608
120	11.50	0.704
121	11.50	0.608
122	11.25	0.544
123	11.45	0.608
124	10.85	0.960
125	11.00	0.896
126	10.65	0.928
127	11.05	1.024
128	12.45	0.768
129	12.45	0.768
130	12.1	0.736
131	12.45	0.736
132	11.95	0.64
133	10.85	0.736
134	10.8	0.8
135	10.45	0.736
136	10.25	0.736
137	13.05	0.896
138	13.10	0.800
139	13.25	0.992
140	13.35	1.024

ตารางผนวกที่ ข1(ต่อ)

ตัวอย่าง	SSC (°Brix)	Total Titratable Acidity (%)
141	12.00	0.832
142	11.65	0.928
143	11.60	0.896
144	11.65	0.800
145	10.10	0.864
146	10.25	0.832
147	10.15	0.928
148	10.25	0.896
149	11.70	0.864
150	12.15	0.672
151	12.30	0.608
152	12.15	0.576
153	11.85	0.544
154	12.25	0.736
155	12.15	0.800
156	11.85	0.736
157	12.15	0.768
158	12.25	0.928
159	12.25	0.896
160	12.55	0.928
161	12.15	0.960
162	11.10	0.832
163	13.00	0.704
164	12.20	0.800
165	12.00	0.800
166	11.45	0.896
167	11.45	0.864
168	12.00	0.864

ตารางผนวกที่ ข1(ต่อ)

ตัวอย่าง	SSC (°Brix)	Total Titratable Acidity (%)
169	12.40	1.088
170	12.65	1.152
171	12.80	0.928
172	12.85	1.056
173	11.15	0.992
174	10.65	0.960
175	12.25	0.672
176	12.20	0.832
177	10.65	0.672
178	10.40	0.864
179	10.45	0.800
180	10.65	0.896
181	10.60	0.768
182	10.40	0.832
183	10.45	0.768
184	10.55	0.800

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายอาทิตย์ พวงสมบัติ
เกิดวันที่	2 มีนาคม 2523
สถานที่เกิด	อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เกษตรกลวิธาน) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วศ.ม. (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนสนับสนุน จากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยเทคโนโลยี หลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้ศูนย์นวัตกรรม เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว (2550) ได้รับทุนสนับสนุน จากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ตามโครงการเครือข่ายเชิงกลยุทธ์เพื่อการผลิตและ พัฒนาอาจารย์ใน สถาบัน อุดมศึกษาประจำปี พ.ศ. 2551 ในเครือข่ายที่ 6 เทคโนโลยีเพื่อ การเกษตร ก้าวหน้า