

## รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

## โครงการวิจัย (Project)

โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ.....2556

## ส่วนที่ 1 สรุปผลการดำเนินงานโครงการวิจัย (Project)

1.1 รหัส พ-ท(ด)85.56 ชื่อโครงการ การพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบความแก่ส้มโอโดยวิธีไม่ทำลาย.....  
.....เพื่อการเก็บเกี่ยวและการคัดแยก.....

1.2 ลักษณะโครงการ  เป็นโครงการวิจัยเดี่ยว  
 เป็นโครงการย่อยในชุดโครงการวิจัย (ระบุชื่อชุดโครงการวิจัย) .....

1.3 ชื่อหัวหน้าโครงการ รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล.....

1.4 หน่วยงานหลักรับผิดชอบ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

1.5 ประเภทโครงการ  โครงการวิจัย 3 สาขา;  เกษตรศาสตร์  วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  สังคมศาสตร์ฯ  
 โครงการวิจัยสถาบันเพื่อพัฒนาคุณภาพ  
 โครงการวิจัยและถ่ายทอดงานวิจัยสู่ประชาชน  
 โครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งด้านการวิจัย  
 โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาหน่วยปฏิบัติการวิจัยเชี่ยวชาญเฉพาะ (SRU)  
 โครงการวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มศักยภาพเชิงบูรณาการเพื่อการแข่งขันฯ  
 โครงการวิจัยพัฒนาร่วมภาครัฐและเอกชน

1.6 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ ..1 ปี ตั้งแต่ปีงบประมาณ 2556 ถึงปีงบประมาณ 2556.

1.7 สถานที่ดำเนินงานวิจัย/เก็บข้อมูล ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

1.8 งบประมาณรวมตลอดโครงการ.....120,000.....บาท ประกอบด้วย

ปีงบประมาณ.....2556.....ได้รับ.....120,000.....บาท ปีงบประมาณ.....ได้รับ.....บาท

1.9 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย .....

1. เพื่อให้ได้สมการทำนายความแก่ผลส้มโอที่เก็บเกี่ยวแล้วจากข้อมูลลักษณะผิวเปลือกและสมบัติทางกายภาพที่วัดแบบไม่ทำลายสำหรับการคัดแยกคุณภาพ

2. เพื่อให้ได้สมการทำนายความแก่ผลส้มโอโดยการวัดข้อมูลลักษณะผิวเปลือกและสมบัติทางกายภาพที่วัดแบบไม่ทำลายจากผลบนต้นเพื่อการเก็บเกี่ยว

1.10 เป้าหมายผลงานวิจัยตลอดโครงการ

ปีที่ เดือนที่ ผลงานวิจัยที่คาดว่าจะได้

1. 1-6 ขั้นตอนและวิธีการที่เหมาะสมในการวัดภาพลักษณะผิวส้มโอและค่าพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแทนภาพผิวส้มโอ และการวัดสมบัติเชิงเสียงและเชิงแสง.....

7-12 สมการทำนายความแก่ผลส้มโอที่สร้างจากข้อมูลลักษณะผิวเปลือก สมบัติเชิงเสียงและสมบัติเชิงแสง ที่สามารถวัดแบบไม่ทำลายจากผลบนต้นเพื่อการเก็บเกี่ยวและการคัดแยกคุณภาพ.....

1.11 สรุปการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์ (ตามแผน)	เป้าหมาย / ผลที่คาดหวัง (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน (ปฏิบัติได้จริง)
1. ตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2... วัดเก็บข้อมูลขนาด น้ำหนัก ภาพ ลักษณะผิวสัมผัส สมบัติเชิงเสียงและเชิง แสง 3. วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างโมเดล ถดถอยและโมเดลจำแนกกลุ่มเพื่อ ทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และการทำนายกลุ่มตามความแก่	1 ได้ข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2... ได้ข้อมูลขนาด น้ำหนัก ภาพลักษณะ ผิวสัมผัส สมบัติเชิงเสียงและเชิงแสงที่ อายุเก็บเกี่ยวต่างๆ กัน 3. ได้โมเดลทำนายปริมาณของแข็งที่ ละลายน้ำได้และโมเดลจำแนกกลุ่มสัม โอบตามความแก่	1... เป็นไปตามแผน 2... เป็นไปตามแผน..... 3. เป็นไปตามแผน

1.12 สรุปผลการดำเนินงานตามวัตถุประสงค์

- บรรลุ.....
- บรรลุบางส่วน (ร้อยละ.....) เหตุผล.....
- ไม่บรรลุ เหตุผล.....

1.13 ผลผลิต/ สิ่งที่ได้จากการวิจัย (Outputs) (โปรดระบุรายละเอียด)

- องค์ความรู้/ข้อมูลพื้นฐานความรู้ใหม่เกี่ยวกับความมั่นคงของเปลือกส้มและความแตกต่างสีต่อมน้ำมัน  
และสีเปลือกที่เป็นตัวแปรไม่ทำลาย ซึ่งสัมพันธ์กับความแก่ของส้มโอบ
- สายพันธุ์พืช/สัตว์/จุลินทรีย์.....
- ผลิตภัณฑ์.....
- สิ่งประดิษฐ์.....
- เทคโนโลยี/นวัตกรรม.....
- ฐานข้อมูล/ซอฟต์แวร์.....
- คู่มือ.....
- วิดีทัศน์.....
- การสร้างนักวิจัย/สนับสนุนนิสิตปริญญาตรี..... คน ปริญญาโท..... คน ปริญญาเอก 1 คน
- สนับสนุนการศึกษาปัญหาพิเศษ..... เรื่อง (ระบุ)..... วิทยานิพนธ์ 1..... เรื่อง (ระบุ).....  
วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกเรื่อง การพัฒนาเทคนิคการวัดความแก่ส้มโอบแบบไม่ทำลายผล
- อื่นๆ (ระบุ).....

1.14 ผลลัพธ์/ผลสำเร็จที่ได้/หรือคาดว่าจะได้จากการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ (Outcomes)

- (1) เป้าหมายการนำไปใช้ประโยชน์ (ระบุกลุ่มเป้าหมายของงานวิจัยเชิงปริมาณ/คุณภาพ)
- ด้านการศึกษา/เสริมการเรียนการสอน.....
  - ด้านการเกษตร.....
  - ด้านอุตสาหกรรม.....
  - ด้านทรัพยากรธรรมชาติ/สิ่งแวดล้อม.....
  - ด้านคุณภาพชีวิต สุขภาพอนามัย.....
  - ด้านเศรษฐกิจ.....
  - ด้านสังคม.....
  - ด้านการทำนุบำรุงศิลป ศาสนา วัฒนธรรม.....
  - ด้านการถ่ายทอดเทคโนโลยี/ฝึกอบรมแก่กลุ่มเป้าหมาย.....

- เสนอภาครัฐ เพื่อใช้กำหนดแผน/นโยบาย ฯลฯ .....
  - นำความรู้ไปวิจัย/พัฒนาขั้นต่อไป...ข้อมูลที่ได้เป็นพื้นฐานสำหรับทำงานวิจัยต่อไปเพื่อนำไปสู่การพัฒนาเครื่องมือวัดความแก่สัมพันธ์กับการเก็บเกี่ยว .....
  - ก่อให้เกิดความร่วมมือระหว่างหน่วยงาน/การสร้างเครือข่าย .....
  - อื่นๆ (ระบุ).....
- (2) สรุปผลการนำผลการวิจัยไปเผยแพร่ / ถ่ายทอด ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดโครงการ (ระบุรายละเอียด อยู่ระหว่างดำเนินการส่งเสริม/ตีพิมพ์แล้วในรูปแบบเอกสารอ้างอิงและแนบสำเนาเป็นภาคผนวกของรายงาน)
- ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการต่างประเทศ..... เรื่อง (ระบุ).....
  - ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ..... เรื่อง (ระบุ).....
  - นำเสนอในการประชุม/สัมมนา ต่างประเทศ..... เรื่อง (ระบุ).....
  - นำเสนอในการประชุม/สัมมนา ในประเทศ..... เรื่อง (ระบุ).....
  - นำเสนอทางวิทยุ/โทรทัศน์/Website..... เรื่อง/ครั้ง (ระบุ).....
  - นำเสนอทางนิทรรศการ ..... เรื่อง/ครั้ง (ระบุ).....
  - บทความ/เอกสารสิ่งพิมพ์/วีดิทัศน์..... เรื่อง/ครั้ง (ระบุ).....
  - ถ่ายทอด/ฝึกอบรมแก่เกษตรกร/ผู้สนใจ..... เรื่อง/ครั้ง (ระบุ).....
  - ถ่ายทอดสู่ภาคเอกชน/อุตสาหกรรม/ผู้ประกอบการ (ประโยชน์เชิงพาณิชย์)..... เรื่อง/ครั้ง (ระบุ).....
  - ภาครัฐนำไปใช้กำหนดแผน/นโยบาย ฯลฯ (ระบุ).....
  - มีผู้นำผลงานวิจัยไปอ้างอิง (ระบุ).....
  - อื่นๆ (ระบุ) อยู่ระหว่างการเขียนบทความเพื่อส่งลงตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ

International Journal of Food Properties

- 1.15 การยื่นจด  สิทธิบัตร  อนุสิทธิบัตร  ลิขสิทธิ์
- มีศักยภาพที่จะยื่นจด (ระบุ).....  ยื่นจดแล้ว เมื่อ.....
- 1.16 ผลกระทบ (Impact) ที่เกิดจากการนำผลการวิจัยไปใช้ (ระบุว่าก่อให้เกิดผลกระทบอย่างไร)
- ด้านความมั่นคง อาทิ การเมืองการปกครอง กฎหมาย การต่างประเทศ โครงสร้างพื้นฐาน และบริการโทรคมนาคม ฯลฯ (ระบุ).....
  - ด้านการเศรษฐกิจ อาทิ การพาณิชย์กรรม การเกษตรกรรม การอุตสาหกรรม การท่องเที่ยว วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พลังงาน ฯลฯ (ระบุ).....ทำให้เกิดการพัฒนาคุณภาพของส้มโอสำหรับส่งออก.....
  - ด้านคุณภาพชีวิตและสังคม ศักยภาพของคนและการศึกษา การแพทย์และสาธารณสุข หลักประกันความมั่นคง สวัสดิการสังคม วัฒนธรรม จริยธรรมและค่านิยม ฯลฯ (ระบุ).....
  - ด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม การบริการจัดการการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์ การป้องกันการทำลาย ลดการสูญเสีย การฟื้นฟูทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม ฯลฯ
  - อื่นๆ (ระบุ).....
- 1.17 ผลการดำเนินงานวิจัยสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ชาติ ในด้าน
- ยุทธศาสตร์การจัดการความยากจน
  - ยุทธศาสตร์การพัฒนาคนและสังคมที่มีคุณภาพ
  - ยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจให้สมดุล และแข่งขันได้
  - ยุทธศาสตร์การบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
  - ยุทธศาสตร์การต่างประเทศและเศรษฐกิจระหว่างประเทศ

- ยุทธศาสตร์การพัฒนากฎหมายและส่งเสริมการบริหารกิจการบ้านเมืองที่ดี
- ยุทธศาสตร์การส่งเสริมประชาธิปไตยและกระบวนการประชาสังคม
- ยุทธศาสตร์การรักษาความมั่นคงของรัฐ
- ยุทธศาสตร์การรองรับการเปลี่ยนแปลงและพลวัตโลก
- อื่นๆ โปรดระบุ.....

1.18 ปัญหา อุปสรรค ในการดำเนินงานวิจัยและแนวทางแก้ไข.....ไม่มี

1.19 งานที่จะทำต่อไป/คำชี้แจงเพิ่มเติม .....เก็บข้อมูลและวิเคราะห์สร้างโมเดลสำหรับส้อมโอบในฤดูกาลใหม่ โดยรวมข้อมูลทั้ง 2 ฤดูกาลและสร้างโมเดลรวม เพื่อให้โมเดลมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น.....

1.20 ได้แนบ “รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ของโครงการ (Project)” ตามหัวข้อ ในส่วนที่ 2 (หน้าถัดไป) มาด้วยแล้ว

ลงชื่อ.....*อนุพันธ์*.....หัวหน้าโครงการ  
 (.....นายอนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล.....)

.....16...../กุมภาพันธ์ / 2556..วัน/เดือน/ปี ที่รายงาน

## ส่วนที่ 2

รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์  
โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ.....2556.....

โครงการวิจัยรหัส พ-ท(ค)85.56

การศึกษาด้านเทคนิคการวัดความแก่ส้มโอบนไม่ทำลายเพื่อการเก็บเกี่ยวและการคัดแยก

Investigation of non-destructive evaluating technique of pomelo maturity for harvest and  
classification

(1)อนุปันท์ เทอดวงศ์วรกุล, (2)จิรวุฑฒ หงษ์เวียงจันทร์

(1)Anupun Terdwongworakul, (2)Jeerayut

Hongwiangjan

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการวัดความแก่ส้มโอบนไม่ทำลายด้วยสมบัติเชิงเสียงที่ได้จากการเคาะ สมบัติเชิงแสงที่ได้จากการวัดสี และตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับผิวเปลือกจากภาพถ่ายผิวเปลือกส้ม โดยใช้ส้มโอบที่มีอายุหลังดอกบาน 5.5, 6.0, 6.5 และ 7.0 เดือน ตัวแปรบนไม่ทำลายทั้งหมดนำมาสร้างโมเดลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพด้วยเทคนิค partial least squares regression และ discriminant analysis ตามลำดับ ในการพัฒนาโมเดลสำหรับทำนายค่าทางเคมีพบว่า ตัวแปรบนไม่ทำลายไม่สามารถใช้สร้างโมเดลเพื่อทำนายปริมาณกรดที่แม่นยำได้ อย่างไรก็ตาม สามารถใช้สร้างโมเดลที่ทำนายปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ ด้วยความแม่นยำปานกลาง ด้วยค่า correlation coefficient = 0.71 และค่า root mean square error of prediction = 0.90 °Brix ตัวแปรที่มีสัมประสิทธิ์ถดถอยสูงสุดในแต่ละกลุ่มตัวแปรคือ  $a^*$ ,  $f_1^2 m^{2/3}$  ที่วัดบริเวณกลางผล (โดยที่  $f_1$  คือความถี่ธรรมชาติอันดับหนึ่งของเสียงเคาะ (Hz) และ  $m$  คือ น้ำหนักส้ม (kg)) และ ขนาดพื้นที่ต่อมน้ำมัน ซึ่งได้จากการใช้เทคนิค stepwise regression ในการเลือก

สำหรับโมเดลจำแนกกลุ่มนั้น ตัวแปรบนไม่ทำลายสามารถใช้สร้างโมเดลที่จำแนกส้มโอบนออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ immature, early-mature และ late-mature ด้วยความแม่นยำรวม 89.4% ตัวแปรที่สำคัญในการจำแนกกลุ่มคือ  $f_2^2 m^{2/3}$  ที่วัดบริเวณกลางผล (โดยที่  $f_2$  คือ ความถี่ธรรมชาติอันดับที่สองของเสียงเคาะ) และความแตกต่างสีต่อมน้ำมันและสีผิวเปลือกในโทนสีน้ำเงิน

คำสำคัญ: ส้มโอบนไม่ทำลาย สมบัติเชิงเสียง สมบัติเชิงแสง การวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม

### Abstract

This research investigated maturity measurement of pomelo using acoustic properties obtained from an impact, optical properties from color measurement and variables related to peel surface from peel images. Pomelo samples were harvested at 5.5, 6.0, 6.5 and 7.0 months after blossom. All non-destructive variables were used to build both quantitative and qualitative models with partial least squares regression and discriminant analysis respectively. In the quantitative

model development, the results showed that the non-destructive variables could not be used to develop accurate model for predicting the titratable acidity. However, the non-destructive variables could be used to build a model to evaluate the soluble solids content with moderate accuracy providing the correlation coefficient = 0.71 and root mean square error of prediction = 0.90 °Brix. The predictive variables having the highest regression coefficients from each group of variables were  $a^*$ ,  $f_1^2 m^{2/3}$  obtained from the impact on the middle of the fruit (where  $f_1$  is the first order resonant frequency of the impact (Hz) and  $m$  is the fruit weight (kg)) and the oil gland area, which was selected by the stepwise regression.

As for classification model, the non-destructive variables were used to build the model for discriminating pomelo fruits into immature, early-mature and late-mature groups with accuracy of 89.4%. The important variables contributing to the classification were  $f_2^2 m^{2/3}$  from impact at the middle of the fruit (where  $f_2$  is the second order resonant frequency of the impact sound) and the color difference between the oil gland and the peel in blue color.

Key words: Pomelo, Non-destructive measurement, Acoustic properties, Optical properties, Discriminant analysis

---

(1)ภาควิชา วิศวกรรมเกษตร คณะ วิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

(1)Department of agricultural engineering, Faculty of engineering kamphaengsaen

(2)ภาควิชา วิศวกรรมเกษตร คณะ วิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

(2)Department of agricultural engineering, Faculty of engineering kamphaengsaen

## สารบัญ

	หน้า
สัญลักษณ์ย่อ	8
บทนำ	9
ตรวจเอกสาร	
ส้อมไอ	10
การประเมินความแก่ส้อมไอ	10
งานวิจัยการวัดคุณภาพผลไม้	11
วิธีวิจัย	
การเตรียมตัวอย่าง	14
การวัดสมบัติเชิงแสง สมบัติเชิงเสียงและลักษณะผิวส้อมไอด้วยวิธีแบบไม่ทำลาย และค่าทางเคมี	14
การวิเคราะห์ทางสถิติ	20
ผลและวิจารณ์	
การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี สมบัติเชิงแสง สมบัติเชิงเสียงและลักษณะผิวเปลือก	22
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปร	26
การสร้างโมเดลทำนายค่าทางเคมี	29
การสร้างโมเดลจำแนกกลุ่มความแก่ส้อมไอ	30
สรุป	34
เอกสารอ้างอิง	35

## สัญลักษณ์ย่อ

1. stf1p1 stiffness coefficient คำนวณจาก  $f_1$  จากการเคาะที่ระนาบ 1 (บริเวณหัว)  
 $f_1^2 m^{2/3} (\text{Hz}^2 \text{kg}^{2/3})$
2. stf2p2 stiffness coefficient คำนวณจาก  $f_2$  จากการเคาะที่ระนาบ 2 (บริเวณกลางผล)
3. stf3p3 stiffness coefficient คำนวณจาก  $f_3$  จากการเคาะที่ระนาบ 3 (บริเวณก้นผล)
4. OGS Oil gland size (ขนาดต่อมน้ำมัน,  $\text{mm}^2$ )
5. OGD Oil gland density (ความหนาแน่นต่อมน้ำมัน, จำนวนต่อม/ $\text{cm}^2$ )

## บทนำ

ส้มโอ (*Citrus maxima* Merr.) เป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย และเป็นผลไม้ที่มีรสชาติเป็นที่นิยมของผู้บริโภคทั้งชาวไทยและชาวต่างประเทศ อีกทั้งยังมีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีสรรพคุณเป็นยาละลายเสมหะ แก้ไอ บำรุงกระเพาะ ขับลมในกระเพาะอาหาร ช่วยเจริญอาหารและช่วยย่อย เนื่องจากส้มโอมีเปลือกที่หนาทำให้สามารถเก็บรักษาได้นานและทนทานต่อการขนย้ายที่ดี และยังสามารถส่งไปจำหน่ายยังต่างประเทศ (ทั้งรูปแบบผลสดและแบบผลไม้ตัดแต่ง) ได้แก่ ฮองกง จีน แคนาดา ญี่ปุ่น และสิงคโปร์ ประเทศไทยมีการปลูกส้มโออย่างแพร่หลายและมีการขยายพื้นที่ปลูกส้มโอมากขึ้นทุกปี รวมถึงพื้นที่ของจังหวัดสมุทรสงคราม สมุทรสาคร ชุมพร ราชบุรี และนครปฐม ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งผลิตที่สำคัญของประเทศ เนื่องจากส้มโอสามารถปลูกได้ตลอดทั้งปีโดยเฉพาะฤดูฝน และสามารถให้ผลผลิตได้ตลอดทั้งปี ส้มโอจึงเป็นที่นิยมปลูกของชาวสวน และเป็นที่รู้จักกันมากในผู้บริโภคทั้งภายในและต่างประเทศ โดยกระทรวงเกษตรและสหกรณ์มีนโยบายในการพัฒนาและเพิ่มศักยภาพของส้มโอในตลาดโลก เพื่อให้ประเทศไทยเป็นผู้นำการผลิตและการตลาดส้มโอคุณภาพดีในตลาดโลก

คุณภาพภายในของส้มโอนับเป็นสิ่งสำคัญ ผลส้มโอที่มีคุณภาพจะช่วยส่งเสริมการตลาดและเพิ่มมูลค่าในทางตรงกันข้ามหากส้มโอไม่ได้คุณภาพออกสู่ตลาดและถึงมือผู้บริโภค เนื่องจากรสชาติที่ไม่ได้คุณภาพ (เปรี้ยว, แฉะ, จืด และหรือมีอาการข้าวสาร) ทำให้ผู้บริโภคปฏิเสธการซื้อในครั้งต่อไปนับเป็นการเสียกลุ่มผู้บริโภค ในปัจจุบันการเก็บเกี่ยวผลส้มโอ เกษตรกรต้องอาศัยความชำนาญในการสังเกตสีผิว ต่อม น้ำมัน ขนาดผลและการนับจำนวนวันหลังดอกบาน ซึ่งไม่แน่นอนมากนักที่จะได้ผลส้มโอที่มีคุณภาพ เพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันของสินค้าเกษตรเพื่อให้มีคุณภาพมาตรฐาน และศักยภาพทางการตลาดสูง รวมถึงมีโอกาสนในการเพิ่มมูลค่าและเพิ่มศักยภาพการแข่งขันของประเทศ เทคโนโลยีในการผลิตและวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวจึงมีความต้องการในการพัฒนา

งานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาลักษณะผิวของเปลือกเพื่อหาตำแหน่งบนผิวเปลือกที่แสดงค่าความสูงแก่ที่เหมาะสม เนื่องจากต่อมน้ำมันที่สามารถแสดงถึงระดับความสูงแก่ของส้มโอได้นั้นมีความแปรปรวนตามตำแหน่งบนผิวของส้มโอ อาทิเช่น ขนาดต่อมน้ำมันที่กลางผลนั้นมีขนาดไม่เท่ากับที่บริเวณก้นผล และเนื่องจากผิวของผลส้มโอมีลักษณะเป็นผิวโค้งนูน การถ่ายภาพแล้วหาระยะห่างและความหนาแน่นของต่อมน้ำมันมีความคลาดเคลื่อนจากระยะจริง ซึ่งระยะที่วัดได้จากภาพจะมีระยะที่น้อยกว่าระยะจริงมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับขนาดรัศมีความโค้งของผลส้มโอว่ามากเพียงใด เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการประเมินความสูงแก่ของส้มโออย่างถูกต้องและแม่นยำ ตำแหน่งของการถ่ายภาพเพื่อการวิเคราะห์และระยะห่างระหว่างต่อมน้ำมันที่แท้จริงจึงมีความจำเป็นอย่างมากในการบ่งชี้ระดับความสูงแก่ของผลส้มโอ

จากการตรวจสอบเอกสารยังไม่มีการศึกษาการใช้เทคนิค Multivariate data analysis ในการสร้างโมเดลเพื่อประเมินคุณภาพของส้มโอจากข้อมูลภาพผิวเปลือกและสมบัติเชิงเสียง ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการวัดแบบไม่ทำลาย ซึ่งผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่าความแตกต่างระหว่างสีของต่อมน้ำมันและสีผิวส้มโอ รวมทั้งขนาดและความหนาแน่นของต่อมน้ำมันที่แสดงบนผิวเปลือก รวมทั้งสมบัติเชิงเสียง มีความสัมพันธ์กับระดับความสูงแก่ ในงานวิจัยครั้งนี้จึงสนใจศึกษาความแตกต่างสีของต่อมน้ำมันและสีเปลือก ขนาดต่อมน้ำมัน และความหนาแน่นต่อมน้ำมันและสมบัติเชิงเสียง เพื่อใช้เป็นตัวแปรทำนายค่ามาตรฐานสำหรับความแก่หรือคุณภาพภายในของผลส้มโอในการวิเคราะห์สร้างโมเดลทำนายความสูงแก่ด้วยเทคนิค Multivariate data analysis

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างโมเดลทำนายปริมาณของแข็งละลายน้ำได้และโมเดลจำแนกกลุ่มส้มโอตามความแก่จากข้อมูลตัวแปรสมบัติเชิงเสียง สมบัติเชิงแสง และลักษณะผิวเปลือกจากภาพถ่ายซึ่งเป็นการวัดแบบไม่ทำลายผล

## ตรวจเอกสาร

### ส้มโอ

ส้มโอ (*Citrus maxima* Merr.) เป็นพืชที่มีลักษณะที่เป็นต้นไม้ทรงพุ่มมีขนาดปานกลาง โดยทั่วไปทรงพุ่มจะสูง 5-8 เมตร จะแตกกิ่งก้านที่บริเวณยอดของลำต้น ลำต้นมีสีน้ำตาลและปกคลุมด้วยหนามเล็กๆ ลักษณะใบเป็นแบบใบประกอบ แผ่นใบมี 2 ส่วนโดย ส่วนบนมีลักษณะเป็นรูปกลมปลายเว้า ส่วนล่างเป็นก้านใบที่แผ่ขยายออกแต่มีขนาดเล็กกว่าส่วนบน ดอกมีลักษณะเป็นช่อสั้น หรือดอกเดี่ยว งามใบดอกมีสีขาวอมเขียว มี 5 กลีบ กลางดอกมีเกสร 20 – 25 เกสร (วรรณวาท, 2545)

### การประเมินความสุกแก่ของส้มโอ

ในปัจจุบันเกษตรกรชาวสวนส้มโอ และพ่อค้า แม่ค้าส้มโอ ประเมินความสุกแก่ (Maturity) ของส้มโอ ด้วยการพิจารณาลักษณะของส้มโอจากภายนอก ซึ่งลักษณะของส้มโอที่มีความสุกแก่พอเหมาะและให้รสชาติดีสามารถพิจารณาได้จากสีของเปลือกส้มโอซึ่งจะมีลักษณะเป็นสีเขียวอ่อนหรือสีเหลือง ผิวผลมีเนื้อนวล ต่อมน้ำมันรอบจุดสีน้ำตาลที่บริเวณก้นผลจะห่าง สีของเปลือกรอบจุดสีน้ำตาลจะเป็นสีเหลือง ผิวก้นผลไม่เรียบ และนิ่ม ซึ่งล้วนเป็นสิ่งที่วิเคราะห์จากการมองเห็นและการสัมผัสทั้งสิ้น ไม่มีมาตรฐานแน่นอนที่จะใช้ชี้วัดว่าส้มโอนั้นมีความสุกแก่พอเหมาะแล้วหรือไม่ เนื่องจากการพิจารณาใช้ความรู้สึกของผู้พิจารณาเป็นหลัก ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้พิจารณาด้วย

วิธีการตรวจวัดความสุกแก่ของผลส้มโอจากอดีตจนถึงปัจจุบันสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. การนับอายุของผล จะเริ่มนับตั้งแต่วันหลังดอกบานจนกระทั่งผลแก่ ซึ่งการนับอายุผลในกรณีที่มีจำนวนมากจะกระทำไม่ได้สะดวกและถ้าไม่มีการบันทึกอาจจะลืมหรือสับสนได้ (มงคล, 2536; วิเศษ, 2540)

2. การพิจารณาจากลักษณะผิวของเปลือก สีผิวของเปลือกเมื่อส้มโอแก่จะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวยอ่อนหรือสีเหลือง ผิวของผลจะมีลักษณะเป็นเนื้อนวล ต่อมน้ำมันรอบจุดสีน้ำตาลที่บริเวณก้นผลจะเริ่มมีระยะห่าง สีของเปลือกรอบจุดสีน้ำตาลจะเป็นสีเหลือง ผิวก้นผลจะนิ่มและไม่เรียบ อย่างไรก็ตามการพิจารณาดังกล่าวยังไม่มีมาตรฐานที่แน่นอนในการนำมาใช้ระบุว่าส้มโอนั้นมีความสุกแก่พอเหมาะแล้วหรือไม่ เนื่องจากการพิจารณาในลักษณะนี้จะขึ้นอยู่กับความรู้สึกของผู้พิจารณาเป็นหลัก และขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้พิจารณาด้วย (วรรณวาท, 2545)

3. การวัดปริมาณกรดด้วยการไตเตรท (Titratable Acidity, TA) โดยคั้นน้ำจากผลส้มและนำมาไตเตรทกับด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นการวัดค่าทางเคมีภายในผลซึ่งเป็นการวัดความสุกแก่แบบทำลายผลไม้ม ใช้ในกรณีที่ต้องการค่าอ้างอิงสำหรับยืนยันความสุกแก่ของผลจากการวัดด้วยวิธีอื่น (มงคล, 2536)

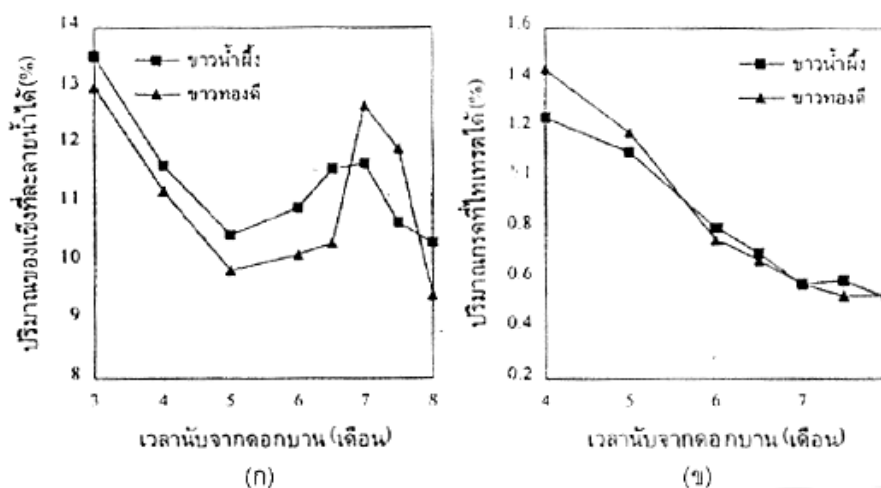
4. การวัดหาอัตราส่วนระหว่างน้ำตาลต่อกรด (TSS/TA) หรือ B/A Ratio โดยปริมาณน้ำตาลจะวัดด้วยเครื่อง Refractometer มีหน่วยเป็น องศาบริกซ์ ( $^{\circ}$ Brix) เพื่อวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total Soluble Solids, TSS) ซึ่งในน้ำส้มโอจะมีส่วนประกอบที่รวมถึงกรดอินทรีย์และปริมาณสารประกอบต่าง ๆ ที่ละลายน้ำได้ แต่ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาล เทคนิคนี้เป็นการทดสอบแบบทำลายเช่นกัน และนำมาใช้ในกรณีที่ต้องการยืนยันความสุกแก่ของผลจากการวัดด้วยวิธีอื่นเช่นเดียวกับวิธีที่ 3 จากการศึกษาผลไม้มหลายชนิดพบว่าอัตราส่วนของน้ำตาลต่อกรดจะมีความสัมพันธ์กับวัยหรือความแก่ของผลไม้มากกว่าการเปรียบเทียบโดยใช้ปริมาณกรด หรือปริมาณน้ำตาลเพียงอย่างเดียว (มงคล, 2536; จริงแท้, 2542)

ทั้ง 4 วิธีข้างต้นมีความไม่เหมาะสมในการบ่งชี้ความสุกแก่ของผลส้มโอเนื่องจากเป็นวิธีทำลายผลหรือเป็นวิธีที่ต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้พิจารณาจึงทำให้มีการศึกษาวิจัยเพื่อหาวิธีบ่งชี้ความสุกแก่ของผลส้มโอที่ไม่ขึ้นอยู่กับความรู้สึก ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และไม่ทำลายผลไม้ม

## งานวิจัยการวัดคุณภาพผลไม้

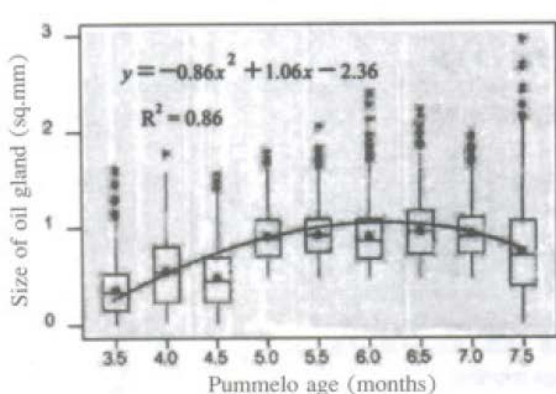
มีการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของส้มโอ 7 พันธุ์ ได้แก่ ขาวน้ำผึ้ง ทองดี ท่าช้อย ขาวหอม ขาวแป้น ขาวพวง และขาวแตงกวา (กลัฟพฤษ, 2534) ได้แก่ น้ำหนัก ความหนาเปลือก ขนาดผล ความถ่วงจำเพาะ จำนวนกลีบ และจำนวนต่อมน้ำมันต่อพื้นที่ ผลการวิจัยพบว่า ส้มโอพันธุ์ขาวทองดีมีจำนวนต่อมน้ำมันต่อพื้นที่มากที่สุด (237.1 ต่อตารางเซนติเมตร)

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดตามอายุผลของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งและพันธุ์ขาวทองดี พบว่าทั้งสองพันธุ์มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในลักษณะเดียวกันโดยปริมาณของแข็งละลายน้ำได้จะลดลงในช่วง 3-5 เดือนแรกหลังจากดอกบาน และเพิ่มขึ้นจนอายุ 7 เดือนต่อจากนั้นจึงมีแนวโน้มลดลงอีกครั้ง ส่วนปริมาณกรดของทั้งสองพันธุ์มีแนวโน้มการลดลงอย่างต่อเนื่องในลักษณะคล้ายกันทั้งสองพันธุ์ (จริงแท้, 2542) โดยจะลดลงในช่วงแรกด้วยอัตราที่สูงกว่าในช่วงหลัง

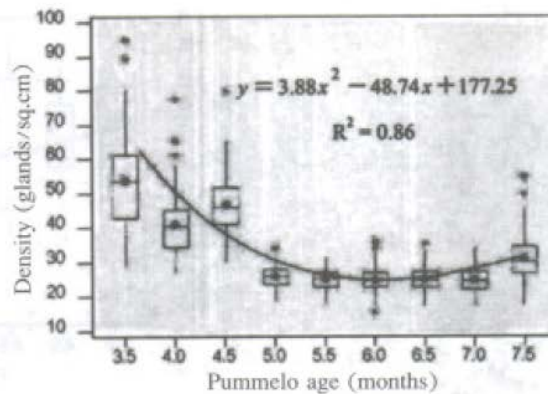


รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของ (ก) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และ (ข) ปริมาณกรดที่โตเตรทได้กับอายุของผล ส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งและขาวทองดี (จริงแท้, 2542)

กรกฎ และ นพดล (2545) เป็นนักวิจัยกลุ่มแรก que ศึกษาการวัดขนาดต่อมน้ำมันบนผิวส้มโอเป็นตัวเลขโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยเฉพาะ โดยในการศึกษาภาพถ่ายผิวส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่มีอายุตั้งแต่ 3.5 – 7.5 เดือนหลังดอกบาน พบว่า เมื่อส้มโอมีอายุผลเพิ่มขึ้นขนาดของต่อมน้ำมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงอายุประมาณ 6 เดือนต่อจากนั้นขนาดต่อมน้ำมันมีแนวโน้มลดลง ในส่วนความหนาแน่นเฉลี่ยของต่อมน้ำมันมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรกจนถึงอายุประมาณ 6 เดือนเช่นเดียวกันต่อจากนั้นความหนาแน่นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยกว่าอัตราการลดลง (รูปที่ 2) การเปลี่ยนแปลงขนาดต่อมน้ำมันและความหนาแน่นต่อมน้ำมันสามารถอธิบายได้ในรูปแบบสมการกำลังสอง



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของขนาดต่อมน้ำมัน (ก) และความหนาแน่นต่อมน้ำมัน (ข) ของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง (กรกฎ และ นพดล, 2545)

วิธีการตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในปัจจุบันมีหลากหลายวิธี สามารถจำแนกออกเป็นวิธีแบบทำลายและแบบไม่ทำลาย (Destructive and Nondestructive technique) วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายจะนิยมนำมาใช้มากกว่าวิธีแบบทำลาย เพราะเป็นการตรวจสอบโดยไม่ทำให้ตัวอย่างทดสอบเสียหายและยังสามารถนำตัวอย่างทดลองดังกล่าวไปจำหน่ายต่อได้ แต่วิธีแบบทำลายก็ยังคงถูกนำมาใช้เพื่อเป็นวิธีอ้างอิงหรือยืนยันความถูกต้องของวิธีการแบบไม่ทำลาย สำหรับส้มโอ มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการวัดคุณภาพภายในส้มโอแบบไม่ทำลาย เช่นเดียวกัน

ค่าสีและความเงาของผิวเปลือกก็ถูกนำมาใช้วัดเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผิวเปลือก ที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ ที่มากขึ้น ค่าสี  $L^*$  มีค่าสว่างเพิ่มขึ้น ค่า  $a^*$  จากค่าติดลบ (สีเขียว) เมื่อมีอายุเพิ่มขึ้นค่า  $a^*$  ติดลบน้อยลง (สีเขียวลดลง) ส่วนค่า  $b^*$  จะเพิ่มขึ้นกล่าวคือมีสีเหลืองเพิ่ม (เยาวรัตน์, 2545; จรูญพงศ์, 2552)

Acoustic response เป็นเทคนิคการตรวจสอบคุณภาพผลไม้แบบไม่ทำลายอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถใช้วัดความแน่นเนื้อได้โดยการกระตุ้นตัวอย่างทดลองให้สั่นอย่างอิสระแล้ววัดความถี่ในการสั่น (Natural frequency) Abbott and Massie (1993) สามารถประเมินค่าความแน่นเนื้อ (firmness) ที่วัดจากค่าแรงสูงสุด ในแอปเปิ้ลพันธุ์ Golden delicious ด้วยดัชนีเชิงเสียงที่คำนวณจากค่าความถี่เสียง (f) และมวล (m) ( $f^2 m^{2/3}$ ) ดัชนีเชิงเสียงนี้ได้มีการนำไปใช้วัดความแก่ของทุเรียน (Neamsorn and Terdwongworakul, 2004) โดยในงานวิจัยนี้ได้นำผลทุเรียน 130 ผล ใน 7 ช่วงอายุหลังดอกบานตั้งแต่ 105 วัน จนถึง 136 วัน ตั้งแต่อ่อนจนแก่ มาวัดความแข็งแรงก้านด้วยเครื่องมือบีบก้านที่สร้างขึ้นโดยเฉพาะ โดยบันทึกแรงกดตามแนวรัศมีกับระยะกด และวัดเสียงเคาะเพื่อนำมาหาความถี่ธรรมชาติ เนื้อทุเรียนถูกนำมาอบแห้งเพื่อหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อแห้งสำหรับใช้เป็นดัชนีอ้างอิงความแก่ของทุเรียน การวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาความสัมพันธ์พบว่า สำหรับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงก้านนั้น พื้นที่ใต้กราฟแรงกดกับระยะกด มีความสัมพันธ์ทางบวกกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อแห้งโดยมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์  $r = 0.808$  และความถี่ธรรมชาติเสียงเคาะมีความสัมพันธ์ทางลบกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อแห้งที่  $r = -0.448$  และจากการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณพบว่า พื้นที่ใต้กราฟแรงกดกับระยะกดและความถี่ธรรมชาติมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อแห้งที่  $r = 0.844$  และสัมประสิทธิ์ถดถอยพหุคูณ  $R^2 = 0.713$

สำหรับสัปเปอร์ดได้มีการประยุกต์ใช้สมบัติเชิงเสียงในการคัดแยกสัปเปอร์ดเป็นกลุ่มตามความแก่และคัดแยกสัปเปอร์ดไส้แกน (Pathaveerat et al., 2008) โดยในงานวิจัยได้ศึกษาการใช้สมบัติทางเคมีซึ่งเป็นการวัดแบบทำลายผล และการวัดทางกลแบบไม่ทำลายผล เพื่อใช้เป็นตัวแปรอิสระในการสร้างโมเดลคัดแยกสัปเปอร์ด

ผลการวิจัยพบว่า โมเดลที่สร้างด้วยเทคนิค discriminant analysis สามารถคัดแยกสับปะรดออกเป็นกลุ่มความแก่ 3 กลุ่มด้วยความแม่นยำ 77.0% อย่างไรก็ตามสำหรับโมเดลที่สร้างจากตัวแปรที่เป็นการวัดแบบไม่ทำลายผลได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ และ  $f^2m^{2/3}$  ให้ผลความแม่นยำเท่ากับ 82.8%

นอกจากนี้ยังได้มีการประยุกต์ใช้สมบัติเชิงเสียงในการวัดความแก่ของมะพร้าว (Terdwongworakul et al., 2009) โดยค่าอ้างอิงที่เป็นตัวแทนความแก่ของมะพร้าวได้แก่ ความหนาเนื้อมะพร้าว ซึ่งจากการใช้เทคนิค partial least squares regression ในการสร้างโมเดลทำนายความหนามะพร้าว โดยใช้ตัวแปรไม่ทำลายผลเป็นตัวแปรอิสระ พบว่า โมเดลที่สร้างจากสมบัติเชิงเสียงหรือความถี่ธรรมชาติของเสียงเคาะนั้นสามารถทำนายความหนาเนื้อมะพร้าวได้ โดยให้ค่า  $R^2 = 0.927$  ค่า standard error of prediction เท่ากับ 0.386 มิลลิเมตร

การเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อระหว่างเก็บรักษาของผลส้มแมนดาริน (Wang et al., 2006a) และความแน่นเนื้อของผลพีช (Wang et al., 2006b)

ในปัจจุบันเทคนิคการสร้างโมเดลแบบพหุคูณ (multivariate data regression) มีการนำมาประยุกต์สร้างโมเดลสำหรับทำนายสมบัติภายในของผลไม้อย่างแพร่หลาย โดยในกรณีของแอปเปิ้ลได้มีการนำค่าที่ประมวลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบตัว 6 ค่า มาสร้างโมเดลจำแนกกลุ่มแอปเปิ้ลตามพันธุ์ (Camps et al., 2005) ซึ่งให้ความแม่นยำในการจำแนกพันธุ์ 92% สำหรับผลพีชมีงานวิจัยที่ใช้เทคนิคการสร้างโมเดลพหุคูณจากข้อมูลเชิงเสียง และเชิงกล เพื่อทำนายค่าแรงสูงสุดในการวัดทดสอบแบบกด (Diezma-Iglesias et al., 2006) ผู้วิจัยพบว่า โมเดลที่สร้างจากข้อมูลทั้งสองกลุ่ม ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในการทำนายสูงกว่าโมเดลที่สร้างจากข้อมูลเพียงกลุ่มใดกลุ่มหนึ่ง ในกรณีของผลไม้เมืองร้อน มีการนำมาประยุกต์ใช้กับสับปะรด (Pathaveerat et al., 2008) โดยเป็นการสร้างโมเดลจำแนกกลุ่มสับปะรดตามความสุก ซึ่งมีความแม่นยำ 75.7% โดยข้อมูลที่ใช้ในการสร้างโมเดลเป็นข้อมูลจากสมบัติกายภาพ สมบัติทางเคมี รวมทั้งสมบัติเชิงเสียง

มีงานวิจัยที่ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการวัดเสียงเคาะหรือ acoustic response ในการประเมินคุณภาพภายในและแยกอายุความแก่ของส้มโอพันธุ์ขาวทองดี (Terdwongworakul et al., 2009) ผลจากงานวิจัยนี้ทำให้ได้โมเดลที่สร้างด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR) โดยใช้ข้อมูลจากตัวแปรไม่ทำลายจากความถี่ของสัญญาณเสียงเคาะ ค่าความเร่งต่อเวลาจากการทดสอบแบบกระแทก ความถ่วงจำเพาะ และขนาดผลสำหรับทำนายอัตราส่วนระหว่างค่าของแข็งละลายได้กับปริมาณกรดไตรเทรท โดยให้ความแม่นยำในการทำนายที่ค่า correlation coefficient เท่ากับ 0.786 และค่า root mean square error of prediction (RMSEP) เท่ากับ 2.728 °Brix/% และในการสร้างโมเดลสำหรับจำแนกกลุ่มส้มโอตามอายุเก็บเกี่ยว ด้วยเทคนิค discriminant analysis พบว่าสามารถจำแนกส้มโอเป็นกลุ่มอายุเก็บเกี่ยว 4 กลุ่มอายุ ได้ด้วยความแม่นยำ 80% โดยใช้ตัวแปรที่วัดแบบไม่ทำลายผลส้มโอ

## วิธีวิจัย

### 1. การเตรียมตัวอย่าง

ทำการติดป้ายพลาสติกเพื่อบันทึกอายุของผลส้มโอ โดยเริ่มนับอายุหลังจากวันดอกบาน (Day after full anthesis) ที่สวนคุณทิม ไทยทวี อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม โดยใช้ส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งจำนวน 4 ช่วงอายุ ระยะห่างระหว่างการเก็บผลตัวอย่างแต่ละอายุ คือ 2 สัปดาห์ ใช้จำนวนประมาณ 30 ตัวอย่างต่อหนึ่งอายุ โดยจะเก็บส้มโออายุแรกที่ 5.5 เดือน เป็นกลุ่มส้มโออ่อน (Immature) เก็บส้มโออายุสองที่ 6 เดือนเป็นกลุ่มส้มโอใกล้แก่ (Early mature) ส้มโออายุสามถูกเก็บที่ 6.5 เดือนเป็นกลุ่มส้มโอแก่ (Mature) และส้มโออายุสุดท้ายถูกเก็บที่ 7 เดือนเป็นกลุ่มส้มโอแก่เกิน (Over mature)

### 2. การวัดสมบัติเชิงแสง สมบัติเชิงเสียงและลักษณะผิวส้มโอด้วยวิธีแบบไม่ทำลาย และค่าทางเคมี

ส้มโอที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกันถูกใช้ทดลองเพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพภายในของส้มโอกับค่าตัวแปรที่ได้จากการวัดในแต่ละวิธีการวัด โดยวิธีการวัดที่ศึกษาถึงความสัมพันธ์ได้ในการประเมินความแก่ของส้มโอในการทดลองครั้งนี้ คือ เทคนิคการประมวลผลภาพผิวเปลือก และ เทคนิค Acoustic response

#### 2.1 การวัดและประมวลผลภาพผิวเปลือกส้มโอ

ขั้นตอนโดยรวมในการถ่ายและประมวลผลภาพที่ดังนี้

1. ทำการถ่ายภาพผิวส้มโอพร้อมสเกล (หน่วยมิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 3 ภายใต้สภาวะแสงควบคุม ด้วยกล้องดิจิทัล (Canon PowerShot A2200) โดยใช้โหมดถ่ายระยะใกล้ (Macro mode) ที่ความละเอียด 3072x2304 พิกเซล โดยวางผลส้มโอในกล่องสีดำขนาด 50x60x60 เซนติเมตร (กว้างxยาวxสูง) ผนังด้านในบุด้วยผ้ากำมะหยี่สีดำ สร้างขึ้นเพื่อลดแสงรบกวนจากสภาวะแวดล้อม ภายในกล่องบรรจุที่วางผลส้มโอเพื่อการถ่ายภาพและหลอดไฟ LED ขนาด 3.5W (5000K, 220V) จำนวน 4 หลอดเพื่อให้แสงสว่าง (รูปที่ 4) ถ่ายภาพที่ตำแหน่งจุดตัดของเส้นแบ่งแนวจากขั้วถึงก้นผล 4 แนวรอบผลห่างกัน 90 องศา ตำแหน่งถ่ายภาพจะอยู่บนแนวเส้นนี้แนวละ 3 ตำแหน่งภาพ และถ่ายภาพที่รอบกันผลอีก 1 ตำแหน่ง รวมภาพถ่ายในหนึ่งผลเป็นจำนวน 13 ภาพ



รูปที่ 3 ภาพถ่ายผิวส้มโอ

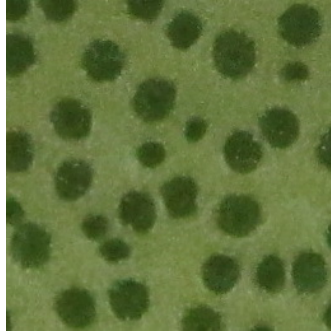


รูปที่ 4 หลอดไฟและแท่นวางส้อมโอ

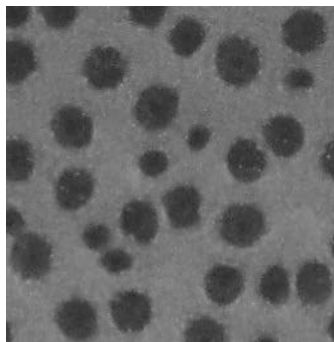
## 2. ในการประมวลผลมีรายละเอียดดังนี้

ภาพถ่ายผิวส้อมโอถูกนำมาตัดให้มีขนาด 1x1 ตารางเซนติเมตร (รูปที่ 5) โดยเทียบระยะตามแถบสเกล เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากความโค้งของผิวส้อมที่จะส่งผลต่อการวัดขนาดของต่อมน้ำมันที่ไม่ถูกต้อง (Wattanavichean and Aroonyadet, 2002) หลังจากนั้นนำภาพตัดดังกล่าวที่อยู่ในรูปแบบ RGB แปลงเป็นภาพสีเทา (Gray scale) (รูปที่ 6) แล้วทำการเพิ่มรายละเอียดของภาพ (Enhancement) ด้วยการใช้ตัวกรองโฮโมมอร์ฟิก (Homomorphic filter) เพื่อลดผลขององค์ประกอบการส่องสว่างของแสงภายนอกในภาพที่มากเกินไป (รูปที่ 7) นำภาพที่ได้มาเพิ่มรายละเอียดทำเป็นภาพแบบทวิภาค (Binary image, รูปที่ 8) โดยใช้ขีดเริ่มแบ่ง (Threshold) แบบ Minimum Cross Entropy เมื่อค่าความเข้มสีน้อยกว่าค่าขีดเริ่มแบ่งค่าสีของจุดสีนั้นจะถูกกำหนดให้เท่ากับ 0 (ดำ, ต่อม้ำมัน) แต่ถ้าค่าที่จุดสีนั้นมากกว่าขีดเริ่มแบ่งค่าจะถูกกำหนดให้เท่ากับ 1 (ขาว, พื้นผิวส้อมโอที่ไม่รวมต่อมน้ำมัน) ภายหลังจากทำภาพให้เป็นแบบทวิภาคแล้ว ใช้ตัวกรองแบบมัธยฐาน (Median filter) ลดค่าสิ่งรบกวน (Noise) ภายในภาพลง (รูปที่ 9) ต่อม้ำมันบางต่อมยังคงมีรู (สีขาวในรูปที่ 10 ที่มีวงกลมล้อมรอบ) อยู่ภายในอันเนื่องมาจากเศษผงหรือสิ่งแปลกปลอมเกาะติดต่อมน้ำมันอยู่ในขณะการถ่ายภาพ เศษผงและสิ่งแปลกปลอมเหล่านี้ยังคงเป็นสาเหตุให้เกิดจุดดำบนผิวส้อม ในการคำนวณหาพื้นที่และความหนาแน่นของต่อมน้ำมันนั้น จุดดังกล่าวโปรแกรมจะรวมว่าเป็นต่อมน้ำมันด้วย การเติมรูและการเอาจุดดังกล่าวออกจึงจำเป็นเพื่อให้การคำนวณหาพื้นที่และความหนาแน่นของต่อมน้ำมันมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น (รูปที่ 11) ต่อม้ำมันที่ติดกัน (Touching) จะถูกแยกออกโดยใช้ Morphological watershed (รูปที่ 12) การคำนวณหาขนาดเฉลี่ยของต่อมน้ำมันนั้นคำนวณจากผลรวมของพื้นที่ของต่อมน้ำมันที่ไม่อยู่ชิดขอบ (รูปที่ 13) หาร

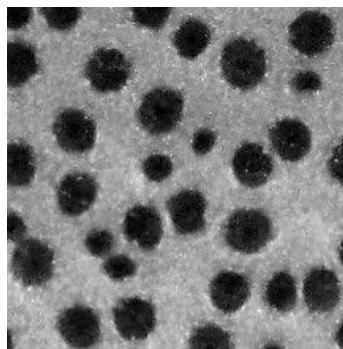
ด้วยจำนวนต่อมน้ำมันดังกล่าว ส่วนความหนาแน่นของต่อมน้ำมันคำนวณได้จากผลรวมของพื้นที่ต่อมน้ำมันทั้งหมด (รวมที่ขีดขอบด้วย)หารด้วยขนาดต่อมน้ำมันเฉลี่ยและหารด้วยขนาดของภาพ (1 ตารางเซนติเมตร)



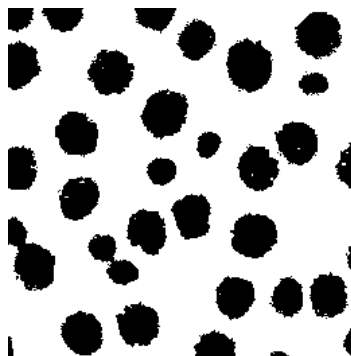
รูปที่ 5 ภาพตัดขนาด 1x1 ตารางเซนติเมตร



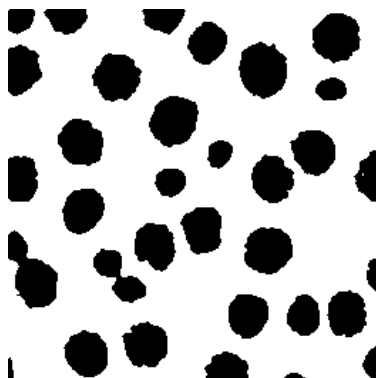
รูปที่ 6 ภาพ gray scale



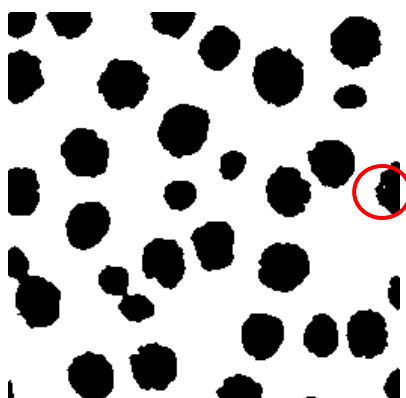
รูปที่ 7 ภาพผ่านการปรับปรุงด้วย Homomorphic filter



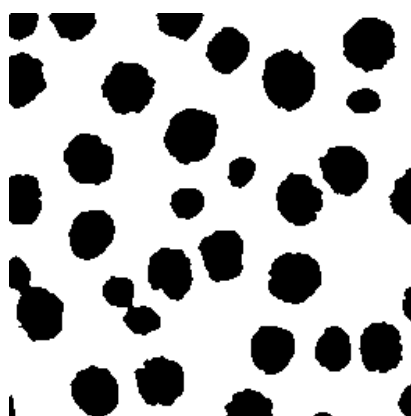
รูปที่ 8 ภาพทวิภาคโดยใช้ Minimum cross entropy



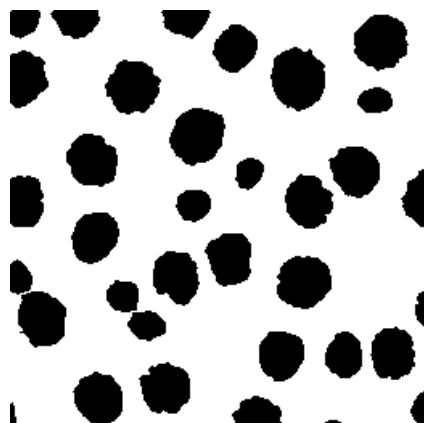
รูปที่ 9 กำจัด Noise ด้วย Median filter



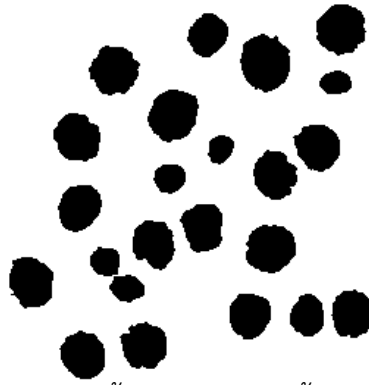
รูปที่ 10 แสดงช่องว่างภายในต่อมน้ำมัน



รูปที่ 11 เติมช่องว่างภายในต่อมน้ำมัน

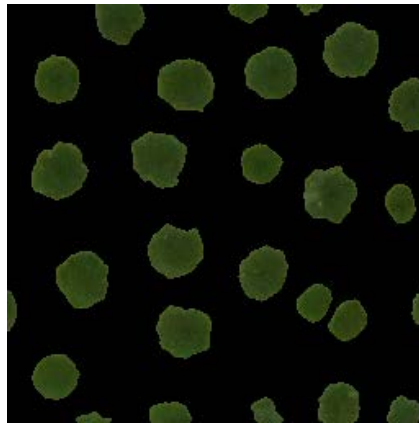


รูปที่ 12 แยกต่อมน้ำมันที่ชิดกันด้วย Watershed

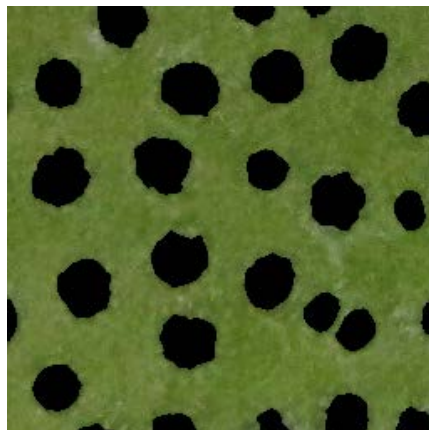


รูปที่ 13 ภาพแสดงต่อมน้ำมันไม่รวมต่อมน้ำมันที่บริเวณขอบภาพ

นอกจากขนาดและความหนาแน่นต่อมน้ำมันแล้ว ข้อมูลอีกค่าหนึ่งที่ได้จากภาพคือ ค่าความแตกต่างสีระหว่างต่อมน้ำมันกับสีผิวเปลือก โดยนำภาพผิวส้มเริ่มต้น (รูปที่ 5) มาลบด้วยภาพแบบทวิภาค (รูปที่ 12) เพื่อให้ได้ภาพที่มีสีเฉพาะต่อมน้ำมัน (รูปที่ 14) และภาพที่มีสีเฉพาะผิวเปลือกส้ม (รูปที่ 15) จากนั้นนำภาพทั้งสองมาแยกองค์ประกอบออกเป็นภาพสี R, G, และ B แล้วหาค่าเฉลี่ยของแต่ละภาพองค์ประกอบของทั้งภาพเฉพาะต่อมน้ำมันและภาพเฉพาะผิวเปลือกส้ม นำค่าเฉลี่ยในแต่ละองค์ประกอบภาพ (R, G, และ B) มาเปรียบเทียบความแตกต่างกัน (ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบภาพสีผิวเปลือกส้มลบด้วยค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบภาพสีต่อมน้ำมัน) เช่น การเปรียบเทียบภาพองค์ประกอบ R กระทำโดย นำค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบ R ของภาพผิวส้มลบด้วยค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบ R ของภาพต่อมน้ำมัน เป็นต้น จะได้ตัวแปร  $\Delta R$ ,  $\Delta G$  และ  $\Delta B$  เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 14 ภาพสี RGB เฉพาะต่อมน้ำมัน (ค่าสีผิวส้มโอเท่ากับ 0)



รูปที่ 15 ภาพสี RGB เฉพาะผิวส้มโอ (ค่าสีต่อมน้ำมันเท่ากับ 0)

## 2.2 การวัดสีจากสมบัติเชิงแสง

วัดค่าสีของผิวเปลือก โดยวัดจำนวน 12 จุด (4 จุดรอบระนาบ ที่ระนาบ 1/3, 1/2, และ 3/4 ของความสูงของผล) ด้วยเครื่อง Spectro-guide sphere gloss (CD-6834, BYK Gardner) ทำซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละจุด บันทึกค่า Gloss (ความเป็นมันเงาของผิวเปลือก),  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$

## 2.3 การวัดความถี่ธรรมชาติจากสมบัติเชิงเสียง

1. นำผลส้มโอมาเคาะเพื่อวัดเสียง 6 ตำแหน่ง คือ 4 ตำแหน่งรอบผลบนเส้นศูนย์สูตร (equatorial line) ตำแหน่งด้านบนและตำแหน่งก้นผล ทำ 3 ซ้ำในแต่ละตำแหน่ง
2. บันทึกเสียงด้วยไมโครโฟนที่ต่อเข้ากับ Sound card ของคอมพิวเตอร์ ใช้โปรแกรมที่พัฒนาด้วย Matlab ในการควบคุมอัตราการสุ่มเก็บข้อมูลที่ 8,000 Hz และคำนวณค่าความถี่ในสัญญาณเสียงจากการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform)
3. บันทึกค่าความถี่อันดับหนึ่ง สองและสาม ( $f_1$ ,  $f_2$  และ  $f_3$  ตามลำดับ) ของแต่ละสัญญาณเป็นความถี่ธรรมชาติ
4. ทำการหาคำนวณ stiffness coefficient ( $f^2 m^{2/3}$ ) จากค่าความถี่ ( $f$ ) แต่ละค่ากับน้ำหนัก ( $m$ ) ดังนั้นในส้มโอ 1 ผล จะได้ค่า stf1p1, stf2p1, stf3p1, stf1p2, stf2p2, stf3p2, stf1p3, stf2p3 และ stf3p3 โดย stf1p1 หมายถึงค่า  $f_1^2 m^{2/3}$  คำนวณจาก  $f_1$  ที่วัดจากบริเวณซั้ว (p1) โดย p2 และ p3 หมายถึงการวัดบริเวณกลางผลและก้นผล ตามลำดับ

## 2.4 การวัดสมบัติทางเคมี

นำตัวอย่างที่ผ่านการตรวจสอบด้วยเทคนิคแบบไม่ทำลายมาวิเคราะห์คุณภาพภายในด้วยวิธีมาตรฐาน โดยการวัดปริมาณของแข็งที่สามารถละลายน้ำได้ (Total Soluble Solids, TSS) ด้วยเครื่อง hand refractometer โดยมีหน่วยเป็นองศาบริกซ์ ( $^{\circ}$ Brix) และวัดปริมาณกรด (acidity) โดยวิธีไทเทรตซึ่งจะได้ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Titratable Acidity, TA)

### 2.4.1 การวัดปริมาณของแข็งที่สามารถละลายน้ำได้

1. ปอกเปลือกผลส้มโอทำการวัดปริมาณน้ำตาลในน้ำส้มโอจากทุกกลีบเว้นกลีบ โดยนำทั้งกลีบมาคั้นและกรองเพื่อเอาน้ำคั้น
2. นำน้ำคั้นมาวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยใช้เครื่อง Refractometer แบบดิจิตอล (ATAGO PR-32) อ่านค่าที่ได้และบันทึกผล ( $^{\circ}$ Brix)
3. ทำความสะอาดบริเวณที่หยดสาร
4. ทำซ้ำ 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย

### 2.4.2 การวัดปริมาณกรดในน้ำคั้น

1. นำน้ำคั้นจากขั้นตอนการวัดปริมาณของแข็งที่สามารถละลายน้ำได้ปริมาณ 6 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่จำนวน 3 ขวด ขวดละ 2 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นขวดละ 10 มิลลิลิตร

3. หยดฟีนอล์ฟทาลีน ความเข้มข้น 1% จำนวน 2 หยด
4. ทำการไตเตรทด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.1 N โดยหยดสารละลาย NaOH จนถึงจุดสิ้นสุด (End Point) คือจุดที่สีของน้ำส้มโอเริ่มเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน
5. บันทึกค่าปริมาณสาร NaOH ที่ใช้ แล้วนำมาคำนวณปริมาณกรดที่ไตเตรทได้เป็นเปอร์เซ็นต์ (citric acid equivalent)
6. ทำซ้ำ 3 ครั้งหาค่าเฉลี่ย

### 3. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

พารามิเตอร์จากการทดลองข้างต้นที่จะนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติได้แก่ สมบัติทางเคมี (TA และ TSS) เป็นตัวแปรตาม ค่าสี ( $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$ ) ความถี่ธรรมชาติในรูปแบบสัมประสิทธิ์ความแน่นเนื้อ (stiffness coefficient,  $st = f^2 m^{2/3}$ ) โดยใช้ความถี่ธรรมชาติที่อันดับความถี่ ( $f_1$ ,  $f_2$  และ  $f_3$ ) และระนาบต่างๆ (ใกล้ขั้วผล (p1) กลางผล (p2) และก้นผล (p3)) ทั้งหมด 9 พารามิเตอร์ ได้แก่  $stf1p1$ ,  $stf2p1$ ,  $stf2p1$ ,  $stf1p2$ ,  $stf2p2$ ,  $stf2p2$ ,  $stf1p3$ ,  $stf2p3$  และ  $stf3p3$  และ ตัวแปรลักษณะผิวเปลือกได้แก่ ขนาดพื้นที่ต่อมน้ำมัน (OGS: Oil gland size) ความหนาแน่นต่อมน้ำมัน (OGD: Oil gland density) และความแตกต่างสีโทนน้ำเงิน เขียวและแดง ระหว่างต่อมน้ำมันและสีผิวเปลือก ( $\Delta R$ ,  $\Delta G$  และ  $\Delta B$ )

#### 3.1 การสร้างโมเดลทำนายค่าทางเคมี

แบ่งตัวอย่างออกเป็น กลุ่มแคลิเบรชัน (calibration set) และกลุ่มทำนาย (prediction set) โดยตัวอย่างในกลุ่มทั้งสองจะต้องมีการกระจายตัวของค่าทางเคมีใกล้เคียงกัน สร้างโมเดลทำนายค่าทางเคมีโดยใช้ข้อมูลจากตัวอย่างในกลุ่มแคลิเบรชัน ด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR) (ซอฟต์แวร์ Unscrambler V. 9.8, CAMO) ซึ่งเป็นเทคนิคแบบเดียวกันกับการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ (multiple linear regression) แต่ป้องกันปัญหาการเกิด collinearity หรือปัญหาที่ตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันเองสูงซึ่งจะทำให้โมเดลไม่เสถียร โดยเทคนิค PLSR จะมีกระบวนการสร้างตัวแปรใหม่ที่เรียกว่า factor ซึ่งเป็นผลบวกของตัวแปรเดิมทุกตัวแปร จำนวนตัวแปรใหม่ที่สร้างขึ้นนี้จะมีกระบวนการเลือกที่ไม่ให้มีจำนวนมากเกินไปแต่มีความแปรปรวนในข้อมูลอย่างเหมาะสมที่จะใช้ทำนายปริมาณทางเคมี จากนั้นจึงนำ factor มาใช้แทนตัวแปรอิสระเดิมในการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ โดยในการเลือกจำนวน factor ที่เหมาะสมจะใช้เทคนิค full cross validation ซึ่งเป็นการทดสอบโมเดลที่มีจำนวน factor ต่างๆ กันโดยทำนายค่าทางเคมีในตัวอย่างที่ถูกกันออกมาจากกลุ่มแคลิเบรชัน ในขณะที่ตัวอย่างอื่นนำไปใช้สร้างโมเดล เมื่อได้โมเดลที่มีจำนวน factor ที่เหมาะสมแล้ว จึงนำมาใช้ทำนายค่าทางเคมีของตัวอย่างในกลุ่มทำนาย โดยประเมินความแม่นยำของโมเดลจากค่า correlation coefficient ( $r$ ) และค่า root mean square error of prediction (RMSEP) ซึ่งโมเดลที่เหมาะสมควรมีค่า  $r$  สูง และค่า RMSEP ต่ำ

โมเดลจะถูกสร้าง 3 โมเดลเพื่อใช้ทำนายค่า TSS, TA และ TSS/TA โดยใช้ตัวแปรที่วัดแบบไม่ทำลายเป็นตัวแปรอิสระ

### 3.2 การสร้างโมเดลจำแนกกลุ่ม

ในการสร้างโมเดลจำแนกกลุ่มเพื่อทำนายกลุ่มความแก่ของผลส้มโอ เริ่มต้นจะแบ่งกลุ่มตัวอย่างตามอายุความแก่เป็น 4 ระดับ ในแต่ละอายุจะแบ่งตัวอย่างเป็นกลุ่มแคลิเบรชันและกลุ่มทำนายในลักษณะเดียวกันกับข้อ 3.1 โดยอ้างอิงจากค่า TSS จากนั้นนำตัวอย่างของกลุ่มแคลิเบรชันในแต่ละกลุ่มอายุความแก่มารวมกันเป็นกลุ่มแคลิเบรชันจำแนกกลุ่ม และนำตัวอย่างของกลุ่มทำนายในแต่ละกลุ่มอายุความแก่มารวมกันเป็นกลุ่มทำนายจำแนกกลุ่ม

นำตัวอย่างในกลุ่มแคลิเบรชันจำแนกกลุ่มมาสร้างโมเดลจำแนกกลุ่ม เทคนิค discriminant analysis ด้วยซอฟต์แวร์ SPSS V. 9.0 ซึ่งเป็นเทคนิคที่คำนวณสัมประสิทธิ์สำหรับตัวแปรอิสระแต่ละตัวในโมเดล โดยทำให้ความแปรปรวนระหว่างกลุ่มมีมากกว่าความแปรปรวนภายในกลุ่ม โดยตัวแปรอิสระคือค่าที่ได้จากการวัดแบบทำลาย เมื่อได้โมเดลแล้วนำมาทำนายกลุ่มอายุความแก่ของตัวอย่างในกลุ่มทำนายจำแนกกลุ่ม และประเมินความแม่นยำของโมเดลจากเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการทำนายกลุ่มของตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง

### 3.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและหาความสัมพันธ์

เพื่อหาความสำคัญของตัวแปรอิสระแต่ละตัวในการทำนายกลุ่มความแก่ของส้มโอ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระทั้งหมดถูกนำมาทดสอบเปรียบเทียบด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) ในการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design) โดยปัจจัยคือ อายุความแก่ 4 ระดับ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

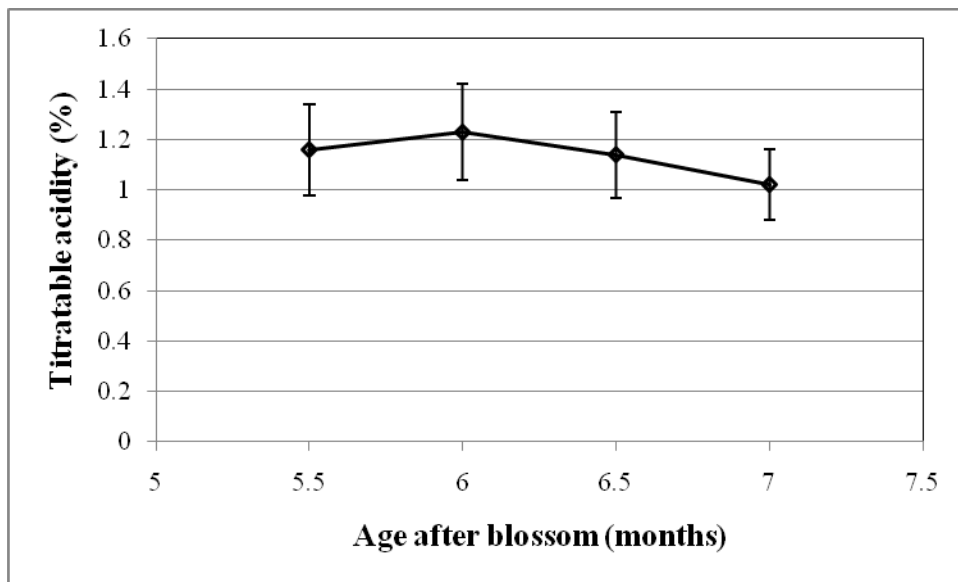
ตัวแปรทั้งหมดถูกนำมาวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (correlation analysis) เพื่อประเมินความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระซึ่งคือ ตัวแปรที่วัดแบบไม่ทำลาย กับตัวแปรตามหรือตัวแปรที่วัดค่าทางเคมี

## ผลและวิจารณ์

## 1. การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี สมบัติเชิงแสง สมบัติเชิงเสียงและลักษณะผิวเปลือก

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี สมบัติเชิงแสง สมบัติเชิงเสียงและลักษณะผิวเปลือกของส้มโอบตามอายุ หลังดอกบาน 4 ระดับ แสดงในตารางที่ 1 สมบัติที่ได้รับอิทธิพลจากอายุเก็บเกี่ยวมากที่สุด 5 อันดับแรกจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้แก่ ความแตกต่างสีเขียวระหว่างต่อมและผิวเปลือก ( $\Delta G$ ) ( $F = 43.34$ ),  $f_2^2 m^{2/3}$  ด้านกลางผล (stf2p2) ( $F = 40.08$ ),  $f_1^2 m^{2/3}$  ด้านกลางผล (stf2p2) ( $F = 38.47$ ), ความแตกต่างสีแดงระหว่างต่อมและผิวเปลือก ( $\Delta R$ ) ( $F = 38.11$ ) และ  $f_2^2 m^{2/3}$  ด้านกันผล (stf2p3) ( $F = 30.34$ ) ส่วนสมบัติที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากอายุเก็บเกี่ยวได้แก่ ค่าสี  $a^*$  หรือสีแดง-เขียว

สำหรับค่าปริมาณกรดที่ไตเตรทได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุได้ 6 เดือน ต่อจากนั้นจะลดลงเป็นลำดับจนถึงอายุ 7 เดือน ดังแสดงในรูปที่ 16 ผลการทดลองตั้งแต่อายุ 6 ถึง 7 เดือน สอดคล้องกับงานวิจัยของ จริงแท้ (2542) ซึ่งพบว่าปริมาณกรดที่ไตเตรทได้จะลดลงอย่างต่อเนื่องโดยจะมีอัตราการลดลงสูงจนถึงอายุ 6 เดือน และมีอัตราการลดลงของปริมาณกรดที่ลดลงจนเกือบคงที่ที่อายุ 8 เดือน (รูปที่ 16) การลดลงของปริมาณกรดอาจเนื่องมาจากปริมาณกรดถูกใช้ป็นสารตั้งต้นในกระบวนการหายใจ (Ulrich, 1970) อย่างไรก็ตามส้มโอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีปริมาณกรดในช่วงอายุ 6 ถึง 7 เดือน (1.02% - 1.23%) ต่ำกว่างานวิจัยของ จริงแท้ (2542) และมีการลดลงเพียง 0.2% เมื่อเทียบกับการลดลงประมาณ 0.25% ในรูปที่ 1



รูปที่ 16 การเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณกรดตามอายุหลังดอกบาน

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เมื่อส้มโอบมีอายุมากขึ้นแสดงในรูปที่ 17 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นมาที่อายุ 6 เดือน และลดลงต่อเนื่องหลังจากนั้นจนถึงอายุ 7 เดือน ในลักษณะเดียวกันกับปริมาณกรด การลดลงของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่ช่วงอายุ 6 - 7 เดือนอาจเป็นผลมาจากฝนที่ตกในช่วงการเก็บเกี่ยว ดังกล่าว การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ใกล้เคียงกับผลวิจัยของ จริงแท้ (2542) แตกต่างกันที่ผลการวิจัยของ จริงแท้ (2542) การเพิ่มขึ้นและลดลงในลักษณะเดียวกันนี้เกิดที่อายุ 6.5 - 8 เดือน อย่างไรก็ตาม ส้มโอบในงานวิจัยนี้มีปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ที่สูงกว่าและมีความแตกต่างของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในช่วงอายุที่ศึกษาน้อยกว่าผลที่ได้จากงานวิจัยของ จริงแท้ (2542) เมื่อพิจารณาในช่วงอายุ 6.5 - 8 เดือน

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่าทางเคมี ค่าทางกายภาพ และค่าทางกลของส้มโอตามอายุหลังดอกบาน 4 ระดับ

อายุหลังดอกบาน (เดือน)	ปริมาณกรด (TA, %) (F** = 8.26)		ปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ (TSS, °Brix) (F = 10.39)		L* (F = 4.94)		a* (F = 1.41)		b* (F = 10.44)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
5.5	1.16 <sup>bc*</sup>	0.18	13.70 <sup>a</sup>	1.27	55.22 <sup>a</sup>	2.14	-6.75 <sup>n.s.</sup>	0.46	27.86 <sup>a</sup>	1.85
6.0	1.23 <sup>c</sup>	0.19	14.69 <sup>b</sup>	1.26	52.28 <sup>b</sup>	1.85	-7.06 <sup>n.s.</sup>	0.5	31.27 <sup>c</sup>	2.21
6.5	1.14 <sup>b</sup>	0.17	14.3 <sup>b</sup>	0.87	57.35 <sup>b</sup>	3.34	-6.6 <sup>n.s.</sup>	1.26	30.43 <sup>bc</sup>	3.24
7.0	1.02 <sup>a</sup>	0.14	13.26 <sup>a</sup>	1.02	56.28 <sup>ab</sup>	2.58	-6.79 <sup>n.s.</sup>	1.07	29.49 <sup>b</sup>	2.67

อายุหลังดอกบาน (เดือน)	$f_1^2 m^{2/3}$ (Hz <sup>2</sup> kg <sup>2/3</sup> ) ด้านซ้ายผล (stf1p1) (F = 22.91)		$f_2^2 m^{2/3}$ (Hz <sup>2</sup> kg <sup>2/3</sup> ) ด้านซ้ายผล (stf2p1) (F = 25.56)		$f_3^2 m^{2/3}$ (Hz <sup>2</sup> kg <sup>2/3</sup> ) ด้านซ้ายผล (stf3p1) (F = 12.81)		$f_1^2 m^{2/3}$ (Hz <sup>2</sup> kg <sup>2/3</sup> ) ด้านกลางผล (stf1p2) (F = 38.47)		$f_2^2 m^{2/3}$ (Hz <sup>2</sup> kg <sup>2/3</sup> ) ด้านกลางผล (stf2p2) (F = 40.08)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
5.5	141648.2 <sup>a</sup>	23024.2	314352.0 <sup>a</sup>	39029.9	1604901 <sup>b</sup>	343188.8	140397.0 <sup>b</sup>	24352.9	302143.4 <sup>a</sup>	34848.4
6.0	174434.1 <sup>b</sup>	29640	403853.8 <sup>b</sup>	70901.9	1265350 <sup>a</sup>	190394.6	170500.4 <sup>c</sup>	28947.3	375700.6 <sup>b</sup>	47885.9
6.5	135962.4 <sup>a</sup>	17847.3	304425.8 <sup>a</sup>	49722.8	1199944 <sup>a</sup>	185603.3	114846.6 <sup>a</sup>	21793.5	285687.8 <sup>a</sup>	30202.1
7.0	133445.8 <sup>a</sup>	16628.9	299368.2 <sup>a</sup>	54587.2	1314304 <sup>a</sup>	356790.6	112129.3 <sup>a</sup>	23128.1	286049.2 <sup>a</sup>	37076

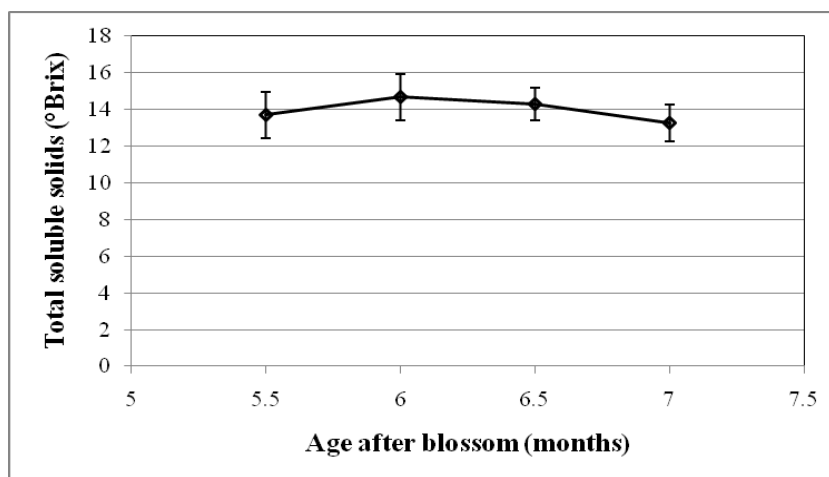
\*อักษร a, b และ c แสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

\*\*ค่า F คืออัตราส่วนค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มต่อค่าความแปรปรวนในกลุ่ม

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่าทางเคมี ค่าทางกายภาพ และค่าทางกลของส้มโอที่อายุหลังดอกบาน 4 ระดับ (ต่อ)

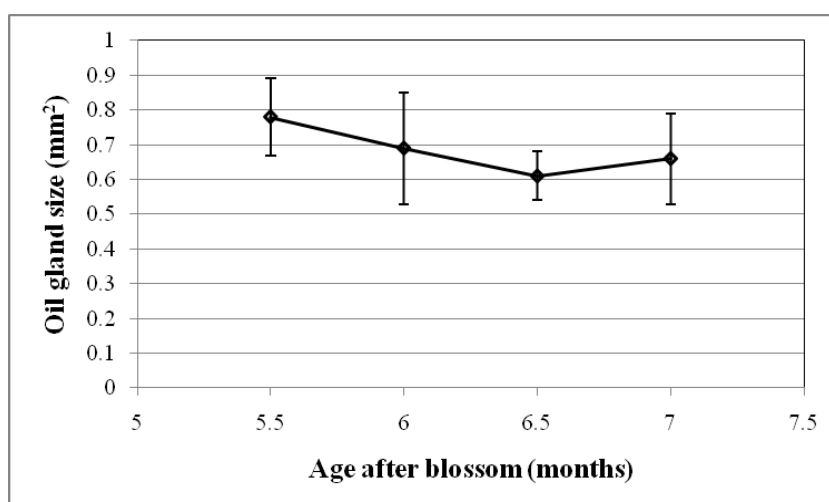
อายุหลังดอกบาน (เดือน)	$f_3^2 m^{2/3}$ (Hz <sup>2</sup> kg <sup>2/3</sup> ) ด้านกลางผล (stf3p2) (F = 17.70)		$f_1^2 m^{2/3}$ (Hz <sup>2</sup> kg <sup>2/3</sup> ) ด้านกันผล (stf1p3) (F = 22.64)		$f_2^2 m^{2/3}$ (Hz <sup>2</sup> kg <sup>2/3</sup> ) ด้านกันผล (stf2p3) (F = 30.34)		$f_3^2 m^{2/3}$ (Hz <sup>2</sup> kg <sup>2/3</sup> ) ด้านกันผล (stf3p3) (F = 5.16)		ขนาดพื้นที่ต่อมน้ำมัน (ตารางมิลลิเมตร) (F = 11.50)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
5.5	1586488 <sup>c</sup>	224752.5	140057.9 <sup>a</sup>	28070.9	296965.6 <sup>a</sup>	53449.9	1526032 <sup>b</sup>	312025.5	0.78 <sup>c</sup>	0.11
6.0	1358945 <sup>b</sup>	181847.2	175194.7 <sup>b</sup>	26832.4	396745.3 <sup>b</sup>	69911.8	1392414 <sup>ab</sup>	325735.4	0.69 <sup>b</sup>	0.16
6.5	1212253 <sup>c</sup>	179474.3	134444.6 <sup>a</sup>	19168.6	297991.7 <sup>a</sup>	34839.6	1241733 <sup>a</sup>	319421.8	0.61 <sup>a</sup>	0.07
7.0	1296823 <sup>bc</sup>	263017.4	132183.7 <sup>a</sup>	19372.9	294962.8 <sup>a</sup>	38799.7	1291751 <sup>a</sup>	294874.5	0.66 <sup>ab</sup>	0.13

อายุหลังดอกบาน (เดือน)	ความหนาแน่นต่อมน้ำมันต่อพื้นที่ (ต่อมต่อตารางเซนติเมตร) (F = 12.7)		ความแตกต่างสีแดงระหว่างต่อมและ ผิวเปลือก ( $\Delta R$ ) (F = 38.11)		ความแตกต่างสีเขียวระหว่างต่อมและ ผิวเปลือก ( $\Delta G$ ) (F = 43.34)		ความแตกต่างสีน้ำเงินระหว่างต่อมและ ผิวเปลือก ( $\Delta B$ ) (F = 9.75)		Gloss (F = 5.84)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
5.5	33.86 <sup>a</sup>	6.21	42.10 <sup>c</sup>	3.87	41.12 <sup>c</sup>	4.01	25.69 <sup>b</sup>	3.89	2.42 <sup>b</sup>	0.75
6.0	38.75 <sup>b</sup>	8.19	40.91 <sup>c</sup>	3.5	38.58 <sup>b</sup>	4.12	24.52 <sup>b</sup>	3.24	2.16 <sup>a</sup>	0.39
6.5	44.16 <sup>c</sup>	6.75	34.97 <sup>b</sup>	4.72	31.70 <sup>a</sup>	5.13	26.08 <sup>b</sup>	3.14	2.02 <sup>a</sup>	0.18
7.0	43.56 <sup>c</sup>	9.06	32.37 <sup>a</sup>	4.9	29.95 <sup>a</sup>	5.08	22.01 <sup>a</sup>	3.07	2.02 <sup>a</sup>	0.18



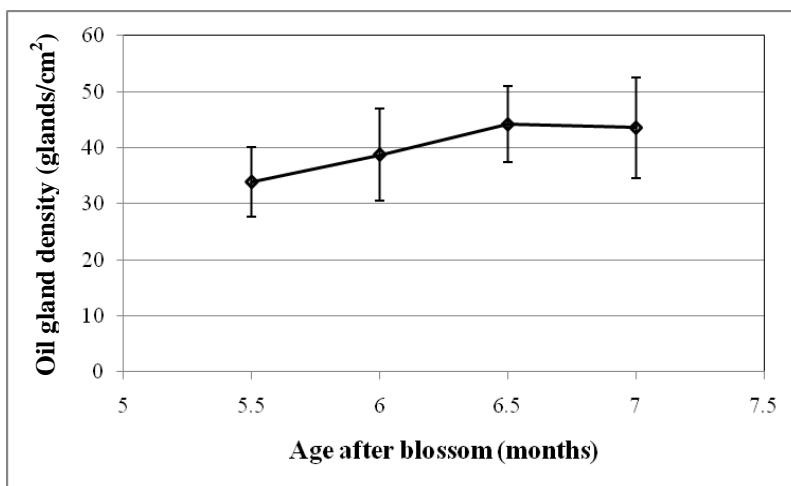
รูปที่ 17 การเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ตามอายุหลังดอกบาน

ในกรณีของต่อมน้ำมันพบว่า มีขนาดพื้นที่ต่อมลดลงต่อเนื่องจากขนาด  $0.78 \text{ mm}^2$  จนถึง  $0.61 \text{ mm}^2$  ที่อายุ 6.5 เดือน และเพิ่มขึ้นเป็น  $0.66 \text{ mm}^2$  (รูปที่ 18) การลดลงของขนาดต่อมน้ำมันในช่วงตั้งแต่ 5.5 – 6.5 เดือน สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ กรกฎ และนพดล (2545) สำหรับช่วงอายุตั้งแต่ 6.5 – 7.5 เดือน อย่างไรก็ตาม ขนาดของต่อมน้ำมันในงานวิจัยนี้มีขนาดเล็กกว่าในงานวิจัยของ กรกฎ และนพดล (2545) (รูปที่ 2) ในทำนองเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นต่อมน้ำมันในงานวิจัยนี้ก็มีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ กรกฎ และนพดล (2545) เช่นเดียวกัน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องในช่วงอายุตั้งแต่ 5.5 – 6.5 เดือน และลดลงในเดือนที่ 7 (รูปที่ 19) ซึ่งการลดลงของความหนาแน่นต่อมน้ำมันในงานวิจัยของ กรกฎ และนพดล (2545) จะเกิดในช่วงอายุตั้งแต่ 6.5 – 7.5 เดือน นอกจากนั้นความหนาแน่นต่อมน้ำมันในช่วงอายุที่พิจารณา (5.5 – 6.5 เดือน) มีค่าสูงกว่างานวิจัยของ กรกฎ และนพดล (2545)



รูปที่ 18 การเปลี่ยนแปลงของขนาดพื้นที่ต่อมน้ำมันที่เปลือกส้มโอตามอายุหลังดอกบาน

จากการเปรียบเทียบผลจากการวิจัยข้างต้นในกรณีการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรด ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ขนาดต่อมน้ำมัน และความหนาแน่นต่อมน้ำมัน กับผลจากงานวิจัยของ จริ่งแท้ (2542) และ กรกฎ และนพดล (2445) พบว่า ส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้อาจมีการพัฒนาล่าช้าหรือมีความแก่ช้ากว่าในงานวิจัยของ จริ่งแท้ (2542) และ กรกฎ และนพดล (2545) ประมาณ 1 เดือน



รูปที่ 19 การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นต่อมน้ำมันที่เปลือกส้มโอตามอายุหลังดอกบาน

## 2. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปร

ตัวแปรทั้งหมดทั้งแบบการวัดแบบทำลายผลและไม่ทำลายผล ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Principal component analysis (PCA) เพื่อลดจำนวนตัวแปร โดยเทคนิค PCA จะสร้างตัวแปรใหม่เรียกว่า principal component ที่มีข้อมูลตัวแปรเดิมทุกตัวตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$PC_1 = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n$$

โดยที่

- PC<sub>i</sub> คือ Principal component อันดับที่ i
- a<sub>i</sub> คือ สัมประสิทธิ์ของตัวแปร x<sub>i</sub>
- n คือ จำนวนตัวแปรเริ่มต้นทั้งหมด

จำนวนตัวแปร PC สามารถสร้างได้มากที่สุดเท่ากับจำนวนตัวแปรเริ่มต้น อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปจะสร้าง PC เพียงไม่กี่ค่าตามกฎเกณฑ์ในการวิเคราะห์ เนื่องจาก PC ค่าที่มากขึ้นจะมีข้อมูลตัวแปรเริ่มต้นที่ไม่มีความสำคัญ ตัวแปรเริ่มต้นมีความสัมพันธ์กับตัวแปร PC ดังนี้

$$X_1 = l_1PC_1 + l_2PC_2 + l_3PC_3 + \dots + l_nPC_n$$

โดยที่

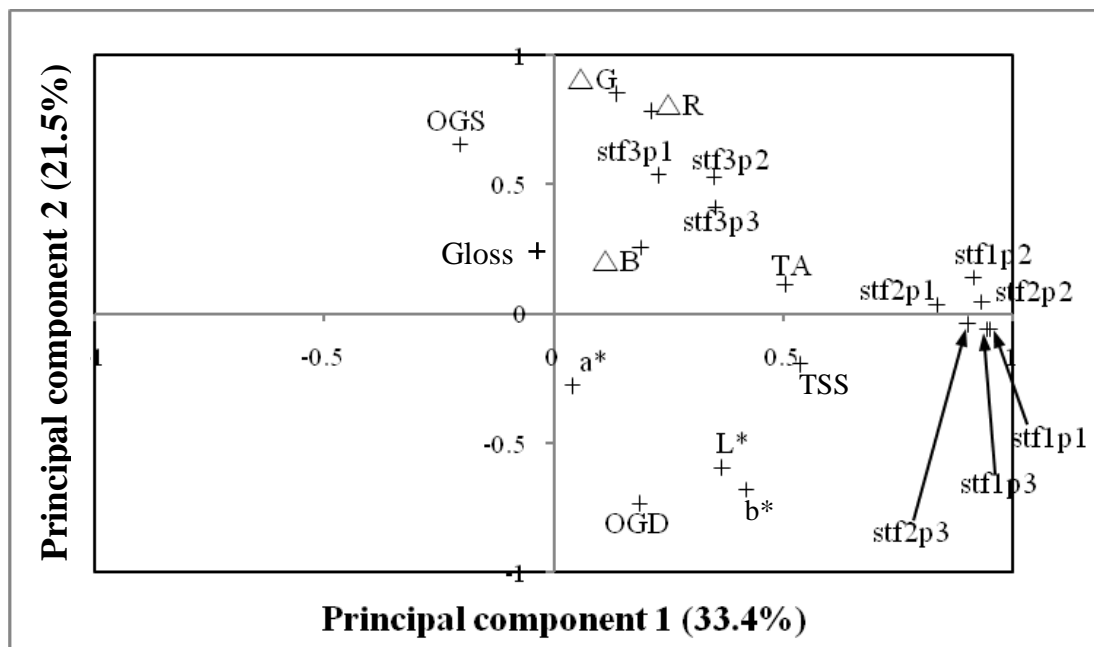
- PC<sub>i</sub> คือ Principal component อันดับที่ i
- l<sub>i</sub> คือ สัมประสิทธิ์ของ PC<sub>i</sub> หรือ ค่า correlation coefficient ระหว่าง x กับ PC หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า loading
- n คือ จำนวนตัวแปรเริ่มต้นทั้งหมด

ตัวแปร x เริ่มต้นทุกตัวจะมีค่า loading คู่กับตัวแปรใหม่ PC เมื่อนำค่า loading ของตัวแปรเริ่มต้นทุกตัวที่สัมพันธ์กับตัวแปร PC 2 ตัวแปรมาสร้างกราฟจะได้กราฟ loading plot ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเริ่มต้นทั้งหมดและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเริ่มต้นกับตัวแปร PC โดยตัวแปรคู่ใดที่มีค่า loading ของค่า PC เดียวกันสูงและมีตำแหน่งที่ใกล้กันจะมีความสัมพันธ์กันสูง ส่วนตัวแปรคู่ใดที่มีค่า loading สูงแต่เป็นของ PC ที่แตกต่างกันก็จะมีความสัมพันธ์กันต่ำ ตัวแปรที่มีค่า loading ต่ำจะไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นๆ

กราฟ loading plot ระหว่างค่า loading ของ PC1 และ PC2 สำหรับตัวแปรเริ่มต้นทั้งหมดแสดงในรูปแบบที่ 20 PC ทั้งสองค่าสามารถอธิบายความแปรปรวนในตัวแปรเริ่มต้นทั้งหมดได้ 54.9% ซึ่งจากการพิจารณากราฟจะพบว่า สมบัติเชิงเสถียร (stiffness coefficient:  $f^2 m^{2/3}$ ) ที่คำนวณจาก  $f_1$  และ  $f_2$  ที่ได้จากการเคาะที่บริเวณใกล้ข้อ (stf1p1 และ stf2p1) และบริเวณกลางผล (stf1p2 และ stf2p2) เป็นตัวแปรที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน เนื่องจากมีตำแหน่งใกล้เคียงกัน และมีความสัมพันธ์กับค่า TA และค่า TSS มากกว่าตัวแปรอื่นๆ เนื่องจากมีค่า loading ของ PC1 ที่สูงและใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาจากค่า loading ของ PC2 ที่มีค่าใกล้เคียงกันพบว่า ค่าความแตกต่างต่อมน้ำมันและผิวสีเปลือกในโทนสีเขียว  $\Delta G$  และโทนสีแดง  $\Delta R$  มีความสัมพันธ์กับขนาดพื้นที่ต่อมน้ำมัน (OGS) และสมบัติเชิงเสถียร (stf3p1, stf3p2 และ stf3p3) ที่คำนวณจาก  $f_3$  ส่วนค่า  $L^*$  หรือความสว่างของสีและค่า  $b^*$  หรือค่าสีเหลือง-น้ำเงิน มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นต่อมน้ำมัน (OGD) หรือเป็นตัวแปรในกลุ่มเดียวกัน และตัวแปรทั้งสองกลุ่มมีความสัมพันธ์ตรงกันข้าม

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นภาพรวมที่ได้จาก loading plot ซึ่งให้การแปลผลแบบพหุ (multivariate data) และความสัมพันธ์ที่กล่าวมาสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดังแสดงในตารางที่ 2 ตัวแปรวัดแบบไม่ทำลายที่มีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณกรด (TA) ที่เป็นตัวแปรแบบทำลายสูงได้แก่สมบัติเชิงเสถียรที่คำนวณจาก  $f_1$  และ  $f_2$  (stf1p2 ( $r = 0.43$ ), stf2p2 ( $r = 0.44$ ), stf1p3 ( $r = 0.38$ ), stf2p3 ( $r = 0.40$ ), stf1p1 ( $r = 0.42$ ) และ stf2p1 ( $r = 0.38$ )) ซึ่งสอดคล้องบางส่วนกับงานวิจัยของ Terdwongworakul et al. (2009) ส่วนตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณกรดต่ำสุดคือ ความหนาแน่นต่อมน้ำมัน ( $r = 0.00$ )



รูปที่ 20 Loading plot ของตัวแปร Principal component 1 และ Principal component 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งหมด (OGS: Oil gland size, OGD: Oil gland density)

ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และทางกล

	TA	TSS	L*	a*	b*	Gloss	stf1p2	stf2p2	stf3p2
TA	1.00	0.31	0.11	-0.06	0.10	0.10	0.43	0.44	0.11
TSS	0.31	1.00	0.20	-0.15	0.29	-0.05	0.41	0.45	-0.07
L*	0.11	0.20	1.00	0.35	0.91	-0.06	0.19	0.20	-0.19
a*	-0.06	-0.15	0.35	1.00	0.26	-0.03	0.11	0.00	0.01
b*	0.10	0.29	0.91	0.26	1.00	-0.03	0.26	0.30	-0.20
Gloss	0.10	-0.05	-0.06	-0.03	-0.03	1.00	0.10	-0.05	0.15
stf1p2	0.43	0.41	0.19	0.11	0.26	0.10	1.00	0.89	0.42
stf2p2	<b>0.44</b>	0.45	0.20	0.00	0.30	-0.05	0.89	1.00	0.29
stf3p2	0.11	-0.07	-0.19	0.01	-0.20	0.15	0.42	0.29	1.00
stf1p3	0.38	0.46	0.35	0.06	0.40	-0.02	0.90	0.88	0.29
stf2p3	0.40	0.46	0.30	-0.03	0.36	-0.14	0.76	0.87	0.23
stf3p3	0.03	-0.02	0.01	-0.01	-0.04	-0.00	0.30	0.30	0.58
stf1p1	0.42	<b>0.48</b>	0.32	0.06	0.38	-0.01	0.92	0.90	0.31
stf2p1	0.38	0.41	0.23	-0.06	0.31	-0.05	0.71	0.80	0.22
stf3p1	0.00	-0.08	-0.16	-0.03	-0.25	0.11	0.27	0.16	0.59
OGS*	-0.12	-0.33	-0.26	-0.01	-0.32	0.11	-0.05	-0.11	0.20
OGD*	0.00	0.22	0.31	0.13	0.36	-0.12	0.03	0.13	-0.19
$\Delta R$	0.29	0.05	-0.27	-0.22	-0.37	0.19	0.25	0.20	0.28
$\Delta G$	0.27	0.03	-0.43	-0.28	-0.49	0.22	0.22	0.15	0.32
$\Delta B$	0.20	0.06	0.27	0.10	0.00	-0.01	0.08	0.07	0.05

\*OGS: Oil gland size, OGD: Oil density, stf2p2:  $f_2^2 m^{2/3}$  obtained from impact sound at fruit middle part

	stf1p3	stf2p3	stf3p3	stf1p1	stf2p1	stf3p1	OGS	OGD	$\Delta R$	$\Delta G$	$\Delta B$
TA	0.38	0.40	0.03	0.42	0.38	0.00	-0.12	0.00	0.29	0.27	0.20
TSS	0.46	0.46	-0.02	0.48	0.41	-0.08	-0.33	0.22	0.05	0.03	0.06
L	0.35	0.30	0.01	0.32	0.23	-0.16	-0.26	0.31	-0.27	-0.43	0.27
a	0.06	-0.03	-0.01	0.06	-0.06	-0.03	-0.01	0.13	-0.22	-0.28	0.10
b	0.40	0.36	-0.04	0.38	0.31	-0.25	-0.32	0.36	-0.37	-0.49	0.00
Gloss	-0.02	-0.14	-0.00	-0.01	-0.05	0.11	0.11	-0.12	-0.19	0.22	-0.01
stf1p2	0.90	0.76	0.30	0.92	0.71	0.27	-0.05	0.03	0.25	0.22	0.08
stf2p2	0.88	0.87	0.30	0.90	0.80	0.16	-0.11	0.13	0.20	0.15	0.07
stf3p2	0.29	0.23	0.58	0.31	0.22	0.59	0.20	-0.19	0.28	0.32	0.05
stf1p3	1.00	0.82	0.28	0.96	0.74	0.23	-0.19	0.21	0.10	0.03	0.11
stf2p3	0.82	1.00	0.30	0.83	0.80	0.11	-0.22	0.20	0.17	0.10	0.13
stf3p3	0.28	0.30	1.00	0.27	0.25	0.55	0.24	-0.16	0.19	0.19	0.08
stf1p1	0.96	0.83	0.27	1.00	0.74	0.21	-0.19	0.21	0.09	0.03	0.10
stf2p1	0.74	0.80	0.25	0.74	1.00	0.14	-0.11	0.09	0.19	0.15	0.10
stf3p1	0.23	0.11	0.55	0.21	0.14	1.00	0.27	-0.26	0.24	0.27	0.12
OGS	-0.19	-0.22	0.24	-0.19	-0.11	0.27	1.00	-0.87	0.33	0.37	0.03
OGD	0.21	0.20	-0.16	0.21	0.09	-0.26	-0.87	1.00	-0.49	-0.55	-0.05
$\Delta R$	0.10	0.17	0.19	0.09	0.19	0.24	0.33	-0.49	1.00	0.96	0.58
$\Delta G$	0.03	0.10	0.19	0.03	0.15	0.27	0.37	-0.55	0.96	1.00	0.40
$\Delta B$	0.11	0.13	0.08	0.10	0.10	0.12	0.03	-0.05	0.58	0.40	1.00

ในกรณีค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ (TSS) ตัวแปรไม่ทำลายที่มีความสัมพันธ์สูงได้แก่กลุ่มตัวแปรเชิงเสียงที่คำนวณจากค่า  $f_1$  และ  $f_2$  เช่นเดียวกับกรณีค่าปริมาณกรด ส่วนตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ต่ำคือ ตัวแปรสมบัติเชิงเสียงที่คำนวณจากค่า  $f_3$  และค่าความแตกต่างสีระหว่างต่อมน้ำมันกับสีเปลือก (ตารางที่ 2)

### 3. การสร้างโมเดลทำนายค่าทางเคมี

ค่าทางสถิติเบื้องต้นที่แสดงให้เห็นค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของปริมาณของแข็งละลายน้ำได้สำหรับสร้างโมเดลแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งจะพบว่าค่าในกลุ่มตัวอย่างทั้งสองมีความแปรปรวนใกล้เคียงกัน และตัวอย่างในกลุ่มแคลิเบรชันมีช่วงกว้างกว่าค่าในกลุ่มตัวอย่างสำหรับทำนาย

ตารางที่ 3 ค่าทางสถิติของตัวอย่างในกลุ่มแคลิเบรชันและกลุ่มทำนายสำหรับสร้างโมเดลทำนายปริมาณของแข็งละลายน้ำได้

กลุ่มตัวอย่าง	Minimum (°Brix)	Average (°Brix)	Maximum (°Brix)	Standard deviation (°Brix)
Calibration	11.08	14.92	16.79	1.31
Prediction	11.78	14.95	16.60	1.25

การวิเคราะห์สร้างโมเดลด้วยเทคนิค PLSR เพื่อทำนายค่าทางเคมีที่วัดโดยทำลายคือ ปริมาณกรด และปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ พบว่า ข้อมูลตัวแปรไม่ทำลาย (ตัวแปรอิสระ) ทั้งสามกลุ่ม คือ ตัวแปรเชิงเสียง ตัวแปรเชิงแสง และตัวแปรผิวเปลือก ไม่สามารถใช้สร้างโมเดลเพื่อทำนายปริมาณกรดได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตาม ในกรณีของโมเดลทำนายปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ เมื่อใช้ค่าที่วัดแบบไม่ทำลายเป็นตัวแปรอิสระ ได้ผลการประเมินความแม่นยำแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการประเมินความแม่นยำของโมเดลทำนายค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ที่สร้างจากตัวแปรไม่ทำลาย

โมเดล	จำนวนแฟกเตอร์	r	RMSEP (°Brix)
1. ตัวแปรเชิงเสียง <sup>a</sup> ตัวแปรเชิงแสง <sup>b</sup> และตัวแปรจากผิวเปลือก <sup>c</sup>	1	0.68	0.96
2. ตัวแปรเลือกจากวิธี Stepwise regression <sup>d</sup>	2	0.68	0.91
3. ตัวแปรเชิงเสียง ตัวแปรเชิงแสง และตัวแปรจากผิวเปลือก ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดจากโมเดล 2	1	0.71	0.90

<sup>a</sup>ตัวแปรเชิงเสียง: stf1p1, stf2p1, stf3p1, stf1p2, stf2p2, stf3p2, stf1p3, stf2p3 และ stf3p3

<sup>b</sup>ตัวแปรเชิงแสง: L\*, a\*, b\* และ Gloss

<sup>c</sup>ตัวแปรจากผิวเปลือก: ขนาดต่อมน้ำมัน ความหนาแน่นต่อมน้ำมัน และ

ความแตกต่างสีระหว่างต่อมน้ำมันและผิวเปลือก ( $\Delta R$ ,  $\Delta G$  และ  $\Delta B$ )

<sup>d</sup>ตัวแปรเลือกจากวิธี Stepwise regression: a\*, stf3p2, stf1p1, ขนาดต่อมน้ำมัน และ ความหนาแน่นต่อมน้ำมัน

<sup>e</sup>ตัวแปรเชิงเสียง ตัวแปรเชิงแสง และตัวแปรจากผิวเปลือกที่มีค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดจากโมเดล 2

r = Correlation coefficient, RMSEP = Root mean square error of prediction

โมเดลแรกในตารางที่ 4 สร้างจากตัวแปรไม่ทำลายทั้งหมด ใช้แฟคเตอร์ PLS 1 ตัว เมื่อนำมาทำนายค่า TSS ของตัวอย่างในกลุ่ม prediction ให้ค่า  $r = 0.68$  และ Root mean square error of prediction (RMSEP) =  $0.96^{\circ}\text{Brix}$  ซึ่งมีความแม่นยำที่ต่ำ เมื่อพิจารณา weighted regression coefficients ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวซึ่งมีการปรับให้มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับหนึ่งซึ่งเป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบความสำคัญของตัวแปรแต่ละตัวในการทำนายค่า TSS พบว่าตัวแปรที่มีสัมประสิทธิ์สูงสุดได้แก่  $\text{stf2p2}$  ( $f^2 m^{2/3}$  ใช้ค่าความถี่  $f_2$  ที่วัดเสียงบริเวณกลางผล) ในกลุ่มตัวแปรเชิงเสียงโดยทั่วไปจะพบว่าตัวแปรที่มีความสำคัญจะเป็นตัวแปรที่คำนวณจากค่าความถี่  $f_1$  และ  $f_2$  ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับข้อมูลสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัวกับค่า TSS ในตารางที่ 2 สำหรับกลุ่มตัวแปรเชิงแสงค่า  $b^*$  มีความสำคัญมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลในตารางที่ 2 เช่นเดียวกัน ค่า  $b^*$  เป็นค่าที่ระบุถึงการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเหลืองไปเป็นสีน้ำเงิน แสดงว่าสีเปลือกส้มโอมีสีเหลืองลดลงเมื่อมีค่า TSS สูงขึ้น ในกลุ่มตัวแปรจากผิวเปลือกตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ ขนาดพื้นที่ต่อมไขมัน ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตารางที่ 2 จากความสัมพันธ์แสดงว่าต่อมไขมันมีขนาดเล็กลงสำหรับส้มโอที่มีค่า TSS สูง ตัวแปรที่มีความสำคัญรองลงมาคือ ความแตกต่างสีแดงระหว่างต่อมไขมันและผิวเปลือก

ขั้นตอนต่อมาคือ การสร้างโมเดลเพื่อให้มีตัวแปรน้อยลงสำหรับประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานจริงซึ่งควรจะมีการวัดค่าต่างๆ ไม่มากจนเกินไปเพราะจะทำให้การประเมินค่าล่าช้า ดังนั้นจึงต้องหาเทคนิคในการลดจำนวนตัวแปรในโมเดลลงแต่ยังคงให้ความแม่นยำ ในที่นี้ใช้กระบวนการเลือกตัวแปรที่เหมาะสมด้วยวิธี stepwise regression ในโปรแกรม SPSS ซึ่งเป็นการคัดเลือกตัวแปรเข้าในสมการทีละค่าโดยการพิจารณาจากนัยสำคัญทางสถิติในการวิเคราะห์ความถดถอยกับค่า TSS ผลจากการใช้วิธี stepwise regression พบว่าตัวแปรที่ถูกเลือกในการวิเคราะห์ความถดถอยได้แก่  $a^*$ ,  $\text{stf3p2}$ ,  $\text{stf1p1}$ , ขนาดพื้นที่ต่อมไขมัน และ ความหนาแน่นต่อมไขมันต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หลังจากนั้นนำตัวแปรที่ถูกเลือกดังกล่าวมาใช้เป็นตัวแปรอิสระสร้างโมเดลด้วยวิธี PLSR อีกครั้งหนึ่ง ผลการสร้างโมเดลพบว่า โมเดลสามารถทำนายค่า TSS ได้แม่นยำสูงขึ้นกว่าการใช้ตัวแปรไม่ทำลายทุกตัวตามโมเดลที่หนึ่ง โดยให้ค่า  $r = 0.68$  และค่า  $\text{RMSEP} = 0.96^{\circ}\text{Brix}$

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการลดจำนวนตัวแปรในโมเดลลงโดยเลือกตัวแปรในแต่ละกลุ่ม (ตัวแปรเชิงเสียง ตัวแปรเชิงแสง และตัวแปรผิวเปลือก) ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยสูงสุด (regression coefficient) โดยโมเดลที่สองซึ่งสร้างจากตัวแปรที่เลือกโดยวิธี stepwise regression มีตัวแปรที่มีสัมประสิทธิ์ถดถอยสูงสุดในแต่ละกลุ่มตัวแปรคือ  $a^*$ ,  $\text{stf1p2}$  และ ขนาดพื้นที่ต่อมไขมัน เมื่อนำมาสร้างโมเดลปรากฏว่าได้ผลความแม่นยำในการทำนายค่า TSS สูงสุด โดยมีค่า  $r = 0.71$  และค่า  $\text{RMSEP} = 0.90^{\circ}\text{Brix}$  กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า TSS จริงกับค่าที่ทำนายได้จากโมเดลแสดงในรูปที่ 20

จากการวิเคราะห์สร้างโมเดลในการทำนายค่า TSS พบว่า โมเดลยังไม่มี ความแม่นยำเพียงพอในการนำไปใช้งานเนื่องจากมีค่า  $\text{SD/RMSEP} = 1.25/0.90 = 1.39$  ซึ่งน้อยกว่า 2.5 (Golic and Walsh, 2006)

#### 4. การสร้างโมเดลจำแนกกลุ่มความแก่ส้มโอ

ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณเพื่อสร้างโมเดลจากกลุ่มตัวแปรไม่ทำลายเพื่อทำนายค่า TSS พบว่า ให้ความแม่นยำที่ไม่เหมาะสม อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เชิงคุณภาพควรจะให้โมเดลจำแนกกลุ่มที่มีความแม่นยำสูงขึ้น



รูปที่ 20 กราฟการกระจายค่าของแข็งละลายน้ำได้ค่าจริงและค่าที่ทำนายจากโมเดลที่สร้างจากตัวแปรแต่ละกลุ่ม การวัดที่มีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุด

จากการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มด้วยวิธี discriminant analysis และเลือกตัวแปรที่เหมาะสมด้วยวิธี stepwise ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5 โมเดล A สร้างจากตัวแปรไม่ทำลายที่เลือกจากวิธี stepwise ซึ่งได้แก่ gloss, stp2f2, stp2f3, stp1f3, oil density,  $\Delta R$ ,  $\Delta G$  และ  $\Delta B$  ค่าความแม่นยำรวมเท่ากับ 65.1% โดยส้มโอ กลุ่ม early-mature คัดแยกได้แม่นยำที่สุด (93.3%) กราฟการกระจายตัวอย่างที่สร้างระหว่าง discriminant function 1 และ discriminant function 2 แสดงในรูปที่ 21 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงให้เห็นโครงสร้างและการรวมกลุ่มของตัวอย่าง เมื่อพิจารณากราฟการกระจายตัวดังกล่าว พบว่า กลุ่มส้มโอ immature (5.5 เดือน), early-mature (6 เดือน) และ late-mature (6.5 เดือน) มีการเกาะกลุ่มและแยกจากกันอย่างเห็นได้ชัด ส่วนส้มโอ กลุ่ม over-mature (7 เดือน) มีการเกาะกลุ่มซ้อนทับกับกลุ่มส้มโอ late-mature นั้นหมายความว่า ความแก่ของส้มโอกลุ่ม late-mature และ over-mature มีความใกล้เคียงกัน ในทางปฏิบัติการคัดแยกกลุ่มส้มโอ early-mature จากกลุ่ม immature มีความสำคัญที่สุด ดังนั้นโมเดลที่สามารถจำแนกส้มโอออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ immature, early-mature และ late-mature น่าจะเป็นโมเดลที่ยอมรับได้ กราฟการกระจายเมื่อตัดกลุ่ม over-mature ออกแสดงในรูปที่ 22

โมเดลจำแนกกลุ่มที่สองเป็นโมเดลจำแนกส้มโอออกเป็น 3 กลุ่ม ดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยใช้วิธี stepwise ในการเลือกตัวแปรที่เหมาะสมเข้าในโมเดล ผลการประเมินความแม่นยำในการจำแนกกลุ่มส้มโอออกเป็น 3 กลุ่มของโมเดล B แสดงในตารางที่ 5 พบว่า มีความแม่นยำรวมเพิ่มขึ้นเป็น 87.2% โดยกลุ่ม late-mature คัดแยกได้แม่นยำที่สุด ตัวแปรที่ได้รับการเลือกเข้ามาในโมเดลเหมือนกับในกรณีโมเดล A เกือบทั้งหมดยกเว้นค่า gloss อย่างไรก็ตาม การใช้วิธี stepwise ในการเลือกตัวแปรที่เหมาะสมเข้าโมเดล อาจจะได้โมเดลที่ดีที่สุด ตามที่มีการกล่าวไว้โดย Derksen and Keselman (1992) ดังนั้นจึงสร้างโมเดลจำแนกแบบที่ 3 คือ โมเดล C โดยเพิ่มค่า gloss เข้าไปในโมเดลอีกหนึ่งตัวแปรเพื่อจำแนกส้มโอออกเป็น 3 กลุ่มเช่นเดียวกับโมเดล B ผลความแม่นยำในการจำแนกกลุ่มแสดงให้เห็นว่า (ตารางที่ 5) โมเดล C เป็นโมเดลที่ดีที่สุดสามารถจำแนกกลุ่มด้วยความแม่นยำรวมเท่ากับ 89.4% และกลุ่มส้มโอที่คัดแยกได้แม่นยำที่สุดยังคงได้แก่กลุ่ม late-mature ซึ่งคัดแยกได้แม่นยำเท่ากับ 100%

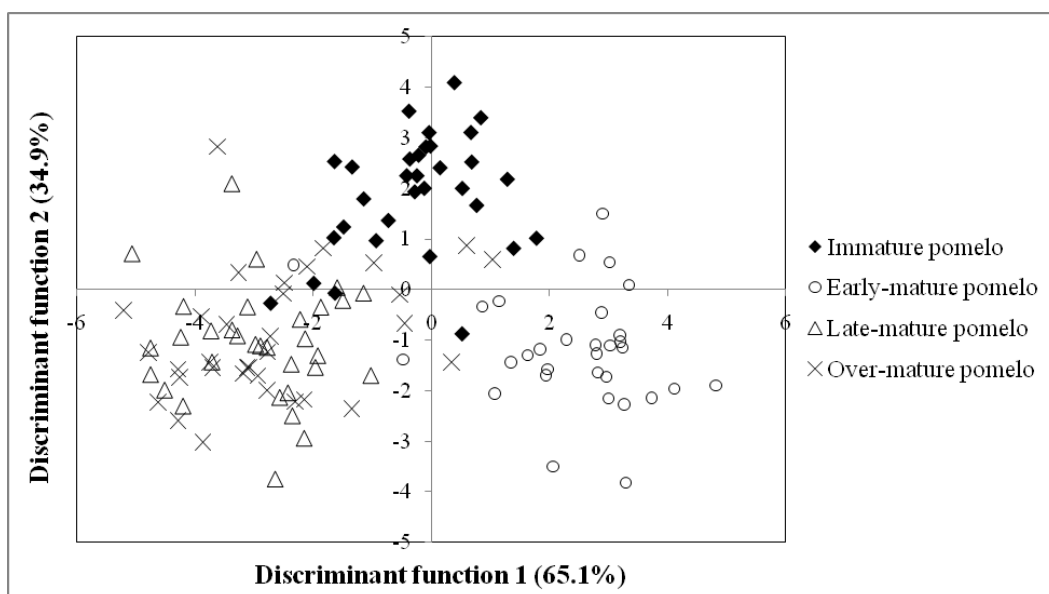
ตารางที่ 5 Cross-validated matrices แสดงประสิทธิภาพของการคัดแยก (performance of classification) ออกเป็น 3 ระดับความแก่ด้วยตัวแปรไม่ทำลาย

Model	Actual group	Correctly classified pomelo (%)	Predicted group			
			Immature pomelo	Early-mature pomelo	Late mature pomelo	Over-mature pomelo
A	Immature pomelo	56.3	9	2	2	3
	Early-mature pomelo	93.3	0	14	1	0
	Late-mature pomelo	50.0	0	0	8	8
	Over-mature pomelo	62.5	2	1	3	10
	Total	65.1	11	17	14	21
B	Immature pomelo	75.0	12	1	3	-
	Early-mature pomelo	93.3	0	14	1	-
	Late-mature pomelo	93.8	1	0	15	-
	Total	87.2	13	15	19	-
C	Immature pomelo	75.0	12	1	3	-
	Early-mature pomelo	93.3	0	14	1	-
	Late-mature pomelo	100.0	0	0	16	-
	Total	89.4	12	15	20	-

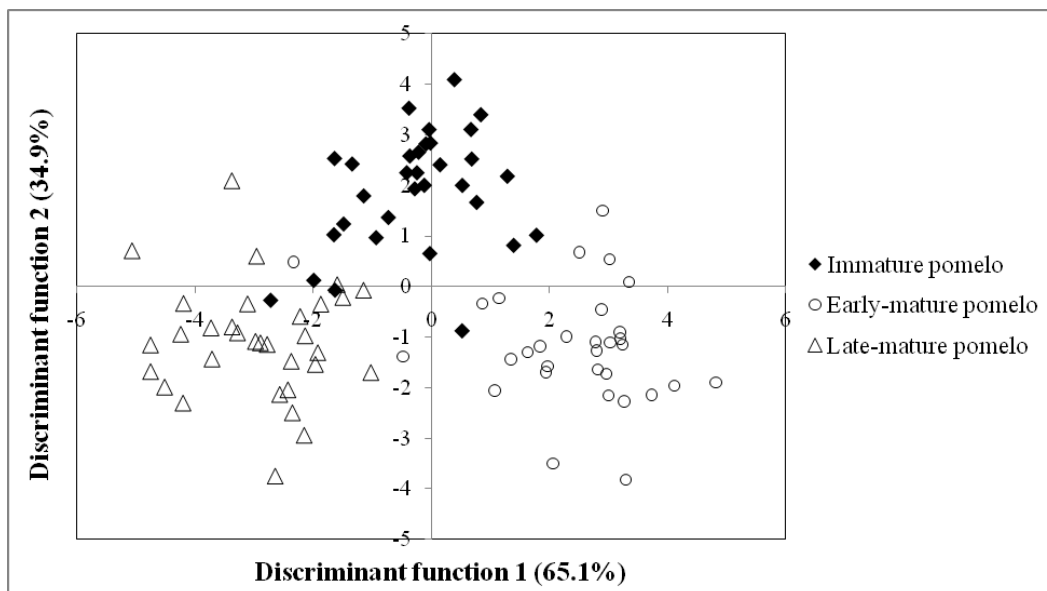
\* A: ตัวแปรในการจำแนกคือ gloss, stp2f2, stp2f3, stp1f3, oil density,  $\Delta R$ ,  $\Delta G$ ,  $\Delta B$ .

B: ตัวแปรในการจำแนกคือ stp2f2, stp2f3, stp1f3, oil density,  $\Delta R$ ,  $\Delta G$ ,  $\Delta B$ .

C: ตัวแปรในการจำแนกคือ gloss, stp2f2, stp2f3, stp1f3, oil density,  $\Delta R$ ,  $\Delta G$ ,  $\Delta B$ .



รูปที่ 21 กราฟแสดงการแบ่งกลุ่มส้มโอออกเป็นกลุ่ม immature, early-mature, late-mature และ over-mature ด้วยตัวแปรเชิงสียง เชิงแสงและลักษณะเปลือกซึ่งวัดโดยไม่ทำลาย



รูปที่ 22 กราฟแสดงการแบ่งกลุ่มส้มโอออกเป็นกลุ่ม immature, early-mature และ late-mature ด้วยตัวแปรเชิงเสียง เชนงแสงและลักษณะเปลือกซึ่งวัดโดยไม่ทำลาย

โมเดลจำแนกกลุ่มแบบ C ให้ผลความแม่นยำสำหรับการคัดแยกส้มโอกลุ่ม immature และ early-mature ใกล้เคียงกับงานวิจัยโดย Terdwongworakul et al. (2009) ซึ่งสร้างโมเดลจากสมบัติเชิงเสียงและสมบัติเชิงกลเป็นตัวแปรไม่ทำลาย และมีความแม่นยำรวมในการคัดแยกส้มโอกลุ่ม immature และ early-mature เท่ากับ 76.7% และ 73.3% ตามลำดับ สำหรับกรณีส้มโอกลุ่ม late-mature โมเดล C มีความแม่นยำสูงกว่าโดยโมเดลจากสมบัติเชิงเสียงและเชิงกลที่มีความแม่นยำเท่ากับ 73.3%

ในการเปรียบเทียบความสำคัญของตัวแปรที่มีผลต่อการจำแนกกลุ่ม จะพิจารณาจาก Structure coefficient หรือ Correlation coefficient ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวแปรกับ discriminant function ดังแสดงในตารางที่ 6 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 22 จะพบว่า discriminant function 1 เป็นฟังก์ชันหลักในการจำแนกส้มโอออกเป็น 3 กลุ่มในเบื้องต้น ซึ่งสังเกตได้จากที่แต่ละกลุ่มจะแยกจากกันตามแนวอน ตัวแปรที่มีส่วนสำคัญในการจำแนกตาม discriminant function 1 นี้ได้แก่ stf2p2 และ  $\Delta B$  ซึ่งมีค่า correlation coefficient สูงสุด (0.433 และ -0.186 ตามลำดับในตารางที่ 6) นั้นแสดงว่า ส้มโอทั้งสามกลุ่มจะแตกต่างกันที่สมบัติเชิงเสียงที่ได้จากความถี่  $f_2$  ที่ได้จากการเคาะที่บริเวณกลางผล (p2 หรือระนาบที่ 2) และมีความแตกต่างระหว่างสีต่อมน้ำมันและสีผิวเปลือกในโทนสีน้ำเงินแตกต่างกัน เมื่อพิจารณารูปที่ 22 เพิ่มเติมจะพบอีกว่า discriminant function 2 ทำหน้าที่แบ่งส้มโอกลุ่ม immature ออกจากกลุ่ม early-mature และ late-mature สมบัติที่มีส่วนสำคัญต่อ discriminant function 2 ตามลำดับได้แก่ stf3p2,  $\Delta G$ , stf3p1,  $\Delta R$ , ความหนาแน่นต่อมน้ำมัน และ Gloss นั่นคือ ส้มโอกลุ่ม early-mature และ late-mature จะมีสมบัติดังกล่าวนี้ไม่แตกต่างกัน แต่จะแตกต่างจากกลุ่ม immature

ค่า  $\Delta G$ , stf2p2 (หรือ  $f_2^2 m^{2/3}$  จากการเคาะกลางผล) และ  $\Delta R$  ซึ่งมีส่วนสำคัญในการจำแนกกลุ่มจากรูปที่ 6 เป็นค่าที่แตกต่างกันมากระหว่างกลุ่มส้มโอแต่ละอายุอย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 1 โดยเป็นค่าที่มีนัยสำคัญสูงสุดใน 4 อันดับแรกในตารางด้วยค่า  $F = 43.34, 40.08$  และ  $38.11$  ตามลำดับ ส่วนค่าตัวแปร stf3p2, stf3p1, Gloss และ ความหนาแน่นต่อมน้ำมัน เป็นตัวแปรที่เสริมตัวแปร 3 ตัวแปรข้างต้นในการจำแนกกลุ่ม

ตารางที่ 6 Structure coefficient หรือ correlation coefficient ระหว่างตัวแปรไม่ทำลายกับ discriminant function

	Discriminant Function	
	1	2
stf2p2	0.433*	-0.215
$\Delta B$	-0.186*	0.060
stf3p2	0.152	0.519*
$\Delta G$	0.254	0.430*
stf3p1	0.068	0.412*
$\Delta R$	0.212	0.313*
Oil density	-0.235	-0.254*
Gloss	0.032	0.210*

ตัวแปรไม่ทำลายที่น่าสนใจซึ่งยังไม่เคยมีการวิจัยมาก่อนได้แก่ ค่าความแตกต่างสีต่อมน้ำมันและสีผิวเปลือกในโทนสีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดง ( $\Delta B$ ,  $\Delta G$  และ  $\Delta R$ ) และค่า Gloss ซึ่งใช้วัดความเป็นเงามันของเปลือก ค่าเหล่านี้ไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าต้องใช้เครื่องมือวัด ตัวแปรทั้งหมดเป็นตัวแปรที่วัดได้โดยไม่ทำลายซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเป็นเครื่องมือวัดสัมโจากบนต้นเพื่อการเก็บเกี่ยว หรือใช้คัดแยกสัมโที่เก็บเกี่ยวมาแล้วเพื่อคัดคุณภาพตามความแก่

### สรุป

งานวิจัยนี้พัฒนาโมเดลสำหรับทำนายค่าทางเคมีและความสุก แก่ของสัมโโดยใช้ข้อมูลจากตัวแปรจากสมบัติเชิงเสียง สมบัติเชิงแสง และลักษณะผิวเปลือก ซึ่งเป็นตัวแปรที่วัดแบบไม่ทำลาย ผลการวิจัยพบว่า ตัวแปรไม่ทำลายไม่สามารถใช้สร้างโมเดลเพื่อทำนายปริมาณกรดได้ อย่างไรก็ตาม สามารถใช้สร้างโมเดลที่ทำนายปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ ด้วยความแม่นยำปานกลาง ด้วยค่า  $r = 0.71$  และค่า  $RMSEP = 0.90^{\circ}\text{Brix}$  ตัวแปรที่มีสัมประสิทธิ์ถดถอยสูงสุดในแต่ละกลุ่มตัวแปรคือ  $a^*$ , stf1p2 และ ขนาดพื้นที่ต่อมน้ำมัน ซึ่งได้จากการใช้เทคนิค stepwise regression ในการเลือก

สำหรับโมเดลจำแนกกลุ่มนั้น ตัวแปรไม่ทำลายสามารถใช้สร้างโมเดลที่จำแนกสัมโออกเป็น 3 กลุ่มได้แก่ immature, early-mature และ late-mature ด้วยความแม่นยำรวม 89.4% ตัวแปรที่สำคัญในการจำแนกกลุ่มคือ  $f_2^2 m^{2/3}$  ที่วัดบริเวณกลางผล และความแตกต่างสีต่อมน้ำมันและสีผิวเปลือกในโทนสีน้ำเงิน

## เอกสารอ้างอิง

- กรกฎ วัฒนวิเชียร และ นพดล อรุณยะเดช, 2545. การวัดความแก่ของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง. NECTEC Technical Journal 3(12) พฤศจิกายน 2545 - กุมภาพันธ์ 2546.
- กัลปพฤกษ์ ลีละวัฒน์, 2534. การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของผลส้มโอ 7 พันธุ์. ปัญหาพิเศษปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จริงแท้ ศิริพาณิชย์. 2542. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผิวส้มและผลไม้อื่นๆ. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จรรยาพงศ์ เทียมประทีป. 2552. การตรวจสอบความบริบูรณ์ของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งโดยวิธีแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- มงคล หลิม. 2536. การผลิตส้ม. ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เยาวรัตน์ วงศ์ศรีสกุลแก้ว. 2545. การเติบโตและพัฒนาการของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งและลักษณะสำคัญของผลพันธุ์อื่นๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรรณวาท แก้วคำแสน. 2545. กองส่งเสริมพืชสวน กองเกษตรสัมพันธ์.
- วิเศษ อัครวิทยากุล. 2540. การปลูกส้มโอ. โครงการหนังสือเกษตรชุมชน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Abbott, J. A. and Massie, D. R. 1993. Nondestructive firmness measurement of apple. ASAE Paper No. 93-6025.
- Camps, C., Guillermin, P., Mauget, J.C. and Bertrand, D. 2005. Data analysis of penetrometric force/displacement curves for the characterization of whole apple fruits. **Journal of Texture Studies** 36(4), 387–401.
- Derksen, S. and Keselman. H. J. 1992. Backward, forward and stepwise automated subset selection algorithms: frequency of obtaining authentic and noise variables. **British Journal of Mathematical and Statistical Psychology** 45: 265–282.
- 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.
- Golic, M.; and Walsh, K.B. 2006. Robustness of calibration models based on near infrared spectroscopy for the in-line grading of stonefruit for total soluble solids content. **Analytica Chimica Acta**. 555, 286-291.
- Neamsorn, N. and Terdwongworakul, A. 2004. Maturity index of “Montong” durian based on stem strength and acoustic frequency response. Proceedings of Japan-Thailand joint symposium on Nondestructive evaluation technology NIR, Bangkok, Thailand, May, 18–21.
- Pathaveerat, S., Terdwongworakul, A. and Phaungsombut, A. 2008. Multivariate data analysis for classification of pineapple maturity. **Journal of Food Engineering**. 89(2), 112–118.
- Terdwongworakul, A., Puangsombat, A., Pathaveerat, S., 2009. Qualitative and quantitative evaluation of pomelo maturity using multivariate combination of chemical and physical properties. **Journal of Texture Studies** 40: 584 – 605.
- Ulrich, R. 1970. Organic acids, pp. 89 – 118. In A.C. Hulme (ed.). The Biochemistry of Fruit and Their Products. Academic Press, London.

- Wang, J., Gomez, A.H. and Pereira, A.G. 2006a. Acoustic impulse response for measuring the firmness of mandarin during storage. **Journal of Food Quality**. 29(4), 392–404.
- Wang, J., Teng, B. and Yu, Y. 2006b. The firmness detection by excitation dynamic characteristics for peach. **Food Control** 17(5), 353–358.
- Wattanavichean, K., Aroonyadet, N. 2003. Assessment of fruit in 'Kao Nampheung' pummelo using image processing of oil glands. **Thai Journal Agricultural Science** 36(2): 129-140.