



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง การพัฒนาเทคนิคการประเมินคุณภาพของผลไม้ไทยโดยเทคโนโลยี
แบบไม่ทำลายตัวอย่างด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดแบบพกพา
Development of Thai Fruits Quality Assessment by Non-Destructive
Techniques: Portable NIR

ได้รับการจัดสรรงบประมาณการวิจัย

ประจำปี 2557

จำนวน 237,600 บาท

หัวหน้าโครงการ

นายอดิศักดิ์ จูมวงษ์

ผู้ร่วมโครงการ

นางสาวปาริชาติ เทียนจูมพล

นายพิเชษฐ์ น้อยมณี

รายงานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

12/มีนาคม/2558

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องการพัฒนาเทคนิคการประเมินคุณภาพของผลไม้ไทยโดยเทคโนโลยีแบบไม่ทำลายตัวอย่างด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดแบบพกพา (Development of Thai Fruits Quality Assessment by Non-Destructive Techniques: Portable NIR) ได้สำเร็จลุล่วงโดยการได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2557 ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ในการสนับสนุนเครื่องมือ NIR ในการวิจัยขอขอบคุณหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน ทั้งภายในและภายนอกพื้นที่ และขอขอบคุณคณาจารย์ ข้าราชการ เจ้าหน้าที่ และผู้ช่วยวิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือทำให้การวิจัยครั้งนี้จนเสร็จสิ้น สมบูรณ์

ผู้วิจัย

สารบัญเรื่อง

หน้า

สารบัญตาราง	ข
สารบัญภาพ	ค
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
บทนำ	3
วัตถุประสงค์การทดลอง	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
แนวคิด ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
วิธีการดำเนินการวิจัย	20
ผลการวิจัย และ อภิปรายผล	35
สรุปผลการทดลอง	88
เอกสารอ้างอิง	89

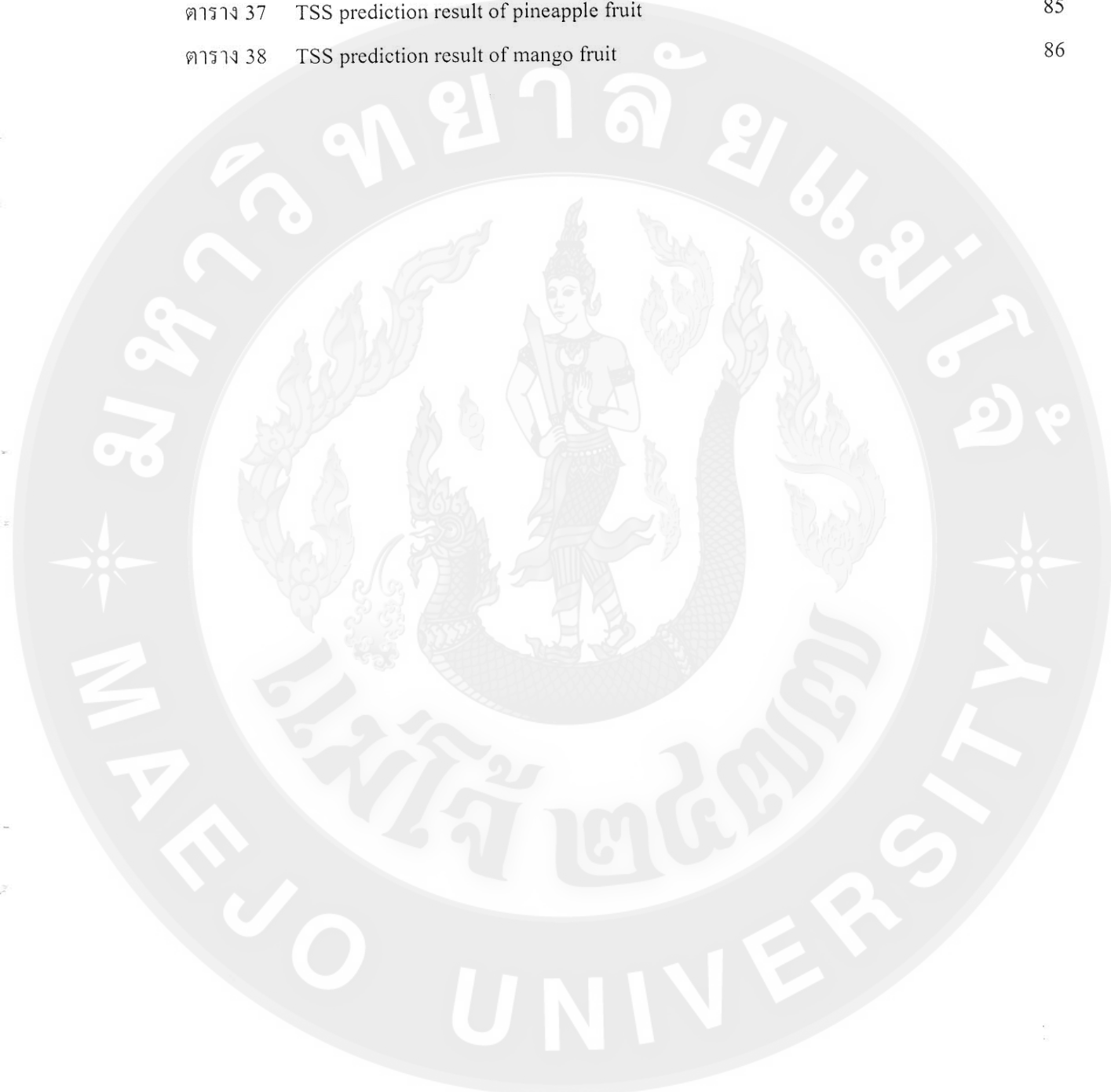
สารบัญตาราง

		หน้า
ตาราง 1	Dimension of papaya fruit harvested at three maturity stages, immature, mature and over-mature	37
ตาราง 2	Peel color of papaya fruit harvested at three maturity stages, immature, mature and over-mature.	39
ตาราง 3	Flesh color of papaya fruit harvested at three maturity stages, immature, mature and over-mature.	40
ตาราง 4	Firmness of papaya flesh harvested at three maturity stages, immature, mature and over-mature.	42
ตาราง 5	Chemical properties of papaya fruit harvested at three maturity stages, immature, mature and over mature.	43
ตาราง 6	Total soluble solid calibration results of papaya fruit at three maturity stages using the spectra from NIRSystem 6500	46
ตาราง 7	Dimension of pineapple fruit at three maturity stages	51
ตาราง 8	Peel color of pineapple fruit at three maturity stages	52
ตาราง 9	Flesh color of pineapple three maturity stages	52
ตาราง 10	Firmness of pineapple flesh at three maturity stages	53
ตาราง 11	Chemical properties of pineapple fruit at three maturity stages	54
ตาราง 12	Total soluble solid calibration results of pineapple fruit at three maturity using the spectra from NIRSystem 6500	56
ตาราง 13	Dimension of mango fruit at three maturity stages, immature, mature and over mature.	61
ตาราง 14	Peel color of mango fruit at three maturity stages	62

ตาราง 15	Flesh color of mango fruit at three maturity stages	62
ตาราง 16	Firmness of mango flesh harvested at three maturity stages	63
ตาราง 17	TSS and TA of mango fruit at three maturity stages	63
ตาราง 18	Total soluble solid calibration results of mango fruit at three maturity stages	66
ตาราง 19	Dimension of green and ripe papaya fruit at maturity stage	67
ตาราง 20	Firmness of green and ripe papaya flesh at maturity stage	67
ตาราง 21	Peel color of green and ripe papaya fruit at maturity stage	69
ตาราง 22	Flesh color of green and ripe papaya fruit at maturity stage	70
ตาราง 23	Total soluble solids and pigment of green and Ripe papaya fruit at maturity stage	71
ตาราง 24	Total soluble solids calibration results of green and ripe papaya fruit at maturity stage	73
ตาราง 25	Dimension of pineapple fruit stored at 30 °C for 10 days and 25 days.	74
ตาราง 26	Firmness of pineapple fruit stored at 30 °C for 10 days and 25 days.	75
ตาราง 27	Peel color of pineapple fruit stored at 30 °C for 10 days and 25 days.	75
ตาราง 28	Flesh color of pineapple fruit 29storage at stored at 30 °C for 10 days and 25 days.	76
ตาราง 29	TSS and TA of pineapple fruit stored at 30 °C for 10 days and 25 days.	76
ตาราง 30	Dimension of green and ripe mango fruit harvested at maturity stage.	78
ตาราง 31	Firmness of green and ripe mango fruit at maturity stage	79
ตาราง 32	Peel color of green and ripe mango fruit at maturity stage	79
ตาราง 33	Flesh color of green and ripe mango fruit at maturity stage	80
ตาราง 34	TSS and TA of green and ripe mango fruit at maturity stage	80
ตาราง 35	Total soluble solids calibration results of green and ripe mango fruit at maturity stage	82

หน้า

ตาราง 36	TSS prediction result of papaya fruit	83
ตาราง 37	TSS prediction result of pineapple fruit	85
ตาราง 38	TSS prediction result of mango fruit	86



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 Sample presentations, (a) transmittance, (b) reflectance (c) transfectance and (d) interactance	6
ภาพ 2 Papaya fruit harvesting at the orchard owner in Ban Hong District, Chiang Mai	20
ภาพ 3 Pineapple fruit harvesting at Chiang Rai province	21
ภาพ 4 Mango fruit harvesting at Phrao Distric, Chiang Mai	22
ภาพ 5 The spectrum of papaya fruit measuring by NIRSystem 6500 with fiber optic probe in interactance mode	23
ภาพ 6 The spectrum of papaya fruit measuring by portable NIR Spectrometer (Hamamatsu)	24
ภาพ 7 Pineapple fruit NIR spectra measuring by NIRSystem 6500	25
ภาพ 8 Pineapple fruit NIR spectra measuring by portable NIR spectrometer (Hamamatsu)	25
ภาพ 9 Mango fruit NIR spectra measuring by NIRSystem 6500	26
ภาพ 10 Papaya fruit weighting	27
ภาพ 11 Papaya fruit firmness measuring by texture analyzer	28
ภาพ 12 Pineapple fruit firmness measuring by texture analyzer	28
ภาพ 13 Flesh color of papaya fruit measuring by Chroma meter	29
ภาพ 14 Peel and flesh color of pineapple fruit measuring by Chroma meter	29
ภาพ 15 Total soluble solids content of papaya fruit juice measuring by digital refractometer	30
ภาพ 16 Titratable acidity determined by using autotitrator.	31

ภาพ 17	Carotenoid and and chlorophyll analysis processes	31
ภาพ 18	Papaya fruit harvesting at three maturity stages, (a) Immature, (b) mature and (c) over-mature	36
ภาพ 19	Means of original spectra of papaya fruit at three maturity stages measured by NIRSystem6500	45
ภาพ 20	Means of second derivative treated spectra of papaya fruit at three maturity measured by NIRSystem 6500	45
ภาพ 21	Means of original spectra of papaya fruit at three maturity stages measured by NIR spectrometer (Hamamatsu)	47
ภาพ 22	Means of second derivative treated spectra of papaya fruit at three maturity stages measured by NIR spectrometer (Hamamatsu)	48
ภาพ 23	Pineapple fruit at three maturity stages, (a) immature 1, (b) mature and (c) over-mature	50
ภาพ 24	Means of original spectra of pineapple fruit at three maturity stages measured by NIRSystem6500	55
ภาพ 25	Means of second derivative treated spectra of pineapple fruit at three maturity stages measured by NIRSystem6500	55
ภาพ 26	Means of original spectra of pineapple fruit at three maturity stages measured by NIR spectrometer (Hamamatsu)	57
ภาพ 27	Means of second derivative treated spectra of pineapple fruit at three maturity measured by NIR spectrometer (Hamamatsu)	58
ภาพ 28	Mango fruit at three maturity stages, immature (a), mature (b) and over mature (c)	60
ภาพ 29	Means of original spectra of mango fruit at three maturity stages measured by NIRSystem6500	64

หน้า

ภาพ 30	Means of second derivative treated spectra of mango fruit at three maturity stages measured by NIRSystem6500	65
ภาพ 31	Means of original spectra of green and ripe papaya fruit at maturity stages	72
ภาพ 32	Means of second derivative treated spectra of green and ripe papaya fruit at maturity stage	72
ภาพ 33	Means of original spectra of pineapple fruit stored at 30 °C for 10 days and 25 days	77
ภาพ 34	Means of second derivative treated spectra of pineapple fruit stored at 30 °C for 10 days and 25 days.	77
ภาพ 35	Means of original spectra of green and ripe mango fruit green and ripe mango fruit at maturity stage	81
ภาพ 36	Means of second derivative treated spectra of green and ripe mango fruit green and ripe mango fruit at maturity stage	81

การพัฒนาเทคนิคการประเมินคุณภาพของผลไม้ไทยโดยเทคโนโลยี แบบไม่ทำลายตัวอย่างด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดแบบพกพา

Development of Thai Fruit Quality Assessment by
Non-Destructive Techniques: Portable NIR

อดิศักดิ์ จูมวงษ์^{*1} พิชษฐ์ น้อยมณี² และ ปาริชาติ เทียนจุมพล²

Adisak Joomwong^{*1}, Pichet Noimanee² and Parichat Theanjumpol³

¹สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

²สถาบันวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

บทคัดย่อ

การศึกษาเพื่อพัฒนาเทคนิคการประเมินคุณภาพของผลไม้ไทยโดยเทคโนโลยีแบบไม่ทำลายด้วยเครื่อง NIR แบบพกพากับผลไม้ จำนวน 3 ชนิด คือ มะละกอ สับปะรด และมะม่วง โดยการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีของผลไม้ และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและเคมีทางคุณภาพของผลไม้ทั้ง 3 ชนิด กับข้อมูลที่ตรวจวัดด้วยเครื่อง NIRSystem6500 และเครื่อง NIR แบบพกพา ผลการทดลองพบว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (TSS) สามารถใช้เป็นดัชนีเก็บเกี่ยวของผลมะละกอ และมะม่วงได้ดีกว่าสับปะรด การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีด้วยเครื่อง NIRSystem 6500 สามารถใช้ประเมินคุณภาพค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของผลไม้ทั้งสามชนิดได้ ทั้งในระหว่างกระบวนการแก่ของผลและกระบวนการสุกของผล ส่วนการใช้เครื่อง NIR spectrometer (NIR แบบพกพา) มีประสิทธิภาพต่ำ

คำสำคัญ: มะละกอ สับปะรด มะม่วง คุณภาพ เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

Abstract

The study on development of Thai fruits quality assessment by non-destructive technology: Portable NIR with 3 fruits (papaya, pineapple and mango). The physical and chemical quality were evaluated and the related to data of fruits quality from NIRSystem 6500 and portable NIR. The results showed that TSS of papaya and mango can use to maturity index better than pineapple. Technique NIR (NIRSystem 6500) can evaluation of TSS value from 3 fruits during maturity and fruit ripening. On the other hand, NIR spectroscopy (NIR portable) is low efficiency.

Key words: papaya, pineapple, mango, quality, near infrared spectroscopy.

บทที่ 1 บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่มีศักยภาพสูงในการผลิตสินค้าเกษตร ทั้งพืชสวน ได้แก่ ผัก และผลไม้ พืชไร่ ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด ถั่วเหลือง และธัญพืช รวมถึงพืชอุตสาหกรรม ได้แก่ มันสำปะหลัง อ้อย ยางพารา เพื่อใช้สำหรับการบริโภคและอุปโภคภายในประเทศ และส่งเป็นสินค้าไปยังต่างประเทศ อีกทั้งประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตที่มีสภาพอากาศร้อนชื้น เหมาะสมต่อการเจริญของพืชหลากหลายชนิดและสายพันธุ์ นับว่าเป็นข้อได้เปรียบกว่าประเทศอื่นอีกประการหนึ่ง แต่จะพบว่าการค้าขายในตลาดโลกปัจจุบันนั้นมีการแข่งขันค่อนข้างสูง ดังนั้นสินค้าเกษตรที่จะส่งออกต้องมีคุณภาพ ซึ่งคุณภาพของสินค้าเกษตร โดยเฉพาะผลไม้ นั้นมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากส่งผลต่อราคาจำหน่าย และจากการค้นคว้าวิจัยในระยะที่ผ่านมาจะพบว่า คุณภาพของผลไม้จะสัมพันธ์กับการระยะแก่ของผล ซึ่งการหาดัชนีการแก่ (maturity index) และการประเมินคุณภาพ (quality assessment) ของผลไม้ไทยหลากหลายชนิดในปัจจุบัน อาทิ มะม่วง ส้ม สับปะรด และอื่นๆ ใช้วิธีการประเมินจากสมบัติทางกายภาพ (physical properties) เป็นหลัก อาทิ การใช้สีผิว สีเนื้อ การเปลี่ยนแปลงสีและความแน่นเนื้อ เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีการตรวจวัดคุณภาพที่เกษตรกรผู้ผลิต ไม่สามารถคัดแยกผลิตผลให้ได้คุณภาพตรงตามที่ตลาดต้องการได้ และนอกจากนั้นยังมีการใช้สมบัติทางเคมี (chemical properties) เป็นตัวชี้วัดอายุการเก็บเกี่ยวและคุณภาพอีกด้วย อาทิ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (soluble solids content) และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (titratable acidity) ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ต้องทำลายผลิตผล และใช้ระยะเวลาในการตรวจวิเคราะห์ค่อนข้างนาน หากต้องการตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบชนิดอื่นที่มีการใช้สารเคมีในการตรวจวิเคราะห์ อีกทั้งมีขั้นตอนและกระบวนการในการตรวจวิเคราะห์ที่ซับซ้อนและมีต้นทุนที่สูงและต้องใช้ผู้ที่มีความรู้ ความชำนาญในการตรวจวิเคราะห์อีกด้วย

ดังนั้น หากสามารถพัฒนาเทคนิคในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพของผลไม้ไทยชนิดต่างๆ ด้วยการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near infrared spectroscopy, NIRS) ทดแทนวิธีการประเมินคุณภาพผลิตผลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จะช่วยลดระยะเวลาและลดต้นทุนการตรวจวิเคราะห์ มีความแม่นยำ และเป็นที่ยอมรับในระดับสากลได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาเทคนิคการประเมินคุณภาพของผลไม้ไทยโดยเทคโนโลยีแบบไม่ทำลาย ด้วยเครื่อง NIR แบบพกพา

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะใช้ผลไม้ จำนวน 3 ชนิด คือ มะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์ สับปะรดพันธุ์ภูแล และ มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณรงควัตถุ สมบัติทางกายภาพและเคมีของผลไม้ด้วยการตรวจวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลไม้ทั้ง 3 ชนิด กับข้อมูลที่ตรวจวัดด้วยเครื่อง NIRSystem6500 และ Hamamatsu เพื่อพัฒนาการประเมินคุณภาพด้วยเครื่อง NIR แบบพกพา

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (near infrared spectroscopy, NIRS) เป็นเทคนิคที่ใช้คลื่นแสงแม่เหล็กไฟฟ้าในการตรวจสอบคุณภาพของตัวอย่างโดยไม่ทำลาย (non-destructive technology) ใช้แสงช่วงความยาวคลื่น 700 – 2500 นาโนเมตร ซึ่งใช้เวลาน้อย ประหยัดแรงงาน และลดต้นทุนการผลิต (Osborne et al., 1993) โดยการตรวจวัดความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลขององค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงมาหาความสัมพันธ์กับค่าวิเคราะห์ทางเคมี โดยวิธี Chemometrics เพื่อให้ได้สมการในการทำนายปริมาณสารชนิดนั้นๆ ที่ปัจจุบันมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ อาทิ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมน้ำมัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมอาหาร และเกษตรที่นำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ทั้งผัก ผลไม้ เมล็ดพันธุ์ รวมถึงเมล็ดพืช (Iwamoto et al., 1995) และนำมาใช้ตรวจวัดผลิตภัณฑ์ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ตั้งแต่การตรวจสอบวัตถุดิบไปจนถึงการตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เมื่อฉายแสงในช่วงความยาวคลื่นเนียร์อินฟราเรด (near infrared, NIR) ลงไปบนตัวอย่าง แสงจะถูกดูดกลืนโดยกระตุ้นให้เกิดการสั่นของโมเลกุลใน functional groups ต่างๆ 2 ลักษณะ คือ การยืดหด (stretching) และ การเปลี่ยนมุม (bending) ช่วงความถี่ overtones และ combination ของหมู่ฟังก์ชัน O-H, C-H, N-H และ O=H ซึ่งเป็นโมเลกุลหลักของสารอินทรีย์ ถ้าโครงสร้างโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ตรวจวัดมีความซับซ้อนสเปกตรัมที่ได้จะยิ่งมีการซ้อนทับกันมากขึ้น มีการประยุกต์ใช้ NIRS ในการตรวจวัดปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ ปริมาณกรด และปริมาณคาร์โบไฮเดรต ในผลไม้ชนิดต่างๆ ได้แก่ พีช แอปเปิ้ล แคนตาลูป แอปเปิ้ล ส้ม มะละกอ บลูเบอรี่ หอมหัวใหญ่ และอื่น ๆ (Kawano, 1998)

2.1.1 ปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของตัวอย่างกับแสง NIR (Kawano, 2002)

เมื่อเครื่อง NIR ให้แสง NIR ส่องผ่านไปยังตัวอย่างจะเกิดปฏิสัมพันธ์กับตัวอย่างได้หลายแบบ ดังนี้

1. Transmittance แหล่งกำเนิดแสง NIR ให้แสง NIR ตกกระทบที่ผิวตัวอย่างด้านหนึ่งและส่องผ่านตัวอย่าง โดยที่ตัวตรวจวัด (detector) จะวัดปริมาณแสงที่ส่องผ่านออกมาจากตัวอย่างในด้านตรงกันข้าม (Figure 1a)

2. Reflectance แหล่งกำเนิดแสง NIR ให้แสง NIR ตกกระทบบนผิวของตัวอย่างและอาจแพร่กระจายในปริมาณหนึ่งก่อน โดยที่ detector จะวัดปริมาณแสงที่สะท้อนกลับออกมาจากผิวของตัวอย่าง (Figure 1b)

3. Transflectance แหล่งกำเนิดแสง NIR ให้แสง NIR ตกกระทบบนผิวของตัวอย่างและส่องผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบบนวัตถุที่ไม่ดูดกลืนแสง (เช่น แผ่นเซรามิก, ทอง หรืออะลูมิเนียม) ที่อยู่ด้านล่าง ตัวอย่างแล้วเกิดการสะท้อนกลับผ่านตัวอย่างมายัง detector โดยที่ detector จะทำการบันทึกการดูดกลืนแสงทั้งในขณะที่แสงส่องลงไปด้านล่างและขณะที่แสงสะท้อนกลับมายัง detector (Figure 1c)

4. Interactance กระบวนการนี้เกิด ในกรณีที่ใช้หัววัดใยแก้วนำแสง (fiber optics probe) แสงจะออกมาจากส่วนวงแหวนด้านนอกของหัววัดมาตกกระทบบนตัวอย่าง และแสงที่สะท้อนออกมาจากเนื้อตัวอย่างจะถูกส่งไปยัง detector บริเวณส่วนกลางของใยแก้วนำแสง (Figure 1d)

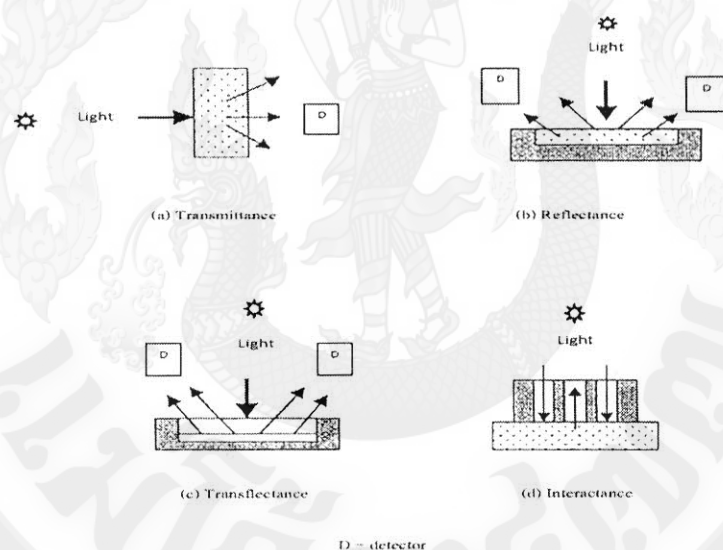


Figure 1 Sample presentations, (a) transmittance, (b) reflectance (c) transflectance and (d) interactance (Kawano, 2002)

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม

1) ขนาดอนุภาคของตัวอย่าง (particle size) ตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน จะทำให้ได้เส้นสเปกตรัมที่ต่างกันด้วย โดยตัวอย่างขนาดเล็กสามารถสะท้อนแสงได้ดีกว่าตัวอย่างขนาดใหญ่ ฉะนั้น

ค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมตัวอย่างที่มีขนาดเล็กจึงมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ (Osborne et al., 1993)

2) ความชื้น (moisture) ตัวอย่างที่มีความชื้นสูงจะมีค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมสูงกว่าตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำ จากการศึกษาของ Osborne et al. (1993) พบว่า สเปกตรัมของข้าวสาลีก่อนอบและหลังอบแห้ง จะเห็นพีกของน้ำจะหายไปและค่าการดูดกลืนแสงลดลงทั้งสเปกตรัม เนื่องจากตัวอย่างแห้งสะท้อนแสงได้มากกว่าตัวอย่างเปียก

3) อุณหภูมิของตัวอย่าง (sample temperature) ตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างเดียวกัน แต่อุณหภูมิในตัวอย่างแตกต่างกันก็อาจทำให้ได้เส้นสเปกตรัมที่ต่างกัน เนื่องจากอุณหภูมิของตัวอย่างจะมีผลโดยตรงต่อโมเลกุลของน้ำ ซึ่งความแตกต่างของสเปกตรัมนี้จะไม่สามารรถสังเกตเห็นได้ชัดเจน แต่สามารถส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของการได้มาก (Kawano et al., 1995)

4) การบรรจุ (packing) ตัวอย่างในเซลล์บรรจุที่มีการอัดตัวแน่นมาก ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างตัวอย่างน้อย มีการสะท้อนกลับของแสงมาก ค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมจะมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่มีการอัดตัวกันน้อย (William and Norris, 2001)

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการวิเคราะห์ด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

1) การสุ่มและการเตรียมตัวอย่าง

การสุ่มตัวอย่างมีความสำคัญมากที่จะทำให้ได้ผลการทำนายที่ดี ตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการควรเป็นตัวแทนที่ดีของตัวอย่างในอนาคต ในกรณีของผลิตผลทางการเกษตรตัวอย่างควรต้องมีความหลากหลายในเรื่องของพันธุ์ พื้นที่การผลิต ฤดูเพาะปลูกและระยะสุกแก่ ค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ศึกษาควรจะมีค่าครอบคลุมค่าสูงสุดและต่ำสุด (Kawano, 2002)

การเตรียมตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์ด้วย NIRS อาจไม่จำเป็นในบางผลิตผลเพราะอาจสามารถวัดทั้งผลได้แต่อาจมีการเตรียมตัวอย่างบ้างกับตัวอย่างบางชนิด เช่น การบด การ รวมถึงการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่าง ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง

- อุณหภูมิของตัวอย่าง ตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างเดียวกัน แต่อุณหภูมิในตัวอย่างแตกต่างกันก็อาจทำให้ได้ข้อมูลสเปกตรัมที่ต่างกัน เนื่องจากอุณหภูมิของตัวอย่างมีผลโดยตรงต่อโมเลกุลของน้ำ ซึ่งความแตกต่างของสเปกตรัมนี้อาจจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน แต่จะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของการสมการ (Blanco and Valdés, 2004) ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ควรคงที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่จะใช้ในการวิเคราะห์ในอนาคต

- การบรรจุ ตัวอย่างในเซลล์บรรจุที่มีการอัดตัวแน่นมาก ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างตัวอย่างน้อย มีการสะท้อนกลับของแสงมาก ค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมจะมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่มีการอัดตัวน้อย (William and Norris, 2001)

- ขนาดอนุภาคของตัวอย่าง ตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน จะทำให้ได้ข้อมูลสเปกตรัมที่แตกต่างกันด้วย โดยตัวอย่างขนาดเล็กสามารถสะท้อนแสงได้ดีกว่าตัวอย่างขนาดใหญ่ ดังนั้นค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่มีขนาดเล็กจึงมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ (Osborne et al., 1993; Paulsen et al., 2003)

- ความชื้น ตัวอย่างที่มีความชื้นสูงจะมีค่าการดูดกลืนแสงสูงกว่าตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำ จะเห็นว่าตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำจะมีค่าการดูดกลืนแสงของน้ำต่ำกว่าที่ความยาวคลื่น 1940 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่โมเลกุลของน้ำมีการดูดกลืนแสง (Osborne et al., 1993)

2) การเลือกความยาวคลื่น

เนื่องจากสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง NIR จะมีสเปกตรัมที่ซ้อนทับกันและมีพีกที่กว้าง ดังนั้น ความแม่นยำของสมการทำนายนอกจากขึ้นอยู่กับเตรียมตัวอย่างแล้ว ยังขึ้นอยู่กับ การเลือกความยาวคลื่นด้วย โดยส่วนมากนั้นพบว่าการใช้ความยาวคลื่นทั้งสเปกตรัม (full spectrum) จะให้ความแม่นยำของสมการดีกว่าการใช้ความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียวหรือบางช่วงสเปกตรัม ในการสร้างสมการทำนายด้วย multiple linear regression (MLR) การเลือกความยาวคลื่นจะเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากต่อสมการทำนาย แต่จะมีผลกระทบน้อยลงเมื่อใช้ partial least squares regression (PLSR) แต่อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นว่าการสร้างสมการทำนายด้วย PLSR นั้นช่วงของความยาวคลื่นที่เลือกก็มีผลต่อความแม่นยำของสมการ (Osborne et al., 1993) ในการสร้างสมการด้วย PLSR กับตัวอย่างที่มีความชื้นสูง เช่น ผักและผลไม้ ซึ่งปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำตาลมีความสัมพันธ์กันอย่างมาก เนื่องจากน้ำมีคุณสมบัติในการดูดกลืนคลื่นแสง NIR ได้ดีจึงพบพีกที่ชัดเจนกว่าพีกของน้ำตาล การเลือกความยาวคลื่นจึงอาจเกิดความผิดพลาดได้บ่อย มีการทดลองพบว่า การเลือกความยาวคลื่น 950 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นเป็นความยาวคลื่นแรกของสมการทำนายปริมาณน้ำตาล ทำให้มีความแตกต่างเฉลี่ย (bias) สูงกว่าการเลือกความยาวคลื่นที่ 906 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับน้ำตาล (Kawano, 2002)

3) การวิเคราะห์ค่าเคมี

เนื่องจาก NIRS เป็นวิธีการวิเคราะห์แบบใช้ความสัมพันธ์ลำดับที่ 2 (Secondary relation) ข้อมูลการวิเคราะห์ทางเคมีจึงมีผลกระทบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย NIRS นอกจากนี้การใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ทางเคมีนาน อาจทำให้องค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อ

ความแม่นยำของข้อมูลวิเคราะห์ทางเคมี ทำให้มีความแปรปรวนสูง

2.1.4 การแปลงข้อมูลสเปกตรัม

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสเปกตรัม อาทิ อุณหภูมิ ขนาดตัวอย่าง การบรรจุตัวอย่าง ความแตกต่างที่เป็นผลมาจากความเข้มข้นขององค์ประกอบทางเคมีที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่งจะทำให้สเปกตรัมที่ได้มีความแตกต่างกันอันเป็นผลจากการกระเจิงแสง (scattering) และนอกจากนี้สเปกตรัมที่ได้จากการดูดกลืนแสงเนียร์อินฟราเรด (NIR) เป็นสเปกตรัมที่มีการซ้อนทับกันของพีก (overlapping) ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำของสมการที่สร้างขึ้น (Bokobza, 1998) ดังนั้นจึงต้องแปลงข้อมูลสเปกตรัมเพื่อลดอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ โดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้สมการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น วิธีการแปลงข้อมูลสเปกตรัมที่ดีที่สุด คือ วิธีที่ทำให้ได้สมการทำนายที่มีความสามารถทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้ใกล้เคียงที่สุด ทำได้โดยการทดลองใช้แต่ละวิธีจนกว่าจะได้วิธีการทำนายที่มีความแม่นยำที่สุด โดยต้องเข้าใจความหมายและคำนึงข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีให้ชัดเจน (Hruschka, 2001) วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ในการแปลงข้อมูลสเปกตรัม ได้แก่

1) Multiplicative scatter correction (MSC) สเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงย่าน NIR แบบ diffuse reflectance และแบบ transmittance มักเกิดการกระเจิงแสง ซึ่งการกระเจิงแสงโดยทั่วไปจะทำให้ความชันโดยรวมของสเปกตรัมเปลี่ยนไป จึงมีการใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า MSC คือการแปลงข้อมูลสเปกตรัมโดยการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสเปกตรัม เพื่อลดผลกระทบแบบ multiplicative ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดจากการใช้ตัวอย่างชนิดเดียวกัน แต่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน MSC เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการลดค่าความผิดพลาด จากอิทธิพลของการกระเจิงแสง วิธีการ คือ การหาสเปกตรัมเฉลี่ยของการทดลองนั้น จากนั้นหาค่าคงที่ค่าหนึ่งมาลบออกจากสเปกตรัมในแต่ละตัวอย่าง เพื่อให้มีค่าใกล้เคียงกับสเปกตรัมเฉลี่ยหรือเพื่อเป็นการลดการเลื่อนตัวของสเปกตรัมออกจากสเปกตรัมเฉลี่ย และต้องหาค่าคงที่ค่าหนึ่งมาหารค่าการดูดกลืนแสง หรือค่า $\log(1/R)$ (R =Reflectance) ของทุกๆ จุดของตัวอย่างเพื่อปรับความชันของสเปกตรัมที่เปลี่ยนไปหรือก็คือการปรับค่า $\log(1/R)$ ให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงเพื่อให้มีค่าตรงกับสเปกตรัมเฉลี่ย (อนุพันธ์, 2545)

2) Smoothing เป็นการแปลงข้อมูลสเปกตรัมที่นิยมใช้มากวิธีหนึ่ง เป็นวิธีการที่ง่าย มักจะใช้กับข้อมูลที่สัญญาณรบกวน (noise) มาก ทำให้สเปกตรัมไม่เรียบ เป็นวิธีการที่ทำได้โดย การหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average) โดยมีการแทนค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความยาวคลื่นด้วยค่าเฉลี่ยของการดูดกลืนแสงในช่วงหนึ่งความยาวคลื่น แล้วคำนวณซ้ำจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ซึ่งสามารถลดปัญหาของสัญญาณรบกวนต่อค่าการดูดกลืนแสง (signal to noise) โดยจะได้สเปกตรัมที่มีลักษณะเหมือน

สเปกตรัมดั้งเดิม แต่จะเรียบสม่ำเสมอมากกว่า (Siesler et al., 2002)

3) Derivative การทำอนุพันธ์เป็นการหาความชันของเส้นสเปกตรัม เพื่อแก้ปัญหาคือพื้นฐานกว้าง เนื่องจากการซ้อนทับกันของพีกและอิทธิพลจากการยกตัวของเส้นสเปกตรัม (baseline shift) ที่เกิดจากการกระเจิงแสง เมื่อแสงตกกระทบที่ตัวอย่างทำให้แสงเปลี่ยนทิศทาง การบรรจุที่แตกต่างกัน รวมทั้งความชันภายในตัวอย่างที่แตกต่างกัน มีผลต่อการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น (λ) ต่างๆ (William and Norris, 2001) การแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 1 (first derivative) เป็นการหาความชันของทั้งสเปกตรัม หมายถึงการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่น $[(A_{\lambda_2} - A_{\lambda_1})/(\lambda_2 - \lambda_1)]$ (ธีรศักดิ์และวนิดา, 2550) สามารถลดปัญหาการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัม แต่ยังมีพื้นฐานกว้าง จึงไม่สามารถแยกพีกออกจากกันอย่างชัดเจนได้ อีกทั้งวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 ให้ผลเป็นค่าความชันของสเปกตรัมแต่ละความยาวคลื่น ซึ่งทำให้แปลความหมายได้ยาก แต่การแปลงข้อมูลด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 (second derivative) เป็นการนำอนุพันธ์อันดับที่ 1 มาหาความชันอีกครั้ง และเป็นที่ยอมรับมากกว่า (Siesler et al., 2002) เพราะสามารถแยกพีกที่มีการซ้อนทับกันออกได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการทำอนุพันธ์อันดับที่สูงขึ้นทำให้ความกว้างของพีกแคบลง สามารถลดผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแนวแกน Y ทำให้ทราบตำแหน่งความยาวคลื่นที่ชัดเจนขึ้นแต่สเปกตรัมมีลักษณะหัวกลับลงมาด้านล่าง

นอกจากนี้ยังมีวิธีการแปลงสเปกตรัมที่นิยมใช้อีกหลายวิธี เช่น Standard normal variate (SNV) ซึ่งจะมีวิธีการคล้ายกับ MSC แต่ SNV จะทำการแปลงเฉพาะสเปกตรัมและเฉพาะความยาวคลื่นที่ได้รับผลกระทบจากการกระเจิงแสง ซึ่งการหาค่า SNV เพื่อมาลดการกระเจิงแสงของสเปกตรัมนั้น ทำได้โดยการลบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นนั้นๆ ด้วยค่าเฉลี่ยการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นนั้น และหารด้วยค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Branes et al., 1993)

2.1.5 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

การวิเคราะห์เชิงปริมาณต้องมีการสร้างสมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (calibration equation development) โดยกลุ่มตัวอย่างที่จะใช้ในการสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นระหว่างข้อมูลวิเคราะห์ทางเคมีกับข้อมูลสเปกตรัม จะต้องมีจำนวนตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์อย่างพอเพียงทั้งตัวอย่างในปัจจุบันและตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ในอนาคตโดยปริมาณองค์ประกอบทางเคมีจะต้องมีค่าครอบคลุมปริมาณทั้งต่ำสุดและสูงสุดของตัวอย่าง ต้องมีการสุ่มตัวอย่างที่เพียงพอและเป็นตัวแทนที่ดี เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่ได้จากการทดลอง (Hruschaka, 2001) และวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ก็มีผลต่อความแม่นยำของ NIR ด้วย (พรณทิพย์, 2548; Kawano, 2002)

การสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (Calibration equation)

การสร้างสมการเทียบมาตรฐานสามารถทำได้ วิธี 2

(1) Wavelength selection method เป็นวิธีการที่ต้องเลือกข้อมูลที่มีความยาวคลื่นหนึ่งๆ ที่มีความสัมพันธ์กับค่าวิเคราะห์ทางเคมี โดยการพิจารณาจากข้อมูลทางสถิติ

- Simple linear regression (SLR) เป็นการสร้างสมการที่ประกอบด้วยตัวแปรสองชนิดที่มีความสัมพันธ์กัน คือ ตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) SLR เป็นการเลือกพิจารณาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างที่ความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียว (single wavelength) แต่เนื่องจากตัวอย่างประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิด ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย NIRS จึงไม่สามารถใช้ความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียวได้จึงต้องใช้ข้อมูลจากหลายความยาวคลื่น (multiple wave length) เพื่อทำนายองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ สมการ SLR สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Y = K_0 + K_1 X$$

เมื่อ

Y = ค่าองค์ประกอบทางเคมี

X = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับค่าทางเคมี

K_0 = ค่าคงที่ ณ จุดตัดแกน Y เมื่อ X มีค่าเท่ากับ 0

K_1 = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

- Multiple linear regression (MLR) เป็นการประเมินค่าตัวแปรตาม (Y) โดยใช้ตัวแปรอิสระ (X) มากกว่าหนึ่งตัวที่ได้จากการเลือกความยาวคลื่นมากกว่าหนึ่งความยาวคลื่นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม แต่วิธีนี้มีข้อเสีย คือ ในการคัดเลือกตัวแปรอิสระหรือความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดมาสร้างสมการอาจได้ข้อมูลที่ไม่ครอบคลุมมากพอ จึงทำให้ได้ค่าจากการทำนายสูงหรือต่ำกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี (Osborne, 1993)

$$C = K_0 + K_1 A_1 + K_2 A_2 + \dots + K_n A_n$$

เมื่อ C = ค่าองค์ประกอบทางเคมี

$A_1, A_2, \dots, A_n$ = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นตำแหน่งที่ n

K_0 = ค่าคงที่

$K_1, \dots, K_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ความยาวคลื่น ตำแหน่งที่
n

(2) Full spectrum method เนื่องจากการพิจารณาเลือกความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่าองค์ประกอบที่ศึกษานั้นค่อนข้างทำได้ยาก เกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย การใช้ข้อมูลจากความยาวคลื่นทั้งหมดในสเปกตรัม (Full spectrum) หรือในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจ มาสร้างสมการเป็นการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม โดยทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) และสร้างตัวแปรกลุ่มใหม่ขึ้นมาวิธีทางสถิติที่นิยมได้แก่

- Principal component regression (PCR) เป็นการวิเคราะห์ผล โดยทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) ด้วยการแบ่งกลุ่มตัวแปรอิสระเดิมที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรใหม่หรือองค์ประกอบที่เรียกว่าแฟกเตอร์ (factor score, F) หรือ principal component (PC) แล้วจึงนำค่าแฟกเตอร์ไปสร้างสมการเชิงถดถอย ก่อนนำมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม (Y) ที่ได้จากวิธีวิเคราะห์มาตรฐานเพื่อสร้างสมการทำนายตัวแปรตาม(Y)

- Partial least squares regression (PLSR) เป็นเทคนิคในการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) เช่นเดียวกับ PCR แต่จะแตกต่างกันตรงที่ในช่วงจัดกลุ่มการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) โดยการสร้างแฟกเตอร์นั้นจะมีการนำข้อมูลตัวแปรตาม (Y) เข้ามารวมในการสร้างแฟกเตอร์ ซึ่งช่วงความยาวคลื่นจะมีค่าสัมประสิทธิ์ (loading weight, W) แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ได้จากวิธีทางเคมีที่นำมาหาความสัมพันธ์กัน ทำให้สมการที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้

$$C = K_0 + K_1 F_1 + K_2 F_2 + \dots + K_n F_n$$

เมื่อ C = ค่าองค์ประกอบทางเคมี

$F_1, F_2, \dots, F_n$ = ค่าตัวแปรใหม่ที่ตำแหน่ง n ตัวแปร

K_0 = ค่าคงที่

$K_1, K_2, \dots, K_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่วงน้ำหนักที่ตำแหน่ง n ตัวแปร

ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสมการ

- 1) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R) คือ ค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) หากค่าที่คำนวณได้มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1 หมายความว่า สมการที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้ในการอธิบายค่าทำนายที่เกิดจากอิทธิพลของตัวแปรอิสระ (X) กับค่าแปรตาม (Y) ที่มีความสัมพันธ์กันมาก
- 2) ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มสร้างสมการ (standard error of calibration, SEC) คือ ค่าที่บอกถึงสมการที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการทำนายต่อไปได้ดีหรือไม่ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย
- 3) ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มทดสอบสมการ (standard error of prediction, SEP) คือ ค่าที่บอกถึง การนำเอาสมการที่สร้างขึ้น มาทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากเครื่อง NIR มีความแม่นยำสูงหรือต่ำ ซึ่งถ้าค่าที่คำนวณได้มีค่าน้อย หมายความว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำสูง
- 4) อัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่ม validation set ต่อค่า SEP (ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP; RPD) ค่าจากที่คำนวณได้มีค่าสูง หมายถึง ค่าผิดพลาดมาตรฐานที่ทำนายได้จาก NIR มีค่าน้อยกว่าค่าผิดพลาดมาตรฐานที่ได้จากวิเคราะห์จริง
- 5) ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิงกับค่าที่ได้จาก NIR (average of difference between actual value and NIR value; bias) คือ ค่าเฉลี่ยของการทำนายข้อมูลของ ตัวแปรตาม (Y) และค่าเฉลี่ยข้อมูลของตัวแปรอิสระ (X) มีความแตกต่างกันหรือไม่ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย

2.1.6 การประยุกต์ใช้กับผลิตผลทางการเกษตร

Kawano et al. (1992) ได้นำเทคนิคเนียร์อินฟราเรดมาใช้เพื่อตรวจวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในผลท้อ (peach) โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของผลท้อ ในช่วงความยาวคลื่น (wavelength region) 700-1100 นาโนเมตร กับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (%Brix) พบว่า NIRS สามารถวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในผลท้อได้ โดยเปลี่ยนสเปกตรัมให้อยู่ในรูปของอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative spectra) และหาความสัมพันธ์แบบการถดถอยเชิงเส้นพหุ (multiple linear regression, MLR) โดยเลือกค่าการดูดกลืนแสงที่ 906 นาโนเมตร เป็นความยาวคลื่นแรกของสมการซึ่งคือ แถบการดูดกลืนแสงของน้ำตาล (sucrose band) สมการประกอบด้วยค่าการดูดกลืนแสงที่ 4 ความยาวคลื่นด้วยกัน คือ ที่ 906, 878, 870 และ 889 นาโนเมตร มีค่าผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายความหวานในกลุ่ม calibration set (standard error of calibration, SEC) เท่ากับ 0.48 เปอร์เซ็นต์บริกซ์ ค่าผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายความหวานในกลุ่ม validation set (standard error of prediction, SEP) เท่ากับ 0.50 เปอร์เซ็นต์บริกซ์ และค่าความแตกต่างเฉลี่ย (bias) เท่ากับ 0.01 เปอร์เซ็นต์บริกซ์ เช่นเดียวกับ Miyamoto et al. (1998)

ได้ใช้เทคนิค NIRS ในการตรวจวัดปริมาณกรดซิตริกในผล Satsuma mandarins และเนื่องจากพลังงานแสงที่ส่องผ่านตัวอย่างมีความเข้มต่ำมาก และเป็นการยากในการวัดความเข้มของแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 800 นาโนเมตร ดังนั้นจึงต้องมีการปกปิดของตัวอย่างด้วย ทั้งนี้เพื่อความแม่นยำ พบว่าจากการสร้างสมการ calibration ด้วยเทคนิค PLS (Partial least square) นั้นสมการประกอบด้วย 12 แฟกเตอร์ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r) เท่ากับ 0.963 bias เท่ากับ -0.013% และ SEP เท่ากับ 0.146% นอกจากนี้ Greensill and Newman (1999) นำเทคนิค NIRS เพื่อหาความสุกแก่ของมะละกอ Pawpaws (*Carica papaya*) ด้วยการวัดการส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 500-1000 nm พบว่า ลักษณะปรากฏของมะละกอสุกที่ระยะต่างๆ คือ ก่อนสุกแก่ (immature green) จนถึงผลสุก มีความสัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 720-815 นาโนเมตร รวมทั้ง Saranwong et al. (2004) ได้ใช้เทคนิค NIR ทำนายคุณภาพของมะม่วงที่พร้อมรับประทาน ในขณะที่ยังเป็นผลดิบ ซึ่งพบว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างค่าของน้ำหนักแห้งและแป้งในผลดิบ ส่งผลต่อค่าของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดในผลสุก McGlone et al. (2003) ตรวจวัดน้ำหนักแห้งและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของผลแอปเปิ้ลพันธุ์ Royal Gala ด้วยเทคนิค NIRS ในช่วงความยาวคลื่น Clark et al. (2003) ที่ใช้เทคนิค NIRS หา น้ำหนักแห้งในผลอะโวคาโด (*Persea americana* Mill.) ในทำนองเดียวกัน Gomez et al. (2006) ใช้เทคนิค VIS/NIRS ความยาวคลื่น 400-2500 nm ตรวจวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ความเป็นกรด (acidity, pH) รวมถึงความแน่นเนื้อของผลส้ม Satsuma mandarin สมการเทียบมาตรฐานของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ มีค่า r เท่ากับ 0.94 ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (root mean square error of prediction, RMSEP) เท่ากับ 0.33% Brix ส่วนสมการเทียบมาตรฐานของปริมาณกรดและความแน่นเนื้อ มีค่า r เท่ากับ 0.8 และ 0.83 ค่า RMSEP เท่ากับ 0.18% และ 8.53 N

นอกจากปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีต่างๆ แล้วเทคนิค NIRS ยังได้ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบอาการผิดปกติ ในผลไม้ด้วย อาทิ Clark et al. (2003) ใช้เทคนิค NIRS แบบการส่องผ่าน (Transmittance) ตรวจอาการไส้ดำ (brown core) ในผลแอปเปิ้ล พบว่า สเปกตรัมของผลแอปเปิ้ลเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในช่วงความยาวคลื่น 700 – 900 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การเกิดสีดำในเนื้อเยื่อแอปเปิ้ล ต่อมา Fu et al. (2007) พบว่า การตรวจหาอาการไส้ดำ (brown heart) ในผลสาลี่โดยวัดสเปกตรัมแบบการส่องผ่านของแสง NIR (transmittance) ให้ผลดีกว่าการวัดสเปกตรัมแบบการสะท้อนกลับ (reflectance) นอกจากนี้ Clark et al. (2004) สามารถใช้ เทคนิค VIS/NIR แยกผลกีวี่ที่พบอาการผิดปกติในระหว่างการเก็บรักษา (storage disorder) ออกจากผลกีวี่ปกติ (sound) ได้ ในทำนองเดียวกัน Han et al. (2006) ตรวจสอบอาการไส้ดำในผลสาลี่จีนโดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 651 – 1282 นาโนเมตร พบว่า การวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี Mahalanobis Distance (MD)

สามารถแยกผลสาส์นที่พบอาการไส้ดำออกจากผลสาส์นปกติได้ นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกความรุนแรงของอาการไส้ดำออกได้เป็น 3 ระดับ คือ ต่ำ (slight) ปานกลาง (moderate) และรุนแรง (severe) นอกจากนี้เทคนิค NIRS ยังถูกนำไปตรวจหาอาการสะท้อนหนาว (chilling injury) ในผลมะม่วงอีกด้วย พบว่า สเปกตรัมของผลมะม่วงที่พบอาการสะท้อนหนาวแตกต่างจากสเปกตรัมของผลมะม่วงปกติ สมการเทียบมาตรฐานของการรบกวนของอิเล็กโตรไลต์ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (correlation of determination, R^2) ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายตัวเอง (root mean square error of cross validation, RMSECV) และค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (root mean square error of prediction, RMSEP) เท่ากับ 0.74, 1.50 % และ 1.89 % ตามลำดับ (Suwapanich and Theanjumol (2008); Theanjumol et al. (2008))

2.2 ผลไม้

2.2.1 มะละกอ

มะละกอ (*Carica papaya* L.) เป็นไม้ผลที่คนทั่วไปนิยมรับประทาน ผลดิบนำมาปรุงอาหาร ผลสุกรับประทานสด มีถิ่นกำเนิดในอเมริกากลาง ถูกนำเข้าสู่ประเทศไทยในสมัยกรุงศรีอยุธยา ผลดิบมีสีเขียว เมื่อสุกแล้วเนื้อในจะมีสีเหลืองถึงส้ม นอกจากจะบริโภคภายในประเทศแล้วยังสามารถส่งไปจำหน่ายตลาดต่างประเทศด้วย

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์: ไม้ล้มลุกอายุหลายปีขนาดใหญ่ อายุหลายปี สูง 2-8 เมตร ลำต้นตั้งตรง มักไม่แตกกิ่ง ไม่มีแก่น ต้นอวบน้ำ มีรอยแผลเป็นของก้านใบที่หลุดร่วงไป มีน้ำยางสีขาวทั่วลำต้น การเก็บเกี่ยวผลมะละกอนั้นถือเป็นเรื่องสำคัญไม่น้อย เพราะความแก่อ่อนของผลที่จะเก็บเกี่ยวมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพของมะละกอและอายุการเก็บรักษาด้วย ดังนั้น จึงต้องเก็บผลมะละกอในระยะที่เหมาะสม การเก็บเกี่ยวผลมะละกอเพื่อกินผลสุก ควรปล่อยให้ผลสุกเต็มที่ ผลมะละกอที่แก่เต็มที่ที่วัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ประมาณ 11-13 % Brix โดยสามารถแบ่งความแก่ของมะละกอได้ดังนี้

- ระยะแก่จัดสีเขียว ผลจะมีสีเขียวเข้ม เนื้อผลแน่น
- ระยะเริ่มเปลี่ยนสีผล จะมีพื้นผิวสีเขียวเข้มและจะมีสีเหลืองอ่อน ๆ บริเวณเนินสันทางด้านปลายผล
- ระยะสุกหนึ่งในสี่ผล จะมีพื้นผิวสีเขียว และเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอมส้มชัดเจนบริเวณเนินสันด้านปลายผล
- ระยะสุกสองในสี่ ผิวของผลจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ประมาณครึ่งผล
- ระยะสุกสามในสี่ ผิวของผลจะมีสีเหลืองมากกว่าสีเขียว เนื้อผลนุ่ม เมื่อใช้มือกดจะยุบตัวลง ระยะสุกเต็มที่ ผิวจะมีสีเหลืองเกือบเต็มผล จะมีสีเขียวปะปนบ้างเล็กน้อย

มะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์

สำหรับมะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์ซึ่งกำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน ลำต้นใหญ่สีเขียว ใบมี 11 แฉกใหญ่ กลางใบมีกระโดงใบ 1 ใบ ก้านใบมีสีเขียวตั้งขึ้น ดอกออก เป็นช่อ ติดผลดก รูปทรงกระบอก คล้ายลูกฟักอ่อน อายุ เก็บเกี่ยว 8 เดือน น้ำหนักผลประมาณ 800-2,000 กรัม ต่อผล เนื้อสีแดงอมส้ม ไม่ละ เนื้อหนา 2.5-3.0 เซนติเมตร ความหวานวัดได้ 11-13 เปอร์เซนต์บrix ผลผลิตต่อต้น 60-80 กิโลกรัม จุดเด่นที่มองออกง่ายมาก ว่าผลมะละกอฮอลแลนด์เป็นอย่างไรนั้นที่ปลายผลจะป้านคล้ายผลฟักอ่อนดอก และเพศของมะละกอ

คุณค่าทางอาหารของผลมะละกอ พบว่าเนื้อมะละกอประกอบด้วยสารอาหารต่างๆ ในปริมาณ 100 กรัมของผลที่บริโภคได้ ดังนี้ ดังนี้

โปรตีน	0.5 กรัม
ไขมัน	0.1 กรัม
แคลเซียม	24 มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	22 มิลลิกรัม
เหล็ก	0.6 มิลลิกรัม
โซเดียม	4 มิลลิกรัม
วิตามิน ซี	70 มิลลิกรัม และอื่นๆ

2.2.2 สับปะรด

สับปะรด (*Ananas Comosus Merr.*) เป็นพืชล้มลุกชนิดหนึ่งมีใบเลี้ยงเดี่ยว ที่มีต้นกำเนิดมาจากทวีปอเมริกาใต้ การปลูกก็สามารถปลูกได้ง่ายโดยการใช้หน่อหรือที่เป็นส่วนยอดของผลที่เรียก ว่า จุก มาฝังกลบดินไว้ และออกเป็นผล เปลือกของผลสับปะรดภายนอกมีลักษณะคล้ายตาต่อมรอบผล

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์: สับปะรดเป็นพรรณไม้ล้มลุก แตกหน่อเป็นกอใหญ่สูงประมาณ 90 เซนติเมตร เมื่อให้ผลแล้วต้นเดิมจะตายไป ใบ เป็นใบเดี่ยวยาวแข็ง รูปร่างเรียวยาวแหลม เรียงสลับซ้อนๆกัน กว้างประมาณ 5- 6 เซนติเมตร ยาวประมาณ 80- 100 เซนติเมตร ขอบใบมีหนาม ผิวใบเรียบมีสีเขียว และมีนวลสีขาวเคลือบอยู่

การเก็บเกี่ยว

วิธีการเก็บเกี่ยว

- สับปะรดสำหรับส่งโรงงานให้ใช้มือหักผลออกจากต้นโดยไม่ต้องเหลือก้าน แล้วหักจุกออก

- สับปะรดสำหรับบริโภค ใช้มีดตัดให้เหลือก้านยาวติดผลประมาณ 10 เซนติเมตร ไม่ต้องหักจุกออก

สับปะรดสำหรับโรงงาน

- เก็บเกี่ยวผลสับปะรดที่มีความสุกแก่ตามมาตรฐาน
- ห้ามใช้สารเคมีทุกชนิดเร่งให้สับปะรดสุกก่อนกำหนด

สับปะรดสำหรับบริโภคสด

- เก็บเกี่ยวเมื่อตาสับปะรดเริ่มเปิด 2-3 ตา หรือผิวเปลือกเปลี่ยนเป็นสีเหลืองประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

สรรพคุณทางยา: คุณค่าทางยาหรือสรรพคุณทางยาของสับปะรดมีอยู่มาก เช่นกัน เพียงแค่รับประทานสับปะรดเข้าไปเพียง 1-2 ชิ้น ก็เหมือนกับได้รับประทานยาช่วยย่อยอาหาร ทำให้ระบบอาหารเป็นปกติ ช่วยขับปัสสาวะ บำรุงสุขภาพอีกด้วย ฆ่าพยาธิ ขับระดู บำรุงกำลัง แก้หนองใน แก้กษัย แก้ไขข้อ ทำให้สุขภาพของดี

สับปะรดพันธุ์ภูแล

เป็นสับปะรดในกลุ่มสายพันธุ์วิน ที่มีผู้นำพันธุ์จากจังหวัดภูเก็ต มาปลูกครั้งแรกที่ตำบลนางแล อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย แต่ด้วยสภาพพื้นที่ที่แตกต่างทั้งอากาศและภูมิประเทศ ทำให้สับปะรดที่ได้ มีลักษณะแตกต่างจากสับปะรดภูเก็ต คือมีผลขนาดเล็ก ทรงกลม มีจุกใหญ่ตั้งตรง รับประทานได้ทั้งเนื้อและแกน เรียกสับปะรดนี้ว่า สับปะรดภูแล

ปริมาณธาตุอาหารที่พบในเนื้อสับปะรดสด (100 กรัม)

คาร์โบไฮเดรต	12.63 กรัม	วิตามิน ซี	6.2	มิลลิกรัม
- น้ำตาล	9.26 กรัม	แคลเซียม	13	มิลลิกรัม
- ไคเอทรีไฟเบอร์	1.4 กรัม	เหล็ก	0.28	มิลลิกรัม
ไขมัน	0.12 กรัม	แมกนีเซียม	12	มิลลิกรัม
โปรตีน	0.54 กรัม	แมงกานีส	0.9	มิลลิกรัม
วิตามิน บี 1	0.079 มิลลิกรัม	ฟอสฟอรัส	8	มิลลิกรัม
วิตามิน บี 2	0.031 มิลลิกรัม	โพแทสเซียม	115	มิลลิกรัม
วิตามิน บี 3	0.489 มิลลิกรัม	สังกะสี	0.1	มิลลิกรัม

ที่มา: USDA National Nutrient Database for Standard Reference

2.2.3 มะม่วง

มะม่วง (*Mangifera indica* Linn.) มีพื้นที่ปลูกกระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ ภาคเหนือ คือ เชียงใหม่ พิจิตร โลก และพิจิตร ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คือ เลย ชัยภูมิ และอุดรธานี ภาคกลาง คือ กาญจนบุรี สุพรรณบุรี และเพชรบุรี มะม่วงที่ปลูกในภาคกลางจะเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ในช่วงเดือนมีนาคมถึงเดือนเมษายน ส่วนมะม่วงที่ปลูกในภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะเก็บเกี่ยวในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงมิถุนายน มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เป็นพันธุ์หนึ่งที่มีการส่งออกในรูปผลสดเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีลักษณะตรงกับความต้องการของตลาดทั้งในและต่างประเทศ ผลของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้มีขนาดใหญ่ หนักประมาณ 400 กรัม ผลอ่อนเกือบกลมหัวใหญ่ปลายแหลม ผลค่อนข้างยาว เนื้อมาก เมล็ดเล็ก มีเปลือกบางจึงชำได้ง่ายและอ่อนแอต่อโรคแอนแทรกโนส ตั้งแต่ระยะออกดอกจนถึงผลแก่ประมาณ 115 วัน เมื่อผลดิบมีรสเปรี้ยว ผิวสีเขียวปนเหลือง เนื้อแน่น เมื่อผลสุกมีผิวสีเหลือง กลิ่นหอม เนื้อละเอียด มีเสี้ยนน้อย รสหวาน พันธุ์ที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน คือ น้ำดอกไม้เบอร์ 4 และน้ำดอกไม้สีทองมะม่วงเป็นไม้ผลเศรษฐกิจที่นิยมปลูกกันมาก เพราะนอกจากจะใช้บริโภคภายในประเทศทั้งในรูปผลสดและแปรรูปส่งออกไปจำหน่ายต่างประเทศเป็นจำนวนมาก

ผลมะม่วงมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 16 เซนติเมตร กว้าง 6 และหนา 7 เซนติเมตร มีน้ำหนักประมาณ 300 กรัมต่อผล ทรงผลเป็นรูปไข่ มีเนื้อสีเหลืองทอง มีเสี้ยนน้อย และมีกลิ่นหอม รสหวานมีความหวานประมาณ 19 เปอร์เซ็นต์บริกซ์

คุณค่าทางอาหาร

เนื้อมะม่วงอุดมไปด้วยสารอาหารต่างๆ ต่อ 100 กรัม

คาร์โบไฮเดรต	15.9 กรัม	เส้นใย	0.5 กรัม
ไขมัน	0.3 กรัม	วิตามินเอ	38 ไมโครกรัม
โปรตีน	0.6 กรัม	ฟอสฟอรัส	15.0 กรัม
ธาตุเหล็ก	0.3 มิลลิกรัม	วิตามิน ซี	36 มิลลิกรัม

การผลิตมะม่วงในปัจจุบันต้องได้เป็นไปตามการปฏิบัติเกษตรที่ดีและเหมาะสม (Good Agricultural Practice: GAP) ของกรมวิชาการเกษตร คุณภาพมะม่วงจะต้องมีลักษณะ ดังนี้

- 1) เป็นผลมะม่วงสดทั้งผล ถ้ามีข้อผลติดอยู่ต้องมีความยาวประมาณ 1 เซนติเมตร
- 2) เนื้อแน่นตรงตามพันธุ์
- 3) มีรูปทรง สี และรสชาติ ตรงตามพันธุ์

- 4) ไม่มีรอยชำ หรือตำหนิ หรือรอยด่างที่เห็นเด่นชัด และไม่เน่าเสีย
- 5) สะอาด และปราศจากสิ่งแปลกปลอม โดยการตรวจสอบด้วยสายตา
- 6) ปลอดภัยจากศัตรูพืชและความเสียหายอันเนื่องมาจากศัตรูพืช
- 7) ปลอดภัยจากความชื้นที่ผิดปกติจากภายนอก
- 8) ปลอดภัยจากความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ
- 9) ไม่มีกลิ่นและรสชาติผิดปกติจากสิ่งแปลกปลอมภายนอก

ซึ่งแบ่งชั้นคุณภาพของมะม่วงออกเป็น 3 ชั้น คือ

1) ชั้นพิเศษ (Extra class)

ผลมะม่วงในชั้นนี้ต้องมีคุณภาพดีที่สุด ตรงตามพันธุ์ ผลต้องปลอดภัยจากตำหนิ ยกเว้น ตำหนิ ผิวเล็กน้อย โดยไม่มีผลต่อรูปลักษณะทั่วไปของผลิตผล คุณภาพ และคุณภาพการเก็บรักษา รวมทั้งการจัดเรียงเสนอในภาชนะบรรจุ

2) ชั้นหนึ่ง (Class I)

ผลมะม่วงในชั้นนี้ต้องมีคุณภาพดี ตรงตามพันธุ์ มีตำหนิได้เล็กน้อยด้านรูปทรง สีและผิว ซึ่งเกิดจากการเสียดสี หรือแดดเผา และรอยด่างที่เกิดจากยาง โดยไม่มีผลต่อรูปลักษณะ คุณภาพ และคุณภาพการเก็บรักษา รวมทั้งการจัดเรียงเสนอในภาชนะบรรจุ ตำหนิผิวโดยรวมต่อผลต้องมีพื้นที่ไม่เกิน 4, 3 และ 2 ตารางเซนติเมตร สำหรับผลมะม่วงขนาด 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

3) ชั้นสอง (Class II)

ชั้นนี้รวมผลมะม่วงที่ไม่เข้าขั้นชั้นที่สูงกว่า แต่มีคุณภาพต่ำตามมาตรฐาน มีตำหนิได้เล็กน้อยด้านรูปทรง สีและผิว ซึ่งเกิดจากการเสียดสี หรือแดดเผา และรอยด่างที่เกิดจากยาง โดยไม่มีผลต่อรูปลักษณะ คุณภาพ และคุณภาพการเก็บรักษา รวมทั้งการจัดเรียงเสนอในภาชนะบรรจุ ตำหนิผิวโดยรวมต่อผล ต้องมีพื้นที่ไม่เกิน 6, 5 และ 4 ตารางเซนติเมตร สำหรับผลมะม่วงขนาด 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ข้อสังเกตต่างๆ ว่ามะม่วงจะแก่เมื่อใดนั้น สิ่งที่นำสังเกต 2 ประการคือ

- 1) แก้มผลทั้ง 2 ข้างพองโตเต็มที่ สีผิวเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีขาวจาง สังเกตจากผิวของผลมะม่วงมีสีขาวนวล หรือไขปกคลุมผล
- 2) เก็บตัวอย่างผลมะม่วงมา 2-3 ผล เพื่อทดสอบ โดยนำมะม่วงมาแช่น้ำดู หากผลมะม่วงจมน้ำ แสดงว่าแก่จัด ถ้าวางแสดงว่ายังอ่อนอยู่พอเก็บได้ และเวลาเก็บต้องอย่าให้ช้า มิฉะนั้นจะเน่าและเสียได้ง่ายเวลามะม่วงสุก

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ ทำการศึกษาในมะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์ สับปะรดพันธุ์ภูแล และ มะม่วงพันธุ์ น้ำดอกไม้สีทอง ในแปลงผลิตของเกษตรกร พื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกของประเทศไทย และนำมาตรวจวิเคราะห์ห้สมบัติต่างๆ ณ ห้องปฏิบัติการของสถาบันวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลองดังนี้

การทดลองที่ 1 การหาดัชนีการเก็บเกี่ยวของผลไม้และการประเมินระยะเก็บเกี่ยวด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การเตรียมตัวอย่าง

มะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์

กำหนดระยะเก็บเกี่ยวของผลไม้ เป็น 3 ระยะ คือ ระยะก่อนผลแก่ (im-mature) ระยะผลแก่ (mature) และระยะหลังผลแก่ (over-mature) ใช้ผลิตผล 300 ผลต่อชนิดผลไม้ ระยะที่ไม่สุกนำมาบ่มภายใต้สภาพอุณหภูมิห้อง (30 °C) เป็นเวลา 3-5 วัน ส่วนผลมะละกอในระยะที่สุกแล้วนำเข้าสู่กระบวนการทดสอบตามลำดับ (Figure 2)



Figure 2 Papaya fruit harvesting at the orchard owner in Ban Hong District, Chiang Mai

สับปะรดพันธุ์ภูแล

กำหนดระยะเก็บเกี่ยวของผลสับปะรดที่ 3 ระยะ คือ ระยะก่อนผลแก่ (im-mature) ระยะผลแก่ (mature) และระยะหลังผลแก่ (over-mature) ใช้ผลิตผล 100 ผลต่อระยะผลแก่ นำมาตัดแต่งใบและก้านผลก่อนเข้าสู่กระบวนการทดสอบตามลำดับ (Figure 3)



Figure 3 Pineapple fruit harvesting at Chiang Rai province

มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง

เก็บเกี่ยวมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองจากสวนเกษตรกรในจังหวัดเชียงใหม่ ที่ 3 ระยะความแก่ของผล คือ ก่อนระยะผลแก่ทางการค้า 7 วัน (im-mature), ผลแก่ทางการค้า (0 วัน) (mature) และหลังผลแก่ 7 วัน (over-mature) จากนั้นนำผลมะม่วงขนส่งมายังห้องปฏิบัติการ แล้วจึงนำไปวัดสมบัติทางกายภาพและทางเคมีตามลำดับ (Figure 4)



Figure 4 Mango fruit harvesting at Phrao District, Chiang Mai

การวัดสเปกตรัม

มะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์

นำผลมะละกามาวัดสเปกตรัมด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ทั้ง 2 เครื่อง คือ NIRSystem6500 (Foss NIRSystems, Silver Spring, USA) ด้วยการวัดการสะท้อนกลับของแสง (reflectance) ใช้หัววัดไฟเบอร์ออปติก (fiber optic probe) ในช่วงความยาวคลื่น 400 - 1100 นาโนเมตร บริเวณกลางผล (Figure 5) และเครื่อง Portable NIR Spectrometer (Hamamatsu, Japan) วัดการส่องผ่านของแสง (transmittance) ในช่วงความยาวคลื่น 700-1000 นาโนเมตร (Figure 6) จากนั้นจึงผลมะละกอไปวัดสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีต่อไป

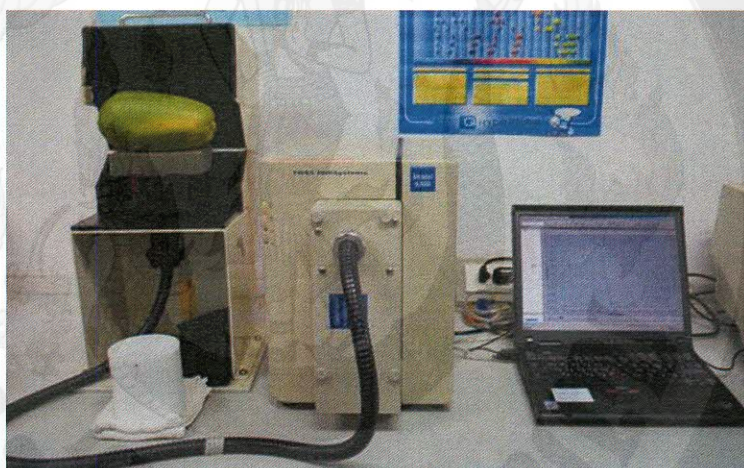


Figure 5 The spectrum of papaya fruit measuring by NIRSystem 6500 with fiber optic probe in interactance mode

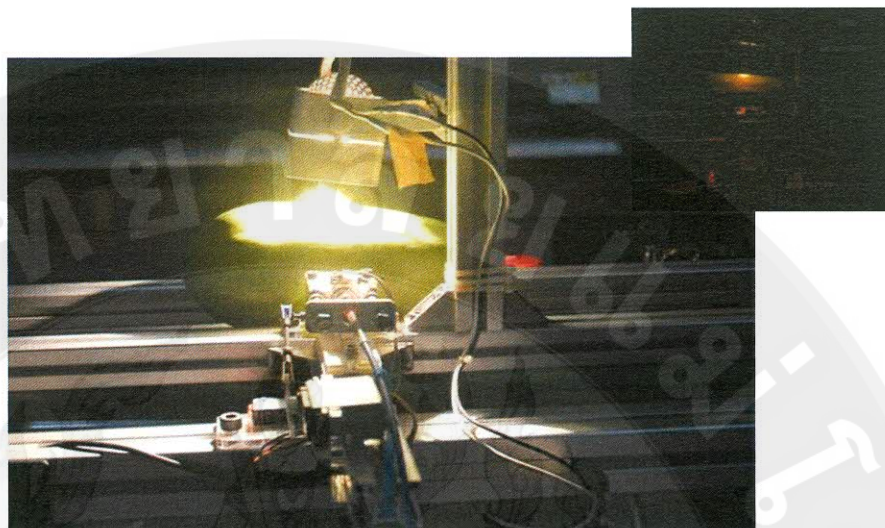


Figure 6 The spectrum of papaya fruit measuring by portable NIR Spectrometer (Hamamatsu)

สับปะรดพันธุ์แดง

นำผลสับปะรดมาวัดสเปกตรัมด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทั้ง 2 เครื่อง คือ NIRSystem6500 (Foss NIRSystems, Silver Spring, USA) ด้วยการวัดการสะท้อนกลับของแสง (reflectance) ใช้หัววัดไฟเบอร์ออปติก (fiber optic probe) ในช่วงความยาวคลื่น 400 - 1100 นาโนเมตร บริเวณกลางผลระหว่างตา (Figure 7) และเครื่อง Portable NIR Spectrometer (Hamamatsu, Japan) วัดการส่องผ่านของแสง (transmittance) ในช่วงความยาวคลื่น 700-1000 นาโนเมตร (Figure 8) จากนั้นจึงผลสับปะรดไปวัดสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีต่อไป



Figure 7 Pineapple fruit NIR spectra measuring by NIRSystem 6500

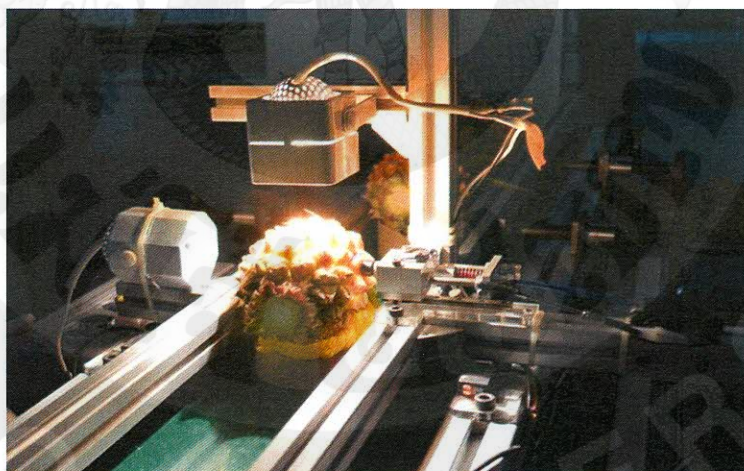


Figure 8 Pineapple fruit NIR spectra measuring by portable NIR spectrometer (Hamamatsu)

มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง

นำผลมะม่วงมาวัดสเปกตรัมด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทั้ง 2 เครื่อง คือ NIRSystem6500 (Foss NIRSystems, Silver Spring, USA) ด้วยการวัดการสะท้อนกลับของแสง (reflectance) ใช้หัววัดไฟเบอร์ออปติก (fiber optic probe) ในช่วงความยาวคลื่น 400 - 1100 นาโนเมตร บริเวณกลางผล (Figure 9) และเครื่อง Portable NIR Spectrometer (Hamamatsu, Japan) วัดการส่องผ่านของแสง (transmittance) ในช่วงความยาวคลื่น 700-1000 นาโนเมตร จากนั้นจึงผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองไปวัดสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีต่อไป

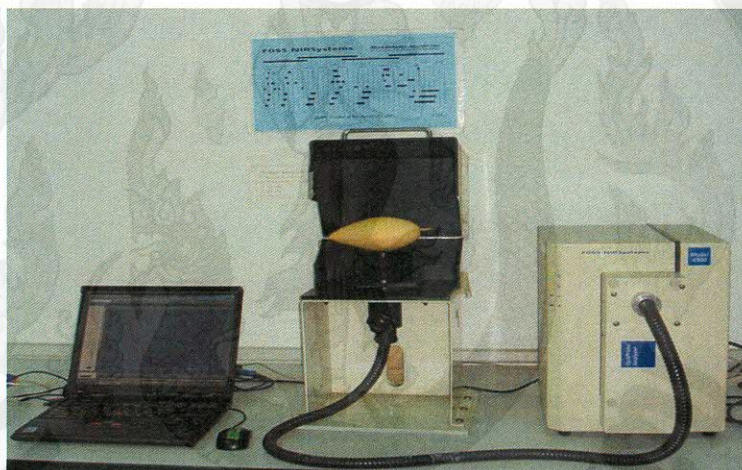


Figure 9 Mango fruit NIR spectra measuring by NIRSystem 6500

การตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ

1) ขนาด และน้ำหนักผล

วัดขนาดของผลมะละกอแสดงผลใน 2 ค่า คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของผล โดยใช้สายวัด (tape measure) และเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier caliper) สำหรับน้ำหนักของผล มะละกอนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งสองตำแหน่ง (Digital balance, Metler Toledo, Switzerland) (Figure 10)

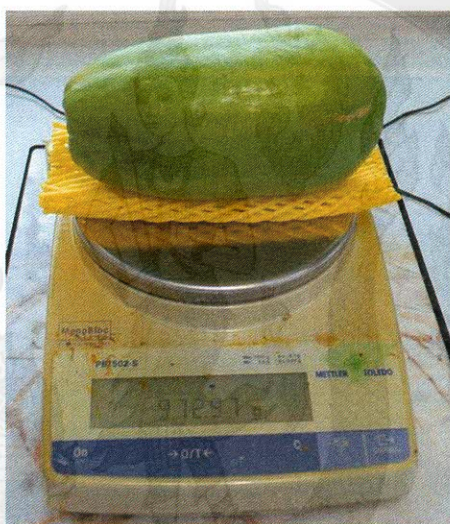


Figure 10 Papaya fruit weighting

2) ความแน่นเนื้อ

นำผลมะละกอผ่าครึ่งผลตามความยาวของผลแล้วปอกเปลือกออกเพื่อวัดความแน่นเนื้อ ที่ตำแหน่งกลางผลด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer, TA.XT plus, Microstable, England) หัววัด P6 (stainless steel cylinder probe) กดลงไปบนผลมะละกอที่ระยะ 10 มิลลิเมตร (Figure 11, 12)



Figure 11 Papaya fruit firmness measuring by texture analyzer

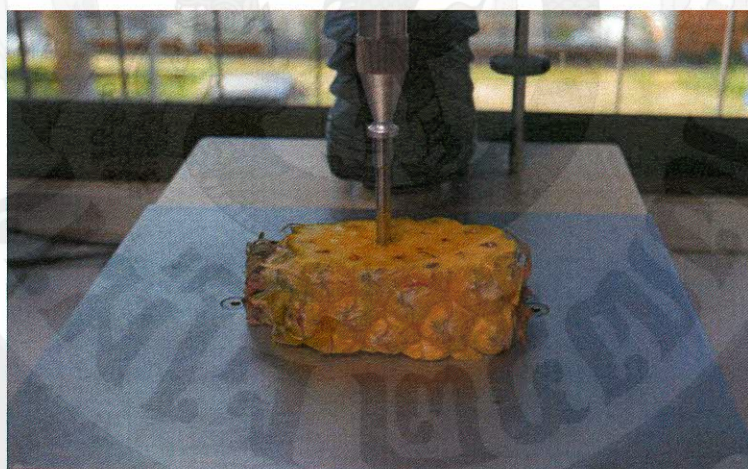


Figure 12 Pineapple fruit firmness measuring by texture analyzer

3) สีเปลือกและสีเนื้อ

วัดสีเปลือกและสีเนื้อของผลไม้ด้วยเครื่องวัดสี (Chroma meter, CR400, Minolta, Japan)
แสดงในค่า L^* , a^* , b^* , C^* และ h° (Figure 13)



Figure 13 Flesh color of papaya fruit measuring by Chroma meter



Figure 14 Peel and flesh color of pineapple fruit measuring by Chroma meter

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

1) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solids content) โดยใช้เครื่อง Digital refractometer (PAL-1, ATAGO, Japan) หยดน้ำคั้นลงบนแผ่นปริซึมของเครื่องมือ ซึ่งอ่านค่าได้ตั้งแต่ 0-45 เปอร์เซ็นต์ (Figure 15)



Figure 15 Total soluble solids content of papaya fruit juice measuring by digital refractometer

2) ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Titratable acidity) (AOAC, 1984)

โดยใช้น้ำคั้นของผลไม้แต่ละผลมาไทเทรตด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ (Autotitrator, SCHOTT, Titroline easy, Belgium) กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนสารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 8.2 บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ แล้วจึงคำนวณหาปริมาณกรดทั้งหมดที่ไทเทรตได้ในรูปของกรดซิตริก มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์กรัมต่อ 100 กรัม น้ำสับประคั้น โดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานดังนี้ (AOAC, 2000) (Figure 16)

1 มิลลิลิตร สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล ทำปฏิกิริยาสมมูลพอดีกับกรดซิตริก 0.07 กรัม

$$\text{ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (\%)} = \frac{\text{ความเข้มข้นของ NaOH (0.1N)} \times \text{ปริมาตรของ NaOH (ml.)} \times 0.07 \times 100}{\text{ปริมาตรน้ำสับประคั้น (ml.)}}$$



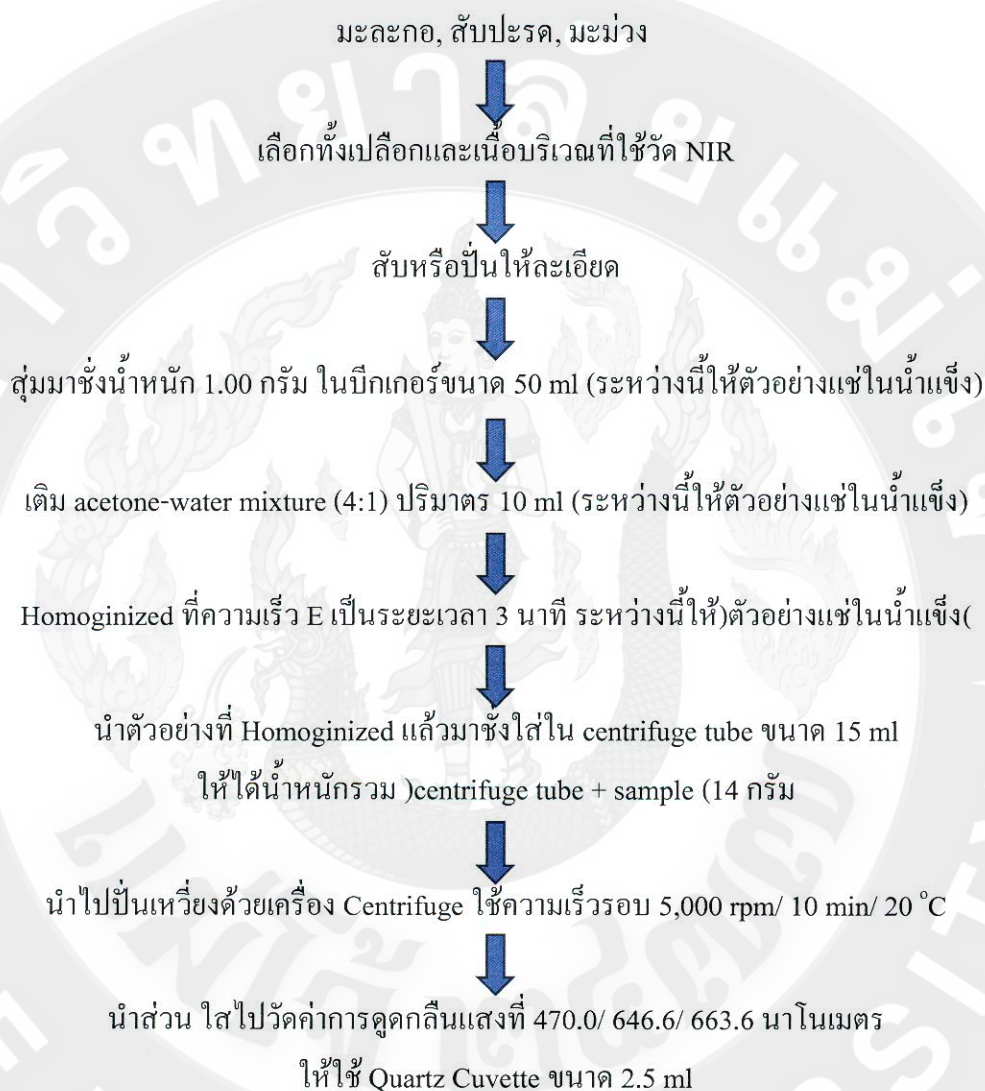
Figure 16 Titratable acidity determined by using autotitrator

3) ปริมาณแคโรทีนอยด์ ด้วยเครื่อง UV - VIS Spectrophotometer (Figure 17)



Figure 17 Carotenoid and chlorophyll analysis processes

ขั้นตอนการวิเคราะห์คลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์



4) ปริมาณคลอโรฟิลล์ด้วยเครื่อง UV - VIS Spectrophotometer

การวิเคราะห์ข้อมูล

เปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วยโปรแกรมทางสถิติ และหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของผลไม้กับข้อมูลที่วัดได้จาก เครื่อง DA Meter และ เครื่อง NIRSystem6500 โดยโปรแกรม the Unscrambler ® version 9.8

การทดลองที่ 2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และลักษณะทางสรีรวิทยาของผลไม้ก่อนและระหว่างการสุกและการประเมินคุณภาพด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การเตรียมตัวอย่าง

เก็บเกี่ยวผลไม้ทั้ง 3 ชนิดที่ระยะการเก็บเกี่ยวทางการค้า จำนวน 150 ผลต่อชนิด เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง สุ่มตัวอย่างผลไม้ทุก 3 วัน วันละ 30 ตัวอย่าง นำมาวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง DA Meter และเครื่อง NIRSystem6500 จากนั้นนำมาตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และเคมี เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่างๆ ของผลไม้ก่อนและระหว่างการสุก และหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและเคมีกับข้อมูลที่วัดได้จากเครื่อง DA Meter และ เครื่อง NIRSystem6500

ข้อมูลที่ใช้บันทึก

1. สมบัติทางกายภาพ

- ขนาด และน้ำหนักผล
- ความแน่นเนื้อ วัดด้วยเครื่อง Texture analyzer (TA.XT plus, Texture analyzer, England)
- สีเปลือกผล วัดด้วยเครื่อง Colorimeter (Color Quest XE, Hunter Lab)

2. สมบัติทางเคมี

- ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (soluble solids content) โดยใช้เครื่อง Digital refractometer (PAL-1, ATAGO, Japan)
- ปริมาณกรดที่ไตเตรตได้ (Titratable acidity) (AOAC, 1984) โดยใช้น้ำคั้นของผลไม้แต่ละผลมาไตเตรดกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1 N โดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) จนสารละลายมีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8.2 แล้วจึงคำนวณหาปริมาณกรดที่ไตเตรตได้มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์
- ปริมาณแคโรทีนอยด์ ด้วยเครื่อง HPLC
- ปริมาณคลอโรฟิลล์ด้วยเครื่อง UV-VIA Spectrophotometer

การวิเคราะห์ข้อมูล

เปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วยโปรแกรมทางสถิติ และหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของผลไม้กับข้อมูลที่วัดได้จาก เครื่อง DA Meter และ เครื่อง NIRSystem6500 โดยโปรแกรม the Unscrambler ® version 9.8

การทดลองที่ 3 การทดสอบความแม่นยำของการประเมินคุณภาพของผลไม้ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

นำผลไม้ ทั้ง 3 ชนิด จำนวน 100 ผลต่อชนิด มาวัดข้อมูลด้วยเครื่อง Hamamatsu และเครื่อง NIR6500 ทำนายคุณภาพของผลไม้เครื่อง DA meter และด้วยสมการเทียบมาตรฐานของเครื่อง NIR6500 จากนั้นนำวิเคราะห์คุณภาพของผลไม้ เพื่อศึกษาความแม่นยำของเครื่อง Hamamatsu สมการเทียบมาตรฐานของเครื่อง NIR6500 เปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วยโปรแกรมทางสถิติ

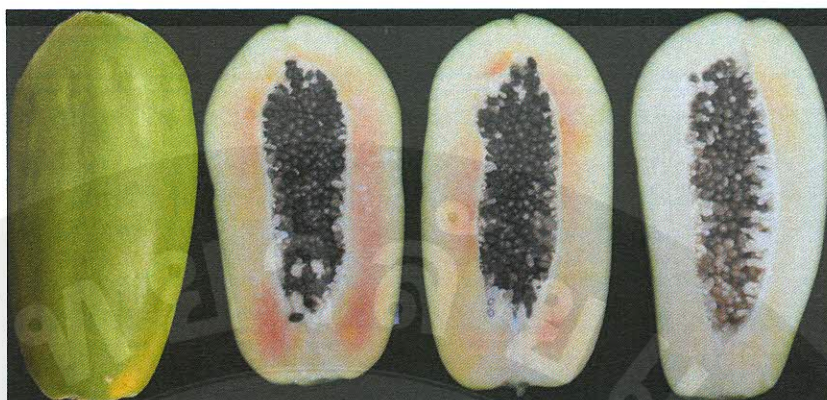
บทที่ 4

ผลการวิจัย

การทดลองที่ 1 การหาดัชนีการเก็บเกี่ยวของผลไม้และการประเมินระยะเก็บเกี่ยวด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

1. มะละกอ

เก็บเกี่ยวผลมะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์จากสวนเกษตรกรในพื้นที่อำเภอบ้านโฮ่ง จังหวัดลำพูน ที่ 3 ระยะ คือ ระยะก่อนผลแก่ (immature) ระยะผลแก่ (mature) และระยะหลังผลแก่ (over-mature) (Figure 18) ห่อด้วยถุงตาข่ายโฟม (foam net) ขนส่งมายังห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ นำมาวัดสเปกตรัมที่บริเวณแก้มผล ด้วยเครื่อง NIRsystem 6500 และเครื่อง NIR Spectrometer (Hamamatsu) ในช่วงความยาวคลื่น 400 - 1100 นาโนเมตร โดยก่อนวัดสเปกตรัมของผลมะละกอดำเนินการควบคุมอุณหภูมิของผลมะละกอที่ 25 องศาเซลเซียส ด้วยการแช่ผลในอ่างน้ำเย็นที่ป้องกันการเปียกของผลด้วยแผ่นพลาสติก จากนั้นจึงนำผลมะละกอทั้ง 3 ระยะเก็บเกี่ยว ไปตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ขนาด น้ำหนักผล สีเปลือกและสีเนื้อผล สมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และปริมาณสารสี (pigment) ได้แก่ คลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ ดังรายละเอียดผลการทดลองต่อไปนี้



(a) Immature



(b) Mature



(c) Over-mature

Figure 18 Papaya fruit harvesting at three maturity stages, (a) Immature, (b) mature and (c) over-mature

สมบัติทางกายภาพ

- ขนาด และน้ำหนักผล

ขนาดของผลมะละกอแสดงในค่า ความยาวผล และเส้นรอบผล และน้ำหนักผล ที่เก็บเกี่ยวใน ระยะก่อนผลแก่ ระยะผลแก่ และระยะหลังผลแก่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยความยาวผล เส้นรอบผล และน้ำหนักผลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น โดยความยาวผลมีค่าระหว่าง 18.80 - 20.17 เซนติเมตร เส้นรอบผลระหว่าง 29.05 - 30.26 เซนติเมตร และ น้ำหนักผลระหว่าง 913.01 - 981.94 กรัม ตามลำดับ (Table 1) เมื่อพิจารณาว่าน้ำหนักผลมะละกอจะเห็นว่าในระยะผลแก่ (mature) เป็นระยะที่มะละกอน้ำหนักสูงสุด เนื่องจากน้ำหนักผลมะละกอจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่ผลมีการเจริญเติบโตเต็มที่ (ประสิทธิ์ และเบญจวรรณ, 2541) สอดคล้องกับขนาดของผลทั้งความยาวและเส้นรอบวงผล ผลที่เก็บเกี่ยวในระยะผลแก่เป็นระยะที่มีการเจริญของผลเต็มที่ จะมีการพัฒนาด้านขนาดผลอย่างรวดเร็ว เนื่องจากผลมะละกอจะสะสมอาหารในระหว่างการเจริญเติบโต เมื่อผลมีอายุมากขึ้น ปริมาณอาหารที่สะสมจึงมากทำให้ผลมีขนาดใหญ่ (Shewfelt, 1993)

Table 1 Dimension of papaya fruit harvested at three maturity stages, immature, mature and over-mature.

Maturity stages	Length (cm)	Circumference(cm)	Weight (g)
Immature	18.80 c $\pm$ 1.06	30.26 a $\pm$ 1.02	937.74b $\pm$ 84.81
Mature	20.17 a $\pm$ 1.12	29.79 a $\pm$ 1.19	981.94a $\pm$ 82.23
Over- mature	19.59 b $\pm$ 1.16	29.05 b $\pm$ 1.49	913.01b $\pm$ 107.47
CV. (%)	5.63	4.02	9.41

: Table display the value of mean $\pm$ standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

- สีเปลือกและสีเนื้อผล

ผลมะละกอที่เก็บเกี่ยว 3 ระยะ พบว่า สีเปลือกผลของมะละกอที่วัดจาก 3 ตำแหน่งบนผล ได้แก่ บริเวณก้านผล (stem), กลางผลหรือแก้มผล (middle) และปลายผล (end) แสดงในค่าความสว่าง (L^*), ค่าสีแดง (a^*), ค่าสีเหลือง (b^*), ค่าความเข้มสี (C^*) และ ค่าสีที่แท้จริง (Hue°) เมื่อพิจารณาค่าสีแต่ละค่า พบว่า เมื่อระยะความแก่ของผลเพิ่มขึ้น ค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และค่าความเข้มสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าสีที่แท้จริง มีแนวโน้มลดลง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 2) สำหรับค่าสีที่ตำแหน่งต่างบนผลมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสีเปลือกผลมะละกอที่ปรากฏ โดยเมื่อระยะความแก่ของผลเพิ่มมากขึ้น เปลือกผลมะละกอจะมีสีเขียวลดลงและมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น ก่อนข้างสม่ำเสมอ ทั้งบริเวณก้านผล กลางผล และปลายผล เช่นเดียวกับการศึกษาของ ภัณฑิรา และคณะ (2555) พบว่า มะละกอพันธุ์แขกดำ ฮอลแลนด์ และฮาวาย ที่ระยะการสุก 5 ระยะ มีค่าความสว่าง (L^*), ค่าสีแดง (a^*) และ ค่าสีเหลือง (b^*) ของเปลือกเพิ่มขึ้น เมื่อระยะการสุกเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าสีของเนื้อผลมะละกอที่เก็บเกี่ยว 3 ระยะ พบว่า เมื่อระยะความแก่ของผลเพิ่มขึ้น ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และค่าความเข้มสีมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความสว่างและสีที่แท้จริงลดลง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 3) สำหรับค่าสีของเนื้อที่ตำแหน่งต่างๆ บนผลมีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับค่าสีของเปลือกผล ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสีเนื้อที่ปรากฏ พบว่าเนื้อผลมะละกอ ที่ระยะก่อนผลแก่ เนื้อผลจะมีสีขาวเหลือง ที่ระยะผลแก่และระยะหลังผลแก่ เนื้อผลจะมีสีส้มปนแดง และสีแดง

Table 2 Peel color of papaya fruit harvested at three maturity stages, immature, mature and over-mature.

Measuring position	Maturity stages	Peel color				
		L*	a*	b*	Chroma	Hue
Stem	Immature	50.23 c $\pm$ 3.23	-16.31 c $\pm$ 1.76	28.60 c $\pm$ 4.33	32.94 c $\pm$ 4.17	120.02a $\pm$ 3.82
	Mature	57.56 a $\pm$ 4.01	-0.7 b $\pm$ 1.25	40.72 a $\pm$ 5.42	42.19b $\pm$ 5.45	92.82b $\pm$ 15.09
	Over-mature	55.98 b $\pm$ 3.23	29.33 a $\pm$ 5.48	38.29 b $\pm$ 3.54	48.62a $\pm$ 2.42	52.53c $\pm$ 7.25
Middle	Immature	48.82 c $\pm$ 2.77	-15.85 c $\pm$ 4.90	27.46 c $\pm$ 3.81	32.07 c $\pm$ 3.82	121.21 a $\pm$ 2.42
	Mature	57.34 a $\pm$ 3.93	-3.04 b $\pm$ 9.03	41.51 a $\pm$ 4.82	41.70 b $\pm$ 8.70	93.54 b $\pm$ 14.75
	Over-mature	54.99 b $\pm$ 3.05	30.47 a $\pm$ 5.07	38.10 b $\pm$ 3.73	49.08 a $\pm$ 2.65	51.40 c $\pm$ 6.60
End	Immature	47.64 b $\pm$ 2.62	-16.29 c $\pm$ 1.47	27.27 b $\pm$ 3.64	31.81 c $\pm$ 3.60	120.98 a $\pm$ 2.67
	Mature	55.65 a $\pm$ 4.38	-4.07 b $\pm$ 9.92	41.14 a $\pm$ 5.36	42.51b $\pm$ 5.24	96.83 b $\pm$ 13.18
	Over-mature	56.76 a $\pm$ 3.57	27.97a $\pm$ 5.63	41.81a $\pm$ 4.54	50.38 a $\pm$ 3.67	56.20 c $\pm$ 7.42

: Table display the value of mean $\pm$ standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

Table 3 Flesh color of papaya fruit harvested at three maturity stages, immature, mature and over-mature.

Measuring position	Maturity stages	Peel color				
		L*	a*	b*	Chroma	Hue
Stem	Immature	74.38a $\pm$ 2.64	-2.14c $\pm$ 6.49	39.31a $\pm$ 3.74	39.91c $\pm$ 3.54	93.71a $\pm$ 9.51
	Mature	63.04b $\pm$ 4.14	22.72b $\pm$ 5.26	38.86a $\pm$ 3.62	45.31b $\pm$ 3.33	59.77b $\pm$ 7.01
	Over-mature	53.06c $\pm$ 6.18	33.71a $\pm$ 3.27	36.83b $\pm$ 4.26	50.38a $\pm$ 3.65	47.51c $\pm$ 4.05
Middle	Immature	75.24a $\pm$ 2.23	-4.87c $\pm$ 3.65	35.62a $\pm$ 3.80	36.16c $\pm$ 3.51	98.21a $\pm$ 6.22
	Mature	64.42b $\pm$ 4.07	20.48b $\pm$ 5.01	36.85a $\pm$ 3.77	42.70b $\pm$ 3.62	61.17b $\pm$ 6.72
	Over-mature	54.72c $\pm$ 2.05	32.97a $\pm$ 2.51	36.13a $\pm$ 2.89	49.01a $\pm$ 2.50	47.58c $\pm$ 3.39
End	Immature	74.91a $\pm$ 1.65	-5.62c $\pm$ 3.60	35.25c $\pm$ 3.58	36.01c $\pm$ 3.34	99.33a $\pm$ 5.99
	Mature	66.43b $\pm$ 4.08	17.12b $\pm$ 5.94	36.88b $\pm$ 3.84	41.05b $\pm$ 4.21	65.29b $\pm$ 7.96
	Over-mature	54.95c $\pm$ 3.35	31.34a $\pm$ 3.81	40.25a $\pm$ 3.30	51.09a $\pm$ 3.29	52.20c $\pm$ 4.25

: Table display the value of mean $\pm$ standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

ความแน่นเนื้อ

ความแน่นเนื้อของผลมะละกอเก็บเกี่ยวที่ 3 ระยะความแก่ พบว่า มีค่าลดลงเมื่อความแก่ของผลเพิ่มขึ้น และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 4) โดยที่ระยะก่อนผลแก่เนื้อมะละกามีความแน่นเนื้อสูงสุด รองลงมาคือระยะผลแก่ และมีค่าต่ำที่สุดที่ระยะหลังผลแก่ เมื่อพิจารณาความแน่นเนื้อที่ตำแหน่งต่างๆ บนผลมะละกอ พบว่า ที่บริเวณก้านผลมีความแน่นเนื้อสูงสุด รองลงมาคือที่ตำแหน่งกลางผล และปลายผล ตาม ลำดับ

ความแน่นเนื้อผล (Fruit firmness) เป็นสมบัติสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเก็บเกี่ยว การขนส่ง ผิวสัมผัส และความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อมะละกอ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อการจัดการหลังการเก็บเกี่ยว โดยเฉพาะอายุการเก็บรักษาอีกด้วย (คันสนีย์ และคณะ, 2556) ผิวสัมผัสและความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อมะละกอ ความเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา อาทิ การสุก และทางกายภาพ เช่น การตัดเป็นชิ้น และบาดแผล ล้วนส่งผลต่อความแน่นเนื้อผล (จริงแท้, 2550) จากการศึกษาพบว่าการลดลงของเพคตินในผลมะละกอพันธุ์ชันเซทโซโล และมาราดอล ส่งผลให้ความแน่นเนื้อลดลง แต่องค์ประกอบอื่นๆ เช่น ชนิดของน้ำตาลที่พบในผนังเซลล์มีความแตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อโครงสร้างความแข็งแรงของผนังเซลล์ และความแน่นเนื้อของผลมะละกอแตกต่างกัน และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา เช่น การสุก แตกต่างกัน (Paull et al., 1999; Sanudo-Barajas et al., 2009) ในระยะก่อนผลแก่ (immature) มะละกอจะมีค่าความแน่นเนื้อของเนื้อผลสูงที่สุด เนื่องจากผนังเซลล์ในเซลล์ของผลดิบจะถูกเชื่อมกันด้วยห่วงลูกโซ่ของเพคติน ซึ่งจะเชื่อมเข้ากับสารละลายเกลือแคลเซียมที่มีอยู่ในเซลล์พืช เกิดเป็นเกลือแคลเซียมเพคเตทที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้เนื้อของผลมีความแข็งแรงและแน่น (Shetty and Dubash, 1973) ทั้งนี้ระหว่างการสุกของผล กิจกรรมของเอนไซม์ Polygalacturonase จะถูกกระตุ้นเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดการย่อยสลายโมเลกุลของสารเพคตินที่ซับซ้อนให้อยู่ในรูปของเพคตินที่มีโครงสร้างของโมเลกุลเล็กลงและมีคุณสมบัติละลายน้ำได้มากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะกันระหว่างเซลล์ลดน้อยลง ก่อให้เกิดลักษณะความนิ่มของเนื้อ มากขึ้น (Tucker, 1993)

Table 4 Firmness of papaya flesh harvested at three maturity stages, immature, mature and over-mature.

Maturity stages	Firmness (N)		
	Stem	Middle	End
Immature	89.25a $\pm$ 22.67	89.47a $\pm$ 14.22	77.95b $\pm$ 26.54
Mature	84.03a $\pm$ 10.82	78.78c $\pm$ 11.84	76.18b $\pm$ 13.13
Over- mature	10.41b $\pm$ 7.06	8.11b $\pm$ 5.74	8.25 a $\pm$ 4.16
CV. (%)	23.04	17.69	30.14

: Table display the value of mean $\pm$ standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

สมบัติทางเคมี

- ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total Soluble Solids content, TSS)

ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของผลมะละกอเก็บเกี่ยวที่ 3 ระยะความแก่ของผล พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะความแก่ของผลเพิ่มขึ้น และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยมีค่าระหว่าง 7.96 - 12.40 % (Table 5) เนื่องจากมะละกอเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมทั้งบริโภคสดและผลสุกในการจำหน่ายมะละกอสุกในมณฑลรัฐฮาวายนั้น มะละกอดังกล่าวต้องมีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ขั้นต่ำ 11.5 % (Anonymous, 1990) ผลที่เก็บเกี่ยวก่อนระยะบรรจุนั้นจะมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้น้อยกว่าระยะบรรจุนั้น (พีรพงษ์ และ Paull, 2551) โดยค่ามาตรฐานของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ที่บริษัทบ้านนาล้อมฟาร์ม บริษัทสวนสวนมี และห้างสรรพสินค้าหรือซูเปอร์มาร์เก็ตกำหนดไว้ต้องไม่ต่ำกว่า 10-11 % สำหรับมะละกอเกรดเอ และบี ตามลำดับ (พีรพงษ์ และคณะ, 2552) เนื่องจากผลทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บสะสมอาหาร เมื่อผลมีอายุเพิ่มมากขึ้นจะมีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในเนื้อของผลเพิ่มขึ้น (Amar, 1980) ผลมะละกอในช่วงอายุที่มีความบริบูรณ์มีอาหารสะสมเป็นคาร์โบไฮเดรตมาก ในช่วงระหว่างการสุกภายในผล จะมีกิจกรรมของเอนไซม์ที่ย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลขนาดใหญ่เปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล จึงทำให้ผลมะละกอในอายุดังกล่าวมีความหวานมากกว่าผลในช่วงที่มีอายุน้อยกว่า (Jagtiani et al., 1988)

- ปริมาณแคโรทีนอยด์ และปริมาณคลอโรฟิลล์

ปริมาณแคโรทีนอยด์ของผลมะละกจะเพิ่มขึ้นตามระยะความแก่ของผล ซึ่งตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ที่ลดลง และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยผลมะละกามีปริมาณแคโรทีนอยด์ระหว่าง 0.36 - 1.46 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักสด ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ระหว่าง 0.03 - 0.69 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักสด และ 0.04 - 0.27 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักสด (Table 5)

การเพิ่มของปริมาณแคโรทีนอยด์ เป็นผลจากกระบวนการสร้างแคโรทีนอยด์ (carotenogenesis) ซึ่งเป็นรงควัตถุในสีเนื้อมะละกามีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับระยะความแก่ของผล โดยผลมะละกที่เข้าสู่ระยะแก่มากขึ้น การสร้างแคโรทีนอยด์ในส่วนของเนื้อจะเกิดมากขึ้น (Gross, 1987) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณคลอโรฟิลล์ในผลไม้ที่ผันแปรตามระยะการพัฒนาของผล โดยในระหว่างช่วงแรกของการพัฒนาของผล คลอโรฟิลล์จะถูกสร้างขึ้นจำนวนมาก เมื่อผลมีอายุมากขึ้น การสร้างคลอโรฟิลล์จะเริ่มลดลง โดยเฉพาะผลไม้พวก Climacteric fruit เช่น มะละก การสลายตัวของคลอโรฟิลล์และการสร้างแคโรทีนอยด์จะยังคงดำเนินไปอย่างต่อเนื่องภายหลังการเก็บเกี่ยว โดยกลไกจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อย ขึ้นกับอายุของผล ทั้งนี้ผลที่เข้าสู่ระยะแก่มากขึ้นจะมีการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ และมีการสร้างแคโรทีนอยด์มากกว่าผลที่มีอายุน้อย (Birth et al., 1984)

Table 5 Chemical properties of papaya fruit harvested at three maturity stages, immature, mature and over mature

Maturity stages	TSS (%)	Carotenoid ($\mu\text{g/g}$ fresh weight)	Chlorophyll ($\mu\text{g/g}$ fresh weight)	
			Chlorophyll a	Chlorophyll b
Immature	7.96 c $\pm$ 0.87	0.36c $\pm$ 0.15	0.69a $\pm$ 0.10	0.27a $\pm$ 0.32
Mature	10.2b $\pm$ 0.78	0.84b $\pm$ 0.21	0.27b $\pm$ 0.14	0.10b $\pm$ 0.13
Over- mature	12.40a $\pm$ 0.87	1.46a $\pm$ 0.35	0.03c $\pm$ 0.02	0.04c $\pm$ 0.02
CV. (%)	8.52	28.66	7.61	5.92

: Table display the value of mean $\pm$ standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

NIRSystem 6500

ข้อมูลสเปกตรัม

ผลมะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์เก็บเกี่ยวที่ 3 ระยะความแก่ของผลนำมาวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIRSystem 6500 ในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 นาโนเมตร สเปกตรัมดั้งเดิม (original spectra) พบพีกชัดเจนที่ความยาวคลื่น 680 และ 978 นาโนเมตร (Figure 19) และเมื่อแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 (second derivative) เพื่อลดอิทธิพลของการยกตัวขึ้นของ base line (base line shift) และการซ้อนทับกันของพีก (overlapping peak) ผลที่ได้คือ พีกหัวกลับ จึงพบพีกหัวกลับชัดเจนที่ความยาวคลื่น 678 และ 962 นาโนเมตร (Figure 20) ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ความยาวคลื่นทั้งสอง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน คือมีค่าลดลงเมื่อความแก่ของผลเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงที่สุดที่ระยะก่อนผลแก่ รองลงมา คือ ระยะผลแก่ และระยะหลังผลแก่ ซึ่ง Gitelson (1992) รายงานว่าที่ความยาวคลื่น 600-700 นาโนเมตร พบแถบการดูดกลืนแสง (absorption band) ของรงควัตถุ คือ คลอโรฟิลล์ โดยค่าการดูดกลืนที่ลดลงจะสัมพันธ์กับปริมาณของคลอโรฟิลล์ในเซลล์ของผลไม้ที่ลดลง (Zude-Sasse et al., 2002) ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ในผลสับปะรด เมื่อระยะความแก่ของผลเพิ่มขึ้น ด้วย และที่ความยาวคลื่น 978 นาโนเมตร คือ พิกของน้ำ (Osborne et al., 1993) ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อระยะความแก่ของผลสับปะรดที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ ปาริชาติ และคณะ (2554) พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงที่พิกน้ำของผลสับปะรดน้ำฝ่ำลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสูญเสียน้ำหนักผลในระหว่างการเก็บรักษา

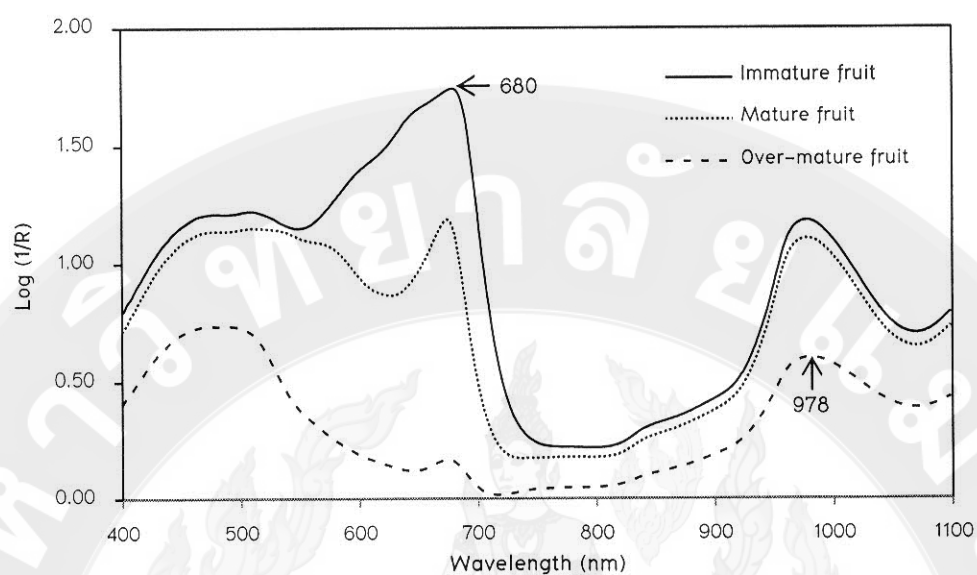


Figure 19 Means of original spectra of papaya fruit at three maturity stages measured by NIRSystem6500

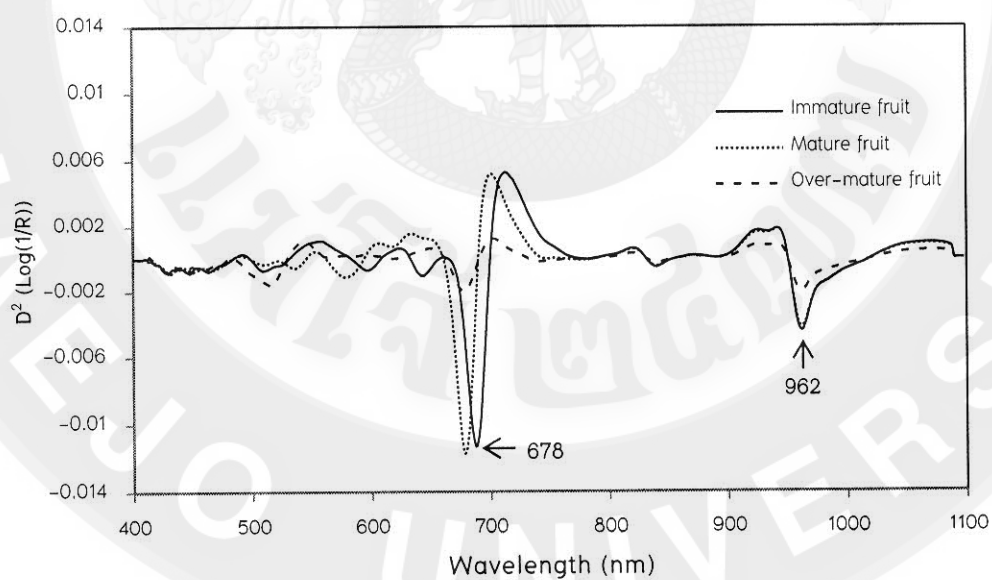


Figure 20 Means of second derivative treated spectra of papaya fruit at three maturity measured by NIRSystem 6500

สมการเทียบมาตรฐาน

สร้างสมการเทียบมาตรฐานค่า TSS โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปกตรัมผลมะละกอเก็บเกี่ยวที่ 3 ระยะความแก่ของผลและค่า TSS ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง digital refractometer นำข้อมูลสเปกตรัมมาแปลงค่าด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เพื่อความแปรปรวนของข้อมูลก่อนนำไปหาความสัมพันธ์เชิงเส้นด้วยวิธี partial least squares regression (PLSR) พบว่า สมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ของผลมะละกอ ที่ 3 ระยะความแก่ของผลให้ดีที่สุด คือ สมการเทียบมาตรฐานที่ใช้ข้อมูลสเปกตรัมแปลงด้วยวิธี Savitzky-Golay second derivative (20 nm average for left and right sides) ในช่วงความยาวคลื่น 850 - 1000 นาโนเมตร และมีค่า สัมประสิทธิ์การคำนวณ (coefficient of determination, R^2), ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในกลุ่มสร้างสมการ (SEC), ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในกลุ่มทดสอบสมการ (SEP) และค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ (วิธีอ้างอิง) กับค่าที่ได้จาก NIR (bias) เท่ากับ 0.92, 0.53%, 0.50% และ 0.02% ตามลำดับ (Table 6)

Table 6 Total soluble solid calibration results of papaya fruit at three maturity stages using the spectra from NIRSystem 6500

Maturity stages	Wavelength region (nm)	Factor	R^2	SEC (%)	SEP (%)	Bias (%)
Original	850-1000	8	0.92	0.52	0.56	0.04
Smoothing (5,5)	850-1000	8	0.92	0.55	0.55	0.05
Second derivative (10,10)	850-1000	6	0.92	0.53	0.50	0.02
Smoothing (5,5)+second derivative (10,10)	850-1000	6	0.92	0.54	0.50	0.02

F: number of factors used in the calibration model; R^2 : coefficient of determination; SEC: standard error of calibration; SEP: standard error of prediction; Bias: average of difference between actual value and NIR predicted value

Hamamatsu

ข้อมูลสเปกตรัม

จากการวัดสเปกตรัมของผลมะละกอด้วยเครื่อง NIR spectrometer (Hamamatsu) ในช่วงความยาวคลื่น 400-1078 นาโนเมตร พบว่าสเปกตรัมดั้งเดิมของผลมะละกอ มีสัญญาณรบกวนค่อนข้างสูง และไม่พบพีกที่เด่นชัดดังเช่นสเปกตรัมที่วัดด้วยเครื่อง NIRSystem 6500 มีเพียง broad band (Figure 21) จึงนำมาแปลงข้อมูลด้วย Savitzky-Golay second derivative ยังคงพบสัญญาณรบกวนบนข้อมูลสเปกตรัม และไม่พบพีกที่ชัดเจนเช่นเดียวกับสเปกตรัมดั้งเดิม (Figure 22) แต่อาจเป็นผลจากการบันทึกข้อมูลความเข้มของแสงที่ส่องผ่านตัวอย่าง มีความละเอียดค่อนข้างสูงคือทุกๆ 0.4 นาโนเมตร จึงทำให้พบพีกของ NIR ที่ชัดเจน

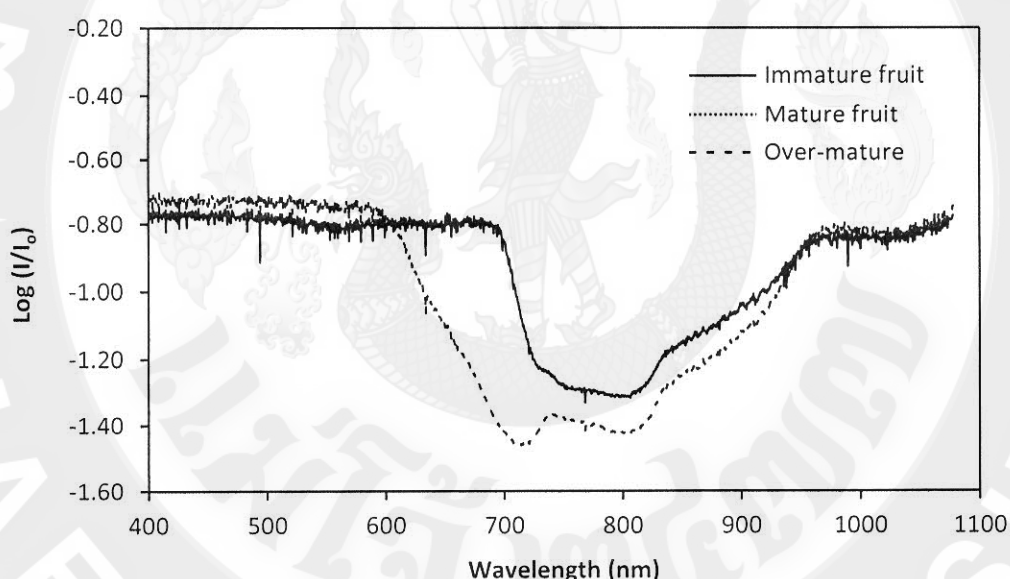


Figure 21 Means of original spectra of papaya fruit at three maturity stages measured by NIR spectrometer (Hamamatsu)

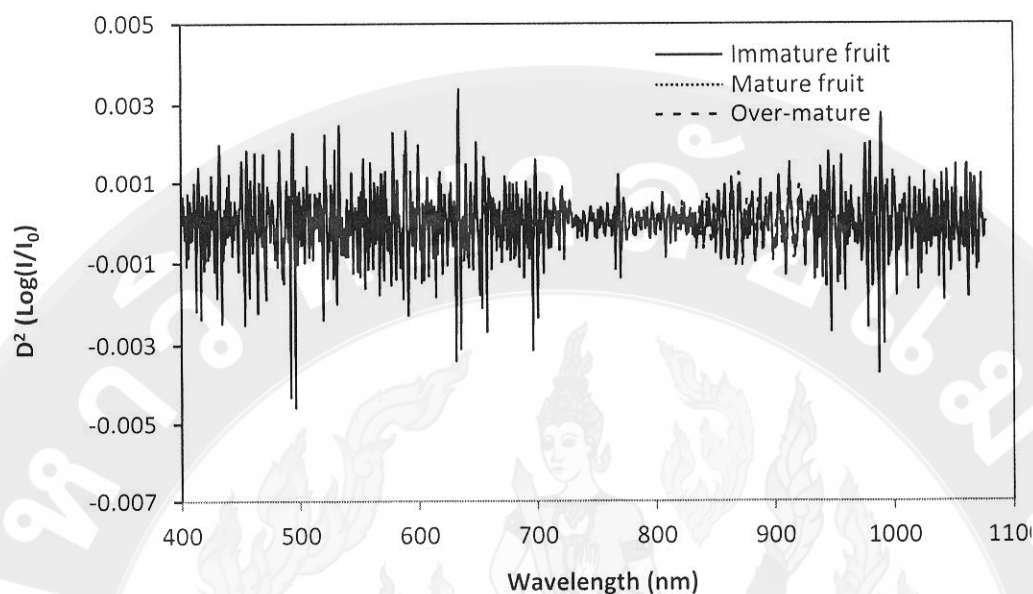


Figure 22 Means of second derivative treated spectra of papaya fruit at three maturity stages measured by NIR spectrometer (Hamamatsu)

สมการเทียบมาตรฐาน

นำข้อมูลสเปกตรัมผลมะละกอที่วัดจากเครื่อง NIR spectrometer (Hamamatsu) มาแปลงด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูลสเปกตรัม แล้วนำมาหาความสัมพันธ์กับค่าวิเคราะห์ทางเคมี (TSS) เช่นเดียวกับเครื่อง NIRSystem 6500 พบว่า ผลของสมการเทียบมาตรฐานให้ค่า R^2 ที่ต่ำ และ SEC, SEP และ bias ที่สูงมาก อาจเป็นเพราะการใช้วิธีการวัดสเปกตรัม และวิธีการแปลงข้อมูลที่ได้จากเครื่อง NIR spectrometer (Hamamatsu) ที่ใช้ในการทดลองนี้ยังไม่เหมาะสม ซึ่งคณะนักวิจัยจะได้ปรับแก้ไขเครื่องมือ และโปรแกรมให้สามารถใช้กับผลมะละกอได้ในลำดับต่อไป

2. สับปะรด

เก็บเกี่ยวผลสับปะรดพันธุ์ภูแล จากสวนเกษตรกรในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย ที่ 3 ระยะความแก่ของผล คือ ระยะก่อนผลแก่ (immature) ระยะผลแก่ (mature) และระยะหลังผลแก่ (over-mature) (Figure 23) ห่อด้วยถุงตาข่ายโฟม (foam net) ขนส่งมายังห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ นำมาวัดสเปกตรัมที่บริเวณแก้มผล ด้วยเครื่อง NIRsystem 6500 เครื่อง NIR Spectrometer (Hamamatsu) ในช่วงความยาวคลื่น 400 - 1100 นาโนเมตร โดยก่อนวัดสเปกตรัมของผล สับปะรดต้องควบคุมอุณหภูมิของผลสับปะรดที่ 25 องศาเซลเซียส ด้วยการแช่ผลในอ่างน้ำเย็นที่ป้องกันการเปียกของผลด้วยแผ่นพลาสติก จากนั้นจึงนำผลสับปะรดทั้ง 3 ระยะเก็บเกี่ยว ไปตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ขนาด น้ำหนักผล สีเปลือกและสีเนื้อผล สมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และปริมาณสารสี (pigment) ได้แก่ กลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ ดังรายละเอียดผลการทดลองต่อไปนี้

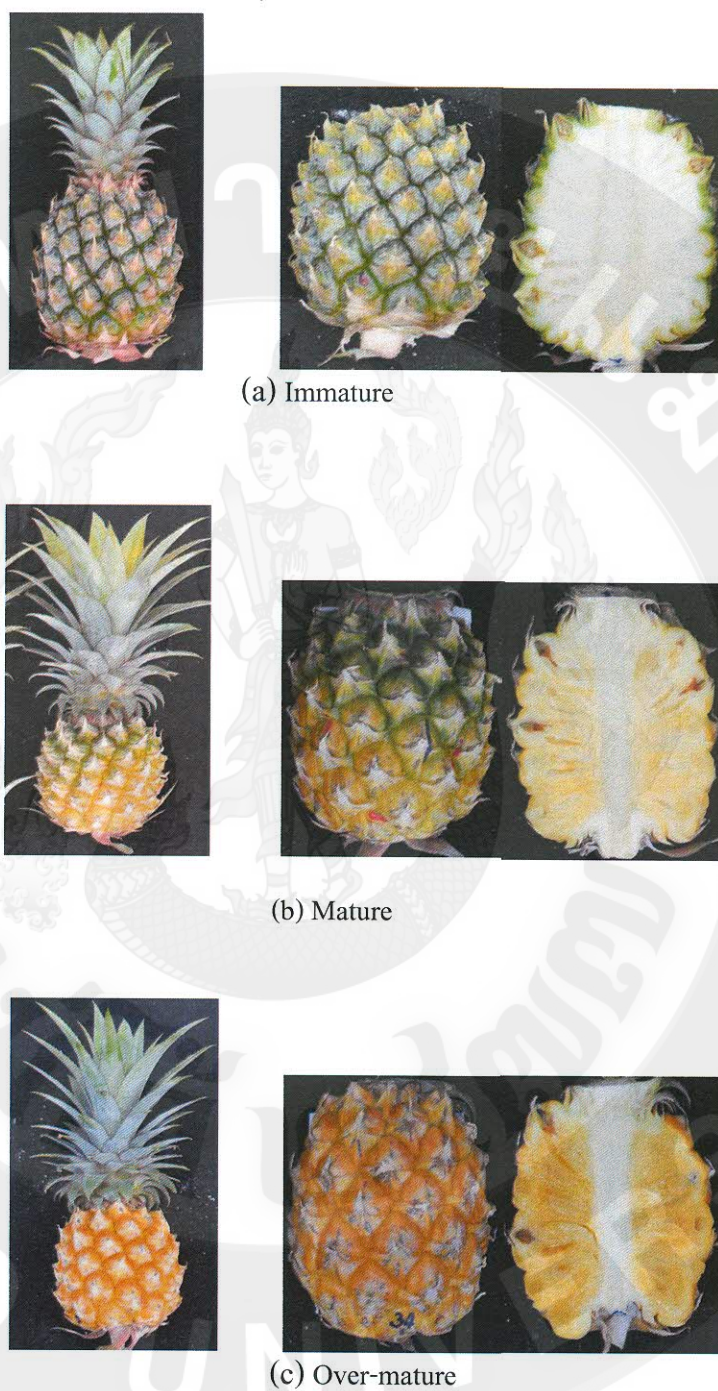


Figure 23 Pineapple fruit at three maturity stages, (a) immature 1, (b) mature and (c) over-mature

สมบัติทางกายภาพ

- ขนาด และน้ำหนักผล

ขนาดของผลสับปะรดแสดงในค่า ความยาวผล และเส้นรอบผล และ น้ำหนักผล และน้ำหนักของ จุกผล (crown) พบว่า เมื่อระยะความแก่ของผลเพิ่มขึ้น ขนาดของผลสับปะรดการเปลี่ยนแปลงมีแนวโน้ม ไม่ชัดเจน ทั้งความยาวและเส้นรอบผล ส่วนน้ำหนักของผลและจุกผลสับปะรดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะความ แก่ของผลเพิ่มขึ้น และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 7) ความยาวผลมีค่า ระหว่าง 8.04 - 8.90 เซนติเมตร เส้นรอบผลมีค่าระหว่าง 25.52 - 30.13 เซนติเมตร น้ำหนักผลมีค่าระหว่าง 291.15 - 400.24 กรัม และน้ำหนักจุกผลมีค่าระหว่าง 52.80 - 103.59 กรัม ตามลำดับ (Table 8) เมื่อพิจารณา น้ำหนักผลสับปะรดและน้ำหนักจุกผลที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากกระบวนการแก่ของผล (maturation) (Rees et al., 2012; Shewfelt, 1993)

Table 7 Dimension of pineapple fruit at three maturity stages

Maturity stages	Length (cm)	Circumference (cm)	Fruit weight (g)	Crown weight (g)
Stage 1	8.81a±0.68	25.52b±0.84	291.15c±34.60	52.80b±12.00
Stage 2	8.90a±0.58	30.13a±8.68	400.24a±39.91	103.59a±31.54
Stage 3	8.04a±0.61	28.44a±0.82	381.61b±37.89	97.92a±25.18
CV. (%)	7.15	18.05	10.49	28.68

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

- สีเปลือกผลและสีเนื้อผลสับปะรด

ผลสับปะรดที่เก็บเกี่ยว 3 ระยะความแก่ของผล พบว่า สีเปลือกผลของสับปะรดที่วัดจาก บริเวณ แก้มผล แสดงในค่าความสว่าง (L^*), ค่าสีแดง (a^*), ค่าสีเหลือง (b^*), ค่าความเข้มสี (C^*) และ ค่าสีที่แท้จริง (Hue°) เมื่อพิจารณาค่าสีแต่ละค่า พบว่า เมื่อระยะความแก่ของผลเพิ่มขึ้น ค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และค่าความเข้มสีมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าสีที่แท้จริงลดลง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 8)

ส่วนค่าสีของเนื้อผลสับปะรดนั้น พบว่า ค่าสีแดง ค่าสีเหลืองและค่าความเข้มสีมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะความแก่ของผลที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความสว่างและค่าสีที่แท้จริงมีค่าลดลง และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 9) ค่าสีเปลือกและเนื้อผลสับปะรดทั้ง 3 ระยะความแก่ของผล สอดคล้องกับสีเปลือกและสีเนื้อที่ปรากฏ โดยที่ระยะก่อนผลแก่ เปลือกผลมีสีเขียว และเปลี่ยนเป็นสีเขียวนปนเหลืองที่ระยะผลแก่ และสีเหลืองที่ระยะหลังผลแก่ สำหรับเนื้อผลที่ระยะก่อนผลแก่มีสีขาว และเปลี่ยนเป็นสีเขียวนปนเหลืองที่ระยะผลแก่ และสีเหลืองที่ระยะหลังผลแก่ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของทั้งสีเปลือกและเนื้อผลสับปะรดนี้เป็นผลจากกระบวนการแก่และการสุก (ripening process) ของผลสับปะรด (Rees et al., 2012)

Table 8 Peel color of pineapple fruit at three maturity stages

Maturity stages	L*	a*	b*	C*	h°
Immature	28.60c±3.72	-1.18b±1.25	7.03c±3.44	7.17c±3.55	98.49a±7.12
Mature	38.13b±4.53	-1.78b±3.09	28.67b±5.24	28.81b±5.26	94.27b±6.56
Over-mature	64.57a±3.65	2.46a±1.10	40.96a±2.60	41.03a±2.62	86.58c±1.50
CV. (%)	9.12	1.92	15.35	15.46	6.07

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

Table 9 Flesh color of pineapple three maturity stages

Maturity stages	L*	a*	b*	C*	h°
Immature	77.36a±1.95	-1.36c±0.58	17.36c±2.25	17.42c±2.28	94.40a±1.62
Mature	66.32b±2.84	1.17b±0.86	37.49b±2.24	37.56b±2.27	87.03b±8.48
Over-mature	64.56c±3.65	2.45a±1.10	40.96a±2.60	41.02a±2.62	86.58b±1.50
CV. (%)	4.18	1.16	7.43	7.49	5.66

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

- ความแน่นเนื้อผลสับปะรด

ความแน่นเนื้อของผลสับปะรดเก็บเกี่ยวที่ 3 ระยะความแก่ พบว่า มีค่าลดลงเมื่อความแก่ของผลเพิ่มขึ้น และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 10) โดยที่ระยะก่อนผลแก่เนื้อผลสับปะรดมีความแน่นเนื้อสูงสุด เท่ากับ 26.60 N รองลงมาคือระยะผลแก่ เท่ากับ 8.29 N และมีค่าต่ำที่สุดที่ระยะหลังผลแก่ เท่ากับ 7.80 N ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของผลไม้นี้เป็นผลจากกระบวนการแก่และการสุกของผลไม้ (จริงแท้, 2550)

Table 10 Firmness of pineapple flesh at three maturity stages

Maturity stages	Firmness (N)
Immature	26.60a±4.67
Mature	8.29b±1.87
Over-mature	7.80b±1.67
CV. (%)	21.54

: Table display the value of mean $\pm$ standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

สมบัติทางเคมี

- ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (TSS) และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Titratable acidity)

ค่า TSS ของผลสับปะรดเก็บเกี่ยวที่ 3 ระยะความแก่ของผล พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะความแก่ของผลเพิ่มขึ้น และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ที่ระยะก่อนผลแก่ มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ต่ำที่สุด เท่ากับ 7.88% และที่ระยะหลังผลแก่มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 20.50% ขณะที่ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (TA) มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยที่ระยะก่อนผลแก่มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.45% และที่ระยะหลังผลแก่มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 0.61% และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เช่นเดียวกับค่า TSS (Table 11) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของทั้งค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ นี้เป็นผลจากกระบวนการแก่ และกระบวนการสุกของผลสับปะรด (Rees et al., 2012)

ปริมาณแคโรทีนอยด์ และปริมาณคลอโรฟิลล์

ปริมาณแคโรทีนอยด์ของผลสับปะรดเพิ่มขึ้นตามระยะความแก่ของผล ซึ่งตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ที่ลดลง และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($P \leq 0.05$) โดยผลสับปะรดที่ระยะก่อนผลแก่มีปริมาณแคโรทีนอยด์ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.51 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักสด และที่ระยะหลังผลแก่มีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงที่สุดเท่ากับ 1.10 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักสด ส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ที่ระยะก่อนผลแก่มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1.59 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักสด และที่ระยะหลังผลแก่มีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 0.00 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักสด (ไม่พบ) ส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ที่ระยะก่อนผลแก่มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 0.92 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักสด และที่ระยะผลแก่มีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 0.14 ไมโครกรัม/กรัม น้ำหนักสด (Table 11)

จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารสีทั้งสองชนิด สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสีที่ปรากฏของผลสับปะรด

Table 11 Chemical properties of pineapple fruit at three maturity stages

Maturity stages	TSS (%)	TA (%)	Carotenoid ($\mu\text{g/g}$ fresh weight)	Chlorophyll ($\mu\text{g/g}$ fresh weight)	
				Chlorophyll a	Chlorophyll b
Immature	7.88 $\pm$ 1.30	0.45b $\pm$ 0.07	0.51b $\pm$ 0.83	1.59a $\pm$ 0.56	0.92a $\pm$ 2.25
Mature	19.42b $\pm$ 1.25	0.59a $\pm$ 0.07	0.98a $\pm$ 0.15	0.32b $\pm$ 0.18	0.14b $\pm$ 0.11
Over-mature	20.50a $\pm$ 1.08	0.61a $\pm$ 0.11	1.10 $\pm$ a0.56	0.00c $\pm$ 0.00	0.22 $\pm$ b1.45
CV. (%)	7.66	16.26	6.74	55.59	3.60

: Table display the value of mean $\pm$ standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

NIRSystem 6500

ข้อมูลสเปกตรัม

ผลสับปะรดเก็บเกี่ยวที่ 3 ระยะความแก่ของผลนำมาวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIRSystem 6500 ในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 นาโนเมตร สเปกตรัมดั้งเดิม พบพิกัดจุดที่ความยาวคลื่น 676 และ 978 นาโนเมตร (Figure 24) และเมื่อแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วย วิธี second derivative จึงพบพิกัดหวัคกลับที่ความยาวคลื่น 680 และ 962 นาโนเมตร (Figure 25) ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ความ

ยาวคลื่นทั้งสอง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน คือมีค่าลดลงเมื่อความแก่ของผลเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับสเปกตรัมของผลมะละกอ

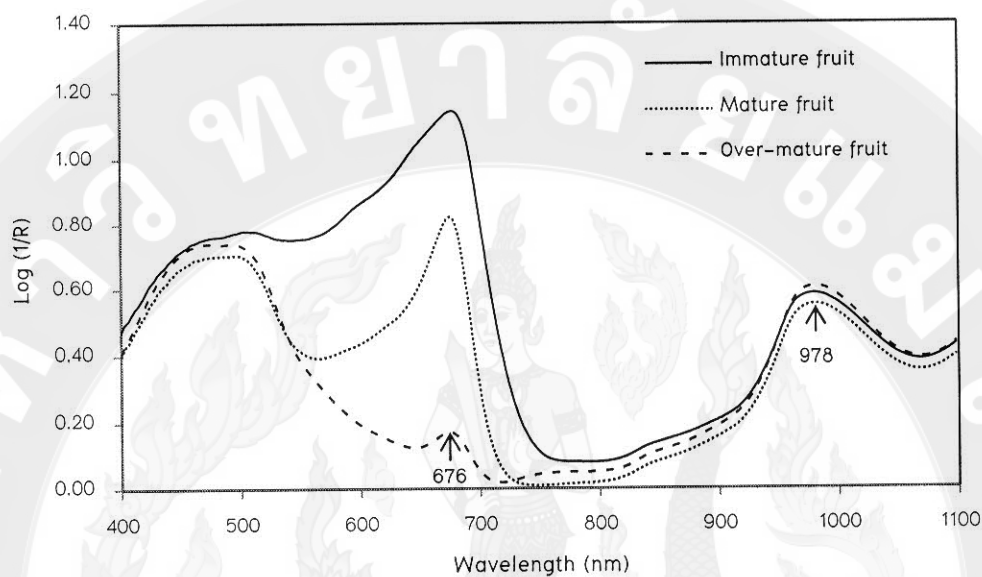


Figure 24 Means of original spectra of pineapple fruit at three maturity stages measured by NIRSystem6500.

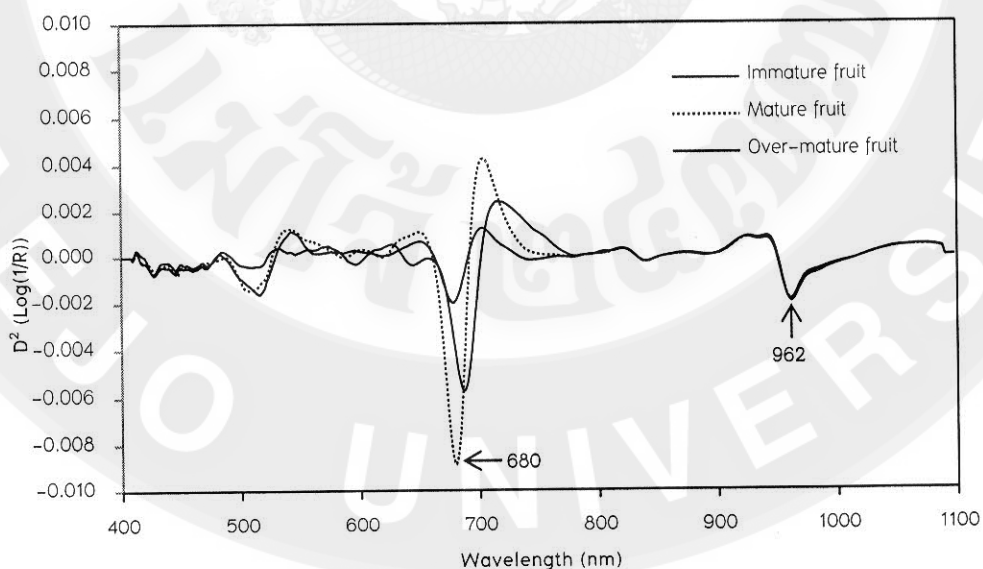


Figure 25 Means of second derivative treated spectra of pineapple fruit at three maturity stages measured by NIRSystem6500.

สมการเทียบมาตรฐาน

สมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ของผลสับปะรดทั้ง 3 ระยะความแก่ของผล สร้างด้วยการนำข้อมูลสเปกตรัมที่แปลงด้วยวิธี Savitzky-Golay second derivative (10 nm average for left and right sides) มาหาความสัมพันธ์กับค่า TSS ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง digital refractometer ในช่วงความยาวคลื่น 850-1050 นาโนเมตร ให้ผลของสมการดีที่สุด ซึ่งมีค่า R^2 , SEC, SEP และ bias เท่ากับ 0.92, 1.62%, 1.67% และ 0.06 ตามลำดับ (Table 12) เนื่องจากการแปลงข้อมูลด้วยวิธีเดียว และการแปลงอนุพันธ์อันดับที่ 2 ทำให้ความกว้างของพีคแคบลง สามารถลดผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแนวแกน Y ทำให้ทราบตำแหน่งความยาวคลื่นที่ชัดเจนขึ้น และเมื่อนำไปใช้ในการทำนายค่า TSS ของตัวอย่างในอนาคต จะมีความแปรปรวนของผลการทำนายต่ำกว่าวิธีอื่น (Osborne et al., 1993)

Table 12 Total soluble solid calibration results of pineapple fruit at three maturity using the spectra from NIRSystem 6500,

Pre-treatment	Wavelength region (nm)	Factor	R^2	SEC (%)	SEP (%)	Bias (%)
Original	850-1050	5	0.92	1.68	1.73	0.06
MSC	850-1050	6	0.94	1.47	1.48	-0.26
Second derivative (5,5)	850-1050	5	0.92	1.62	1.67	0.06
MSC+ Second derivative (5,5)	850-1050	5	0.92	1.46	1.62	0.05

MSC: multiplicative scatter correction; F: number of factors used in the calibration model; R^2 : coefficient of determination; SEC: standard error of calibration; SEP: standard error of prediction; Bias: average of difference between actual value and NIR predicted value

Hamamatsu

ข้อมูลสเปกตรัม

สเปกตรัมของผลสับปะรดที่วัดด้วยเครื่อง NIR spectrometer (Hamamatsu) ในช่วงความยาวคลื่น 400-1078 นาโนเมตร พบว่า สเปกตรัมดั้งเดิมของผลสับปะรด มีสัญญาณรบกวนค่อนข้างสูง และไม่พบพีกที่เด่นชัดดังเช่นสเปกตรัมที่วัดด้วยเครื่อง NIRSystem 6500 มีเพียง broad band (Figure 26) จึงนำมาแปลงข้อมูลด้วย Savitzky-Golay second derivative ยังคงพบสัญญาณรบกวนบนข้อมูลสเปกตรัม และไม่พบพีกที่ชัดเจนเช่นเดียวกับสเปกตรัมดั้งเดิม (Figure 27) เช่นเดียวกับสเปกตรัมของผลมะละกอ

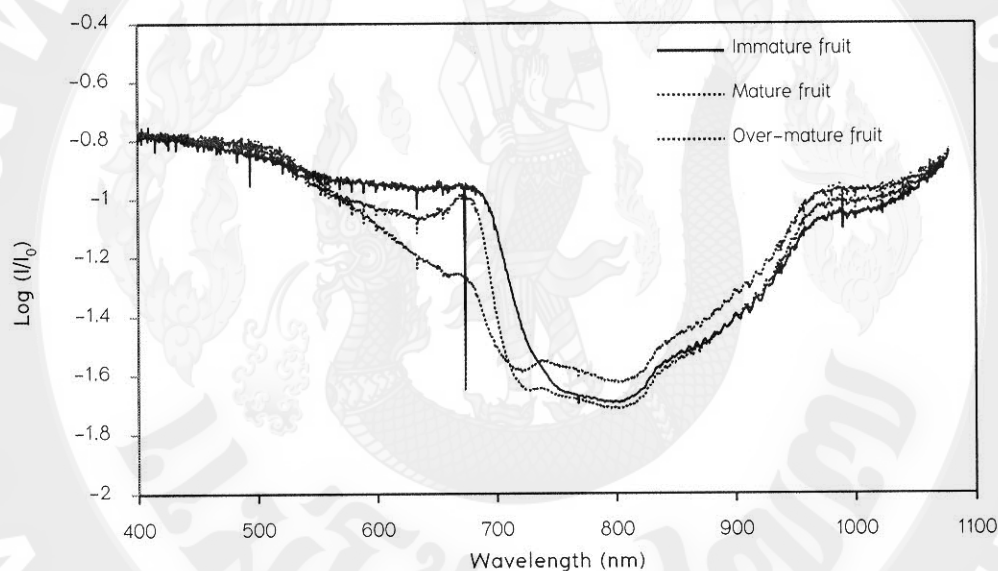


Figure 26 Means of original spectra of pineapple fruit at three maturity stages measured by NIR spectrometer (Hamamatsu)

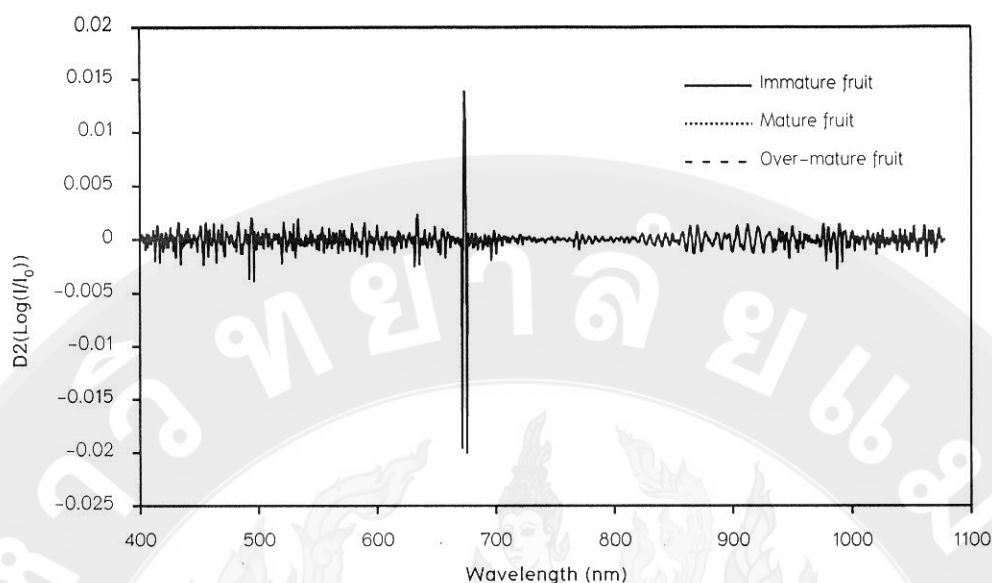


Figure 27 Means of second derivative treated spectra of pineapple fruit at three maturity measured by NIR spectrometer (Hamamatsu)

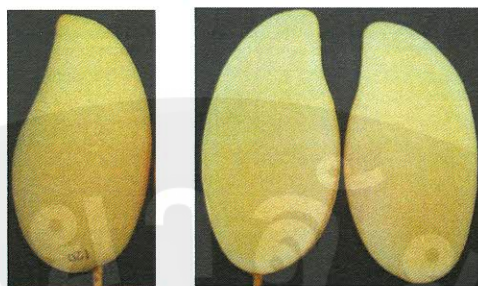
สมการเทียบมาตรฐาน

สร้างสมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ผลสับปะรดด้วยสเปกตรัมที่วัดจากเครื่อง NIR spectrometer (Hamamatsu) เช่นเดียวกับผลมะละกอ พบว่า ผลของสมการเทียบมาตรฐานให้ค่า R^2 ที่ต่ำมาก และ SEC, SEP และ bias ที่สูงมาก โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับผลของสมการเทียบมาตรฐานที่ได้จากเครื่อง NIRSystem 6500

ดังนั้นคณะนักวิจัยจึงสรุปได้ว่าหากต้องการนำเครื่อง NIR spectrometer (Hamamatsu) มาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของผลไม้ที่มีความหนา และความหนาแน่นของเนื้อผลสูง รวมถึงมีลักษณะโครงสร้างเนื้อผลที่ซับซ้อน ดังเช่น ผลมะละกอ และสับปะรดในการทดลองนี้ จำเป็นต้องปรับแก้ไขเครื่องให้มีความเหมาะสมมากขึ้น และใช้โปรแกรมการแปลงค่าจากเครื่องมือให้สามารถลดความแปรปรวนจากการวัดสเปกตรัมได้มากที่สุด ทั้งนี้หากไม่สามารถลดความแปรปรวนของสเปกตรัมจากปัจจัยหลักพื้นฐานได้แล้ว (เครื่องมือ, ตัวอย่าง และ โปรแกรมวิเคราะห์) การใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ใดๆ ไม่สามารถลดความแปรปรวนได้

3. มะม่วง

เก็บเกี่ยวผลมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง จากสวนเกษตรกรในพื้นที่อำเภอฟัว จังหวัดเชียงใหม่ ที่ 3 ระยะความแก่ของผล คือ ระยะก่อนผลแก่ (immature) ระยะผลแก่ (mature) และระยะหลังผลแก่ (over-mature) (Figure 28) ห่อด้วยถุงตาข่ายโฟม (foam net) ขนส่งมายังห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยเทคโนโลยี หลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ นำมาวัดสเปกตรัมที่บริเวณแก้มผล ด้วยเครื่อง NIRsystem 6500 ในช่วงความยาวคลื่น 400 - 1100 นาโนเมตร โดยก่อนวัดสเปกตรัมของผลมะม่วงจะต้องควบคุมอุณหภูมิของผลมะม่วงที่ 25 องศาเซลเซียส ด้วยการแช่ผลในอ่างน้ำเย็นที่ป้องกันการเปียกของผลด้วยแผ่นพลาสติกเช่นเดียวกับผลมะม่วงและสับปะรด จากนั้นจึงนำผลมะม่วงทั้ง 3 ระยะความแก่ ไปตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ขนาด น้ำหนักผล สีเปลือกและสีเนื้อผล สมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และปริมาณสารสี (pigment) ได้แก่ กลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ ดังรายละเอียดผลการทดลองต่อไปนี้



(a) Immature



(b) Mature



(c) Over-mature

Figure 28 Mango fruit at three maturity stages, immature (a), mature (b) and (c) over mature

สมบัติทางกายภาพ

- ขนาด และน้ำหนักผล

ขนาดของผลมะม่วงแสดงในค่า ความกว้าง ความยาว ความหนาของผล และน้ำหนักผล พบว่า เมื่อระยะความแก่ของผลเพิ่มขึ้น ขนาดของผลมะม่วงมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มลดลง ทั้งความกว้าง ความยาว และความหนาของผล ขณะที่น้ำหนักของผลมีค่าเพิ่มขึ้นและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ความกว้างผล มีค่าระหว่าง 6.00 - 7.05 เซนติเมตร ความยาวผลมีค่าระหว่าง 13.99 - 14.84 เซนติเมตร ความหนาผลมีค่าระหว่าง 5.30 - 6.25 เซนติเมตร และน้ำหนักผลมีค่าระหว่าง 320.09 - 393.02 กรัม (Table 13) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักผล เมื่อระยะความแก่ของผลเพิ่มขึ้น เป็นผลจากพัฒนาของผลโดยผลมะม่วงมีการสะสมแป้งในเซลล์ ทำให้น้ำหนักผลเพิ่มขึ้น

Table 13 Dimension of mango fruit at three maturity stages, immature, mature and over mature.

Maturity stages	Width (cm)	Length (cm)	Thickness (cm)	Weight (g)
Immature	7.05a $\pm$ 0.34	14.84a $\pm$ 0.86	6.23a $\pm$ 0.28	327.24b $\pm$ 40.92
Mature	7.02a $\pm$ 0.32	14.30ab $\pm$ 0.79a	6.25a $\pm$ 0.29	320.09b $\pm$ 39.87
Over-mature	6.00b $\pm$ 1.02	13.99b $\pm$ 2.16	5.30b $\pm$ 0.10	393.02a $\pm$ 64.32
CV. (%)	9.76	9.91	11.06	14.33

: Table display the value of mean $\pm$ standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

- สีเปลือกผลและสีเนื้อผลมะม่วง

สีเปลือกผลมะม่วงที่เก็บเกี่ยว 3 ระยะความแก่ของผล พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจนตลอดระยะความแก่ของผล โดยเฉพาะค่าความสว่าง ค่าสีเหลืองและความเข้มสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าสีแดง มีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามค่าสีทุกค่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 14) สำหรับสีเนื้อผลมีค่าความสว่างค่อนข้างคงที่ ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และค่าความเข้มสีเพิ่มขึ้นแต่ค่า h° ลดลง เมื่อระยะความแก่ของผลที่เพิ่มขึ้น โดยค่าสีต่างๆ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 15) จากการเปลี่ยนแปลงค่าสีเปลือกและเนื้อผล สอดคล้องกับสีเปลือกและเนื้อผลของมะม่วงที่ปรากฏ ซึ่งมีสีเหลืองที่ระยะก่อนผลแก่ และพัฒนาเข้มขึ้นเพียงเล็กน้อยที่ระยะหลังความแก่ของผล

Table 14 Peel color of mango fruit at three maturity stages

Maturity stages	L*	a*	b*	C*	h°
Immature	80.67b±1.04	6.45b±0.94	32.59b±2.01	33.22b±2.10	78.83a±1.26
Mature	89.13a±1.62	6.58b±1.44	34.75b±3.37	35.38a±3.51	79.35a±1.73
Over-mature	78.96c±1.79	7.78a±1.18	33.06a±2.21	33.97b±2.34	76.80b±1.49
CV. (%)	1.83	17.39	7.79	7.97	1.92

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

Table 15 Flesh color of mango fruit at three maturity stages

Maturity stages	L*	a*	b*	C*	h°
Immature	82.59b±0.70	0.35c±0.57	22.03c±2.93	22.04c±2.93	89.18a±1.35
Mature	86.68a±1.14	0.95b±1.02	26.27b±4.54	26.30b±4.57	88.20b±1.96
Over-mature	82.22b±2.01	3.42a±1.48	33.50a±6.13	33.69a±6.25	84.35c±1.36
CV. (%)	1.66	6.92	17.32	17.51	1.82

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

- ความแน่นเนื้อผลมะม่วง

ความแน่นเนื้อของผลมะม่วงทั้ง 3 ระยะความแก่ พบว่า มีค่าลดลงเมื่อความแก่ของผลเพิ่มขึ้น และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 16) โดยที่ระยะก่อนผลแก่ผลมะม่วงมีความแน่นเนื้อสูงสุด เท่ากับ 71.06 N รองลงมาคือระยะผลแก่ เท่ากับ 67.62 N และมีค่าต่ำที่สุดที่ระยะหลังผลแก่ เท่ากับ 49.84 N ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความแน่นเนื้อของผลไม้นี้เป็นผลจากกระบวนการแก่และการสุกของผลไม้ (จริงแท้, 2550)

Table 16 Firmness of mango flesh harvested at three maturity stages

Maturity stages	Firmness (N)
Immature	71.06a±10.74
Mature	67.62a±12.04
Over-mature	49.84b±21.74
CV. (%)	24.95

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

สมบัติทางเคมี

- ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดที่ไตเตรตได้

ค่า TSS ของผลมะม่วงที่ 3 ระยะความแก่ของผล พบว่า ค่า TSS ที่ระยะก่อนผลแก่ ระยะผลแก่ และที่ระยะหลังผลแก่มีค่า 13.64% 12.36% และ 17.08% ตามลำดับ และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ค่า TA มีค่าลดลง เมื่อระยะความแก่ของผลเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะก่อนผลแก่มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 2.01% และที่ระยะหลังผลแก่มีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 1.19% และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 17) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า TSS และการลดลงของค่า TA ของผลมะม่วงนี้เป็นผลจากกระบวนการแก่ และกระบวนการสุก

Table 17 TSS and TA of mango fruit at three maturity stages

Maturity stages	TSS (%)	TA(%)
Immature	13.64b±1.09	2.01a±0.26
Mature	12.36c±1.68	1.75b±0.28
Over mature	17.08a±2.71	1.19c±0.27
CV. (%)	13.57	16.67

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

NIRSystem6500

ข้อมูลสเปกตรัม

ผลมะม่วงเก็บเกี่ยวที่ 3 ระยะความแก่ของผลนำมาวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIRSystem 6500 ในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 นาโนเมตร สเปกตรัมดั้งเดิม พบพิกัดเด่นที่ความยาวคลื่น 474 และ 980 นาโนเมตร (Figure 29) และเมื่อแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วย วิธี second derivative จึงพบพิกัดหัวกลับที่ความยาวคลื่น 506 และ 962 นาโนเมตร (Figure 30) ซึ่งพิกัดที่ความยาวคลื่น 474 และ 506 นาโนเมตร เกิดจากการดูดกลืนแสงของแคโรทีนอยด์ที่พบในเปลือกมะม่วง และพิกัดที่ความยาวคลื่น 962 และ 980 นาโนเมตร เกิดจากการดูดกลืนแสงของโมเลกุลน้ำนั่นเอง (Berrardo et al., 2004; Theanjumol, 2013)

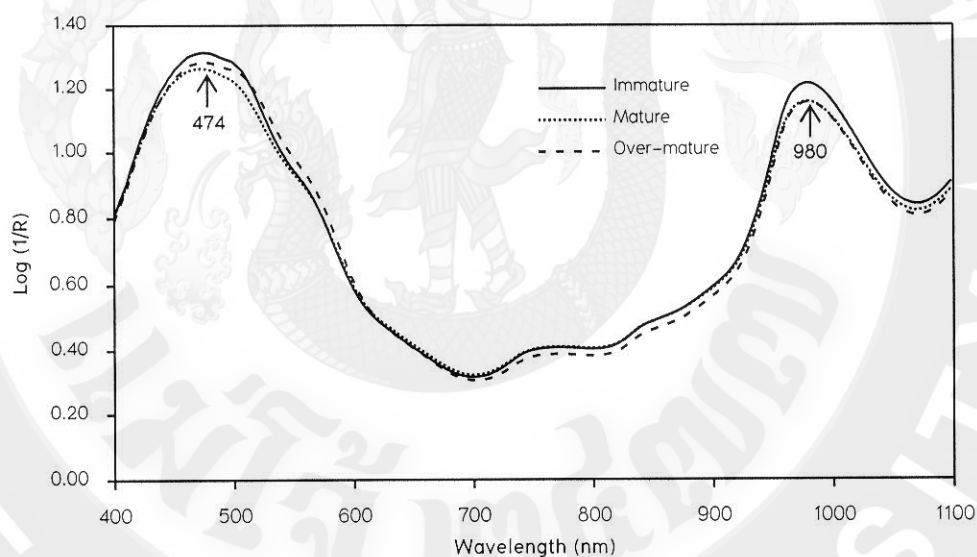


Figure 29 Means of original spectra of mango fruit at three maturity stages measured by NIRSystem 6500.

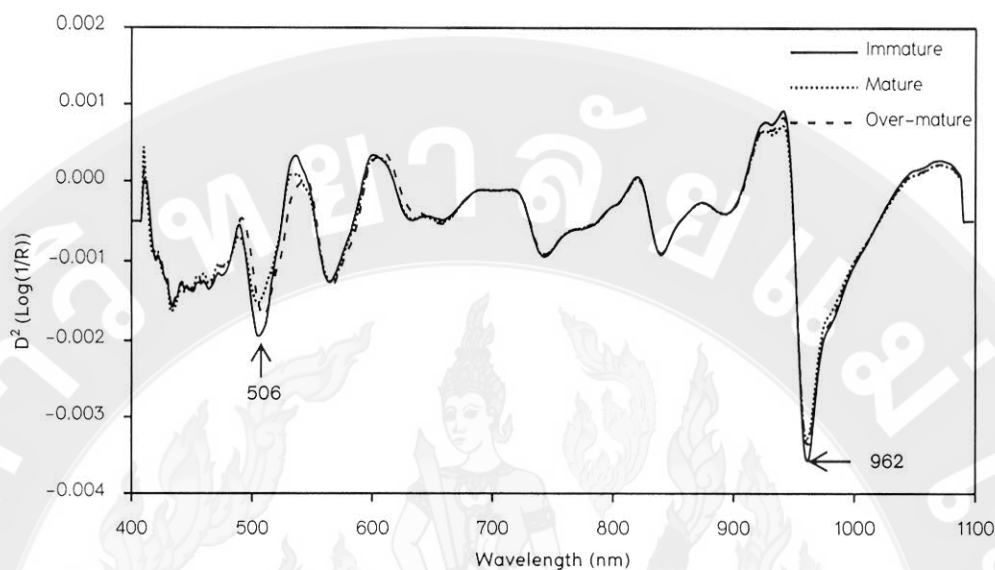


Figure 30 Means of second derivative treated spectra of mango fruit at three maturity stages measured by NIRSystem 6500.

สมการเทียบมาตรฐาน

สมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ของผลมะม่วงทั้ง 3 ระยะความแก่ของผล สร้างด้วยการนำข้อมูลสเปกตรัมที่แปลงด้วยวิธี Savitzky-Golay second derivative (10 nm average for left and right sides) มาหาความสัมพันธ์กับค่า TSS ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง digital refractometer ในช่วงความยาวคลื่น 850-1000 นาโนเมตร ให้ผลของสมการดีที่สุด ซึ่งมีค่า R^2 , SEC, SEP และ bias เท่ากับ 0.90, 0.96%, 0.97% และ 0.06 ตามลำดับ (Table 18) เนื่องจากการแปลงข้อมูลด้วยวิธีเดียว และการแปลงอนุพันธ์อันดับที่ 2 ให้ความกว้างของพีคแคบลง สามารถลดผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแนวแกน Y ทำให้ทราบตำแหน่งความยาวคลื่นที่ชัดเจนขึ้น และเมื่อนำไปใช้ในการทำนายค่า TSS ของตัวอย่างในอนาคต จะมีความแปรปรวนของผลการทำนายต่ำกว่าวิธีอื่น (Osborne et al., 1993) เช่นเดียวกับสมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ของผลมะละกอและผลสับปะรด

Table 18 Total soluble solid calibration results of mango fruit at three maturity stages

Pre-treatment	Wavelength region (nm)	Factor	R ²	SEC (%)	SEP (%)	Bias (%)
Original	800-1000	8	0.87	1.03	1.13	0.01
MSC	800-1000	7	0.86	1.06	1.09	-0.02
Second derivative (5,5)	800-1000	5	0.90	0.96	0.97	0.06
MSC+ Second derivative (5,5)	800-1000	5	0.90	0.93	1.05	0.08

MSC: multiplicative scatter correction; F: number of factors used in the calibration model; R²: coefficient of determination; SEC: standard error of calibration; SEP: standard error of prediction; Bias: average of difference between actual value and NIR predicted value

การทดลองที่ 2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และลักษณะทางสรีรวิทยาของผลไม้ก่อนและระหว่างการสุกและการประเมินคุณภาพด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ในการทดลองที่ 2 นี้ คณะผู้วิจัยได้นำผลไม้แต่ละชนิดเก็บเกี่ยวที่ระยะผลแก่ (Mature) มาแบ่งเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ผลดิบนำมาวัดสเปกตรัม แล้วจึงตรวจวัดสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี รวมทั้งปริมาณสารสี และชุดที่ 2 นำมาบ่มเป็นผลสุก ตามกรรมวิธีในบทที่ 2 วัดสเปกตรัม แล้วจึงตรวจวัดสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี ปริมาณสารสี ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลดิบ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติดังกล่าวข้างต้นในระหว่างการสุก และการประเมินคุณภาพด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

1. มะละกอ

สมบัติทางกายภาพ

- ขนาด และน้ำหนักผล

ผลมะละกอดิบและมะละกอสุกมีความยาวผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) มีค่าระหว่าง 20.24 - 20.52 เซนติเมตร แต่มีเส้นรอบผลและน้ำหนักแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จะเห็นว่าเส้นรอบผลและน้ำหนักผลมีค่าลดลงเมื่อผลมะละกอผ่านกระบวนการสุก โดยเส้นรอบผลมีค่าระหว่าง 28.75 - 29.98 เซนติเมตร ส่วนน้ำหนักผลมีค่าระหว่าง 921.04-992.72 กรัม (Table 19)

Table 19 Dimension of green and ripe papaya fruit at maturity stage

Types of fruit	Length (cm)	Circumference(cm)	Weight (g)
Green apaya	20.24±1.14	29.98±1.31	992.72±83.57
Ripe papaya	20.52±0.99	28.75±1.13	921.04±94.08
t-test(0.05)	ns	*	*

: Table display the value of mean $\pm$ standard deviation (SD.)

: ns mean the value was not significant difference at 95% confident interval by t-test ($P \geq 0.05$)

: * Mean the value was significant different at 95% confident interval by t-test ($P \leq 0.05$)

- ความแน่นเนื้อของผลมะละกอ

ผลมะละกอดิบมีความแน่นเนื้อสูงกว่าผลมะละกอสุก และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นอกจากนี้ตำแหน่งผล ได้แก่ บริเวณขั้วผล กลางผล และปลายผล มีความแน่นเนื้อแตกต่างกันด้วย โดยบริเวณขั้วผลจะมีความแน่นเนื้อสูงกว่า กลางผล และปลายผล ผลมะละกอดิบมีความแน่นเนื้อเท่ากับ 82.41, 77.36 และ 74.65 N ส่วนผลมะละกอสุกมีความแน่นเนื้อ เท่ากับ 17.34, 17.99 และ 19.68 N ตามลำดับ (Table 20) จะพบว่า เมื่อผลมะละกอมีผ่านกระบวนการสุกจะมีผลให้ความแน่นเนื้อลดลง

Table 20 Firmness of green and ripe papaya flesh at maturity stage

Types of fruit	Firmness (N)		
	Stem	Middle	End
Green papaya	82.41±12.75	77.36±13.67	74.65±15.76
Ripe papaya	17.34±9.83	17.99±9.23	19.68±6.35
t-test(0.05)	*	*	*

: Table display the value of mean $\pm$ standard deviation (SD.)

: ns mean the value was not significant difference at 95% confident interval by t-test ($P \geq 0.05$)

: * Mean the value was significant different at 95% confident interval by t-test ($P \leq 0.05$)

- สีเปลือกและเนื้อผลมะละกอ

สีเปลือก ผลมะละกอเมื่อผ่านกระบวนการสุก มีค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และค่าความเข้มสีเพิ่มขึ้น ส่วนค่า h° มีค่าลดลง และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 21) สำหรับตำแหน่งผลนั้น พบว่าค่าสีต่างๆ บริเวณก้านผลมีค่าต่ำกว่ากลางผล และปลายผล

สีเนื้อ ผลมะละกอเมื่อผ่านกระบวนการสุก มีค่าความสว่าง ค่าสีเหลือง และค่าสีที่แท้จริงลดลง และค่าสีแดงเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความเข้มสีคงที่ อย่างไรก็ตามค่าสีต่างๆ ของเนื้อผลมะละกอทั้งดิบและสุกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 22)

จากการเปลี่ยนแปลงค่าสีเปลือกและเนื้อผลมะละกอดิบที่ผ่านกระบวนการสุก กระทั่งผลสุกเต็มที่ สอดคล้องกับสีเปลือกและสีเนื้อที่ปรากฏ โดยสีเปลือกมะละกอดิบมีสีเขียวและเปลี่ยนเป็นสีเหลืองส้มเมื่อผลสุก ส่วนสีเนื้อผลดิบมีสีขาวและเปลี่ยนเป็นสีส้มแดงเมื่อผลสุก ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสารสีโดยเฉพาะการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ ทั้งในส่วนเปลือกและเนื้อ (Thompson, 1996)

Table 21 Peel color of green and ripe papaya fruit at maturity stage

Measuring position	Types of fruit	Peel color				
		L*	a*	b*	C*	h°
Stem	Green papaya	57.66 ±4.08	-0.62 ±1.36	40.28 ±5.51	41.80 ±5.57	92.48 ±15.63
	Ripe papaya	58.23 ±3.82	25.15±8.45	43.45 ±8.45	50.63±2.54	59.05±11.18
	t-test(0.05)	ns	*	ns	*	*
Middle	Green papaya	57.49 ±3.84	-1.24 ±10.30	41.41 ±4.56	41.20±10.52	90.28 ±17.23
	Ripe papaya	58.34 ±2.72	24.59 ±7.47	43.40 ±3.95	50.59±1.72	60.54±9.46
	t-test(0.05)	ns	*	ns	*	*
End	Green papaya	56.76±3.58	27.97 ±5.63	41.81 ±4.55	50.38 ±3.68	56.20 ±7.43
	Ripe papaya	58.22±2.69	25.18 ±6.86	43.16±3.80	50.58±1.75	59.82±8.76
	t-test(0.05)	ns	ns	ns	ns	ns

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: ns mean the value was not significant difference at 95% confident interval by t-test ($P \geq 0.05$)

:* Mean the value was significant different at 95% confident interval by t-test ($P \leq 0.05$)

Table 22 Flesh color of green and ripe papaya fruit at maturity stage

Measuring position	Types of fruit	Peel color				
		L*	a*	b*	C*	h°
Stem	Green papaya	62.70 ±4.08	23.04 ±5.18	39.97 ±3.32	46.45 ±2.64	60.11 ±7.02
	Ripe papaya	55.57 ±4.39	30.76 ±5.25	34.66 ±4.64	46.80 ±3.49	48.39 ±7.52
	t-test(0.05)	*	*	*	ns	*
Middle	Green papaya	64.13 ±4.52	20.89 ±5.71	38.22 ±3.10	43.91 ±3.30	61.54 ±7.44
	Ripe papaya	58.04 ±5.00	29.48 ±5.47	36.85 ±4.05	47.73 ±2.73	51.12 ±8.11
	t-test(0.05)	*	*	ns	*	*
End	Green papaya	65.75 ±4.34	18.02 ±6.37	37.65 ±4.05	42.14 ±4.72	64.71 ±8.04
	Ripe papaya	58.42 ±5.17	27.03 ±6.10	43.12 ±4.34	51.19 ±4.73	58.13 ±6.73
	t-test(0.05)	ns	*	*	*	*

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: ns mean the value was not significant difference at 95% confident interval by t-test ($P \geq 0.05$)

:* Mean the value was significant different at 95% confident interval by t-test ($P \leq 0.05$)

สมบัติทางเคมี

- ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้

ผลมะละกอดิบที่ผ่านกระบวนการสุกมีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ยังคงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 23) ซึ่งเป็นผลจากการที่ผลมะละกอดิบที่ผ่านกระบวนการสุกมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้น้อย แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 23) ซึ่งเป็นผลจากการ สลายสสารเป็นน้ำตาลโดยกระบวนการหายใจของเซลล์ผลไม้ จึงทำให้ผลมะละกามีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นเมื่อผลสุก

- ปริมาณแคโรทีนอยด์ และปริมาณคลอโรฟิลล์

ปริมาณแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้นเมื่อผลมะละกอสุก ขณะที่ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และบีลดลง ซึ่งปริมาณสารสีทั้งสองชนิดของมะละกอผลดิบและผลสุกมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 23) สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าสีและสีที่ปรากฏของผลมะละกอทั้งดิบและสุก ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการสุกดังได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

Table 23 Total soluble solids and pigment of green and Ripe papaya fruit at maturity stage

Harvesting time	TSS (%)	Carotenoid ($\mu\text{g/g}$ fresh weight)	Chlorophyll ($\mu\text{g/g}$ fresh weight)	
			Chlorophyll a	Chlorophyll b
Green papaya	10.29 $\pm$ 0.76	0.84 $\pm$ 0.27	0.29 $\pm$ 0.15	0.14 $\pm$ 0.18
Ripe papaya	11.77 $\pm$ 0.78	1.32 $\pm$ 0.28	0.03 $\pm$ 0.02	0.04 $\pm$ 0.03
t-test(0.05)	*	*	*	*

: Table display the value of mean $\pm$ standard deviation (SD.)

:* Mean the value was significant different at 95% confident interval by t-test ($P \leq 0.05$)

NIRSystem6500

ข้อมูลสเปกตรัม

สเปกตรัมดั้งเดิมของผลมะละกอดิบ และมะละกอสุก พบพีกที่ความยาวคลื่น 676 และ 978 นาโนเมตร (Figure 31) และเมื่อแปลงข้อมูลด้วย second derivative พบพีกหัวกลับที่ความยาวคลื่น 680 และ 962 นาโนเมตร (Figure 32) ซึ่งเป็นตำแหน่งความยาวคลื่นที่พบในผลมะละกอที่ระยะความแตกต่างๆ ด้วย ซึ่งคือแถบการดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์และน้ำในผลมะละกอ เมื่อพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 676 นาโนเมตร มีค่าลดลงเมื่อผลมะละกอสุก สอดคล้องกับปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลดลง

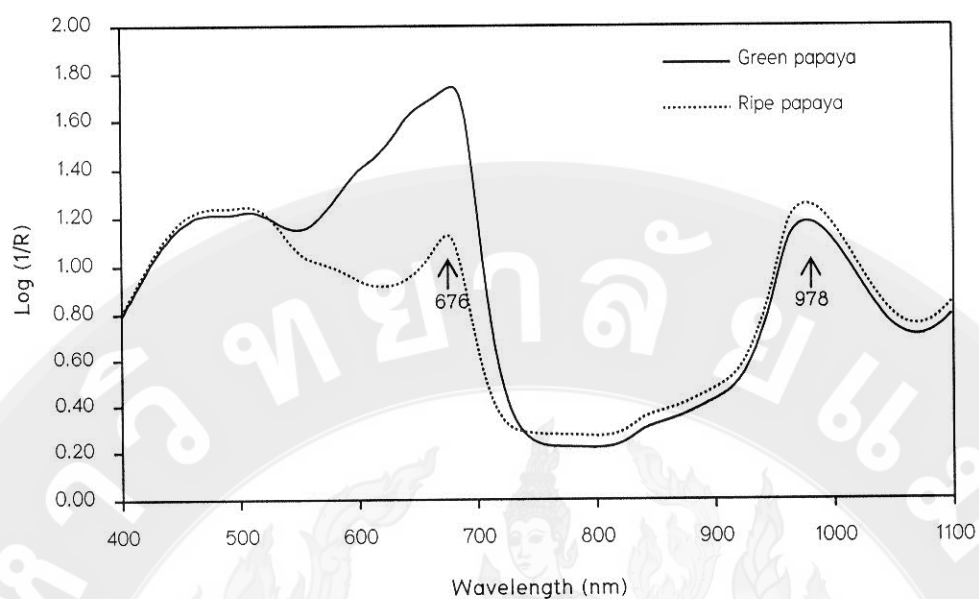


Figure 31 Means of original spectra of green and ripe papaya fruit at maturity stages

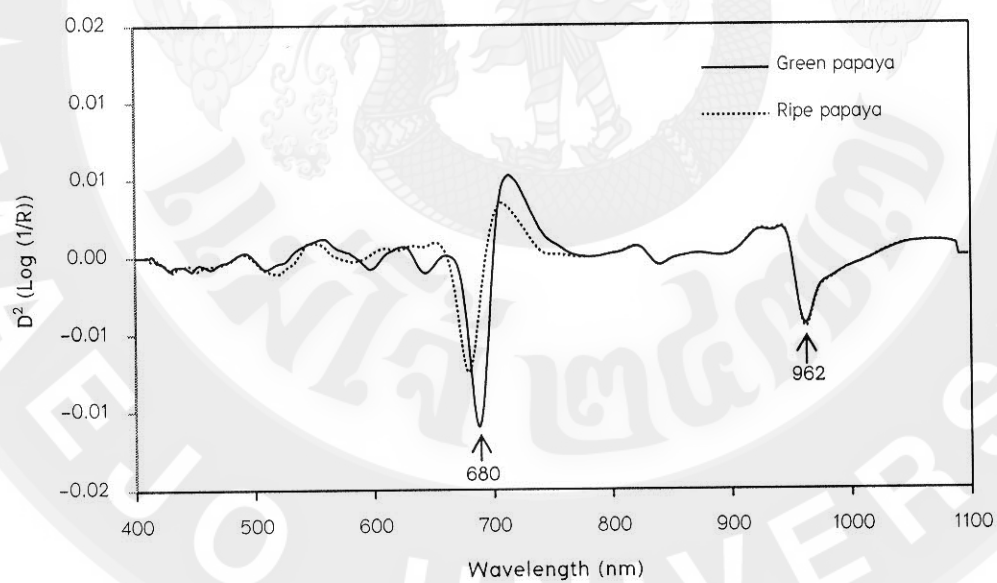


Figure 32 Means of second derivative treated spectra of green and ripe papaya fruit at maturity stage

สมการเทียบมาตรฐาน

สมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ของผลมะละกอในระหว่างกระบวนการสุก สร้างจากข้อมูลสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800 - 1000 นาโนเมตร แล้วแปลงด้วย Savitzky-Golay smoothing (20 nm average for left and right sides) ร่วมกับ Savitzky-Golay second derivative (20 nm average for left and right sides) และ Savitzky-Golay second derivative (20 nm average for left and right sides) ให้ผลดีกว่าการแปลงข้อมูลด้วย Savitzky-Golay smoothing หรือ Savitzky-Golay second derivative วิธีใดวิธีหนึ่ง มีค่า R^2 , SEC, SEP และ bias เท่ากับ 0.92, 0.56%, 0.56% และ 0.06% ตามลำดับ (Table 24) เนื่องจาก การแปลงค่าด้วย smoothing นี้จะช่วยลดความแปรปรวนของข้อมูลสเปกตรัมที่เกิดจากสัญญาณรบกวน (noise) และการแปลงข้อมูลด้วย second derivative จะช่วยลดปัญหาการเลื่อนขึ้นของ baseline และการซ้อนทับกันของพีก ทำให้ได้สมการเทียบมาตรฐานที่มีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อนำไปใช้ทำนายค่า TSS ของตัวอย่างในอนาคต (Williams and Norris, 2001)

Table 24 Total soluble solids calibration results of green and ripe papaya fruit at maturity stage

Pre-treatment	Wavelength region (nm)	Factor	R^2	SEC (%)	SEP (%)	Bias (%)
Original	800 - 1000	8	0.90	0.52	0.54	0.06
Smoothing (10,10)	800 - 1000	8	0.92	0.52	0.54	0.08
Second derivative (10,10)	850 - 1000	7	0.90	0.57	0.51	0.04
Smoothing (10,10) + Second derivative (10,10)	800 - 1000	7	0.90	0.56	0.56	0.06

F: number of factors used in the calibration model; R^2 : coefficient of determination; SEC: standard error of calibration; SEP: standard error of prediction; Bias: average of difference between actual value and NIR predicted value

2. สับปะรด

นำผลสับปะรดเก็บเกี่ยวที่ระยะผลแก่มาเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 25 วัน จากนั้นนำวัดสเปกตรัม ตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมี ตามลำดับ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่างๆ ของผลสับปะรดในระหว่างการเก็บรักษา และการตรวจสอบคุณภาพด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ดังรายละเอียดผลการทดลองต่อไปนี้

สมบัติทางกายภาพ

- ขนาด และน้ำหนักผล

ผลสับปะรดที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลา 25 วัน มีขนาด คือ ความยาว และเส้นรอบผล ไม่เปลี่ยนแปลง และไม่มีมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) แต่พบว่าน้ำหนักผลมีค่าลดลงตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 25) ซึ่งการลดลงของน้ำหนักผลสับปะรดในระหว่างการเก็บรักษานี้เกิดจากการสูญเสียน้ำของผล และเป็นผลจากกระบวนการหายใจ

Table 25 Dimension of pineapple fruit stored at 30 °C for 10 days and 25 days.

Storage time (days)	Length (cm)	Circumference (cm)	Weight (g)
Initial time	9.85a±0.47	29.63a±1.00	514.82a±69.81
10	9.95a±0.96	28.96a±1.21	452.91b±64.00
25	9.95a±0.68	28.77a±0.95	410.64b±60.71
CV. (%)	7.38	3.65	14.13

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

- ความแน่นเนื้อ

ผลสับปะรดมีความแน่นเนื้อลดลงในระหว่างการเก็บรักษา และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ที่ระยะเริ่มต้นผลสับปะรดมีความแน่นเนื้อเท่ากับ 16.02 N และเมื่อเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 20 วัน มีความแน่นเนื้อ เท่ากับ 13.61 และ 12.34 N ตามลำดับ (Table 26) การลดลงของความแน่นเนื้อของผลสับปะรดนี้เป็นผลจากกระบวนการสุกของผลสับปะรด ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผนังเซลล์นั่นเอง (Rees et al., 2012)

Table 26 Firmness of pineapple fruit stored at 30 °C for 10 days and 25 days.

Storage time (days)	Firmness (N)
Initial time	16.02a ± 5.93
10	13.61b ± 3.58
25	12.34b ± 1.76
CV. (%)	29.51

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

สีเปลือกและสีเนื้อผลสับปะรด

ค่าสีของเปลือกผลสับปะรดในระหว่างการเก็บรักษามีการเปลี่ยนแปลง โดยค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และค่าความเข้มสีเพิ่มขึ้น ส่วนค่าสีที่แท้จริงลดลง เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 27)

ส่วนสีเนื้อผลนั้นพบว่ามีค่าความสว่าง และค่าสีที่แท้จริงลดลง ส่วนค่าสีแดง สีเหลืองและความเข้มสีมีค่าเพิ่มขึ้น และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 28)

จากการเปลี่ยนแปลงค่าสีเปลือกและเนื้อผลสับปะรด สอดคล้องกับสีที่ปรากฏของผลสับปะรด คือ ที่ระยะเริ่มต้นก่อนการเก็บรักษาเปลือกสับปะรดจะมีสีเขียวปนเหลือง และจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเข้มขึ้นเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 25 วัน เช่นเดียวกับสีเนื้อผล ที่ระยะเริ่มต้นก่อนการเก็บรักษา เนื้อผลสับปะรดมีสีขาวเหลือง และเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเข้มขึ้น เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 25 วัน ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการสุกของผลสับปะรด (Rees et al., 2012)

Table 27 Peel color of pineapple fruit stored at 30 °C for 10 days and 25 days.

Storage time (days)	Color value				
	L*	a*	b*	C*	h°
Initial time	33.13c±7.36	-4.45c±2.62	21.45c±6.67	21.99c±6.90	101.15a±5.14
10	51.36b±9.39	1.05b±2.28	40.73a±4.99	42.19a±4.73	74.94b±3.28
25	46.53a±2.92	1.28a±2.24	36.31b±5.25	38.57b±5.25	70.38c±3.41
CV. (%)	16.25	38.02	17.32	16.66	4.90

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

Table 28 Flesh color of pineapple fruit storage at stored at 30 °C for 10 days and 25 days.

Storage time (days)	Color value				
	L*	a*	b*	C*	h°
Initial time	79.33a±2.30	-4.81a±0.41	26.86c±5.19	27.30c±5.13	100.45a±1.74
10	80.31a±2.11	-4.79a±0.57	33.23b±3.32	33.51b±3.26	98.34b±1.51
25	74.72b±11.01	-3.74b±1.72	37.70a±4.61	37.94a±4.65	95.54c±2.58
CV. (%)	8.46	24.12	13.63	13.43	2.04

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

สมบัติทางเคมี

- ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดที่ไดเตรตได้

ผลสัประรดที่เก็บรักษาเป็นเวลา 25 วัน พบว่าค่า TSS และ ค่า TA ก่อนข้างคงที่ โดยมีค่า TSS ต่ำที่สุดเท่ากับ 12.21% และค่าสูงที่สุดเท่ากับ 12.87% ส่วนค่า TA ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.45% และค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.74% (Table 29) ทั้งนี้เนื่องจากผลสัประรดเป็นชนิด non-climacteric ซึ่งมีกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาภายหลังการเก็บเกี่ยว เกิดขึ้นอย่างช้าๆ จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า TSS และ TA น้อย นอกจากนี้สัประรดเป็นผลไม้ที่สะสมกรดมากกว่าแป้ง จึงทำให้กระบวนการหายใจเป็นการสลายของกรดอินทรีย์มากกว่าแป้ง (Thompson, 1996; Paull and Nakasone, 1998)

Table 29 TSS and TA of pineapple fruit stored at 30 °C for 10 days and 25 days.

Storage time (days)	TSS (%)	TA (%)
Initial time	12.43a±1.08	0.45c±0.11
10	12.87a±1.02	0.74a±0.14
25	12.21a±0.76	0.59b±0.14
CV. (%)	7.74	23.05

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: Different letter within the same column denote significant difference at 95% confident interval test by Duncan method

ข้อมูลสเปกตรัม

สเปกตรัมดั้งเดิมของผลสับปะรดก่อนการเก็บรักษาและหลังเก็บรักษา พบพิกัดจุดที่ความยาวคลื่น 458 และ 978 นาโนเมตร (Figure 33) และเมื่อแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วย วิธี second derivative จึงพบพิกัดจุดที่ความยาวคลื่น 496 และ 966 นาโนเมตร (Figure 34) ซึ่งพิกัดที่ความยาวคลื่น 474 และ 506 นาโนเมตร เกิดจากการดูดกลืนแสงของแคโรทีนอยด์ที่พบในเปลือกมะม่วง และพิกัดที่ความยาวคลื่น 962 และ 980 นาโนเมตร เกิดจากการดูดกลืนแสงของโมเลกุลน้ำนั่นเอง

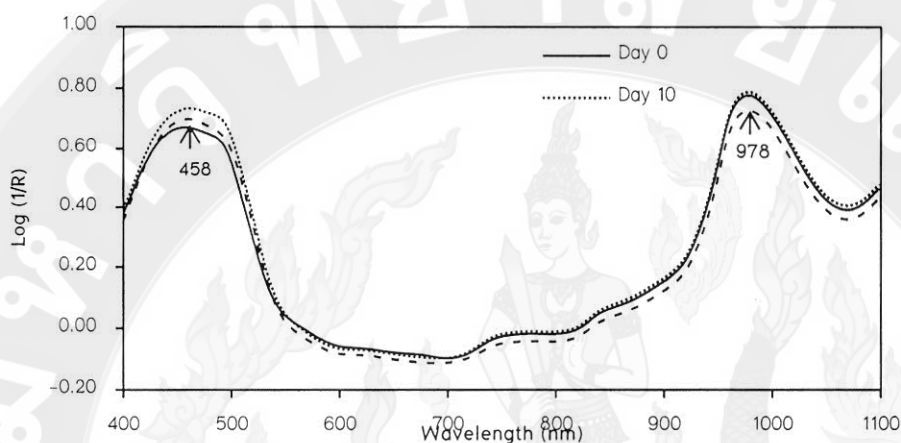


Figure 33 Means of original spectra of pineapple fruit stored at 30 °C for 10 days and 25 days.

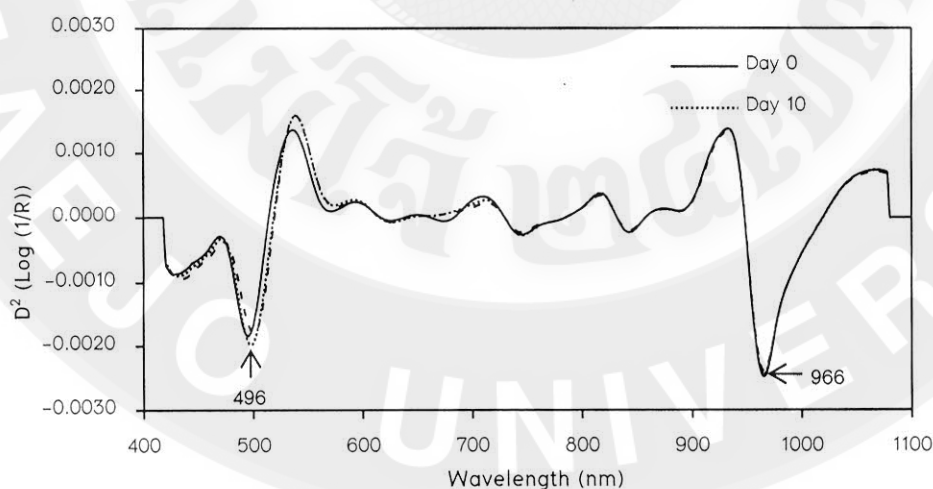


Figure 34 Means of second derivative treated spectra of pineapple fruit stored at 30 °C for 10 days and 25 days.

สมการเทียบมาตรฐาน

แปลงข้อมูลสเปกตรัมของผลสับปะรดที่ผ่านการเก็บรักษา ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ต่างๆแล้วนำมาหาความสัมพันธ์กับค่าวิเคราะห์ทางเคมี (TSS) ของผลสับปะรด พบว่าผลของสมการเทียบมาตรฐานมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง ทั้งนี้เป็นผลจากในระหว่างการเก็บรักษาค่า TSS ของผลสับปะรดไม่มีการเปลี่ยนแปลง (คงที่) จึงส่งผลให้การกระจายตัวของค่า TSS เกาะกลุ่มกันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ทำให้ค่า R^2 ที่คำนวณได้มีค่าต่ำ (<0.50) ค่า SEC, SEP และ bias ค่อนข้างสูง จึงไม่สามารถแสดงผลของสมการเทียบมาตรฐานได้ ไม่มีความสัมพันธ์กันในระหว่างการเก็บรักษา

3. มะม่วง

เก็บเกี่ยวผลมะม่วงที่ระยะผลแก่ นำมาแบ่งเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 คือ มะม่วงดิบ (Green mango) และชุดที่ 2 มะม่วงสุก (Ripe mango) คือ มะม่วงที่นำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 วัน นำมะม่วงทั้งสองชุดมาวัดสเปกตรัม แล้วจึงตรวจวัดสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมี เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีในระหว่างกระบวนการสุกของผลมะม่วง และการตรวจสอบคุณภาพด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ดังรายละเอียดผลต่อไปนี้

สมบัติทางกายภาพ

- ขนาด และน้ำหนักผล

ผลมะม่วงดิบและผลมะม่วงสุกมีขนาดและน้ำหนักผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลค่อนข้างสูง โดยเฉพาะน้ำหนักผล (Table 30)

Table 30 Dimension of green and ripe mango fruit harvested at maturity stage.

Types of fruit	Width (cm)	Length (cm)	Thickness (cm)	Weight (g)
Green mango	7.19±0.33	149.80±0.68	6.29±0.34	337.30±22.89
Ripe mango	7.04±0.21	147.65±0.85	6.39±0.23	327.26±24.05
t-test(0.05)	ns	ns	ns	ns

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

: ns mean the value was not significant difference at 95% confident interval by t-test ($P \geq 0.05$)

- ความแน่นเนื้อ

ผลมะม่วงดิบที่ระยะผลแก่ มีความแน่นเนื้อ เท่ากับ 71.05 N และมีค่าลดลงเมื่อผ่านกระบวนการสุก เท่ากับ 2.53 N และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 31) ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการสุกของผลมะม่วงซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผนังเซลล์ผลทำให้ความแน่นเนื้อลดลง (Litz, 2009)

Table 31 Firmness of green and ripe mango fruit at maturity stage

Types of fruit	Firmness (N)
Green mango	71.05±10.74
Ripe mango	2.53±0.61
t-test(0.05)	*

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

:* Mean the value was significant different at 95% confident interval by t-test ($P \leq 0.05$)

- สีเปลือกและเนื้อผลมะม่วง

ในระหว่างการสุกผลมะม่วงมีค่าสีของเปลือกและเนื้อเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าความสว่าง และสีที่แท้จริงลดลง ส่วนค่าสีแดง สีเหลือง และความเข้มสีมีค่าเพิ่มขึ้น และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 32) (Table 33) ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสีที่ปรากฏของสีเปลือกและเนื้อผล ซึ่งผลมะม่วงดิบเปลือกมีสีเหลือง และเมื่อผลสุกมีสีเหลืองเข้มขึ้น ขณะที่เนื้อมะม่วงดิบมีสีขาวเหลือง และเมื่อสุกมีสีเหลืองส้ม (Theanjumpol, 2013)

Table 32 Peel color of green and ripe mango fruit at maturity stage

Types of fruit	Color value				
	L*	a*	b*	C*	h°
Green mango	80.67±1.04	6.45±0.94	32.58±2.01	33.22±2.10	78.83±1.26
Ripe mango	69.82±1.71	10.11±0.89	38.49±3.85	39.80±3.91	75.24±0.87
t-test(0.05)	*	*	*	*	*

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

:* Mean the value was significant different at 95% confident interval by t-test ($P \leq 0.05$)

Table 33 Flesh color of green and ripe mango fruit at maturity stage

Types of fruit	Color value				
	L*	a*	b*	C*	h°
Green mango	82.59±0.70	0.36±0.57	22.030±2.93	22.04±2.93	89.18±1.35
Ripe mango	68.09±3.47	8.80±1.60	54.30±3.21	55.02±3.36	80.82±1.34
t-test(0.05)	*	*	*	*	*

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

:* Mean the value was significant different at 95% confident interval by t-test ($P \leq 0.05$)

สมบัติทางเคมี

- ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดที่ไทเตรตได้

ผลมะม่วงดิบเมื่อผ่านกระบวนการสุกมีค่า TSS เพิ่มขึ้น และค่า TA ลดลง และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Table 34) ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการสุกที่เกิดขึ้นในผลมะม่วงคาร์โบไฮเดรตและกรดที่สะสมในผลมะม่วงจะถูกสลายเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล (Litz, 2009)

Table 34 TSS and TA of green and ripe mango fruit at maturity stage

Harvesting time	TSS (%)	TA (%)
Green mango	14.00±1.51	2.00±0.29
Ripe mango	17.46±1.01	0.23±0.06
t-test(0.05)	*	*

: Table display the value of mean ± standard deviation (SD.)

:* Mean the value was significant different at 95% confident interval by t-test ($P \leq 0.05$)

ข้อมูลสเปกตรัม

สเปกตรัมดั้งเดิมของผลมะม่วงดิบและผลมะม่วงสุก มีลักษณะคล้ายคลึงกัน และพบพิกัดความยาวคลื่น 476 และ 978 นาโนเมตร (Figure 35) และเมื่อแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วย วิธี second derivative จึงพบพิกัดความยาวคลื่น 506 และ 962 นาโนเมตร (Figure 36) ซึ่งพิกัดความยาวคลื่น 476 และ 506 นาโนเมตร เกิดจากการดูดกลืนแสงของแคโรทีนอยด์ที่พบในเปลือกมะม่วง และพิกัดความยาวคลื่น 962 และ 980 นาโนเมตร เกิดจากการดูดกลืนแสงของโมเลกุลน้ำ

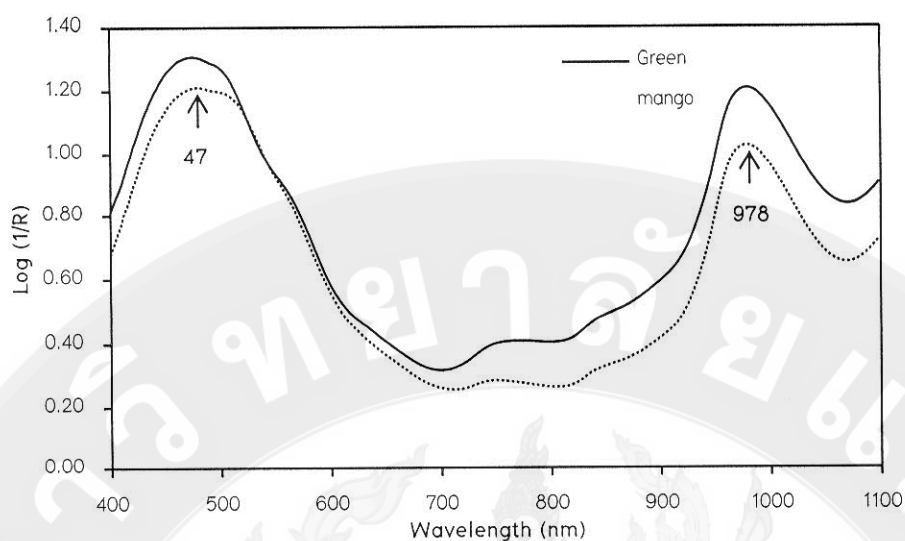


Figure 35 Means of original spectra of green and ripe mango fruit green and ripe mango fruit at maturity stage

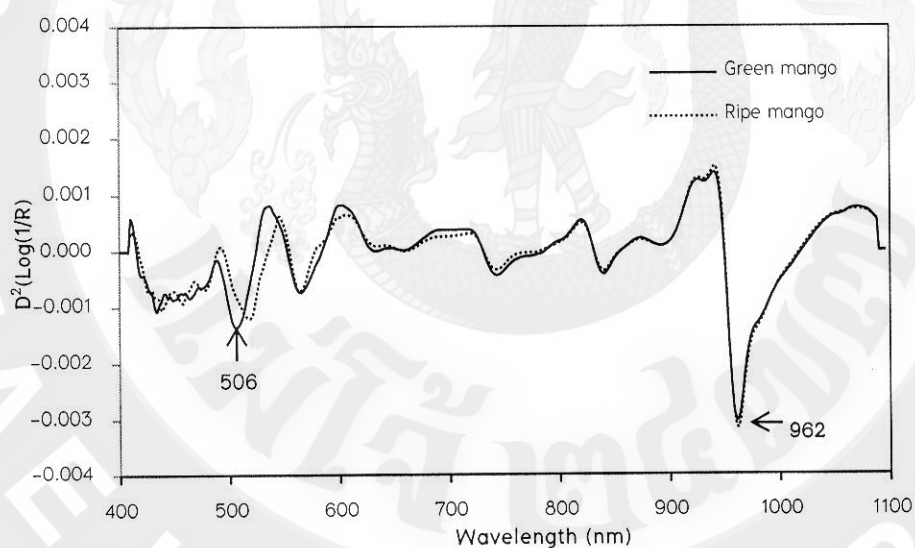


Figure 36 Means of second derivative treated spectra of green and ripe mango fruit green and ripe mango fruit at maturity stage

สมการเทียบมาตรฐาน

สมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ผลมะม่วงระหว่างการสุก ที่สร้างจากสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-1000 นาโนเมตร แปลงข้อมูลด้วย Savitzky-Golay smoothing (10 nm average for left and right sides) ร่วมกับ Savitzky-Golay second derivative (10 nm average for left and right sides) ให้ผลดีกว่าการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วย Savitzky-Golay smoothing หรือ Savitzky-Golay second derivative วิธีใดวิธีหนึ่ง ทั้งนี้ เพื่อลดความแปรปรวนที่เกิดจากสัญญาณรบกวน และการยกตัวของ baseline และการซ้อนทับกันของพีค โดย มีค่า R^2 , SEC, SEP และ bias เท่ากับ 0.92, 0.60%, 0.63% และ -0.24% (Table 35)

Table 35 Total soluble solids calibration results of green and ripe mango fruit at maturity stage

Pre-treatment	Wavelength region (nm)	Factor	R^2	SEC (%)	SEP (%)	Bias (%)
Original	850-1050	5	0.80	1.00	1.08	0.08
Smoothing (5,5)	850-1050	5	0.82	0.89	0.96	0.21
Second derivative (5,5)	850-1050	5	0.86	0.81	0.79	-0.02
Smoothing (5,5)+second derivative (5,5)	800-1000	6	0.92	0.60	0.63	-0.24

F: number of factors used in the calibration model; R^2 : coefficient of determination; SEC: standard error of calibration; SEP: standard error of prediction; Bias: average of difference between actual value and NIR predicted value

การทดลองที่ 3 การทดสอบความแม่นยำของการประเมินคุณภาพของผลไม้ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

นำตัวอย่างผลไม้ 3 ชนิด ได้แก่ มะละกอ, สับปะรด และมะม่วง มาทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ที่ดีที่สุดของผลไม้แต่ละชนิด เพื่อตรวจสอบคุณภาพในระยะความแก่ต่างๆ ของผล ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี โดยใช้เครื่อง NIRSystem 6500 เนื่องจากเครื่อง NIR spectrometer (Hamamatsu) ยังไม่สามารถใช้ตรวจสอบคุณภาพของผลไม้ได้ในขณะนี้ ซึ่งต้องมีการปรับแก้ไขในลำดับต่อไป ด้วยการซื้อตัวอย่างผลไม้ทั้ง 3 ชนิดจากตลาดค้าส่งในจังหวัดเชียงใหม่ แล้วนำมาวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIRSystem 6500 ในช่วงความยาวคลื่น 400-1100 นาโนเมตร เช่นเดียวกับขั้นตอนการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน แล้วจึงนำมาตรวจวัดค่า TSS จากนั้นเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์จริง และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเทียบมาตรฐาน ดังรายละเอียดผลการทดลองดังนี้

1. การทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ของผลมะละกอ

ผลมะละกอที่นำมาใช้ในการทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐาน มีค่า TSS ที่วัดได้จากเครื่อง digital refractometer เฉลี่ย เท่ากับ 9.12 % ค่า TSS ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเทียบมาตรฐาน เฉลี่ย เท่ากับ 9.32% โดยมีค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวิเคราะห์และค่าที่ได้จากการทำนาย (bias) เท่ากับ 0.20% (Table 36) ซึ่งเท่ากับความแปรปรวนเกิดจากการวัดด้วยเครื่อง digital refractometer ที่สามารถยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าสมการเทียบมาตรฐานนี้มีความแม่นยำสูง

Table 36 TSS prediction result of papaya fruit

Sample Number	TSS actual value (%)	TSS predicted value (%)	Deviation (%)
1	6.40	6.92	0.52
2	6.80	7.55	0.75
3	7.30	7.82	0.52
4	7.60	7.75	0.15
5	8.00	7.60	-0.40
6	8.30	8.39	0.09
7	8.70	8.81	0.11
8	8.90	8.89	-0.01
9	9.60	9.05	-0.56
10	8.80	8.45	-0.35
11	9.60	10.20	0.60
12	9.80	10.82	1.02

13	10.00	9.52	-0.48
14	10.20	10.90	0.70
15	10.40	10.40	0.00
16	10.70	10.45	-0.25
17	11.10	10.69	-0.41
18	8.70	12.41	3.71
19	12.30	12.81	0.51
20	12.50	12.46	-0.04
21	12.80	12.46	-0.34
22	13.00	12.51	-0.49
23	6.40	7.56	1.16
24	6.80	7.09	0.29
25	7.40	7.58	0.18
26	7.60	7.69	0.09
27	8.00	7.89	-0.11
28	8.30	7.91	-0.39
29	8.70	7.80	-0.90
30	8.90	9.19	0.29
Average	9.12	9.32	0.20

2. การทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ของผลสับปะรด

ผลสับปะรดที่นำมาใช้ในการทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐาน มีค่า TSS ที่วัดได้จากเครื่อง digital refractometer เฉลี่ย เท่ากับ 14.64 % ค่า TSS ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเทียบมาตรฐาน เฉลี่ย เท่ากับ 15.04% โดยมีค่า bias เท่ากับ 0.40% (Table 37) ซึ่งค่าที่ทำนายได้แตกต่างจากความแปรปรวน เกิดจากการวัดด้วยเครื่อง digital refractometer ที่สามารถยอมรับได้ 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทำนายของมะละกอ อาจเป็นเพราะ โครงสร้างทั้งเปลือกผลและเนื้อผลของสับปะรดมีความซับซ้อนกว่า จึงมีความแปรปรวนของข้อมูลสูงกว่า จึงส่งผลให้ค่า bias ที่ได้มีค่าสูงกว่า แต่หากพิจารณาช่วงของข้อมูล TSS ของผลสับปะรดแล้วจะพบว่า มีช่วงที่กว้างกว่าของมะละกอด้วย อย่างไรก็ตามผลของการทำนายยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

Table 37 TSS prediction result of pineapple fruit

Sample Number	TSS actual value (%)	TSS predicted value (%)	Deviation (%)
1	6.60	9.23	2.63
2	7.20	9.75	2.55
3	7.30	8.27	0.97
4	7.50	9.18	1.68
5	7.60	6.69	-0.91
6	7.90	9.29	1.39
7	8.10	7.64	-0.46
8	8.30	7.80	-0.50
9	8.90	8.05	-0.86
10	17.20	17.92	0.72
11	18.60	18.03	-0.57
12	18.80	19.11	0.31
13	19.30	17.43	-1.87
14	19.60	18.03	-1.57
15	19.80	21.43	1.63
16	20.20	16.68	-3.52
17	20.70	20.86	0.16
18	22.10	17.94	-4.16
19	19.30	20.80	1.50
20	19.70	21.99	2.29
21	20.00	20.88	0.88
22	20.30	21.68	1.38
23	20.70	22.60	1.90
24	21.10	22.14	1.04
25	21.50	18.52	-2.99
26	22.10	23.61	1.51
27	6.90	6.97	0.07
28	7.20	11.60	4.40
29	7.30	10.05	2.75

30	7.50	7.00	-0.50
Average	14.64	15.04	0.40

3. การทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐานค่า TSS ของผลมะม่วง

ผลมะม่วงที่นำมาใช้ในการทดสอบความแม่นยำของสมการเทียบมาตรฐาน มีค่า TSS ที่วัดได้จากเครื่อง digital refractometer เฉลี่ย เท่ากับ 14.91 % ค่า TSS ที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเทียบมาตรฐาน เฉลี่ย เท่ากับ 15.14% โดยมีค่า bias เท่ากับ 0.23% (Table 38) ซึ่งจะเห็นว่าสมการเทียบมาตรฐานของมะม่วง ให้ผลดีเช่นเดียวกับทั้งมะละกอ และสับปะรด

Table 38 TSS prediction result of mango fruit

Sample Number	TSS actual value (%)	TSS predicted value (%)	Deviation (%)
1	10.60	9.74	-0.86
2	12.55	12.74	0.19
3	12.80	12.81	0.01
4	13.15	14.11	0.96
5	13.40	12.31	-1.09
6	13.70	14.49	0.79
7	14.20	13.48	-0.72
8	14.70	12.85	-1.85
9	13.60	13.15	-0.45
10	14.40	14.93	0.53
11	15.40	16.68	1.28
12	12.30	21.91	9.61
13	14.70	16.56	1.86
14	15.35	14.35	-1.00
15	16.45	16.15	-0.31
16	16.90	16.72	-0.18
17	17.60	16.64	-0.96
18	18.25	18.38	0.13
19	13.70	12.82	-0.88
20	14.15	12.13	-2.02
21	13.70	14.86	1.16

22	14.60	15.36	0.76
23	15.75	15.66	-0.10
24	13.90	13.49	-0.41
25	15.00	15.99	0.99
26	15.90	15.03	-0.87
27	16.70	16.18	-0.52
28	17.15	18.85	1.70
29	18.05	17.71	-0.34
30	18.50	18.08	-0.42
Average	14.91	15.14	0.23

บทที่ 5

บทสรุป

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (TSS) สามารถใช้เป็นดัชนีเก็บเกี่ยวของผลมะละกอ และมะม่วงได้ดีกว่าสับปะรด
2. เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ด้วยเครื่อง NIRSystem 6500 สามารถใช้ประเมินคุณภาพ (ค่า TSS) ของผลไม้ทั้งสามชนิดได้ทั้งในระหว่างกระบวนการแก้ของผล และกระบวนการสุกของผล ส่วนการใช้เครื่อง NIR spectrometer (NIR แบบพกพา) ยังมีศักยภาพต่ำ เนื่องจากเป็นเครื่องที่มีความเฉพาะของการใช้งานกับตัวอย่าง ซึ่งคณะผู้วิจัยจำเป็นต้องปรับปรุงให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพดีในลำดับต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- จริงแท้ ศิริพานิช. 2550. ชีววิทยาหลังการเก็บเกี่ยวและการวางของพืช. โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ, นครปฐม. 453 หน้า.
- ธีรศักดิ์ โรจนธราและวนิดา คำพา. 2550. Derivative Spectroscopy เทคนิคที่ไม่ยุ่งยากสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ซับซ้อน. Lab Today. 31-35 หน้า.
- ประสิทธิ์ ชุตติชูเดช และเบญจวรรณ ชุตติชูเดช. 2541. การศึกษาดัชนีการเก็บเกี่ยวผลมะละกอ. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 26(2): 105-116.
- พิรพงษ์ แสงวนนาคกุล และ Robert E. Paull. 2551. การอินโดค่าน้ำตาลระหว่างการพัฒนาของผลมะละกอ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 39: 3 (พิเศษ): 172-175.
- พิรพงษ์ แสงวนนาคกุล, จตุรงค์ จันทร์สีทิศ, สมนึก ทองบ่อ และไพโร มัทธวรรณ์. 2552. การสำรวจพันธุ์ระบบการผลิตและการตลาดมะละกอในเขตจังหวัดสุพรรณบุรีและกาญจนบุรี. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ศูนย์เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม. 68 น.
- ภัณฑิรา นามไพโรจน์, อนุวัตร แจ่มชัด และกมลวรรณ แจ่มชัด. 2555. ดัชนีคุณภาพของมะละกอที่มีต่อความชอบรวมของผู้บริโภค, น. 515-522. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49 (สาขาอุตสาหกรรมเกษตร). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- คันสนีย์ นาเจริญ, ปาริชาติ เบิร์นส, อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล, ธนพล ไชยแสน, สิริกุล วะสี และจริงแท้ ศิริพานิช. 2556. การศึกษาเปรียบเทียบความแน่นเนื้อของเปลือกและเนื้อผลในมะละกอสายพันธุ์การค้าระหว่างการสุก. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 44: 3 (พิเศษ) 81-84.
- อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล. 2545. การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์. การอบรมเชิงปฏิบัติการควบคุมสินค้าด้วยเทคนิค Near infrared spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 27-28 พฤศจิกายน 2545. หน้า 67-79.
- Amar, S. 1980. Fruit : Physiology and Production. New Delhi : Kalyani Publishers, Inc. 513 pp.
- Anonymous. 1990. Standards for Hawaii-grown papaya. Hawaii Department of Agriculture, Marketing Division.
- Barnes, R. J., M. S. Dhanoa and S. J. Lister. 1993. Correction to the description of standard normal variate (SNV) and detrend (DT) transformations in Practical spectroscopy with applications in food and beverage analysis. *Journal Near Infrared Spectroscopy* 1:185-186.

- Berrardo, N., O.V. Brenna, A. Amato, P. Valoti, V. Pisacane and M. Motto. 2004. Carotenoids concentration among maize genotypes measured by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 5: 393-398.
- Birth, G.S., G.G. Dull, J.B. Magee, H.T. Chan, and C.G. Cavaletto, 1984. An optical method for estimating papaya maturity. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 109: 62-66.
- Blanco, M. and D. Valdés. 2004. Influence of temperature on the predictive ability of near infrared spectroscopy models. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 12: 121-126.
- Bokobza, L. 1998. Near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 6: 3-17.
- Clark, C. J., V. A. McGlone, C. Requejo, A. White and A. B. Woolf. 2003. Dry matter determination in 'Hass' avocado by NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology* 29: 300-307.
- Clark, C. J., V. A. McGlone, H.N. De Silva, M.A. Manning, J. Burdon and A.D. Mowat. 2004. Prediction of storage disorders of kiwifruit (*Actinidia chinensis*) based on visible-NIR spectral characteristics at harvest. *Postharvest Biology and Technology* 32: 147-158.
- Fu, X., Y. Ying, H. Lu and H. Xu. 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.
- Gitelson, A.A. 1992. The peak near 700 nm on reflectance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. *International Journal of Remote Sensing* 13: 3367-3373.
- Gomez, A. H., Y. He and A. G. Pereira. 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.
- Greensill, C.V. and D.S. Newman. 1999. An investigation into the determination of the maturity of pawpaws (*Carica papaya*) from NIR transmission spectra. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 7: 109-116.
- Gross, J. 1987. *Pigments in fruits*. London : Academic Press, Inc. 303pp.
- Hruschka, W. R. 2001. Data analysis: wavelength selection method, pp. 39-58. In: Williams, P. and K. Norris (eds.). *Near Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. American Association of Cereal Chemists, Inc., USA.

- Iwamoto, M., S. Kawano and Y. Ozaki. 1995. An overview of research and development of near infrared spectroscopy in Japan. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 3: 179-189.
- Jagtiani, J., Chan, H.T. and Sakai W.S. 1988. Tropical Fruit Processing. California: Academic Press, Inc. 184 pp.
- Kawano, S., H. Watanabe and M. Iwamoto. 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.
- Kawano, S. 1998. "New application of nondestructive methods for evaluation of fruits and vegetables in Japan." *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 67(6): 1176-1179.
- Kawano, S. 2002. Sampling and Sample Presentation. pp. 115-123. In: Siesler, H. W., Y. Ozaki, S. Kawata, and H. M. Heise (eds.), *Near-Infrared Spectroscopy: Principle, Instrument, Application*. WILEY-VCH Verlag GmbH. Germany.
- Litz, R.E. 2009. *The Mango: Botany, Production and Uses*. 2nd edit. CAB International 2009, USA. 680 pp.
- McGlone V. A., R. B. Jordan, R. Seelye and C. J. Clark. 2003. Dry - matter - a better predictor of the post - storage soluble solids in apples. *Postharvest Biology and Technology* 28: 431-435.
- Miyamoto, K. 1998. Classification of high acid fruits by partial least squares using the near infrared transmittance spectra of intact Satsuma mandarins. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 6: 267-271.
- Osborne, B. G., T. Fearn and P. H. Hindle. 1993. *Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage Analysis*. Longman Group UK Limited. 1986, UK. 227pp.
- Nakasone, H. Y. and R. E. Paull. 1998. *Tropical Fruit*. CABI International. UK. 445pp.
- Paull, R.E., K. Gross and Y. Qui. 1999. Changes in papaya cell walls during fruit ripening. *Postharvest Biology and Technology* 16:79-89.
- Paulesen, M. R., L. O. Pordesimo, M. Singh, S. W. Mbuvi and B. Ye. 2003. Maize starch yield calibrations with near infrared reflectance. *Journal Biosystems Engineering* 85: 455-460.
- Rees, D., G. Farrell and J. Orchard. 2012. *Crop Post-Harvest Science and Technology Perishable*. Wiley-Blackwell, UK. 451pp.
- Sanudo-Barajas. J.A., J. Labavitch, C. Greve, T. Osuna-Enciso, D. Muy-Rangel and J. Siller. Cepeda. 2009. Cell wall disassembly during papaya softening: Role of ethylene in changes in

- composition, pectin-derived oligomers (PDOs) production and wall hydrolases, *Postharvest Biology and Technology* 52:158-167.
- Saranwong, S., J. Sornsrivichai and S. Kawano. 2004. Prediction of ripe-stage eating quality of mango fruit from its harvest quality measured nondestructively by near infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology* 31: 137-145.
- Siesler, H.W., Y. Ozaki, S. Kawata and H.M. Heise. 2002. *Near-Infrared Spectroscopy: Principle, Instrument, Application*. WILEY-VCH Verlag GmbH. Germany. 348pp.
- Shetty, S.R. and Dubash, R.J. 1973. Relation of pectin content of papaya fruit to its firmness and maturity. *Indian Food Packer* 17(3):5-8.
- Shewfelt, R. L. 1993. Measuring quality and maturity. In *Postharvest Handling*. Eds. By Shewfelt, R.L. and S.E. Prussia. Academic Press, Inc. California. 358pp.
- Suwapanich, R. and P. Theanjumpol. 2008. Application of NIRS for assessment chilling injury in mango fruit. 13 st Asian NIR Symposium. November 10-14, 2008. Tsukuba, Japan.
- Theanjumpol, P. 2012. Quality Prediction of Thai Mango cv. Nam Dok Mai by Near Infrared Spectroscopy. Ph.D. Thesis. 198pp.
- Theanjumpol, P., R. Suwapanich and V. Sardsud. 2008. Responsibility of chilling injury in mango cv. Nam Dok Mai Si Thong on near infrared. The 6 th National Technical Seminar on Postharvest Technology. August 14-15, 2008. At Charoen Thani Princess Hotel, Khon Kaen, Thailand.
- Thompson, A.K. 1996. *Postharvest Technology of Fruit and Vegetable*. Blackwell Science, USA. 470pp.
- Tucker, G.A. 1993. Introduction. In *Biochemistry of fruit Ripening*. Eds. By Seymour, G.B., J.E. Taylor and G.A. Tucker. Chapman & Hall, Inc. London. 454pp.
- Williams, P. and K. Norris. 2001. *Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. 2nd ed. American Association of Cereal Chemists, Inc. USA. 296pp.
- Zude-Sasse, M. I. Truppel and B. Herold. 2002. An approach to non-destructive apple fruit chlorophyll determination. *Postharvest Biology and Technology* 25: 123-133.