



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประเมินความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการส่งออกและการประเมิน  
คุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการขายในห้างสรรพสินค้าโดยใช้  
เทคนิคเนียร์อินฟราเรดส เปกโทเรสโกปี  
Evaluation of maturity of durian (*Durio zibethinus* Murray CV. Mon Thong)  
for export and its eating quality for sale in department store by near  
infrared spectroscopy technique

นางสาวปานมนัส ศิริสมบูรณ์

นายพลนน อ่อนไสว

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประเมินความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการส่งออกและการประเมิน  
คุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการขายในห้างสรรพสินค้าโดยใช้  
เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

Evaluation of maturity of durian (*Durio zibethinus* Murray CV. Mon Thong)  
for export and its eating quality for sale in department store by near  
infrared spectroscopy technique

นางสาวปานมนัส ศิริสมบูรณ์

นายพลนน อ่อนใส

600270454  
RC00177

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## สารบัญ

หน้า

สารบัญ.....	iii
สารบัญตาราง.....	v
สารบัญภาพ.....	x
บทคัดย่อภาษาไทย.....	xiii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	xiv
กิตติกรรมประกาศ.....	xv
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
1.5 ทฤษฎี สมมติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 ทูเรียนพันธุ์หมอนทอง.....	9
2.2 คลื่นเนียร์อินฟราเรด (Near Infrared Radiation).....	11
2.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy).....	14
2.4 PLS Modelling.....	20
2.5 คุณสมบัติการรับประทานทุเรียน.....	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 การเตรียมผลทุเรียนสำหรับการทดลอง.....	31
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	31
3.3 วิธีกร.....	35
3.4 การตรวจวัดคุณภาพเนื้อทุเรียน.....	38
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	39
3.6 การทดสอบความแม่นยำของการวัดค่าทางเคมี.....	42

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	43
4.1 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	43
4.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมดิบ.....	45
4.3 ข้อมูลทางสถิติเพื่อสร้างแบบจำลอง.....	54
4.4 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ ผลการทำนายของแบบจำลอง PLS.....	55
4.5 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ ผลการทำนายของแบบจำลอง SIMCA และ PLS-DA.....	87
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	89
5.1 ความเป็นไปได้ในการใช้งานแบบจำลอง.....	89
5.2 สรุปผลการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการประเมินความสุกแก่ของ ทุเรียนพันธุ์หมอนทองกับตัวอย่างใหม่.....	91
เอกสารอ้างอิง.....	92

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเนื้อทุเรียน.....	3
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง.....	11
2.2 ตำแหน่งพีคในแถบสเปกตรัม NIR ที่เด่นชัดขององค์ประกอบต่างๆ ในผลผลิตทางการเกษตร.....	14
2.3 การแปลความหมายของค่า R และ R <sup>2</sup> .....	27
2.4 การอธิบายผลของค่า RPD และ RER.....	29
4.1 สถิติคุณภาพการรับประทานของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว สี ความหวาน ปริมาณความชื้นและปริมาณมวลแห้ง.....	43
4.2 สถิติคุณภาพการรับประทานของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว เนื้อสัมผัส.....	44
4.3 สถิติคุณภาพการรับประทานของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว สี ความหวาน และความชื้นสำหรับตัวอย่างที่เป็นตัวอย่างใหม่ (Unknown).....	44
4.4 สถิติคุณภาพการรับประทานของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว เนื้อสัมผัส สำหรับตัวอย่างที่เป็นตัวอย่างใหม่.....	45
4.5 ข้อมูลทางสถิติที่ใช้สร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม OPUS และโปรแกรม unscrambler X.....	54
4.6 ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งที่ละลายได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลอง ที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณพู สแกนด้วย FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	55
4.7 ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณก้น สแกนด้วย FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	56
4.8 ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียน สแกนด้วย FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	57
4.9 ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	58

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.10 ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือยกุเรียนที่บริเวณพู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	59
4.11 ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือยกุเรียนที่บริเวณกัน สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	60
4.12 ผลการทำนายค่า สี $L^*$ และ $a^*$ ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	60
4.13 ผลการทำนายค่า สี $b^*$ ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	61
4.14 ผลการทำนายค่า ปริมาณมวลแห้ง (DM) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	62
4.15 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	63
4.16 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (AF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	64
4.17 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (APF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	65
4.18 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (PE) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	66
4.19 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (RF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	67
4.20 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	68

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.21 ผลการทำนายค่า สี $L^*$ $a^*$ และ $b^*$ ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พื ที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	68
4.22 ผลการทำนายค่าปริมาณมวลแห้งด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พื ที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	69
4.23 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัม เนื้อทุเรียนที่พืที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	70
4.24 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (AF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พืที่ห่อ หุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	71
4.25 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (APF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พื ที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	72
4.26 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (PE) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พื ที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	73
4.27 การสร้างแบบจำลองการทำนายเนื้อทุเรียนบริเวณพืที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกกับค่า เนื้อสัมผัส (RF) ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer โดยวิธี Partial Least Square Regression.....	74
4.28 การสร้างแบบจำลองการทำนายเนื้อทุเรียนบริเวณพืที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกกับค่า เนื้อสัมผัส (T) ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer โดยวิธี Partial Least Square Regression.....	75
4.29 ผลการทำนายค่า สี $L^*$ $a^*$ และ $b^*$ ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณพื สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	76

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.30 ผลการทำนายค่า ปริมาณมวลแห้ง (DM) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณพู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	76
4.31 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และ ค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RF) และ (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณพู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	77
4.32 ผลการทำนายค่า สี ( $L^*$ ) ( $a^*$ ) และ ( $b^*$ ) ค่า ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และ ค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RF) และ (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณพู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	78
4.33 ผลการทำนายค่า สี ( $L^*$ ) และ ( $a^*$ ) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	79
4.34 ผลการทำนายค่า สี ( $b^*$ ) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	79
4.35 ผลการทำนายค่าปริมาณมวลแห้ง (DM) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	80
4.36 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	81
4.37 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RE) และ (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	82
4.38 ผลการทำนายค่า สี ( $L^*$ , $a^*$ และ $b^*$ ) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และเนื้อสัมผัส (AF, APF, PE, RF และ T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พูที่ ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	83
4.39 สรุปค่าการวิเคราะห์ปริมาณมวลแห้ง (DM) ของตัวอย่างใหม่โดยใช้แบบจำลองที่ดีที่สุด.....	84
4.40 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของ Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ที่สแกนบริเวณพูบนต้น ด้วยวิธี SIMCA.....	87
4.41 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของ Longwave linear variable filter spectrometer ที่สแกนบริเวณพูบนต้น ด้วยวิธี SIMCA.....	87

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.42 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของ Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ที่สแกนบริเวณพบบนต้น ด้วยวิธี PLS-DA.....	88
4.43 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของ Longwave linear variable filter spectrometer ที่สแกนบริเวณพบบนต้น ด้วยวิธี PLS-DA.....	88



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลซูโครส.....	4
1.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำวิจัย.....	8
2.1 ช่วงสเปกตรัมของคลื่นแสงอินฟราเรด.....	12
2.2 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานการสั่น.....	13
2.3 การเปลี่ยนแปลงพันธะของโมเลกุลในรูปแบบต่างๆ.....	13
2.4 การออกแบบเครื่องมือแบบพื้นฐาน A = light source; B = wavelength selection system; C = detector; D = computer; S = sample.....	15
2.5 ความแตกต่างของ path length ระหว่างเครื่องมือแบบ transmittance และแบบ reflectance.....	16
2.6 แบบวิธีการวัดด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี a. การส่องผ่าน (transmittance) b. การส่องผ่านสะท้อน (transflectance) c. การสะท้อนแบบแพร่ (diffuse reflectance) d. อินเทอร์แอคแตนซ์ (interactance) e. การส่องผ่านตัวอย่างที่มีการกระเจิงแสง (transmittance through scattering medium) ( $I_0$ = incident light, $I_s$ = light comes from the sample).....	16
2.7 ไดอะแกรมการทำงานของฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	19
2.8 การทำแบบจำลองแคลิเบรชันด้วยวิธี MLR, PCR และ PLS.....	25
2.9 ชุดตัวอย่างในการ full cross validation.....	26
2.10 ชุดตัวอย่างในการ Prediction testing.....	26
3.1 เครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	32
3.2 เครื่อง Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer.....	32
3.3 เครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer.....	33
3.4 เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ Brix Refractometer .....	33
3.5 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส Texture Analyzer.....	33
3.6 เครื่องบด.....	34
3.7 เครื่องชั่งความละเอียด 0.001 g Shimadzu BX300 และเครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 g AR2140 Adventurer.....	34

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.8 เครื่อง Microcentrifuge.....	34
3.9 ตู้อบลมร้อน.....	35
3.10 การสแกนสเปกตรัมของเนื้อทุเรียนบนต้นด้วยเครื่อง Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer และ Longwave linear variable filter spectrometer.....	35
3.11 การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	37
3.12 การสแกนด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer.....	37
3.13 การสแกนด้วยเครื่อง Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer.....	38
4.1 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูที่ทำการวัดด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	45
4.2 สเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกที่ทำการวัดด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	46
4.3 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณพูที่ทำการวัด ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในสวนทุเรียน ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	47
4.4 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณก้นที่ทำการวัด ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในสวนทุเรียนที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	48
4.5 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณพู ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	48
4.6 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณก้น ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	49

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.7 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพู ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	49
4.8 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	50
4.9 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณพูที่ทำการวัด ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในสวนทุเรียนที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	51
4.10 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณก้นที่ทำการวัด ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในสวนทุเรียนที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	52
4.11 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณพูที่ทำการวัด ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	52
4.12 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณก้นที่ทำการวัด ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	53
4.13 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพู ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	53
4.14 สเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้อง ปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	54
4.15 การเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ในเนื้อทุเรียน ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จากเครื่อง FT-NIR Spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่.....	84
4.16 การเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ในของเนื้อทุเรียนที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธี เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่.....	84

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)// การประเมินความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการส่งออกและการประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการขายในห้างสรรพสินค้าโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

แหล่งเงิน// งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ.....2558. จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 297,900 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย.....1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 เดือนตุลาคม 2557 ถึงวันที่ 30 เดือนกันยายน 2558

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ นางสาวปานมนัส ศิริสมบุรณ์และผู้ร่วมโครงการวิจัย นายพลสน อ่อนใส  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีถูกใช้เป็นที่เทคนิคที่ไม่ทำลายในการประเมินคุณภาพการรับประทาน (เนื้อสัมผัส มวลแห้ง และความหวาน) ของทุเรียน ทุเรียน 25 ผล ถูกสแกนแบบสุ่มที่ต้นทุเรียนบริเวณพื้นที่ใหญ่ที่สุด ด้วยเครื่อง Short wavelength Diode Array Spectrometer (FQA-NIR GUN Fantec, Japan) and longwave linear variable filters near infrared spectrometer (MicroNIR, JDSU, Germany) ในทุกๆ 10 วัน นับจาก 80 วันจนถึง 127 วันหลังดอกบาน (80 days, 90 days, 100 days, 110 days, 120 days and 127 days) ตัวอย่างทั้ง 6 ช่วงระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวครอบคลุมความสุกแก่ทุเรียนตั้งแต่ทุเรียนอ่อนจนทุเรียนสุก ใช้ Ethephon ที่ช่วยผลทุเรียน เก็บรักษาไว้ 3 วันที่อุณหภูมิห้องและปล่อยให้สุก ทำการทดลองทั้งหมดที่อุณหภูมิห้อง  $26 \pm 2$  สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer, Longwave linear variable filter spectrometer (MICRONIR JDSU, USA) และ Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer ตามลำดับ หลังจากนั้นนำไปหา (เนื้อสัมผัส มวลแห้ง และความหวาน) ด้วยวิธีทางเคมี แบบจำลองที่ดีที่สุดคือปริมาณมวลแห้ง (DM) ที่เนื้อทุเรียน และเนื้อทุเรียนที่หุ้มพลาสติก ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ให้ค่า coefficient of determination ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.89, root mean square error of prediction (RMSEP) เท่ากับ 3.60% และ  $r^2$  เท่ากับ 0.83, RMSEP เท่ากับ 4.60% ตามลำดับ เมื่อทดสอบกับตัวอย่างใหม่ พบว่าปริมาณมวลแห้ง (DM) ส่งผลให้ค่า  $r^2$ , เท่ากับ 0.88 และ 0.85 ตามลำดับ

คำสำคัญ : ทุเรียนพันธุ์หมอนทอง ความสุกแก่ การส่งออก คุณภาพการรับประทาน เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

Research Title: Evaluation of maturity of durian (*Durio zibethinus* Murray CV. Mon Thong) for export and its eating quality for sale in department store by near infrared spectroscopy technique

Researcher: Panmanas Sirisomboon and Phalanon Onsawai

Faculty: Engineering Department: Agricultural Engineering

## ABSTRACT

Near infrared spectroscopy was used as a non-invasive technique for the evaluation of eating quality (Texture, Dry matter and Soluble solids) of durian. A set of 25 fruits was randomly scanned on tree at the cheek of the biggest locule of each fruit for spectral data using visible and NIR short wavelength diode array spectrometer (FQA-NIR GUN Fantec, Japan) and longwave linear variable filters near infrared spectrometer (MicroNIR, JDSU, USA), every 10 days starting from 80 days until 127 days after fruit onset development covering six levels of maturity (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days). After applying ethephon on the fruit stems, the fruits were kept for 3 days at room temperature and allowed to ripen. The laboratory experiment was performed at room temperature ( $26 \pm 2$  °C). Fourier transform near infrared (FT-NIR), FQA-NIR GUN and MicroNIR spectrometers were used to scan the spectrum at the cheek of the biggest locule of fruit, the bottom of fruit, the durian pulp and the plastic wrap-covered pulp. Then, the texture, dry matter and soluble solids values were immediately determined by their standard methods. The optimum models were obtained from dry matter determination scanning at the durian pulp and the plastic wrap-covered pulp by FT-NIR spectrometer. It showed the coefficient of determination ( $r^2$ ) and root mean square error of prediction ( $RMSEP$ ) of 0.89 and 3.60%, 0.83 and 4.60%, respectively. In addition, the models were used to predict 120 unknown durian samples showing the  $r^2$  of 0.88 and 0.85 for the durian pulp and the plastic wrap-covered pulp, respectively.

Keywords : Durian (Cv. Mon Thong), maturity, export, eating quality, near infrared spectroscopy

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่ง  
ทุน งบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ซึ่งคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง .

นางสาวปานมนัส ศิริสมบูรณ์  
นายพลน น่อไสว



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทุเรียนเป็นสินค้าเกษตรที่ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกที่สำคัญของโลก เนื้อที่ให้ผลทุเรียนในปี พ.ศ. 2558 ของประเทศเป็น 573,293 ไร่ ผลผลิตทุเรียนเท่ากับ 603,332 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558 คิดเป็นมูลค่าในการส่งออกในปี 2558 เท่ากับ 15,563.23 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558 ตลาดส่งออกที่สำคัญของทุเรียนไทย 5 ลำดับ ได้แก่ ประเทศจีน ฮองกง อินโดนีเซีย ใต้หวัน และญี่ปุ่นในปี 2555 (กระทรวงพาณิชย์ 2556) ทุเรียนมีแนวโน้มที่จะส่งออกเพิ่มขึ้นสืบเนื่องจากข้อตกลงการค้าเสรี การกีดกันทางการค้าที่ไม่ใช่ภาษีของการนำเข้าทุเรียนในแต่ละประเทศแตกต่างกัน ดังนั้นคณะกรรมการสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติออกประกาศกำหนดมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ เรื่อง ทุเรียน ไว้ใช้เป็นมาตรฐานสมัครใจเพื่อให้ทุเรียนของไทยเป็นที่ยอมรับในระดับชาติและระดับสากล เพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภคและส่งเสริมการส่งออก ลักษณะภายนอกของผลทุเรียนที่แก่ได้ที่ ตามที่กำหนดในมาตรฐาน ได้แก่ ขั้วผลแข็ง สีเข้ม เมื่อสัมผัสขั้วจะรู้สึกสากมือ บริเวณรอยต่อระหว่างขั้วผลและก้านผล ซึ่งเรียกว่าปากปลิงบวมโต เมื่อจับขั้วผลแล้วแกว่งผลทุเรียนจะรู้สึกว่ามีขั้วผลแข็ง และมีสปริงมากขึ้น ร่องหนามห่าง เมื่อบีบปลายหนามเข้าหากันจะรู้สึกว่ามีสปริง ปลายหนามเริ่มแห้ง มีสีน้ำตาล สังเกตเห็นรอยเป็นแนวยาวบนสันพูได้ชัดเจน ยกเว้นพันธุ์ก้านยาว ลักษณะภายในชั้นต่ำของผลแก่ได้ที่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองได้แก่เนื้อสีขาวปนเหลืองอ่อน ผิวเมล็ดสีครีมเป็นน้ำตาล และมีน้ำหนักเนื้อแห้งชั้นต่ำร้อยละ 32 น้ำหนักเนื้อแห้งดังกล่าวเทียบเท่ากับทุเรียนที่มีจำนวนวันสุกหลังการเก็บเกี่ยวในสภาพธรรมชาติประมาณ 6-9 วัน (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2546) Siriphanich and Sangwanangkul (2000) เสนอว่าการตัดสินจากน้ำหนักเนื้อแห้งและปริมาณน้ำตาลในเนื้อทุเรียนที่ระดับความสุกแก่ในการค้าขาย 70, 80 และ 90 เปอร์เซ็นต์ จะเทียบเท่ากับทุเรียนที่มีอายุ 106, 113 และ 120 วันหลังดอกบาน ทุเรียนที่จะเก็บเกี่ยวได้ต้องมีอายุไม่น้อยกว่า 106 วันหลังดอกบาน และจะต้องมีน้ำหนักเนื้อแห้งอย่างน้อย 32 เปอร์เซ็นต์ คณะกรรมการมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ ได้ออกประกาศเรื่อง กำหนดมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ : ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยสินค้าเกษตรและอาหาร พ.ศ. 2548 (National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, 2005) กำหนดให้การหาค่าน้ำหนักเนื้อแห้งซึ่งเกี่ยวข้องกับความชื้นและสารที่ระเหยได้ให้ใช้มาตรฐาน AOAC 950.01 หรือเทียบเท่า วิธีการนี้ถึงแม้จะได้ค่าแน่นอน แต่เป็นวิธีการที่ต้องทำให้ตัวอย่างเสียหาย (destructive) และใช้เวลานาน โดยต้องใช้ตัวอย่างขนาด 2 กรัม อบจนแห้งในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ใช้เวลา 5 ชั่วโมง และต้องทำการวิเคราะห์โดยการสุ่มชั่งตัวอย่าง ไม่สามารถทำได้ทุกผลหรือทุกพูนอกจากนี้คุณภาพที่เกี่ยวกับการรับประทานของเนื้อทุเรียนได้แก่ เนื้อสัมผัส ความชื้น และความหวาน เป็นสมบัติ

ที่ผู้บริโภคคำนึงถึงถึงเป็นสิ่งที่ควรตรวจสอบโดยวิธีไม่ทำลายโดยให้ได้ค่าทั้งหมดในการวัดในคราวเดียว ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาวิธีวัดโดยไม่ทำลาย (nondestructive) และรวดเร็วทำได้ทุกผลหรือทุกพู โดยใช้วิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (near infrared spectroscopy; NIRS) เพื่อคัดแยกทุเรียนตามความสุกแก่โดยไม่ทำลายหรือทำให้เสียหาย ใช้เวลาในการวัดน้อย และสามารถตรวจวัดความสุกแก่ได้ทุกผลก่อนเก็บหรือก่อนส่งออก และตรวจคุณภาพเนื้อที่เกี่ยวกับการรับประทานได้ทุกพูโดยไม่ทำลาย สำหรับการขายในห้างสรรพสินค้าซึ่งจะเพิ่มการยอมรับในระดับชาติและระดับสากล เพิ่มความมั่นใจให้ผู้บริโภค ผู้ชาย และชาวสวน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการประเมินความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการส่งออกและการประเมินคุณภาพการรับประทาน (เนื้อสัมผัส ความชื้น และความหวาน) ของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการขายในห้างสรรพสินค้าซึ่งเป็นวิธีไม่ทำลายช่วยให้ประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์
- 1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองในการประเมินความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการส่งออกและการประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการขายในห้างสรรพสินค้าด้วยวิธีไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
- 1.2.3 เพื่อประยุกต์แบบจำลองที่ได้ใน 2 ใช้จริงในสวนทุเรียนเพื่อการส่งออกและห้างสรรพสินค้าเพื่อเพิ่มความมั่นใจให้ผู้บริโภค ผู้ชาย และชาวสวน
- 1.2.4 เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อการประเมินความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการส่งออกและการประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการขายในห้างสรรพสินค้า

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ใช้ทุเรียนพันธุ์หมอนทองจากสวนที่ผลิตเพื่อการส่งออกเท่านั้นและการวิจัยจะใช้เวลาช่วงคลื่นเนียร์อินฟราเรดระหว่าง 700 – 2500 nm

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองในการประเมินความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการส่งออกและการประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการขายในห้างสรรพสินค้าโดยตรงด้วยวิธีไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

2. สามารถประยุกต์แบบจำลองที่ได้ใน 1 ใช้จริงในสวนทุเรียนเพื่อการส่งออกและห้างสรรพสินค้าเพื่อเพิ่มความมั่นใจให้ผู้บริโภค ผู้ชาย และชาวสวน หรือหน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจคุณภาพของเนื้อทุเรียน เพื่อลดเวลา และแรงงานในการตรวจสอบซึ่งหมายถึงการลดต้นทุนในการผลิต
3. ได้องค์ความรู้ใหม่ในการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อการประเมินความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการส่งออกและการประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการขายในห้างสรรพสินค้า
4. สามารถเพิ่มศักยภาพของการปรับปรุงและประกันคุณภาพของการผลิตทุเรียนทั้งเพื่อการส่งออกและบริโภคภายในประเทศได้ ทำให้ผู้บริโภค ผู้ชาย และชาวสวนสามารถมั่นใจในคุณภาพของผลิตภัณฑ์
5. ผลงานสามารถจดสิทธิบัตร หรือเผยแพร่ในวารสารระดับชาติและระดับนานาชาติได้
6. นอกจากนี้นักศึกษาที่เข้าร่วมโครงการนี้ระดับปริญญาตรี โทและเอก จะได้รับความรู้และทักษะในการตรวจวัดความสุกแก่ของทุเรียนและการประเมินคุณภาพที่เกี่ยวกับการรับประทานของเนื้อทุเรียน และเทคนิคทางเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

#### 1.5 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

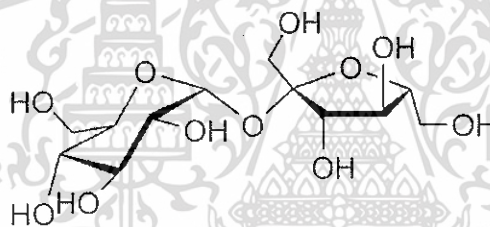
องค์ประกอบหลักทางเคมีของเนื้อทุเรียน แสดงดังตารางที่ 1.1 จะเห็นว่าเนื้อทุเรียนมีน้ำเป็นองค์ประกอบถึง 65% คาร์โบไฮเดรตในเนื้อทุเรียนมีถึง 27% ประกอบด้วยแป้งและน้ำตาลในเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีปริมาณแป้ง 9-10% ของน้ำหนักเนื้อ (จริงแท้ 2538) ปริมาณน้ำตาลของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่มีความสุกพอเหมาะในการรับประทาน 40 g จะมีปริมาณน้ำตาล ทั้งหมด 8.52 g แบ่งเป็น ฟรุ็กโตส 0.38 g กลูโคส 0.40 g และซูโครส 7.74 g (พิมพ์ร 2556) จะเห็นว่าซูโครสเป็นองค์ประกอบน้ำตาลหลัก

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเนื้อทุเรียน (วิกิพีเดีย 2556)

ทุเรียน ( <i>Durio zibethinus</i> ) องค์ประกอบหลักต่อ 100 g	
คาร์โบไฮเดรต	27.09 g
เส้นใย	3.8 g
ไขมัน	5.33 g
โปรตีน	1.47 g
น้ำ	65 g

การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงสเปกตรัมของตัวอย่าง ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง ในกรณีนี้คือ เนื้อทุเรียน กับองค์ประกอบทางเคมีที่สนใจ เช่นใน

กรณีงานวิจัยนี้คือ เนื้อสัมผัส ความชื้น น้ำหนักเนื้อแห้ง และความหวาน หรือความสุกแก่ ความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคนี้มาใช้คือ การที่องค์ประกอบทางเคมีมีการดูดซับคลื่นเนียร์อินฟราเรดที่ความยาวคลื่นเฉพาะ เช่น กรณีการวัดความชื้นหรือน้ำ น้ำมีการดูดซับคลื่นที่ความยาวคลื่น (Osborne and Fearn 1993) ที่ 760 nm ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ O-H str. third overtone ที่ 970 nm ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ O-H str. second overtone ที่ 1450 nm ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ O-H str. first overtone ที่ 1940 nm ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ O-H str. + O-H def. กรณีการวัดน้ำหนักเนื้อแห้งจะเห็นว่าน้ำหนักเนื้อแห้งมีค่าเท่ากับ 100-เปอร์เซ็นต์ความชื้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการประเมินค่าน้ำหนักเนื้อแห้งโดยใช้เทคนิคนี้เช่นกัน กรณีการวัดความหวานของเนื้อทุเรียน ซึ่งมีน้ำตาลซูโครสเป็นองค์ประกอบหลัก จะเห็นว่าจากโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลซูโครส (ภาพที่ 1.1) จะเห็นว่ามีพันธะ O-H ซึ่งจาก Osborne and Fearn (1993) รายงานว่า ที่ 1440 และ 2080 nm ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ O-H str. first overtone และ O-H str. + O-H def. ของซูโครส ตามลำดับ



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลซูโครส (วิกิพีเดีย 2556)

สำหรับสมบัติเนื้อสัมผัสของผลไม้ จริงแท้ (2538) กล่าวว่า การอ่อนนุ่มของผลไม้เกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวหรืออ่อนตัวของผนังเซลล์ประการหนึ่ง นอกจากนั้นยังเกิดจากการที่แป้งซึ่งสะสมไว้ในผลเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล และเกิดจากการสูญเสียน้ำออกไปจากผลผลิตผล ซึ่งองค์ประกอบสำคัญของผนังเซลล์คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพกทิน ซึ่งจาก Osborne and Fearn (1993) รายงานว่า ที่ 1490, 1780, 1820, 2336, 2352 nm ซึ่งเป็น Absorption band ของเซลลูโลส และที่ 1218, 1360, 1728, 2110, 2314, 2380 ซึ่งเป็น Absorption band ของเฮมิเซลลูโลส และ Absorption band ของแป้ง อยู่ที่ 990, 1440, 1450, 1528, 1540, 1580, 1900, 2000, 2100, 2276, 2461 nm Sirisomboon (2001) รายงานว่า Absorption band ของเพกทินอยู่ที่ 1928, 2104, 2366 nm

จากคำอธิบายข้างต้น จะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการประเมินค่าคุณภาพที่เกี่ยวข้องกับการรับประทานของเนื้อทุเรียนได้แก่ เนื้อสัมผัส ความชื้น น้ำหนักเนื้อแห้ง และความหวาน เนื่องจากการดูดซับคลื่นเนียร์อินฟราเรดขององค์ประกอบที่เกี่ยวข้องซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตาม

สรีระของเนื้อทุเรียน เช่น เปลี่ยนแปลงตามความสุกแก่ของเนื้อทุเรียน ส่วนการตรวจสอบความสุกแก่จะศึกษาจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดโดยการตรวจที่ผิวของผล (เปลือก) โดยตรงทั้งบนต้นและหลังจากเก็บเกี่ยวมาแล้ว จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีงานวิจัยที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกผลไม้จำนวนน้อยมาก ซึ่งสำหรับการเปลี่ยนแปลงของเปลือกทุเรียนไม่มีผู้ศึกษาเลย อย่างไรก็ตามเมื่อความสุกแก่เปลี่ยนแปลง มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเซลล์และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเซลล์ของเปลือกและเนื้อของพีช (Ognjanov et al., 1995) ปริมาณ chelating-soluble pectin และ acid soluble pectin ของเปลือกกล้วย (Bicu and Mustata, 2013) เมื่อเก็บผลส้ม navel ไว้บนต้นหลังการบริบูรณ์ insoluble dietary fibre และ water soluble pectin มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Dong et al., 2008) เปลือกของลองกองมีการลดลงของไตรโคม (Trichome) และมีการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อพาราเควลิม่า (Parenchyma cell) ในระหว่าง 13-16 สัปดาห์ของความสุกแก่ (Venkatachalam and Meenune, 2012) การเปลี่ยนแปลงของเปลือกผลไม้เช่นนี้นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดของผิวของผล (เปลือก) ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะจำแนกความสุกแก่ของผลไม้ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี นอกจากนี้ เนื่องจากความสุกแก่ของทุเรียนมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักเนื้อแห้งของเนื้อทุเรียน จึงจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดโดยการตรวจที่ผิวของผล (เปลือก) โดยตรงทั้งบนต้นและหลังจากเก็บเกี่ยวมาแล้วกับน้ำหนักเนื้อแห้งของเนื้อทุเรียนในงานนี้ ดังนั้น จากหลักการข้างต้น การนำเทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรด มาใช้ประเมินความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการส่งออกและการประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการขายในห้างสรรพสินค้าจึงมีความเป็นไปได้ อย่างไรก็ตาม การที่จะมองเห็นความเปลี่ยนแปลงในรูปแบบการดูดกลืนแสงโดยตรงนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของทุเรียนมีรูปแบบการดูดกลืนแสง (Absorption band) ขนาดใหญ่ครอบคลุมรูปแบบการดูดกลืนคลื่นของสารเคมีชนิดอื่นและการซ้อนทับของแถบการดูดกลืนของคลื่นขององค์ประกอบที่มีความซับซ้อน ดังนั้นจึงต้องนำการใช้หลักการทาง Chemometric เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลแบบตัวแปรพหุ (Multivariate analysis) มาช่วยในการจัดตัวแปรรบกวนออกไปแล้วสร้างแบบจำลองในการทำนาย (Calibration model) ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จึงเป็นการทำทนายที่จะได้องค์ความรู้ใหม่จากโครงการวิจัยที่ได้นำเสนอนี้พร้อมกับการสามารถประยุกต์ใช้ได้ในส่วนทุเรียนเพื่อการส่งออกและห้างสรรพสินค้า หรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย

ขั้นตอนของการปฏิบัติในงานวิจัยนี้แสดงโดยสรุปดังภาพที่ 1.2

1. ศึกษากระบวนการผลิตทุเรียนในสวนทุเรียนเพื่อการส่งออกและบริโภคภายในประเทศ ทั้งนี้เน้นกระบวนการการเก็บเกี่ยวและการบรรจุภัณฑ์ส่งออก

2. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการขายเนื้อทุเรียนให้ห้างสรรพสินค้าและตรวจวัดคุณภาพที่เกี่ยวข้องกับการรับประทานเนื้อทุเรียน
3. ผูกป้ายชื่อเมื่อดอกทุเรียนบานจำนวน 700 ดอกโดยสุ่มผูกตามต้นต่างๆทั่วบริเวณสวนทุเรียนเพื่อการส่งออก
4. ในระหว่างรอวันครบกำหนดเก็บเกี่ยวทุเรียน ฝักการสแกนผลทุเรียนและเนื้อทุเรียนพร้อมฝักวัดคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการรับประทาน (เนื้อสัมผัส ความชื้น น้ำหนักเนื้อแห้ง และความหวาน) โดยใช้ทุเรียนที่ซื้อจากท้องตลาด
5. สุ่มตัวอย่างผลทุเรียนที่สวนทุเรียนเพื่อการส่งออก ที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน 6 ระดับคือ 80, 90, 100, 110 (ช่วง100-110วันเป็นวันเก็บเกี่ยวเชิงการค้า), 120, และ127 วันหลังดอกบาน จำนวน 25 ผลต่ออายุการเก็บเกี่ยว โดยสแกนที่ต้นบริเวณตำแหน่งกลางพูที่ใหญ่ที่สุดของผลและก้นผล ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer (MICRONIR JDSU, USA) ช่วงความยาวคลื่น 1150-2150 nm และเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer (FOA-NIR GUN Fantec, Japan) ช่วงความยาวคลื่น 600-1100 nm
6. แล้วเก็บตัวอย่างทุเรียนที่สแกนนำมาป้ายยาเอธิฟอน (ethephon) โดยมีสัดส่วนน้ำต่อน้ำยา 2:1 ที่ปลายช้อน แล้วนำมายัดศูนย์วิจัยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปสำหรับผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 24 ชั่วโมง แล้วสแกนทุกวันเป็นเวลา 4 วัน (เป็นเวลาที่เขาสวนแจ้งว่าทุเรียนจะสุก) ที่บริเวณตำแหน่งกลางพูที่ใหญ่ที่สุดของผลและก้นผลด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer (MICRONIR JDSU, USA) ช่วงความยาวคลื่น 1150-2150 nm เครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer (FOA-NIR GUN Fantec, Japan) ช่วงความยาวคลื่น 600-1100 nm และ เครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ช่วงจำนวนคลื่น 12500-3600  $\text{cm}^{-1}$  โดยก่อนสแกนนำทุเรียนมาไว้ที่อุณหภูมิปรับอากาศที่ 27 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อปรับอุณหภูมิผลทุเรียนให้คงที่
7. ในวันที่ 4 หลังจากสแกนแล้ว ปอกทุเรียนเพื่อนำเนื้อของพูใหญ่มาสแกนที่กลางพู ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer (MICRONIR JDSU, USA) ช่วงความยาวคลื่น 1150-2150 nm เครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer (FOA-NIR GUN Fantec, Japan) ช่วงความยาวคลื่น 600-1100 nm และ เครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ช่วงจำนวนคลื่น 12500-3600  $\text{cm}^{-1}$
8. แล้วนำเนื้อทุเรียนใส่ถาดโฟมแล้วหุ้มด้วยพลาสติกโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) ใส ความหนา 10 ไมโครเมตร แล้วสแกนด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer (MICRONIR JDSU, USA) ช่วงความยาวคลื่น 1150-2150 nm เครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array

spectrometer (FQA-NIR GUN Fantec, Japan) ช่วงความยาวคลื่น 600-1100 nm และ เครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ช่วงจำนวนคลื่น 12500-3600  $\text{cm}^{-1}$

9. แล้วนำเนื้อทุเรียนทั้งพูไปวัดเนื้อสัมผัสบริเวณที่ผ่านการสแกนด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (TA HD Plus, Texture Analyzer, Stable Micro System, London, UK) โดยใช้หัววัดแบบทรงกระบอกหัวตัดเรียบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm ด้วยความเร็วหัววัด 1 mm/s ความลึก 10 mm เพื่อวิเคราะห์ (Rupture force: N) (Average firmness: N/mm) (Toughness: Nmm) (Average penetrating force: N) (Penetrating energy: Nmm) ของเนื้อทุเรียน
10. นำเนื้อทุเรียนที่ผ่านการวัดเนื้อสัมผัสจำนวน 80 g มาปั่นด้วยเครื่องปั่นให้ละเอียดแล้วแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 วัดความชื้น น้ำหนักเนื้อแห้งโดยใช้เนื้อทุเรียนปริมาณ 5 g จำนวน 2 ซ้ำ โดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ส่วนที่ 2 วัดความหวาน โดยใช้เนื้อทุเรียน 1 ส่วน ต่อน้ำ 3 ส่วน โดยปริมาตร ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Microcentrifuge (Spectrafuge 7M, Labnet, USA) ที่ความเร็วรอบ 6000 rpm เป็นเวลา 10 min แล้ววัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Soluble solids content) ซึ่งเป็นเสมือนความหวานของเนื้อทุเรียนโดยรับส่วนบนที่เป็นของเหลวใสลงใน Digital Refractometer (Pal 1, ATAGO, Japan) ทั้งนี้ต้องคุณค่าที่ได้ด้วย 4
11. นำสเปกตรัมของผลทุเรียนที่วัดที่สวน ของผลทุเรียนที่วัดที่ห้องปฏิบัติการวันต่างๆ (4 วัน) และของเนื้อทุเรียนที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆมาสร้าง Classification model จำแนก ความสุกแก่โดยวิธีทาง Chemometric โดยวิธี PCA (Principle Component Analysis), SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogy) และ PLS-DA (Partial Least Square-Discriminant Analysis)
12. แล้วนำข้อมูลทั้งหมดมาสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพที่เกี่ยวข้องกับการรับประทาน (เนื้อสัมผัส ความชื้น น้ำหนักเนื้อแห้งและความหวาน) กับ สเปกตรัมของผลทุเรียนและเนื้อทุเรียน โดยวิธีทาง Chemometric แบบ Partial least square regression
13. ทดสอบแบบจำลองเพื่อใช้ประเมินความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การทำนายถูกโดยรวมและทดสอบแบบจำลองคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองของตัวอย่างที่เป็น Unknown โดยพิจารณาจาก Coefficient of determination ( $R^2$ ) Standard error of prediction (SEP) และ Bias
14. สรุปผล และ เขียนรายงาน
15. ประยุกต์ใช้วิธีการในสวนทุเรียนเพื่อการส่งออกและห้างสรรพสินค้าหรือหน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตทุเรียนหมอนทอง หลังจากเสร็จสิ้นโครงการเนื่องจากต้องรอเวลาทุเรียนออกผลอีกครั้งหนึ่ง



ภาพที่ 1.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำวิจัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทูเรียนพันธุ์หมอนทอง

เป็นทุเรียนพันธุ์ที่นิยมปลูกกันมาก เพราะตลาดต้องการและการขายได้ราคาดี เป็นพันธุ์ที่อยู่ในตระกูลกลาง ลำต้นมีลักษณะลุ่มๆตอนๆไม่ค่อยกลม กิ่งตั้งฉากกับลำต้นแต่เนื่องจากกิ่งอ่อนจึงทำให้ลูกลงขนาดของโคนกิ่งไม่ใหญ่จึงไม่แข็งแรง ขณะเดียวกันกิ่งมีแขนงยาวจึงทำให้กิ่งทอดลง แต่กิ่งที่แตกออกมาใหม่ๆ ปลายกิ่งจะชูขึ้นตามปกติ ลักษณะทรงพุ่มโปร่ง กิ่งแขนงห่าง ช่วงใบแต่ละใบก็ห่างกันด้วย ลักษณะใบยาว ปลายใบเรียวเด่นชัดกว่าพันธุ์อื่นๆ ผลมีขนาดใหญ่ยาวประมาณ 30 เซนติเมตร เนื้อหนา สีเนื้อเหลืองอ่อน รสหวานมัน ร่องพุ่มมองเห็นไม่ชัด พบว่าพูใหญ่เพียงอันเดียวเรียกว่าพูเอก เมล็ดค่อนข้างเล็ก เนื้อไม่แฉะ เก็บไว้ได้นานไม่และไม่น่าเสีย แต่ผลผลิตต่อต้นไม่มากนัก (พิจิตร 2537)

##### 2.1.1 ดัชนีการเก็บเกี่ยว

เพื่อให้การเก็บเกี่ยวผลทุเรียนสัมฤทธิ์ผลตามวัตถุประสงค์ ดัชนีการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องทราบ ดังนั้นอายุของผลทุเรียนและลักษณะที่เหมาะสมที่จะเก็บเกี่ยวผลทุเรียนโดยมีจุดมุ่งหมายที่จะเก็บเกี่ยวในอายุที่เหมาะสมและมีความแก่ตามที่ตลาดต้องการทั้งภายในประเทศและต่างประเทศลำดับได้ดังนี้ (ทิฆัมพร 2530, ทรงพล 2531, นิรนาม และ รัชฎา, จรุงแท้ 2531)

- 1) การนับอายุ โดยเริ่มต้นนับตั้งแต่ดอกแรก หรือดอกทั้งต้นบานเป็นส่วนใหญ่จนกลีบดอกร่วงหมดหรือเรียกตามคนสวน คือ หางแย้ จนกระทั่งผลแก่และเริ่มเก็บเกี่ยวได้ ดังนั้นดัชนีการเก็บเกี่ยวโดยอาศัยการนับอายุจึงมีการแนะนำเป็นช่วงซึ่งมีค่าแตกต่างกันอยู่ระหว่าง 10-20 วัน (ทรงพล 2531, นิรนาม) ซึ่งทุเรียนหมอนทอง จังหวัด จันทบุรี อยู่ในช่วง 115-130 วันหลังดอกบาน การนับอายุนี้มีความผันแปรด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ แหล่งปลูก อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน ความแตกต่างของแต่ละช่อดอกและแต่ละผลในต้นเดียวกัน
- 2) สีผล (หนาม) ผลอ่อนหนามมีสีเขียวหรือน้ำตาลอ่อน เมื่อผลแก่ปลายหนามมีสีน้ำตาลเข้มติดกับสีโคนหนามและร่องหนามซึ่งเป็นสีอ่อนกว่า ทั้งนี้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ถ้าผลทุเรียนได้แสงแดดไม่เท่ากัน โดยเฉพาะผลที่ได้รับแสงแดดมากย่อมมีลักษณะผิวกร้าน ฯลฯ
- 3) ร่องหนาม ผลแก่นอกจากปลายหนามจะสีเข้มแล้ว ร่องหนามก็ขยายออกเล็กน้อย ทำให้ร่องหนามห่าง นอกจากนี้สีของร่องหนามก็จะเข้มมากขึ้นตามอายุด้วย
- 4) ก้านผล เมื่อผลแก่ ก้านผลทุเรียนขยายใหญ่ (ดูอ้วนขึ้น) ซึ่งแข็งแรง ในหมอนทองจะเห็นได้ชัดเจนสีของขั้วในส่วนที่กับก้านผลจะคล้ำกว่าส่วนที่ติดกับกิ่ง

- 5) ปากปลิง (รอยตรงปลายกิ่งที่ต่อกับปลายก้านผล) ผลทุเรียนแก่ ปากปลิงขยายโตขึ้น ทุเรียนพันธุ์หมอนทองเห็นเด่นชัดในผลที่สมบูรณ์
- 6) ความยืดหยุ่นของปลายหนาม ทุเรียนแก่ ปลายหนามมีความยืดหยุ่น มีแรงดัดกลับคล้ายสปริงเมื่อบีบปลายหนามเข้าหากัน ส่วนทุเรียนที่อ่อนปลายหนามจะแข็งไม่มีความยืดหยุ่น
- 7) ร่องพู รอยต่อระหว่างพูจะดูห่างมากขึ้นและมองเห็นเป็นเส้นตรงมาก
- 8) การเคาะผล ผลทุเรียนแก่จะให้เสียงโพก เสียงโปร่งมากกว่าผลอ่อน ทั้งนี้ในช่วงเข้าหรือมีความชื้นมากการเคาะผลก็ทำให้ข้อสรุปที่คลาดเคลื่อนได้
- 9) การดูน้ำที่ก้านผล ทุเรียนแก่จะมีน้ำใส ส่วนทุเรียนอ่อนน้ำจะขุ่นเหนียวมียางติดมือเมื่อสัมผัส

### 2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง (สุดารัตน์ 2536)

องค์ประกอบหลักของทุเรียนคือ น้ำ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้รวมกันมีมากถึง 84.7% ของน้ำหนักทุเรียน และองค์ประกอบที่เหลือคือ วิตามิน และเกลือแร่ แต่จะมีปริมาณที่น้อยมาก

- 1) น้ำ น้ำเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดของทุเรียน ซึ่งในทุเรียนหมอนทองมีน้ำเป็นองค์ประกอบถึง 49.3 %
- 2) คาร์โบไฮเดรต ทุเรียนประกอบไปด้วยคาร์โบไฮเดรตถึง 30 % ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแป้ง (ประมาณ 12%) (สุดารัตน์ 2536) ได้รายงานไว้ว่า พันธุ์ทุเรียนที่แตกต่างกันจะมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ต่างกัน เช่น ทุเรียนพันธุ์ชะนี มีคาร์โบไฮเดรต 22.3% ในขณะที่ทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีคาร์โบไฮเดรตมากถึง 29.6%
- 3) ไขมัน เป็นสารอาหารที่มีรองมาจากคาร์โบไฮเดรต ซึ่งในทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีปริมาณไขมันเพียง 3.3 % ซึ่งน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนพันธุ์อื่น เช่น พันธุ์กระดุม พันธุ์ชะนี พันธุ์ก้านยาว
- 4) โปรตีน โปรตีนเป็นส่วนประกอบที่มีปริมาณเล็กน้อยในทุเรียนและทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีโปรตีนเพียง 2.1% ซึ่งน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนพันธุ์อื่น ๆ

### 2.1.3 องค์ประกอบอื่น ๆ เช่นเกลือแร่ และวิตามิน

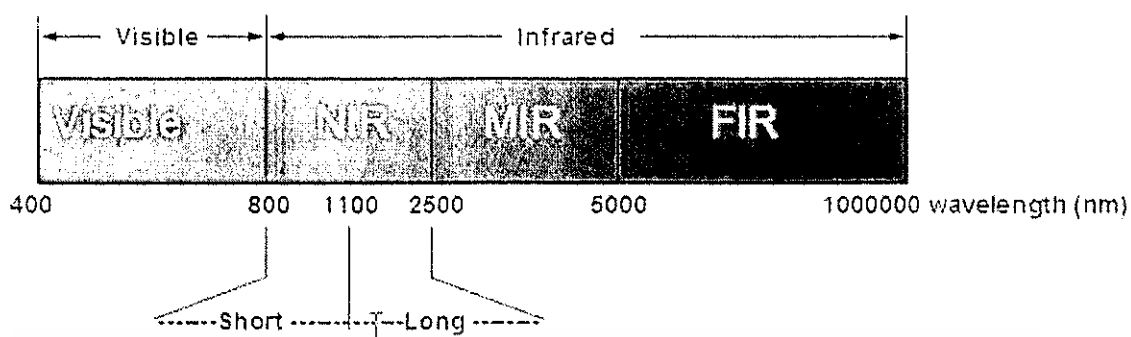
เนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีสีเหลืองเนื่องมาจากสารเบต้า-คาโรทีน เป็นองค์ประกอบ เนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีสีเหลืองอ่อน เนื่องมาจากมีเบต้า-คาโรทีนน้อยที่สุดคือ 46 มิลลิกรัมต่อเนื้อทุเรียน 100 กรัม องค์ประกอบของทุเรียนพันธุ์หมอนทองแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง (สุดารัตน์ 2536)

ส่วนประกอบของธาตุอาหาร/น้ำหนักผลไม้ 100 g (Nutrient Composition per 100 g. Edible Portion)	หน่วยวัด	ทุเรียนพันธุ์หมอนทอง
พลังงาน (energy)	กิโลแคลอรี	156
ความชื้น (moisture)	กรัม	62.5
โปรตีน (protein)	กรัม	2.1
ไขมัน (fat)	กรัม	3.3
คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate)	กรัม	29.6
เส้นใยอาหารหยาบ (crude Fibre)	กรัม	1.4
กากอาหาร (ash)	กรัม	0.9
แคลเซียม (calcium)	มิลลิกรัม	29
ฟอสฟอรัส (phosphorus)	มิลลิกรัม	34
เหล็ก (iron)	มิลลิกรัม	1.1
เบตา-คาโรทีน (B-carotene)	มิลลิกรัม	46
(Total A (RE))	มิลลิกรัม	8
ไทมีน (thiamin)	มิลลิกรัม	0.16
ไรโบฟลาวิน (riboflavin)	มิลลิกรัม	0.23
ไนอะซิน (niacin)	มิลลิกรัม	2.5
วิตามิน ซี (vitamin C)	มิลลิกรัม	35

## 2.2 คลื่นเนียร์อินฟราเรด (Near Infrared Radiation)

คลื่นแสงย่านเนียร์อินฟราเรด (near infrared; NIR) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ระหว่างช่วงคลื่นแสงย่านวิสิเบิล (visible) และช่วงคลื่นแสงอินฟราเรดย่านกลาง (middle infrared; MIR) ดังในภาพที่ 2.1



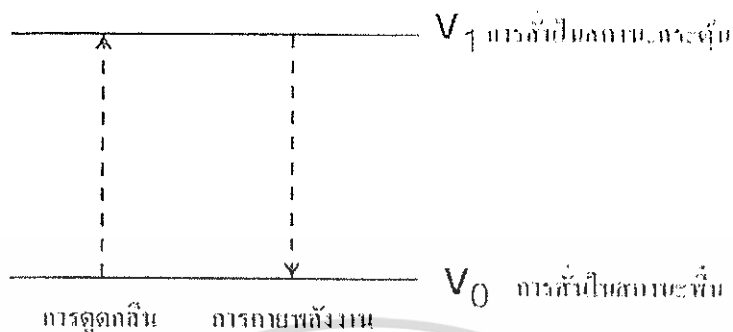
ภาพที่ 2.1 ช่วงสเปกตรัมของคลื่นแสงอินฟราเรด Osborne, Feam, Hindle (1993)

คลื่นแสง NIR มีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 800-2500 นาโนเมตร สามารถแบ่งช่วงความยาวคลื่นออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงคลื่นสั้นที่มีความยาวคลื่น 800-1100 นาโนเมตร และช่วงคลื่นยาวที่มีความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร Osborne, Feam, Hindle (1993) พลังงานของคลื่นแสง NIR จะอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับการสั่น (vibration) ของพันธะภายในโมเลกุล หากการสั่นของพันธะใดเกิดที่ความถี่ที่ตรงกับความถี่ของคลื่นแสง NIR ก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนขึ้น ซึ่งการดูดกลืนแสง NIR ใช้มากในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ และคุณภาพของสารประกอบอินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ

การสั่นของพันธะในลักษณะต่างๆ จะมีการดูดกลืนพลังงานที่เป็นเฉพาะของมัน เนื่องจากโมเลกุลหนึ่งๆ มีพันธะได้หลายแบบ ซึ่งแต่ละพันธะก็มีรูปแบบการสั่นได้อีกหลายรูปแบบ ทำให้โมเลกุลหนึ่งๆ จะแสดงการดูดกลืนแสง NIR ได้หลายช่วงคลื่นพร้อมกัน ลักษณะการดูดกลืนแสงจะเกิดเป็นแถบ (band) หรือ พีก (peak) แสดงถึงพลังงานคลื่นแสง NIR ที่ถูกดูดกลืน ซึ่งสามารถวัดได้ใน 2 รูปแบบ คือรูปแบบความเข้มแสงที่ส่องผ่าน (transmittance) และรูปแบบความเข้มแสงสะท้อนออกมา (reflectance) แล้วนำค่าความเข้มแสงที่วัดในแต่ละความยาวคลื่น มาเขียนกราฟโดยให้แกนนอนเป็นค่าความยาวคลื่น แกนตั้งเป็นค่าการดูดกลืนแสง จะได้กราฟการดูดกลืนแสงของตัวอย่างนั้นๆ กราฟที่ได้เรียกว่า เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม (NIR spectrum) โมเลกุลของสารแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างกัน เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจึงได้สเปกตรัมที่มีลักษณะต่างกัน Osborne, Feam, Hindle (1993)

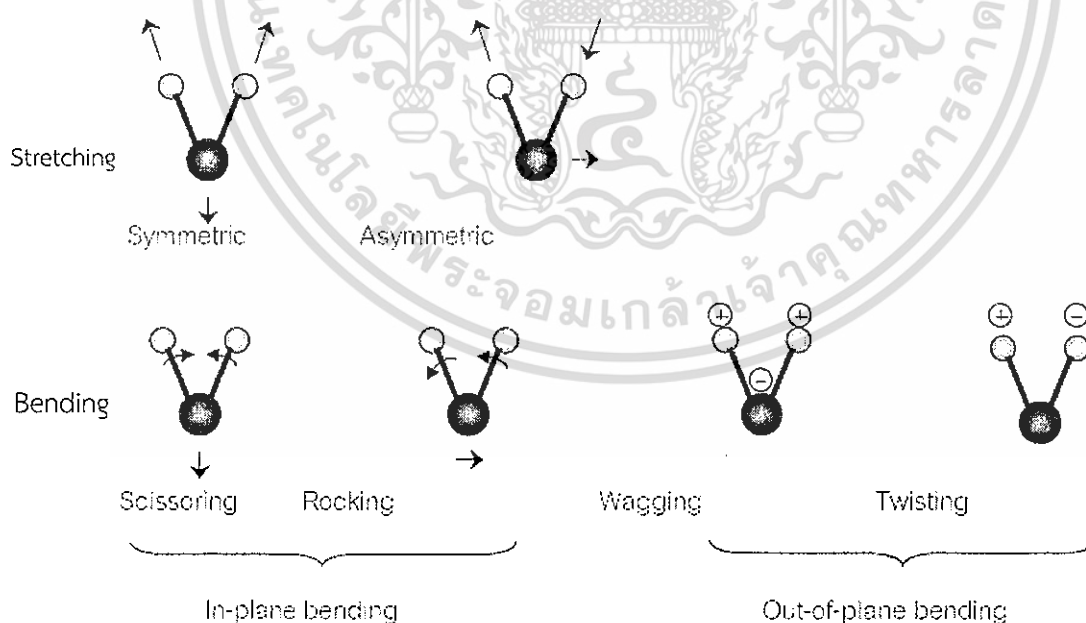
จากทฤษฎีของกลศาสตร์ควอนตัม อธิบายว่าโมเลกุลของสารประกอบขึ้นด้วยอะตอมที่เชื่อมต่อกันด้วยการสร้างพันธะเคมี (chemical bonding) พันธะในโมเลกุลจะเกิดการสั่น (vibration) อยู่ตลอด เรียกการสั่นชนิดนี้ว่า การสั่นในสถานะพื้น (vibration ground state) ด้วยความถี่ซึ่งมีค่าเฉพาะ (quantized frequency) ถ้าโมเลกุลเกิดอันตรกิริยากับรังสี NIR จะดูดกลืนรังสีที่มีความถี่ตรงกับความถี่ค่าเฉพาะ จนทำให้เกิดการสั่นในสถานะกระตุ้น (vibration excited state) ระดับโอเวอร์โทน โมเลกุลไม่สามารถอยู่ในสถานะ

กระตุ้นได้จึงต้องคายพลังงานออกมาในรูปความร้อนเพื่อให้กลับคืนสู่การสั่นในสถานะพื้นตามเดิม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าแทรนซิชัน (transition) ดังภาพที่ 2.2. (รศ.ดร.วิชัย และคณะ 2555)



ภาพที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานการสั่น (วิชัย และคณะ 2555)

การสั่นของโมเลกุลในกลุ่มฟังก์ชันต่างๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะหลักๆ ลักษณะที่หนึ่ง คือ การยืดหด (stretching) ของพันธะเป็นการสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวระหว่างอะตอมที่สร้างพันธะกันซึ่งมีสองรูปแบบย่อยคือ แบบสมมาตร (symmetric) และแบบอสมมาตร (asymmetric) และลักษณะที่สองคือ การงอ (bending) หรือการผิดรูป (deformation) เป็นการสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมพันธะ ที่มีรูปแบบปลีกย่อยอีกได้แก่ scissoring, rocking, wagging และ twisting ซึ่งทั้งหมดนี้อาจเกิดการเคลื่อนที่อยู่ในระนาบเดียวกัน (in-plane) หรือต่างระนาบกัน (out-of-plane) ก็ได้ ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงพันธะของโมเลกุลในรูปแบบต่างๆ (วิชัย และคณะ 2555)

ในสารประกอบอินทรีย์จะมีหมู่ฟังก์ชันในกลุ่ม X-H เป็นโมเลกุลหลัก และสามารถเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับคลื่นแสง NIR ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นและเปลี่ยนระดับพลังงานการสั่นจากสถานะพื้น (ground vibration) แล้วเปลี่ยนไปยังสถานะกระตุ้น (excited vibration) แบบข้ามขั้น จึงเกิดลักษณะของแถบคลื่นแสง NIR แบบโอเวอร์โทน (overtone band) และคอมบิเนชัน (combination band) ในช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร จะพบโอเวอร์โทนระดับที่หนึ่งและคอมบิเนชันโมเลกุลของสารที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วง NIR ได้ดี คือ โมเลกุลของสารที่มี H เป็นองค์ประกอบอยู่ในพันธะ ซึ่งพันธะ O-H จะพบในโครงสร้างของโมเลกุลน้ำ สำหรับพันธะ O-H และ C-H จะพบในโครงสร้างของโมเลกุลแป้ง และน้ำตาล ส่วนพันธะ N-H จะพบในโครงสร้างของโมเลกุลโปรตีน และพันธะ C-H จะพบในโครงสร้างของโมเลกุลไขมัน Osborne, Feam, Hindle (1993)

### 2.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy)

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ดีที่สุดสำหรับการตรวจสอบคุณภาพสินค้าเกษตรและอาหาร เทคนิคนี้จะแสดงถึงการดูดซับคลื่นในแถบเนียร์อินฟราเรดที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และน้ำ Williams, Norris (2001) มีงานวิจัยหลายฉบับที่รายงานเกี่ยวกับการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งเป็นเทคนิคที่รวดเร็วและเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติและโครงสร้างของอาหารในการวิจัยขั้นพื้นฐานและเพื่อตรวจสอบกระบวนการแบบออนไลน์ Ozaki *et al.* (2006) Nicolai *et al.* (2007) ตารางที่ 2.2 ตำแหน่งความยาวคลื่นแสงย่าน NIR ที่ถูกดูดกลืนอย่างเด่นชัดด้วยองค์ประกอบต่างๆ ในผลผลิตทางการเกษตร

ตารางที่ 2.2 ตำแหน่งพีคในแถบสเปกตรัม NIR ที่เด่นชัดขององค์ประกอบต่างๆ ในผลผลิตทางการเกษตร

องค์ประกอบ	ตำแหน่งความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
น้ำ (ความชื้น)	1940
คาร์โบไฮเดรต	2100
โปรตีน	2180
ไขมัน	2310

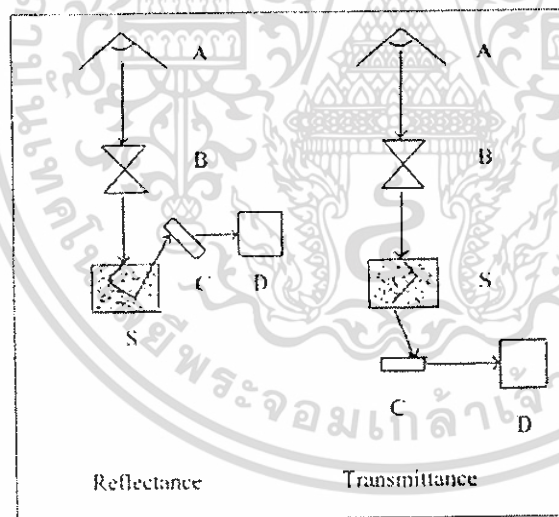
ที่มา: Shenk *et al.* (2001)

#### 2.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Instrumentation for Near Infrared Spectroscopy)

การทำงานของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี อาศัยการดูดซับพลังงานแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของตัวอย่างแต่ละชนิดซึ่งไม่เท่ากัน ดังนั้นเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจึงจำเป็นต้องมีความสามารถในการแยกลำแสงออกเป็นทีละความยาวคลื่นได้ เพื่อที่จะใช้แสงที่ความยาวคลื่นนั้นส่องไปยังตัวอย่างแล้ววัดความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมาเปรียบเทียบกับความเข้มของแสงที่ส่องเข้าไป (reflectance) หรือวัดความเข้มแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มของแสงที่ส่องเข้าไป (Transmittance) ทำแบบนี้ทีละความยาวคลื่น แล้วจึงนำความเข้มแสงนั้นมาเขียนกราฟการดูดกลืนแสงของตัวอย่างนั้นๆ และนำข้อมูลที่ได้ออกมาวิเคราะห์ต่อไป Williams (2007)

### 2.3.2 แบบของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Type of NIRS Instrument)

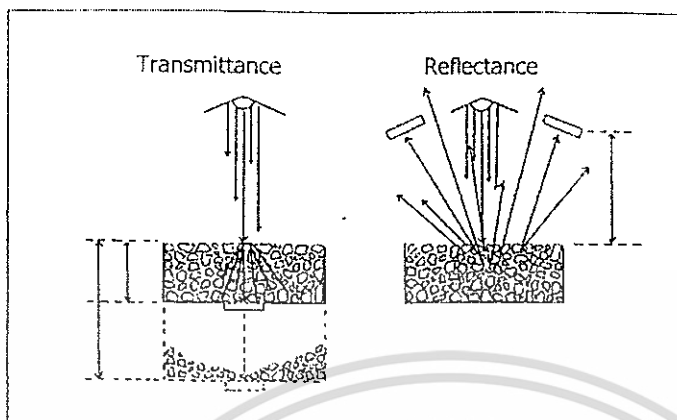
Williams (2007) อธิบายว่าเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี สามารถใช้ได้ทั้งแบบ reflectance และ transmittance เครื่องมือแบบ reflectance มักจะเรียกว่าเป็นเครื่อง NIR ส่วนเครื่องมือแบบ Transmittance จะอยู่ในส่วนของเครื่อง NIT เครื่องมือแบบ reflectance จะมีแหล่งกำเนิดแสงและ detector อยู่ภายในและอยู่ด้านเดียวกับตัวอย่าง สำหรับเครื่องมือแบบ transmittance แสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงจะผ่านหรือแพร่ (diffuse) แล้ว detector จะเป็นตัวรับแสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่าง ภาพที่ 2.4 แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างเครื่องมือแบบ reflectance และแบบ transmittance



ภาพที่ 2.4 การออกแบบเครื่องมือแบบพื้นฐาน A = light source; B = wavelength selection system; C = detector; D = computer; S = sample Williams (2007)

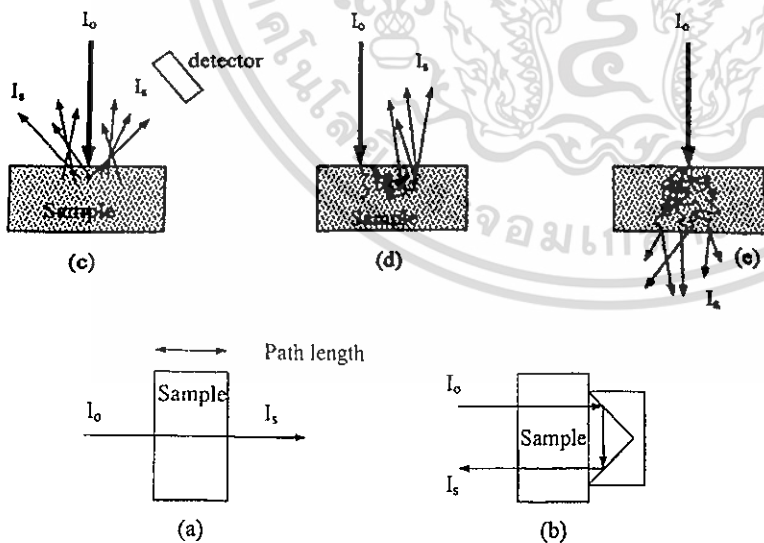
ภาพที่ 2.5 แสดงความแตกต่างของ path length ระหว่างเครื่องมือแบบ reflectance และแบบ transmittance ซึ่ง path length คือระยะทางระหว่างผิวหน้าของตัวอย่างกับ detector และเป็นค่าคงที่ที่สำคัญสำหรับเครื่องมือแบบ reflectance ส่วนเครื่องมือแบบ transmittance นั้น path length จะขึ้นอยู่กับ

ชนิดของวัสดุและการตั้งค่าที่เหมาะสมระหว่างการพัฒนาแบบจำลอง คาลิเบรชัน (calibration model) Williams (2007)



ภาพที่ 2.5 ความแตกต่างของ path length ระหว่างเครื่องมือแบบ transmittance และแบบ reflectance Williams (2007)

สำหรับการวัดด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเริ่มได้รับการยอมรับว่าเป็นเทคนิคที่มีความเฉพาะตัวเมื่อ Karl Norris ได้เสนอว่าการวัดสเปกตรัม NIR สามารถทำได้ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลของปริมาณแสงที่สะท้อนแบบแพร่ (diffuse reflectance) จากตัวอย่างของแข็งแทนที่จะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากแสงที่ส่องผ่านซึ่งสัญญาณจะอ่อน ซึ่งปัจจุบันวิธีการวัดสะท้อนแบบแพร่มักมีการใช้มากที่สุด ภาพที่ 2.6 แสดงแบบวิธีการวัดด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี



ภาพที่ 2.6 แบบวิธีการวัดด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี a. การส่องผ่าน (transmittance) b. การส่องผ่านสะท้อน (transflectance) c. การสะท้อนแบบแพร่ (diffuse reflectance) d. อินเทอร์แอคแตนซ์ (interactance) e. การส่องผ่านตัวอย่างที่มีการกระเจิงแสง (transmittance through

scattering medium) ( $I_0$  = incident light,  $I_s$  = light comes from the sample) Pasquini (2003)

### 2.3.3 พื้นฐานของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

รังสีอินฟราเรดย่านใกล้ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1800 โดย Sir Frederick William Herschel โดยศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของความร้อน (heating effect) ในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ของแถบสเปกตรัมที่เกิดจากการแยกแสงด้วยแท่งปริซึม พบว่าผลกระทบของความร้อนเกิดขึ้นสูงสุดในแถบแสงที่อยู่ถัดไปจากแสงสีแดง (red end) แต่ไม่สามารถมองเห็นสเปกตรัม (spectrum) ได้ เรียกช่วงรังสีที่เขาค้นพบว่า รังสีอินฟราเรด (infrared radiation) (ภาพร 2555) ซึ่งความหมายครอบคลุมช่วงความยาวคลื่น 780 – 2500 nm Nicolai *et al.* (2007) เป็นการเกิดอันตรกิริยาย่านโอเวอร์โทน (overtone) หรือคอมบิเนชัน (combination)

#### 2.3.3.1 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของตัวอย่าง

เมื่อรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ผ่านเข้าไปยังตัวอย่าง รังสีจะเกิดอันตรกิริยา (interaction) ด้วยความถี่ที่มีค่าเฉพาะ (specific frequency) ของพันธะในโมเลกุล รังสีบางส่วนจะเกิดการสะท้อน (reflection) บางส่วนจะเกิดการดูดซับ (absorption) เอาไว้ และบางส่วนจะผ่านออกมา (transmission) Nicolai *et al.* (2007) ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) ความเข้มแสงของหนึ่งความยาวคลื่นที่ส่องผ่านไปตัวอย่าง ( $I$ ) แล้ววัดความเข้มแสงที่ตกกระทบตัวอย่าง ( $I_0$ ) ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์กับความหนาของตัวอย่าง ( $b$ ) และความเข้มข้นของสาร ( $c$ ) Osborne, Fearn, Hindle, (1993)

$$\log(I_0/I) = abc \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\log(I_0/I)$  คือ ค่าดูดกลืนแสง ( $A$ )

**a** คือ ค่าโมลาร์แอบซอร์ปทิวิตี (molar absorptivity) ในหน่วย  $\text{dm}^3\text{cm}^{-1}\text{g}^{-1}$

**b** คือ ความหนาของตัวอย่างในหน่วย cm

**c** คือ ความเข้มข้นของสารในหน่วย หน่วย  $\text{g}^{-1}\text{dm}^3$  หรือ  $\text{mol L}^{-1}$  หรือ molar

#### 2.3.3.2 องค์ประกอบของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

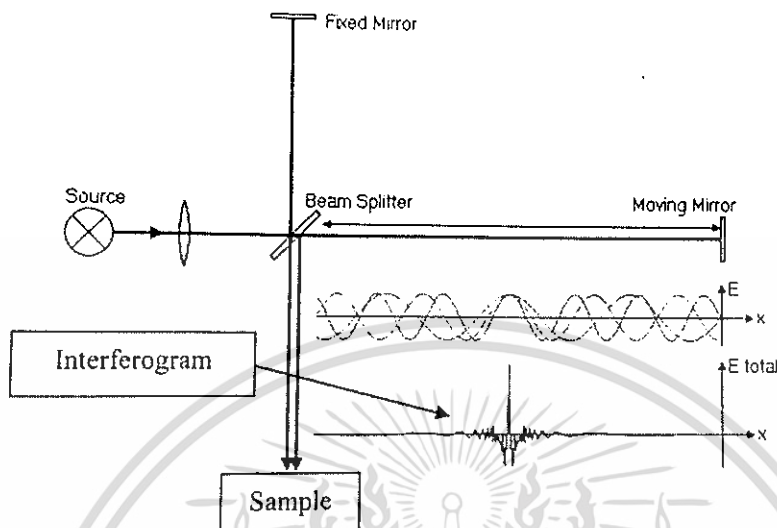
เครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง (light source) อุปกรณ์แยกลำแสงเป็นแต่ละความยาวคลื่นหรือโมนโครเมเตอร์ (monochromater) ช่องใส่ตัวอย่าง (sample cell) ตัวตรวจวัด (Detector) และ คอมพิวเตอร์

1. แหล่งกำเนิดแสง (light source) แหล่งกำเนิดแสงที่ให้ช่วงคลื่นเนียร์อินฟราเรด ส่วนใหญ่จะใช้หลอดทังสเตนฮาโลเจน (Tungsten halogen) เพราะราคาถูก อายุการใช้งานนาน ให้แสงคงที่สม่ำเสมอ (ปานมันส์ 2556) มีช่วงคลื่น Near Ultraviolet จนถึงอินฟราเรด จะให้ความยาวคลื่นครอบคลุมตั้งแต่ 300-2500 nm Wikipedia. "Halogen lamp." (2015) นอกจากนี้ยังใช้ Light Emitting Diodes (LED) เป็นแหล่งกำเนิดแสงโดยค่าความยาวคลื่นที่ได้จะขึ้นกับสารที่ใช้ทำตัว LED อย่างไรก็ตาม LED ไม่สามารถให้ความยาวคลื่นในช่วง 1,700-2,500 nm ได้ ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมนำไปใช้งาน แต่ก็เหมาะสำหรับเครื่องมือแบบพกพาเพราะต้องการกำลังไฟฟ้าน้อย มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและพลังงานของผลัฟท์ที่ได้ก็ไม่เพิ่มสูงขึ้นแม้จะมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของแหล่งกำเนิดแสง (นิพนธ์ 2545)

2. อุปกรณ์แยกลำแสงเป็นแต่ละความยาวคลื่นหรือโมโนโครเมเตอร์ (monochromater) เป็นส่วนที่ใช้แยกความยาวคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงซึ่งเป็นแสงที่มีหลายๆความยาวคลื่น (polychromatic wavelength) ให้เป็นแถบแสงในช่วงแคบๆ หรือเป็นความยาวคลื่นเดี่ยว (monochromatic wavelength) ปัจจุบันโมโนโครเมเตอร์จะใช้แบบเกรตติง (grating) สะท้อนแสงซึ่งมีลักษณะเป็นร่องเล็กๆ ขนานกันจำนวนมาก แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะตกกระทบลงบนผิวหน้าของร่อง แล้วสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เฉพาะความยาวคลื่นที่เราเลือกเท่านั้นจึงจะผ่านช่องแสงออก (exit slit) ไปสู่สารตัวอย่าง (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล สีและแสง การวัดการดูดกลืน)

3. อินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (interferometer) เป็นอุปกรณ์เลือกความยาวคลื่นแสงโดยมีหลักการคือ แสงแต่ละความยาวคลื่นจะถูกแยกเป็นสองลำแสงตั้งฉากกันด้วยอุปกรณ์แยกลำแสง (beam splitter) ลำแสงหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับด้วยกระจกที่อยู่กับที่ (fixed mirror) มาพบกับแสงอีกลำหนึ่งที่ถูกสะท้อนด้วยกระจกที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมา (moving mirror) ลำแสงทั้งสองจะมีทางเดินแสงทั้งที่เท่ากันและแตกต่างกันเป็นลำดับตามจังหวะการเคลื่อนที่ของกระจกที่เคลื่อนกลับไปกลับมาถ้าลำแสงทั้งสองสะท้อนและเดินทางมาพบกันโดยมีทางเดินแสงที่ทำให้เฟสเท่ากันจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (constructive interference) ทำให้ความเข้มแสงสูงที่สุด แต่ถ้าทางเดินแสงทั้งสองพบกันในจังหวะที่มีเฟสไม่เท่ากันแสงจะเกิดการแทรกสอดแบบทำลาย (destructive interference) ความเข้มแสงที่รวมกันจะน้อยกว่าลำแสงเดี่ยวเป็นลำดับ ดังนั้นการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาด้วยความเร็วคงที่ของกระจกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่วัดได้เป็นแบบคลื่นไซน์ที่มีความถี่ค่าหนึ่งโดยความถี่ของคลื่นไซน์จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงเนื่องจากระยะการเกิดแทรกสอดแบบทำลายและแบบเสริมจะแตกต่างกันตามความยาวคลื่นเมื่อนำระยะเคลื่อนที่ของกระจกมาพลอตในแกนแนวนอนและความเข้มแสงแต่ละความยาวคลื่นมาพลอตในแนวตั้งจะได้กราฟเหมือนกับคลื่นไซน์ (sine wave) และเมื่อนำค่าความเข้มแสงดังกล่าวของทุกความ

ยาวคลื่นมาพลอตรวมกันจะได้อินเทอร์เฟอโรแกรม (interferogram) ดังแสดงในภาพที่ 3.4 เมื่อนำไปผ่านกระบวนการฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มจะได้สเปกตรัม (อนุพันธ์ 2558)



ภาพที่ 2.7 ไตอะแกรมการทำงานของฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (อนุพันธ์ 2558)

4. ช่องใส่ตัวอย่าง (sample cell) จะต้องได้รับการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบของการวิเคราะห์และปริมาณของอนุภาคที่ใช้วิเคราะห์ เซลล์ (cell) สำหรับใส่ตัวอย่างจะต้องทำจากวัสดุที่ยอมให้แสงในช่วงเนียร์อินฟราเรดสามารถทะลุผ่านได้ เช่น ควอทซ์หรือแก้ว และมีระยะทางเดินของแสงที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่าง (นิพนธ์ 2545)

5. ตัวตรวจวัด (detector) การเลือกตัวตรวจวัดนั้นขึ้นอยู่กับช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการตรวจวัด เช่น ซิลิคอน (Si) เหมาะกับแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้และเนียร์อินฟราเรด ตั้งแต่ช่วง 400-1,100 nm ส่วน PbS (Lead sulphide) หรือ InGaAs (Indium Gallium Arsenide) ใช้ที่ช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 nm และ PbS คู่กับ Silicon photodiodes จะใช้ในช่วงเนียร์อินฟราเรด (400-2600 nm) (ปานมนัส 2556)

2.3.3.3 การทำงานของเครื่อง เมื่อวางวัตถุที่บรรจุอยู่ในภาชนะที่มีส่วนของควอทซ์หรือแก้ว แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะผ่านโมโนโครเมเตอร์ทำให้มีความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาแล้วส่องผ่านไปยังวัตถุ เมื่อแสงตกกระทบวัตถุ แสงจะมีการเคลื่อนผ่านวัตถุ และสามารถตรวจวัดแสงที่สะท้อนกลับออกมาได้ แต่ภาพจะแสดงค่าออกมาได้ทั้งค่าการดูดซับ (absorbance) หรือค่าการสะท้อนกลับ (reflectance) ซึ่งสเปกตรัมที่ได้จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับ (ค่าที่ได้จากการแปลงค่าแสงที่สะท้อนกลับ ( $\log 1/R$ )) และความยาวคลื่น

#### 2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม (Factors affecting NIR spectra)

1. ขนาดอนุภาคของตัวอย่าง (particle size) ตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน จะทำให้ได้เส้นสเปกตรัมที่แตกต่างกันด้วย โดยตัวอย่างขนาดเล็กสามารถสะท้อนแสงได้ดีกว่าตัวอย่างขนาดใหญ่ ฉะนั้นค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมตัวอย่างที่มีขนาดเล็กจึงมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ Osborne *et al.* (1993)

2. ความชื้น (moisture) ตัวอย่างที่มีความชื้นสูงจะมีค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมสูงกว่าตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำ จากการศึกษาของ Osborne *et al.* (1993) พบว่าสเปกตรัมของข้าวสาลีก่อนอบและหลังอบแห้ง จะเห็นพีคของน้ำหายไปและค่าการดูดกลืนแสงลดลงทั้งสเปกตรัม เนื่องจากตัวอย่างแห้งสะท้อนแสงได้มากกว่าตัวอย่างเปียก

3. อุณหภูมิของตัวอย่าง (sample temperature) ตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างเดียวกัน แต่อุณหภูมิในตัวอย่างแตกต่างกันก็อาจทำให้ได้เส้นสเปกตรัมที่ต่างกัน เมื่อวัดผลพีคที่อุณหภูมิ 3 ระดับ พบสเปกตรัมมีความแตกต่างในช่วงการดูดกลืนแสงของน้ำที่พีค 970 นาโนเมตร เนื่องจากอุณหภูมิของตัวอย่างจะมีผลโดยตรงต่อโมเลกุลของน้ำ ซึ่งความแตกต่างของสเปกตรัมนี้จึงไม่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน แต่สามารถส่งผลกระทบต่อความแม่นยำสมการได้มาก Kawano, Abe (1995)

4. การบรรจุ (packing) ตัวอย่างในเซลล์บรรจุที่มีการอัดตัวแน่นมาก ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างตัวอย่างน้อย มีการสะท้อนกลับของแสงมาก ค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมจะมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่มีการอัดตัวกันน้อย Williams, Norris (2001)

## 2.4 PLS Modelling

### 2.4.1 การแปลงหรือการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัม (spectrum pretreatment)

การแปลงข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ NIR เพื่อลดอิทธิพลของปัจจัยดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สเปกตรัมมีความแตกต่างกัน ส่งผลต่อสมการที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำในการทำนายลดลง ดังนั้นการแปลงข้อมูลสเปกตรัมโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ถือเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้ขั้นตอนการสร้างสมการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ในการแปลงข้อมูลสเปกตรัมได้แก่ (ปานมนัส และคณะ 2556)

1) วิธีอนุพันธ์ (derivative) เป็นการหาความชันของเส้นสเปกตรัม เพื่อแก้ปัญหาพีคที่มีฐานกว้าง (broad peak) เนื่องจากการซ้อนทับกันของพีค (overlapping) และอิทธิพลจากการยกตัวของเส้นสเปกตรัม (base line shift) ที่เกิดจากการกระเจิงแสง (scattering light) เมื่อแสงตกกระทบที่ตัวอย่างทำให้แสงเปลี่ยนทิศทาง ซึ่งมีผลต่อการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากขนาดของตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ การอัดตัว และการกระจายตัวของตัวอย่างภายในเซลล์บรรจุที่แตกต่างกัน รวมทั้งความชื้นภายในตัวอย่างที่แตกต่างกันด้วย Williams, Norris (2001) โดยการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 1 (first

derivative) สามารถลดปัญหาการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแกน Y ทำให้เส้นสเปกตรัมเลือนมาชิดกัน แต่พีคของสเปกตรัมยังมีฐานกว้าง จึงไม่สามารถแยกพีคออกจากกันอย่างชัดเจนได้ อีกทั้งวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 ให้ความหมายเป็นค่าความชันของสเปกตรัมแต่ละความยาวคลื่นซึ่งทำให้แปลความหมายได้ยาก แต่การแปลงข้อมูลด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 (second derivative) สามารถลดผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแกน Y ที่ชัดเจนกว่าวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 และแยกพีคสเปกตรัมที่มีการซ้อนทับกันออกจากกันได้อย่างชัดเจน ทำให้ทราบตำแหน่งความยาวคลื่น แต่สเปกตรัมมีลักษณะหัวกลับลงมาด้านล่าง Osborne, Feam, Hindle (1993) ดังนั้น การคำนวณการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 จึงเป็นที่นิยมมากกว่าวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 โดยการเพิ่มอันดับของอนุพันธ์สูงขึ้น ก็จะได้สเปกตรัมที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นข้อมูลที่ดีในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ แต่การทำอนุพันธ์ที่สูงเกินไปทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณวัดกับสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ลดลง เนื่องจากแถบสัญญาณรบกวนมักมีรูปร่างแคบชัน ดังนั้นเมื่อแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์สเปกตรัมที่ได้ของสัญญาณรบกวน จึงมีแอมพลิจูด (amplitude) เต็มชัดมากยิ่งขึ้นจนสามารถรบกวนการวิเคราะห์ได้

2) multiplicative scatter correction (MSC) เป็นการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสเปกตรัม เพื่อลดอิทธิพลของการกระเจิงของแสงที่เกิดจากสาเหตุที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการลดค่าผิดพลาด การใช้ NIRS แบบวัดการสะท้อนกลับของแสง เพื่อหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในเนื้อเยื่อพืชโดยแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี MSC พบว่ามีค่าผิดพลาดของสมการต่ำกว่าสมการของสเปกตรัมดั้งเดิม (original spectrum) (ปานมนัส และคณะ 2556)

3) smoothing เป็นวิธีการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมเพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก ทำให้เส้นสเปกตรัมราบเรียบต่อเนื่องขึ้น มี 2 วิธีนิยมใช้คือ

3.1 running mean smooth or N-point smooth) เป็นการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ มีข้อดีคือเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด โดยมีการแทนค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความยาวคลื่นด้วยค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีจุดศูนย์กลางของช่วงความยาวคลื่นตรงกับจุดที่ถูกแทนที่ ต่อจากนั้นเลื่อนช่วงไปหนึ่งความยาวคลื่น แล้วคำนวณซ้ำจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ซึ่งสามารถลดปัญหาของสัญญาณรบกวนต่อค่าการดูดกลืนแสง โดยจะได้สเปกตรัมที่มีลักษณะเหมือนสเปกตรัมดั้งเดิม แต่จะเรียบสม่ำเสมอมากกว่า

3.2 Savitzky-Golay smooth เป็นวิธีที่นิยมใช้มาก ใช้ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนมาก ต้องการทำให้สัญญาณเรียบและยังคงรูปร่างของสเปกตรัมเหมือนเดิม และรูปร่างของสเปกตรัมมียอดแหลมเป็นจำนวนมาก วิธีการนี้เริ่มจากการกำหนดช่วงความยาวคลื่น ( $n=2m+1$ ) เหมือนวิธี Running mean smooth จากนั้นนำข้อมูลสเปกตรัม

ในช่วงที่กำหนดมาหาสมการโพลีโนเมียลด้วยวิธี least square เพื่อให้ได้สมการที่ต่อเนื่อง และเป็นตัวแทนของข้อมูลในช่วงดังกล่าว เมื่อได้สมการแล้วนำมาคำนวณค่าสเปกตรัมที่จุดศูนย์กลางช่วง แล้วนำค่าที่คำนวณได้ไปแทนค่าสเปกตรัมเดิมที่จุดหรือความยาวคลื่นนั้น ค่าที่คำนวณได้จะใกล้เคียงกับค่าจริงมากขึ้น เนื่องจากสัญญาณรบกวนได้ถูกกำจัดออกไปแล้ว จากนั้นทำซ้ำโดยเลื่อนไปที่ช่วงความยาวคลื่นถัดไปจนตลอดทุกช่วงความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมข้อมูล (ปานมนัส และคณะ 2556)

4) standard normal variate (SNV) and detrending เป็นวิธีการกำจัดอิทธิพลของการกระเจิงแสงอีกวิธีหนึ่ง สำหรับการวัดด้วยวิธีการสะท้อนแบบแพร่ (diffuse reflectance) ซึ่งโดยทั่วไปจะทำให้เกิดสเปกตรัมที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของอนุภาคในตัวอย่าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดการกระเจิงแสงที่สูงและเป็นสาเหตุให้เกิดความแปรปรวนส่วนใหญ่ในข้อมูลที่วัดได้ การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (standard normal Variate; SNV) โดยวิธีนี้มักจะใช้คู่กับการปรับแนวโน้มของเส้นสเปกตรัม (detrending) โดยใช้การปรับแก้ด้วย SNV ก่อนแล้วจึงตามด้วย detrending หรือการลดความโน้มเอียงเส้นสเปกตรัม โดยผลจากการปรับแก้ด้วยวิธีนี้จะคล้ายคลึงกับการปรับแก้ด้วยวิธี MSC แต่จะแตกต่างกันตรงวิธี SNV ไม่จำเป็นต้องใช้สเปกตรัมอ้างอิงเหมือนวิธี MSC ที่ต้องใช้สเปกตรัมเฉลี่ยเป็นค่าอ้างอิง (วิชัย และคณะ 2555)

5) normalization เป็นวิธีการปรับแก้กลุ่มของสเปกตรัมเพื่อให้ได้สเปกตรัมมีจุดสำคัญที่เด่นชัด และเป็นการจัดความแปรปรวนอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งจะช่วยให้สามารถศึกษาทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้ดีขึ้น หรือเป็นการลดความซับซ้อนของข้อมูล ช่วยให้นำข้อมูลสเปกตรัมไปทำสมการทำนาย (calibration equation) ได้ง่ายขึ้น (ปานมนัส และคณะ 2556)

วิธีการแปลงข้อมูลสเปกตรัมที่ดีที่สุดก็คือ วิธีที่ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้สมการทำนายที่มีความสามารถในการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้ใกล้เคียงที่สุด อย่างไรก็ตามไม่มีกฎตายตัวแน่นอนสำหรับการตัดสินใจเลือกวิธีที่จะใช้ในการแปลงข้อมูล วิธีที่ดีที่สุดคือ การลองผิดลองถูกในการทดลองใช้แต่ละวิธีจนกว่าจะได้สมการทำนายที่แม่นยำสุด โดยต้องเข้าใจความหมายและคำนึงถึงข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีให้ชัดเจน (ปานมนัส และคณะ 2556)

#### 2.4.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis)

การวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยทั่วไป ต้องมีการสร้างสมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (calibration equation developed) ในการสร้างสมการจำเป็นต้องมีกลุ่มตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการทดลองเชิงเส้นระหว่างข้อมูลวิเคราะห์ทางเคมีกับข้อมูลสเปกตรัม กลุ่มตัวอย่างที่ดีจะต้องมีจำนวนตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์อย่างพอเพียงทั้งตัวอย่างในปัจจุบันและตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ในอนาคต โดยเฉพาะปริมาณองค์ประกอบทางเคมี จะต้องมีการครอบคลุมปริมาณทั้งต่ำสุดและสูงสุดของตัวอย่าง โดยมีการสุ่มตัวอย่าง (sampling) ที่ถูกต้อง เพียงพอและเป็นตัวแทนที่ดีของประชากร การสุ่มตัวอย่าง

ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการที่จะได้สมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ดี ทำให้ค่าผิดพลาดที่ได้จากการทดลองลดลง นอกจากนี้ควรพิจารณาวิธีวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งควรเป็นวิธีที่เป็นมาตรฐานและมีความแม่นยำเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องเนื่องจากส่งผลต่อสมการที่สร้างขึ้นต่อไป Kawano, Abe (1995) โดยความแม่นยำของ NIRS ขึ้นกับความแม่นยำของวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ สำหรับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์จะต้องทำการเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับตัวอย่างที่จะนำไปวัดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ NIR ในอนาคต (วิชัย และคณะ 2555)

### 1. ขั้นตอนการสร้างสมการ (calibration equation) แบ่งได้ 2 วิธีหลักคือ

1.1 wavelength selected method เป็นวิธีการที่ต้องเลือกข้อมูลแต่ละความยาวคลื่นหนึ่งๆ ที่มีความสัมพันธ์กับค่าวิเคราะห์ทางเคมีโดยการพิจารณาจากข้อมูลทางสถิติ ดังนี้

1.1.1 single linear regression (SLR) เป็นการสร้างสมการที่ประกอบด้วยตัวแปรสองชนิดที่มีความสัมพันธ์กัน คือ ตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) SLR เป็นการเลือกพิจารณาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างที่ความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียว (single wavelength) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย NIRS เป็นไปไม่ได้ที่จะใช้ความยาวคลื่นใดความยาวคลื่นหนึ่งในการหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้ เนื่องจากตัวอย่างประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิดด้วยกัน ดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งมีผลต่อสเปกตรัมและส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำของสมการ ดังนั้นจึงต้องใช้ข้อมูลจากหลายความยาวคลื่น (multiple wavelengths) เพื่อทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของผลผลิต

สมการ SLR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Y = b_0 + b_1x \quad (2.2)$$

เมื่อ Y = ค่าองค์ประกอบทางเคมี

X = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นตำแหน่งเดียว

$b_0$  = ค่าคงที่ ณ จุดตัดแกน Y เมื่อ X มีค่าเท่ากับศูนย์

$b_1$  = ค่าคงที่การถดถอย

1.1.2 multiple linear regression (MLR) เป็นการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่นำตัวแปรอิสระ (X) มากกว่าหนึ่งตัว มาใช้ในการประเมินค่าตัวแปรตาม (Y) ในการพิจารณาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างจากหลายความยาวคลื่นด้วยการใช้เทคนิค MLR ในการสร้างสมการ โดยใช้ตัวแปรอิสระที่ได้จากการเลือกความยาวคลื่นมากกว่าหนึ่งความยาวคลื่นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม การสร้างสมการด้วยวิธี MLR มีข้อเสียคือ ในการคัดเลือกตัวแปรอิสระหรือความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดมาสร้างสมการอาจได้ข้อมูลที่ไม่ครอบคลุมมากพอ ทำให้ค่าที่ทำนายได้จากวิธีนี้ มีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่แท้จริง Osborne, Fearn, Hindle (1993)

สมการ MLR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 \dots + b_nX_n \quad (2.3)$$

เมื่อ  $X_1, X_2, \dots, X_n$  = ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น n ตำแหน่ง

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ความยาวคลื่น  $n$  ตำแหน่ง

full spectrum method เป็นการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม จากความยาวคลื่นทั้งหมดในสเปกตรัม (full spectrum) มาสร้างสมการ โดยทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) และสร้างตัวแปรกลุ่มใหม่ขึ้นมา วิธีทางสถิติที่นิยมใช้ได้แก่ principle component regression (PCR) เป็นการวิเคราะห์ผล โดยทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) ด้วยการแบ่งกลุ่มตัวแปรอิสระเดิมที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรใหม่หรือองค์ประกอบที่เรียกว่าแฟกเตอร์ (factor score; F) หรือ principal component (PC) แล้วจึงนำค่าแฟกเตอร์ไปสร้างสมการเชิงถดถอย ก่อนการนำมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม (Y) ที่ได้จากวิธีวิเคราะห์มาตรฐาน เพื่อสร้างสมการทำนายค่าตัวแปรตาม (Y)

สมการ PCR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Y = b_0 + b_1PC_1 + b_2PC_2 \dots + b_nPC_n \quad (2.4)$$

เมื่อ  $PC_1, PC_2, \dots, PC_n$  = ค่าตัวแปรใหม่ที่ตำแหน่ง  $n$  ตัวแปร

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$  = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่วงน้ำหนักที่ตำแหน่ง  $n$  ตัวแปร

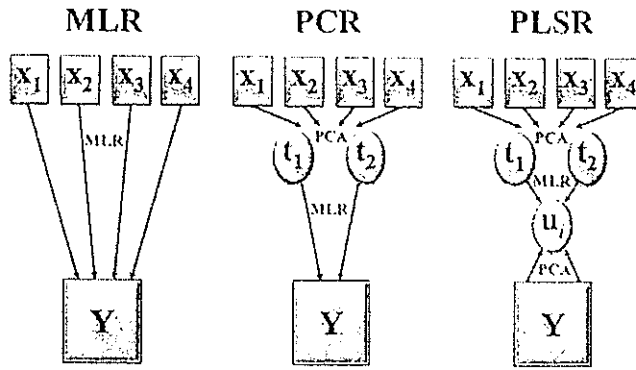
1.1.3 partial least square regression (PLSR) เป็นเทคนิคในการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) เช่นเดียวกับวิธี PCR แต่จะแตกต่างกันตรงที่ในช่วงจัดกลุ่มการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) โดยการสร้างแฟกเตอร์นั้นจะมีการนำข้อมูลตัวแปรตาม (Y) เข้ามารวมในการสร้างแฟกเตอร์ด้วย ซึ่งในการหาค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นมีน้ำหนัก (loading weight; W) แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ได้จากวิธีทางเคมีที่นำมาหาความสัมพันธ์กัน ทำให้สมการที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้

สมการ PLSR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Y = b_0 + b_1F_1 + b_2F_2 \dots + b_nF_n \quad (2.5)$$

เมื่อ  $F_1, F_2, \dots, F_n$  = ค่าตัวแปรใหม่ที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูล Y ที่ตำแหน่ง  $n$  ตัวแปร

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$  = ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่วงน้ำหนักที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูล Y ที่ตำแหน่ง  $n$  ตัวแปร

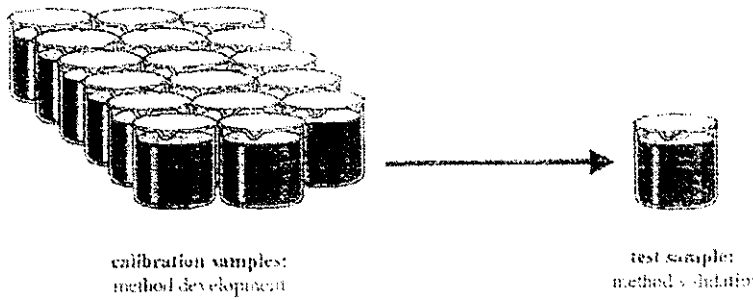


ภาพที่ 2.8 การทำแบบจำลองแคลิเบรชันด้วยวิธี MLR, PCR และ PLS Cho (2556)

Cho (2556) ได้อธิบายภาพที่ 2.8 ซึ่งแสดงการทำแบบจำลองแคลิเบรชันด้วยวิธี MLR, PCR และ PLS โดยเมื่อนำตัวอย่างมาสแกนได้สเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด ซึ่งจะได้ข้อมูลเชิงแสง เช่น ค่าการดูดซับคลื่นที่มีความยาวคลื่นใดๆ ได้แก่  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  หลังจากนั้นนำค่า  $X_n$  เหล่านั้น มาทำ PCA เพื่อลดจำนวนตัวแปรเดิมลงโดยการสร้างตัวแปรใหม่ คือ  $t_1$  และ  $t_2$  หลังจากนั้นจะนำ ตัวแปรใหม่ที่ได้มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง MLR กับตัวแปร  $U_j$  ซึ่งได้จากการทำ PCA ของตัวแปร  $Y$  (ค่าทางเคมี)

หลังจากที่ได้สร้างแบบจำลองที่ใช้ทำนายเรียบร้อยแล้ว จะต้องทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองนั้นก่อนนำไปใช้จริง ซึ่งวิธีการทดสอบที่นิยมมีด้วยกัน 2 วิธี คือ

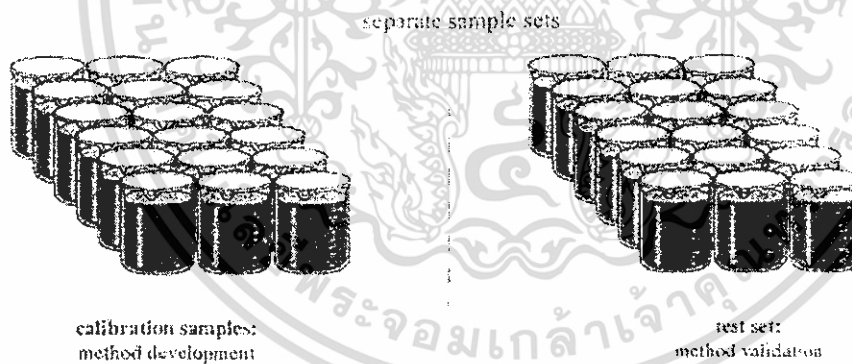
1) การพิสูจน์ภายใน (Internal validation) หรือการพิสูจน์แบบไขว้ (full cross validation) (ปานมนัส และคณะ 2556) การพิสูจน์ภายในนั้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบแบบจำลองก็คือตัวอย่างชุดมาตรฐานทั้งหมดที่ใช้สร้างแบบจำลองนั่นเอง โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ ตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐาน จากนั้นใช้ตัวอย่างมาตรฐานที่เหลือทำการสร้างแบบจำลอง นำแบบจำลองที่ได้ประเมินค่าทางเคมีของตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ที่ตัดออกไป (ภาพที่ 2.9) หลังจากนั้นใส่ตัวอย่างมาตรฐานที่ 1 กลับคืน ขั้นตอนต่อไปตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 2 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐาน ทำขั้นตอนข้างต้นซ้ำจนกระทั่งครบทุกตัวอย่าง จากนั้นหาค่า root mean square error of cross validation (RMSECV)



ภาพที่ 2.9 ชุดตัวอย่างในการ full cross validation Cozen (2006)

#### full cross validation

2) การทดสอบผลการประเมิน (prediction testing) วิธีนี้เป็นการพิสูจน์ภายนอก (external validation) โดยการนำตัวอย่างชุดใหม่มาทำการวิเคราะห์ในสภาวะการทดลองเช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐาน เรียกชุดตัวอย่างที่นำมาทดสอบแบบจำลองนี้ว่า ชุดทดสอบ (testing set) ดังภาพที่ 2.10 วิธีการเตรียมตัวอย่างทำเช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐานทุกขั้นตอน แต่ที่ต้องระวังก็คือปริมาณค่าทางเคมีที่จะหาในตัวอย่างชุดทดสอบต้องอยู่ในช่วงชุดมาตรฐาน หลังจากได้สเปกตรัมของชุดทดสอบแล้ว ให้นำข้อมูลที่ได้ออกค่าทางเคมีจากแบบจำลอง พิจารณาจากค่าทางสถิติที่ได้เพื่อประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งค่าทางสถิติที่ควรพิจารณา ได้แก่ ค่าความคลาดเคลื่อน (bias) และค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการทำนาย (Root mean square error of prediction; RMSEP)



ภาพที่ 2.10 ชุดตัวอย่างในการ Prediction testing Cozen (2006)

#### 2.4.3 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างแบบจำลอง

1. สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (coefficient of correlation, R) Williams (2007)  
สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R) แสดงระดับซึ่งข้อมูล 2 ชุด (ข้อมูลตัวเลข X และ Y ในที่นี้ข้อมูล X คือ ข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิง ข้อมูล Y คือข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีเนียร์อินฟราเรด-สเปกโทรสโกปี) สอดคล้องซึ่งกันและกัน ความสอดคล้องที่สมบูรณ์จะไม่มี ความแตกต่างกันเลยระหว่าง 2 ชุด

ข้อมูล ผลของค่า R จะเท่ากับ 1.00 ในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ และ X และ Y อาจจะมี ความสัมพันธ์เป็นเชิงบวกหรือลบก็ได้ โดยคำนวณได้จากสมการ

$$R = \frac{\sum(X \cdot Y) - [(\sum X \cdot \sum Y) / N]}{(\sum X^2 - [(\sum X)^2 / N]) \cdot (\sum Y^2 - [(\sum Y)^2 / N])}^{1/2} \quad (2.6)$$

เมื่อ X คือ ค่าที่ได้จากการทดสอบทางเคมี  
 Y คือ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIR  
 N คือ จำนวนตัวอย่าง

2. สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination,  $R^2$ ) Williams (2007) แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดยความแปรปรวนในข้อมูล Y ค่าของ  $R^2$  จะเป็นบวกเสมอ เช่น ถ้า  $R = 0.97$  แล้ว  $R^2 = 0.941$  หมายความว่า 94.1 เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนในข้อมูล X และ 5.9 เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนในข้อมูล X เกิดขึ้นจากตัวแปรอื่น เช่น การเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดลองอ้างอิงและอื่นๆ ค่า  $R^2$  เป็นบวกเสมอโดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของ R ในทางปฏิบัติ  $R^2$  ให้ข้อมูลและใช้กันมากกว่า R การแปลความหมายของค่า R และ  $R^2$  (ปานมนัส และคณะ 2556) แสดงดังตารางที่ 2.3 และคำนวณได้จากสมการ

$$R^2 = \left[ 1 - \frac{SSE}{\sum(X - \bar{X})^2} \right] \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\bar{X}$  คือ ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบทางเคมี  $SSE = \sum(X - Y)^2$  (2.7)

ตารางที่ 2.3 การแปลความหมายของค่า R และ  $R^2$  (ปานมนัส และคณะ 2556)

R	$R^2$	การแปลความหมาย
Up to +/-0.5	Up to 0.25	ไม่สามารถใช้ในNIR calibration
+/-0.51-0.70	0.26-0.49	เป็นความสัมพันธ์ที่แย่ ควรหาเหตุผล
+/-0.71-0.80	0.50-0.64	ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกอย่างหยาบๆ
+/-0.81-0.90	0.66-0.81	ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกและการประมาณค่าอย่างหยาบๆ
+/-0.91-0.95	0.83-0.90	ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย
+/-0.96-0.98	0.92-0.96	ใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
+/-0.99+	0.98+	ดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้

3. ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการทำนาย (root meansquared error of prediction: RMSEP) Williams (2007) RMSEP เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพของแบบจำลอง การคำนวณค่า RMSEP ได้รวมค่า Bias ไว้ด้วย ถ้าไม่มีค่า bias ค่า SEP และ RMSEP จะมีค่าเท่ากัน มีการใช้ RMSEP มากกว่า SEP แต่การรายงานผลโดยใช้ SEP กับ Bias แสดงถึงความแม่นยำของการทำนายได้ดี เนื่องจาก RMSEP เกี่ยวข้องกับ Bias แต่ไม่ได้แสดงขนาดและเครื่องหมาย โดยคำนวณได้จากสมการ

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum(X-Y)^2}{N-1}} \quad (2.8)$$

4. ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการประมาณ (Root mean square error of estimation; RMSEE) Cozen (2006) เป็นค่าที่ใช้วิเคราะห์ข้อผิดพลาดของชุดคาลิเบรชัน (Calibration) ไม่เหมาะในการใช้กับชุดทำนาย (Validation) สูตรการคำนวณ คือ

$$RMSEE = \sqrt{\frac{SSE}{N-R-1}} \quad (2.9)$$

เมื่อ R คือ จำนวนแฟคเตอร์

5. อัตราส่วนระหว่างค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ratio of standard error of prediction to the standard deviation; RPD) ค่า RPD คือ อัตราส่วนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของค่าทางเคมีกับค่าความผิดพลาดมาตรฐานการทำนายในชุดทดสอบ ( $SEP_{bias}$ ) Cozen (2006) และค่า  $SEP_{bias}$  ควรต่ำกว่า SD มากๆ ซึ่งอัตราส่วนควรเท่ากับ 5 หรือมากกว่า บางกรณีตัวอย่างมีความสม่ำเสมอมาก ค่า SD จึงไม่สูง จึงทำให้ค่า RPD อาจจะไม่สูงตามไปด้วย ดังนั้น RPD เท่ากับ 2.5-3.0 ก็อาจแสดงถึงการวิเคราะห์ที่แม่นยำ ถ้า SD มีค่าเพียง 0.4-0.5 Williams (2007) การอธิบายผลของค่า RPD แสดงดังตารางที่ 2.4

$$RPD = \frac{SD}{SEP_{bias}} \quad (2.10)$$

$$\text{ซึ่ง } SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum(X - \bar{X})^2} \quad (2.11)$$

$$\text{และ } SEP_{bias} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum(X - Y - bias)^2} \quad (2.12)$$

ตารางที่ 2.4 การอธิบายผลของค่า RPD และ RER Williams (2007)

RPD	RER	ความหมาย	การประยุกต์ใช้
0.0-2.3	ถึง 6	ไม่ดีเลย	ไม่แนะนำ
2.4-3.0	7-12	ไม่ดี	คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) แบบหยาบๆ
3.1-4.9	13-20	พอใช้	คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) ได้
5.0-6.4	21-30	ดี	ควบคุมคุณภาพได้
6.5-8.0	31-40	ดีมาก	ควบคุมกระบวนการได้
8.1+	41+	ดีเยี่ยม	ได้ทุกการประยุกต์ใช้

#### 6. ความผิดพลาด (bias) (ธงชัย และปิติพร 2555)

bias คือ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดด้วยวิธีอ้างอิงและค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เป็นการวัดความแม่นยำโดยรวมของแบบจำลอง

$$\text{bias} = \frac{\sum(X-Y)}{N} \quad (2.13)$$

### 2.5 คุณสมบัติการรับประทานทุเรียน

#### 2.5.1 เนื้อสัมผัส (texture)

เนื้อสัมผัสของผลผลิตแต่ละอย่างแตกต่างกันไป และภายหลังการเก็บเกี่ยวการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสก็แตกต่างกันด้วย บางอย่างเปลี่ยนจากกรอบเป็นเหนียว บางอย่างเปลี่ยนจากแน่นแข็งเป็นนิ่มและบางอย่างจากเนื้อแห้งเป็นฉะ ลักษณะที่ดีขึ้นอยู่กับผู้บริโภค การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสทำได้หลายวิธี เช่น 1. การวัดการเสียรูปทรง หรือ deformation test ซึ่งเป็นวิธีเลียนแบบการตรวจสอบความอ่อนนุ่มของผลไม้ของคนทั่วไป ซึ่งใช้มือบีบดูว่าผลไม้แข็งหรืออ่อนนุ่ม 2. เป็นการวัดลักษณะความแข็งหรืออ่อนนุ่มของเนื้อผลผลิตโดยตรงเช่นเดียวกับการกัดและเคี้ยวบดด้วยปากและฟัน วิธีนี้มักใช้เครื่องมือที่มีลักษณะต่างๆ กดลงบนผลผลิตจนทะลุเข้าไปในเนื้อแล้วอ่านค่าแรงที่ใช้จนทะลุ (จริงแท้ 2542)

เนื้อสัมผัส หมายถึง การตอบสนองวัสดุต่อเนื้อสัมผัส แสดงถึงการต้านทานแรงต่อวัสดุ เนื้อสัมผัสเป็นสมบัติเชิงกลที่เกิดจากการตอบสนองของผลผลิตทางการเกษตรและอาหารต่อแรงที่กระทำ เช่น แรงที่เกิดจากการซอันทับกันของผักผลไม้หรือ แรงกระทำจากการบดเคี้ยวอาหารและอื่นๆ ตัวอย่างเนื้อสัมผัสของผลผลิตทางการเกษตรได้แก่ ความแน่นเนื้อ (firmness) ความแข็ง (hardness) ความยืดหยุ่น (elasticity) แรงที่จุดคราก (bio-yield force) และเนื้อสัมผัสของอาหารได้แก่ ความแน่นเนื้อ (firmness) ความนุ่ม (tenderness) ความเหนียว (toughness) ความเกาะตัวเอง (cohesiveness) และ ความยึดติด (adhesiveness) (ปานมนัส 2555)

2.5.2 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ผลไม้หลายชนิดสะสมอาหารในรูปของน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่ เช่น องุ่นและลำไย ยิ่งมีอายุมากขึ้นยิ่งมีการสะสมน้ำตาลมากขึ้น น้ำตาลในผลจึงเป็นดัชนีความบริบูรณ์และดัชนีการเก็บเกี่ยวที่ดี แต่ในผลไม้ประเภท climacteric ซึ่งจะสะสมอาหารในรูปของแป้งแล้วจึงเปลี่ยนเป็นน้ำตาล ภายหลังการวัดปริมาณน้ำตาลประเภทนี้จึงอาจสายเกินไปสำหรับการเก็บเกี่ยวแต่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพ การวัดปริมาณน้ำตาลอาจทำได้ง่าย เช่น ในแปลงใช้ hand refractometer วัดหาปริมาณ soluble solids จากน้ำคั้น ซึ่งหมายถึงปริมาณสารประกอบต่างๆที่ละลายน้ำได้ หรือปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ รวมทั้งกรดอินทรีย์ต่างๆ แต่ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาล ดังนั้นผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว มีกรดสะสมอยู่มากการวัด soluble solids อาจให้ค่าที่ไม่ถูกต้องนัก (จริงแท้, 2542)

2.5.3 สี (color) การเปลี่ยนแปลงของผลไม้เป็นดัชนีความบริบูรณ์ตามธรรมชาติที่เห็นได้ชัดเจนที่สุด และใช้เป็นดัชนีการเก็บเกี่ยวอย่างแพร่หลาย แต่การเปลี่ยนสีของผลไม้จะขึ้นเมื่อผลไม้เข้าสู่กระบวนการสุก สีจึงเป็นดัชนีที่เหมาะสมกับผลไม้ ผลไม้หลายอย่างไม่สามารถเก็บเกี่ยวก่อนการเปลี่ยนสีได้เช่น มังคุด เงาะ และ สตรอเบอรี่ ในผลไม้บางชนิดการเปลี่ยนสีในระยะที่เหมาะสมกับการเก็บเกี่ยวอาจไม่ชัดเจน อาจทำให้การเก็บเกี่ยวผิดพลาดได้ง่าย ส่วนเนื้อของผลไม้แม้ว่าจะไม่มีคลอโรฟิลล์ แต่มักมีการสร้างสีขึ้นในระยะเก็บเกี่ยว เช่นเดียวกัน เห็นได้ชัดในมะม่วง และทุเรียนผลไม้บางอย่างเนื้อผลมีการเปลี่ยนแปลงสีก่อนที่สีผิวจะเปลี่ยนแปลงดังนั้นการเปลี่ยนสีของเนื้อเป็นดัชนีความบริบูรณ์ได้เช่นเดียวกัน (จริงแท้ 2542)

การวัดค่าสีในระบบ CIELAB โดยใช้เครื่องวัดสี hunter lab colorimeter รายงานผลเป็น L ซึ่งเป็นค่าแสดงความสว่าง (ถ้าค่า L มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าวัตถุมีสีทึบแต่ถ้าค่า L เข้าใกล้ 100 แสดงว่าวัตถุมีสีขาวสว่างมาก) ค่า a แสดงสีแดงและสีเขียว (ถ้า a เป็นบวกวัตถุจะมีสีออกสีแดง แต่ถ้า a เป็นลบ วัตถุจะมีสีออกสีเขียว) ค่า b แสดงสีเหลืองและสีน้ำเงิน (ถ้าค่า b เป็นบวกวัตถุจะมีสีเหลืองแต่ถ้าค่า b เป็นลบวัตถุจะมีสีออกสีน้ำเงิน)

2.5.4 มวลแห้ง (dry matter) ลักษณะภายในของทุเรียนพันธุ์หมอนทองได้แก่เนื้อสีขาวปนเหลืองอ่อน ผิวเมล็ดสีครีมเป็นน้ำตาล และมีน้ำหนักเนื้อแห้งชั้นต่ำร้อยละ 32 มวลแห้ง เป็นดัชนีมาตรฐานชี้วัดความสุกแก่ของทุเรียนเพื่อใช้ประโยชน์ทางการค้า การอบแห้ง (drying) คือ การเอาน้ำออกจากวัสดุที่ต้องการทำให้ปริมาณน้ำในวัสดุนั้นลดลง (ความชื้นลดลง) คำนวณหา %MC และ %DM ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14

$$MC (\%) = \frac{(w_1 - w_2) \times 100}{w_1} \quad (2.14)$$

$$DM (\%) = 100 - (MC) \quad (2.15)$$

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การเตรียมผลทุเรียนสำหรับการทดลอง

การเก็บตัวอย่างทุเรียนพันธุ์หมอนทองจาก อำเภอมะขาม จังหวัด จันทบุรี ทำโดยสุ่มต้นทุเรียนที่ออกดอก จากนั้นรอวันที่ดอกบานนำป้ายพลาสติกผูกติดกับช่อดอกพร้อมเขียนระบุวันที่ดอกบานรวมทั้งหมด 500 ดอก แล้วปล่อยให้ทุเรียนเจริญเติบโต

##### 3.1.1 การเก็บเกี่ยวทุเรียนที่อายุต่างๆ

สุ่มเก็บทุเรียนจำนวน 25 ผล 6 ครั้ง เพื่อตรวจสอบคุณภาพ ดังนี้

เมื่อทุเรียนครบ 80 วันหลังดอกบานสุ่มเก็บทุเรียนรวม 25 ผล

เมื่อทุเรียนครบ 90 วันหลังดอกบานสุ่มเก็บทุเรียนรวม 24 ผล

เมื่อทุเรียนครบ 100 วันหลังดอกบานสุ่มเก็บทุเรียนรวม 25 ผล

เมื่อทุเรียนครบ 110 วันหลังดอกบานสุ่มเก็บทุเรียนรวม 25 ผล

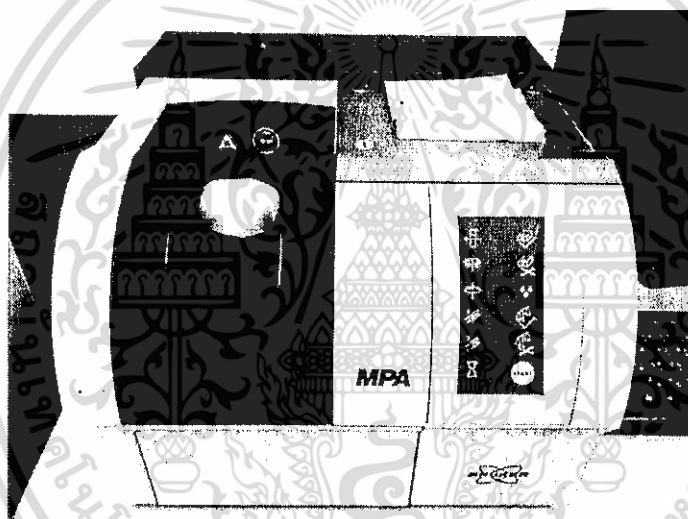
เมื่อทุเรียนครบ 120 วันหลังดอกบานสุ่มเก็บทุเรียนรวม 25 ผล

เมื่อทุเรียนครบ 127 วันหลังดอกบานสุ่มเก็บทุเรียนรวม 25 ผล

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker Ltd., Germany) (ภาพที่ 3.1)
2. เครื่อง Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer (FQA-NIR Gun, Shizuoka Shibuya Seiki, Hamamatsu, Japan) (ภาพที่ 3.2)
3. เครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer (MICRONIR JDSU, USA) (ภาพที่ 3.3)
4. เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Brix Refractometer, ATAGO Pock PAL-1, Japan) (ภาพที่ 3.4)
5. เครื่อง Microcentrifuge (Spectrafuge 7M, Labnet, USA) (ภาพที่ 3.5)

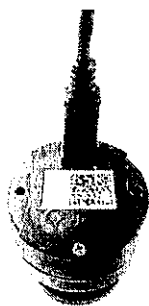
6. เครื่องวัดเนื้อสัมผัส รุ่น (TA HD Plus, Texture Analyzer, Stable Micro System, London, UK) (ภาพที่ 3.6)
7. ตู้อบหม้อนึ่ง (ULM 500, Memmert, USA) (ภาพที่ 3.7)
8. เครื่องบด (OKU SAN NO, Malaysia) (ภาพที่ 3.8)
9. เครื่องชั่ง ความละเอียด 0.001 g (SHIMADZU BX300) และความละเอียด 0.0001 g (AR2140 Adventurer, OHAUS, USA) (ภาพที่ 3.9)
10. ป้ายพลาสติก สายรัดพลาสติก ตะกร้า ปากกา เป็นต้น
11. เครื่องแก้วต่างๆ เช่น ปีกเกอร์ หลอดทดลอง เป็นต้น



ภาพที่ 3.1 เครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker Ltd., Germany)



ภาพที่ 3.2 เครื่อง Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer (FQA-NIR Gun, Shizuoka Shibuya Seiki, Hamamatsu, Japan)



ภาพที่ 3.3 เครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer (MICRONIR, JDSU, USA)



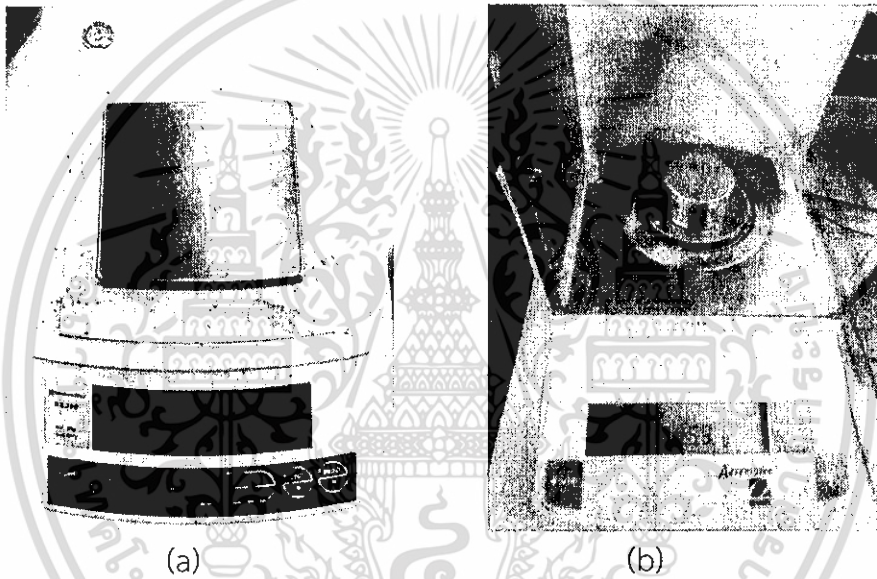
ภาพที่ 3.4 เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Brix Refractometer, ATAGO Pock PAL-1, Japan)



ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส รุน (TA HD Plus, Texture Analyzer, Stable Micro System, London, UK)



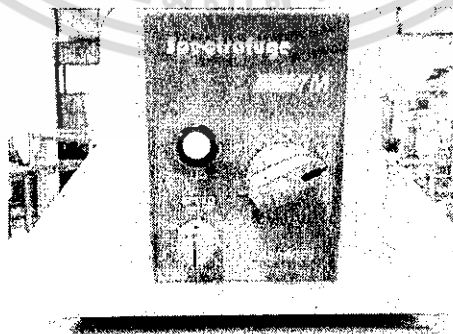
ภาพที่ 3.6 เครื่องบด (OKU SAN NO, Malaysia)



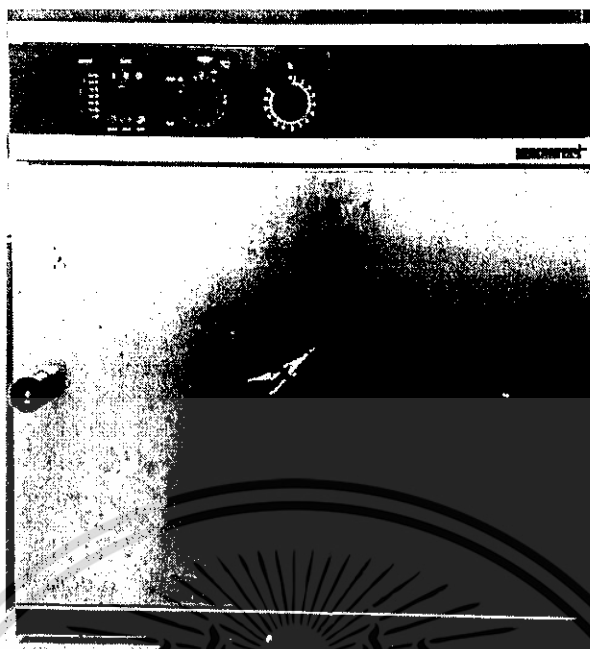
(a)

(b)

ภาพที่ 3.7 เครื่องชั่ง (a) ความละเอียด 0.001 g (SHIMADZU BX300) และเครื่องชั่ง (b) ความละเอียด 0.0001 g (AR2140 Adventurer, OHAUS, USA)



ภาพที่ 3.8 เครื่อง Microcentrifuge (Spectrafuge 7M, Labnet, USA)



ภาพที่ 3.9 ตู้อบลมร้อน (ULM 500, Memmert, USA)

### 3.3 วิธีการ

#### 3.3.1 การสแกนด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี



(a)

(b)

ภาพที่ 3.10 การส่มสแกนทุเรียนบนต้นด้วยเครื่อง Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer (a) และ Longwave linear variable filter spectrometer (b)

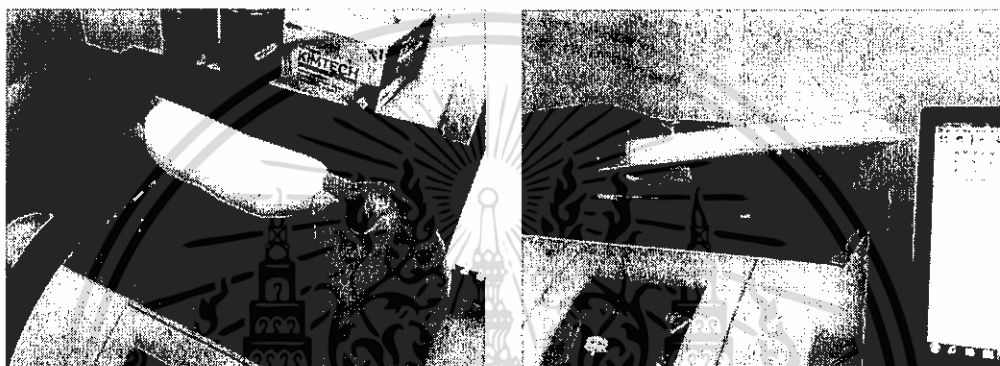
นำเครื่อง Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer และ Longwave linear variable filter spectrometer สุ่มสแกนผลทุเรียนบนต้นจำนวนครั้งละ 25 ลูก จำนวน 6 ครั้ง ดังภาพที่ 3.10 เมื่อทุเรียนมีอายุ 80 90 100 110 120 และ 127 หลังดอกบาน และทำการปายยาเอทีฟอน ก่อนออกจากสวน เพื่อกำหนดเวลา 3 วันให้ทุเรียนสุก นำผลทุเรียนมาไว้ที่ศูนย์วิจัยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลผลิตทาง

การเกษตรและอาหารเป็นระยะเวลา 3 วัน ในช่วงระยะเวลา 3 วัน ก่อนทำการสแกนจะต้องทำการควบคุมอุณหภูมิ  $26\pm 2$  เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมงและทำการสแกนด้วย FT-NIR Spectrometer, Longwave linear variable filter spectrometer (MICRONIR JDSU, USA) และ Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer (FQA-NIR GUN Fantec, Japan) ตามลำดับ ทุกวัน เมื่อครบกำหนด 3 วันทุเรียนสุก ก่อนทำการทดลองควบคุมอุณหภูมิ  $26\pm 2$  เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer, Longwave linear variable filter spectrometer (MICRONIR JDSU, USA) และ Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer ตามลำดับ หลังจากนั้นนำไปหาเนื้อสัมผัส มวลแห้ง และความหวาน ด้วยวิธีทางเคมี

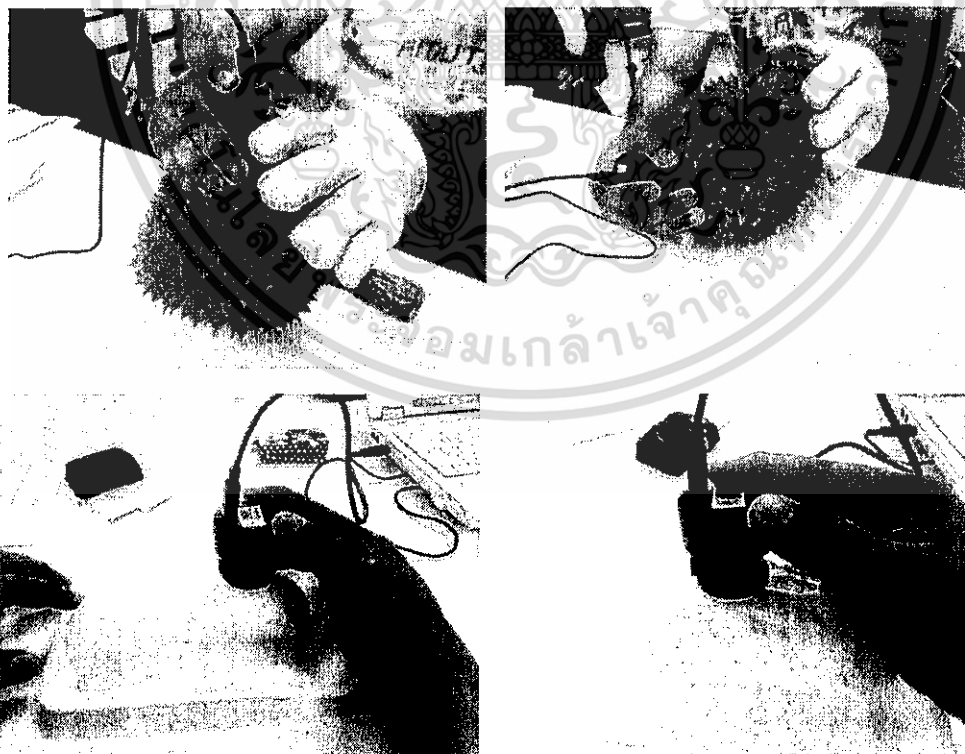
1) การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ซึ่งมีลักษณะการวัดแบบ Diffuse Reflectance ที่ช่วงจำนวนคลื่นระหว่าง  $12500-4000\text{ cm}^{-1}$  (ความยาวคลื่น 700-2500 nm) สแกนทุกๆ  $16\text{ cm}^{-1}$  สแกนซ้ำ 32 ครั้งต่อ 1 สเปกตรัม โดยเลือก Sample form แบบ Integrating sphere rotating (Sphere Macrosample) โดยการสแกนที่ทุเรียนที่ใหญ่ที่สุด ที่ก้นของลูกทุเรียน ที่เนื้อทุเรียนและที่เนื้อทุเรียนหุ้มพลาสติก ดังภาพที่ 3.11

2) การสแกนด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer (MICRONIR JDSU, USA) ซึ่งมีลักษณะการวัดแบบ Interactance มีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 1150-2150 nm ทุกๆ 7 nm Integrating time  $1000\ \mu\text{s}$  และจำนวนตัวอย่างเพื่อหาสเปกตรัมเฉลี่ย เท่ากับ 5000 สแกน ที่เปลือกทุเรียนบริเวณทุเรียนที่ใหญ่ที่สุด ที่ก้นของลูกทุเรียน ที่เนื้อทุเรียนและที่เนื้อทุเรียนหุ้มพลาสติก สแกนจำนวน 2 ครั้งต่อตัวอย่าง ดังภาพที่ 3.12

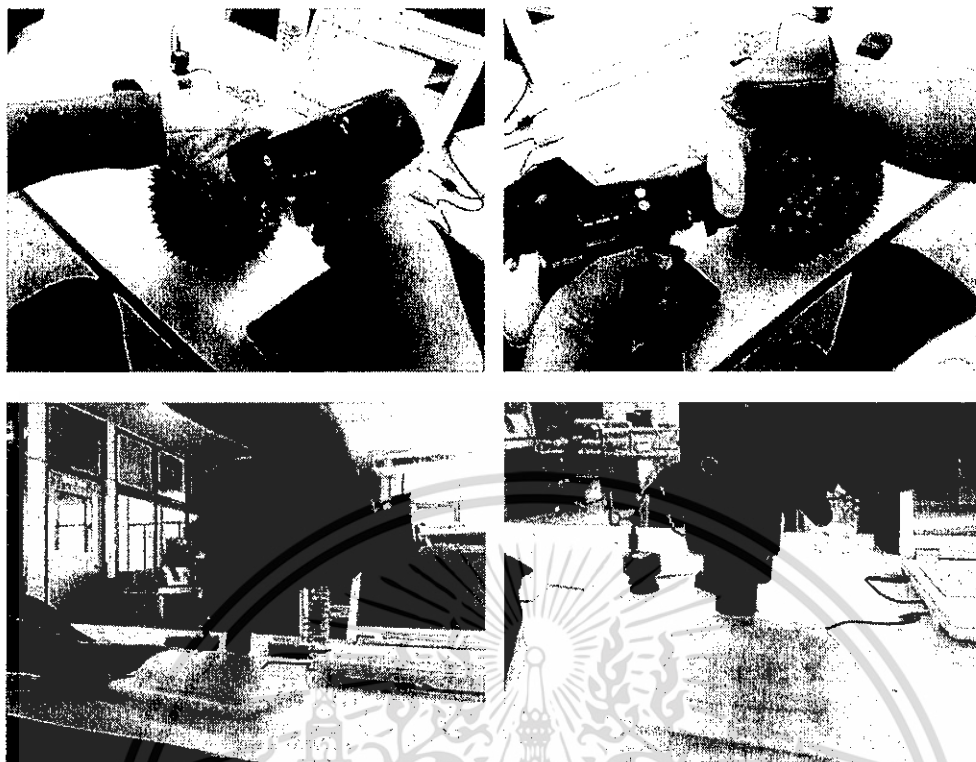
3) การสแกนด้วยเครื่อง Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer (FQA-NIR GUN Fantec, Japan) ซึ่งมีลักษณะการวัดแบบ Interactance มีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 600-1100 nm ทุกๆ 2 nm integration time 25 ms คลุมเครื่องสแกนพร้อมกับตัวอย่างด้วยผ้าสีดำเพื่อป้องกันแสงรบกวนจากภายนอก โดยสแกนที่เปลือกทุเรียนบริเวณทุเรียนที่ใหญ่ที่สุด ที่ก้นของลูกทุเรียน ที่เนื้อทุเรียนและที่เนื้อทุเรียนหุ้มพลาสติก สแกนจำนวน 2 ครั้งต่อตัวอย่าง ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.11 การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker Ltd., Germany)



ภาพที่ 3.12 การสแกนด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer (MICRONIR JDSU, USA)



ภาพที่ 3.13 การสแกนด้วยเครื่อง Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer (FQA-NIR Gun, Shizuoka Shibuya Seiki, Hamamatsu, Japan)

### 3.4 การตรวจวัดคุณภาพเนื้อทุเรียน

#### 3.4.1 ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture)

วัดค่าแรงกดของทุเรียนโดยดัดแปลงจาก (Voon et al., 2006) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส รุ่น TA.HD. Plus (ภาพที่ 3.4) โดยใช้หัวกดทรงกระบอกปลายเรียบเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm กดลงบนทุเรียนด้วยความเร็วก่อนกดและหลังกด เป็น 2, 1 และ 5 mm/min ให้หัวกดลึกลงไป 10 มิลลิเมตร และทำการวัดแรงที่กระทำเป็นค่า (Rupture force: N) (Average firmness: N/mm) (Toughness: Nmm) (Average penetrating force: N) (Penetrating energy: Nmm) การวัดจะวัดที่เนื้อทุเรียนกลางพู

#### 3.4.2 ความชื้นและความหวาน

นำเนื้อทุเรียนที่ผ่านการวัดเนื้อสัมผัสจำนวน 80 g มาปั่นด้วยเครื่องบดให้ละเอียด (OKU SAN NO, Malaysia) แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 วัดความชื้นโดยใช้เนื้อทุเรียนปริมาณ 5 g จำนวน 2 ซ้ำ วัดโดยใช้เครื่องชั่ง ความละเอียด 0.0001 g (AR2140 Adventurer, OHAUS, USA)

โดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C อบจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ส่วนที่ 2 วัดความหวาน โดยใช้เนื้อทุเรียน 1 ส่วน ต่อน้ำ 3 ส่วน โดยปริมาตร ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Microcentrifuge (Spectrafuge 7M, Labnet, USA) ที่ความเร็วรอบ 6000 rpm เป็นเวลา 10 min วัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Soluble solids content) ซึ่งเป็นเสมือนความหวานของเนื้อทุเรียนโดยรินน้ำส่วนบนที่เป็นของเหลวใสลงใน Digital Refractometer (Pal1, ATAGO, Japan) ทั้งนี้ต้องคูณค่าที่ได้ด้วย 4 (สูตรรัตน์ 2536)

การทดลองครั้งนี้เพื่อวัดค่าความชื้นของเนื้อทุเรียน โดยใช้ ตู้อบแห้งแบบลมร้อน (ULM 500, Memmert, USA) เขียนหมายเลขที่ aluminum can นำใส่โหลดูดความชื้น เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที จำนวน 50 กระป๋อง ทำการชั่งน้ำหนัก aluminum can และบันทึกค่า นำเนื้อทุเรียนที่ปั่น มาชั่งน้ำหนักประมาณ 0.5 g และบันทึก ค่า และเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60-65 °C เมื่อครบ 6 ชั่วโมง จึงนำตัวอย่างออกจากตู้อบแห้ง ใส่โหลดูดความชื้น ทิ้งไว้ ให้เย็นประมาณ 10-15 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่า และทุก 3 ชั่วโมง ทุกครั้งที่เอาออกจากตู้อบต้อง ใส่โหลดูดความชื้น ทิ้งไว้ ให้เย็นประมาณ 10-15 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนัก จนกว่า น้ำหนักจะคงที่ โดยมีค่าความแตกต่างระหว่างครั้งที่วัดกับครั้งที่วัดต่อมาไม่เกินระหว่าง 0.003-0.005 g แล้วมาคำนวณหา %MC และ %DM

$$MC (\%) = \frac{(w_1 - w_2) \times 100}{w_1} \quad (3.1)$$

$$DM (\%) = 100 - (MC) (\%) \quad (3.2)$$

### 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

#### 3.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม

การตรวจจุดความผิดปกติของสเปกตรัมดั้งเดิม หากพบบางเส้นอยู่ในตำแหน่งผิดปกติจากกลุ่มจุดบันทึกและพิจารณาตัดข้อมูล นอกจากนี้ยังวิเคราะห์จากแถบการดูดซับคลื่นที่ปรากฏในสเปกตรัม โดยพิจารณาให้สอดคล้องกับองค์ประกอบที่มีในตัวอย่าง (รณฤทธิ์ ฤทธิ์ธรม 2555) วิธีการเลือก Outlier ของสเปกตรัม ในโปรแกรม (OPUS version 7.0.129) การเลือก Outlier พิจารณาจากขีดจำกัดของค่าระยะ Mahalanobis คือ ความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมของตัวอย่างกับค่าเฉลี่ยของทุกสเปกตรัมของชุด Calibration การคำนวณจะพิจารณาบนพื้นฐานของการกระจายของสเปกตรัมของชุด Calibration ทั้งหมด ซึ่งจะต้องคำนวณค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สมมติว่าการกระจายเป็นแบบระฆังคว่ำ ขีดจำกัดด้านหนึ่งจะครอบคลุมความเป็นไปได้ 99.999% ค่าขีดจำกัดของระยะ Mahalanobis

ที่คำนวณโดยวิธีนี้จะทำให้แน่ใจว่าระยะ Mahalanobis ของสเปกตรัมเกือบทั้งหมดหรือทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดนี้ ถ้าเกินขีดจำกัดก็จะเป็น Outlier

### 3.5.2 การวิเคราะห์ค่า outliers

การตรวจสอบพิสัยของค่าทางเคมี เป็นการตรวจสอบการกระจายค่าทางเคมีของประชากรกลุ่มตัวอย่าง หากตัวอย่างมีค่าทางเคมีสูงหรือต่ำจากการกระจายค่าทางเคมีแบบปกติ (Normal distribution) ตัวอย่างเหล่านั้นอาจไม่อยู่ในกลุ่มประชากรที่สนใจ หากค่าสัมบูรณ์ของค่าทางสถิติคะแนน  $t$  ตัวอย่างใดมีค่ามากกว่า 3 หมายถึงตัวอย่างนั้นอยู่นอกกลุ่มประชากรตัวอย่างที่สนใจที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์ ให้พิจารณาตัดตัวอย่างนั้นทิ้ง (รณฤทธิ ฤทธิธรรม 2555)

### 3.5.3 การเตรียมสเปกตรัมของเนื้อทุเรียนที่ไม่หุ้มหรือหุ้มด้วยพลาสติกฟิล์มเพื่อการสร้างสมการในการทำนาย

ก่อนที่นำสเปกตรัมไปสร้างสมการในการทำนาย จำเป็นต้องแปลงข้อมูลก่อนนำไปสร้างแบบจำลองในการทำนาย ดังนี้

- 1) สเปกตรัมจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer ไม่ต้องมีการแปลงไฟล์ใดๆ
- 2) สเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer จำเป็นต้องเปลี่ยนลักษณะการวัดแบบ Interactance ให้เป็น Absorbance ในโปรแกรม Ca Maker ซึ่งจะได้ข้อมูลเป็น Text File จากนั้นนำไป Export ให้เป็นไฟล์ Unscramble X (Camo, Norway)

3.5.4 การสร้างแบบจำลองเชิงปริมาณในการทำนาย ใน (OPUS version 7.0.129) การสร้างแบบจำลองการทำนายเชิงปริมาณทำโดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสง (Optical data) เนื้อสัมผัส มวลแห้ง และความหวาน ที่วัดด้วยวิธีมาตรฐาน โดยวิธี Partial least squares regression (PLSR) โดยใช้โปรแกรม (OPUS version 7.0.129) ทั้งนี้ใช้ข้อมูลเชิงแสง (สเปกตรัม) ที่ไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น หรือที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นโดยวิธี constant offset elimination, straight line subtraction, vector normalization (SNV), min-max normalization, multiplicative scattering correction, first derivative, second derivative, first derivative + straight line subtraction, first derivative + SNV และ first derivative + MSC พิสูจน์แบบจำลองโดยใช้วิธี Test set validation เมื่อได้แบบจำลองจะคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสองของการทำนาย (root mean squared error of prediction; RMSEP) ที่ต่ำที่สุด จากนั้นจะบันทึกค่า

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficients of determination;  $R^2$ ), RMSEP อัตราส่วนระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน เฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of standard error of validation to the standard deviation; RPD), ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (bias) และบันทึกค่า regression coefficient และ X-loading weight ที่จำนวนคลื่นต่างๆ หรือความยาวคลื่นต่างๆ

### 3.5.5 การสร้างแบบจำลองเชิงปริมาณในการทำนาย ใน Unscramble X

การสร้างแบบจำลองการทำนายเชิงปริมาณทำโดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสง (Optical data) เนื้อสัมผัส มวลแห้ง และความหวาน ที่วัดด้วยวิธีมาตรฐาน โดยวิธี Partial least square regression (PLSR) โดยใช้โปรแกรม Unscramble X ทั้งนี้ใช้ข้อมูลเชิงแสง (สเปกตรัม) ที่ไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นหรือที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นโดยวิธี min-max-range normalization, first derivative (5, 11 และ 21 points), second derivative (5, 11 และ 21 points), Baseline-offset, vector normalization (SNV), SNV + Detrending, Detrending, multiplicative scattering correction (MSC) พิสูจน์แบบจำลองโดยใช้วิธี Test set validation เมื่อได้แบบจำลองจะคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่า RMSEP ที่ต่ำที่สุด จากนั้นจะบันทึกค่า  $R^2$ , RMSEP, RPD, bias และบันทึกค่า regression coefficient และ X-loading weight ที่จำนวนคลื่นต่างๆ หรือความยาวคลื่นต่างๆ

### 3.5.6 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ แบบ Soft Independent Modeling of Class Analogy (SIMCA)

การวิเคราะห์แบบ SIMCA เป็นการวิเคราะห์โดยใช้วิธี PCA นำมาวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มของความสุกแก่ทุเรียนตามอายุในการเก็บเกี่ยว 80 90 100 110 120 และ 127 วันหลังดอกบาน โดยนำสเปกตรัมของความสุกแก่ทุเรียนตามอายุในการเก็บเกี่ยว 80 90 100 110 120 และ 127 วันหลังดอกบาน ในชุด Calibration มาทำการวิเคราะห์โดยใช้ทำแบบจำลอง PCA เพื่อใช้ในการทำนาย จะทำให้ได้แบบจำลอง PCA ของความสุกแก่ทุเรียนตามอายุในการเก็บเกี่ยว 80 90 100 110 120 และ 127 วันหลังดอกบานนำแบบจำลอง PCA ของทั้งความสุกแก่ทุเรียนตามอายุในการเก็บเกี่ยว 80 90 100 110 120 และ 127 วันหลังดอกบานมาทำนายค่าว่าความสุกแก่ทุเรียนในชุด Validation เป็นกลุ่มอายุในการเก็บเกี่ยวใดและวิเคราะห์ว่าแบบจำลองมีความแม่นยำในการทำนายได้ถูกต้องหรือไม่

### 3.5.7 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ การวิเคราะห์แบบ PLS- DA

เป็นการวิเคราะห์โดยใช้วิธี PLS2 นำมาวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มของความสุกแก่ทุเรียนตามอายุในการเก็บเกี่ยว 80 90 100 110 120 และ 127 วันหลังดอกบาน โดยตัวแปรต้นคือสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง NIR และตัวแปรตามคือความความสุกแก่ทุเรียนที่ได้มาตรฐานและความสุกแก่ทุเรียนที่ไม่ได้มาตรฐาน เพื่อสร้างแบบจำลองโดยตัวแปรตามในการสร้างแบบจำลองความสุกแก่ทุเรียนจะแทนด้วย 0 และ 1 (Yes = 1 , No = 0) แบบจำลองที่ได้จะนำไปทำนายในชุด Validation โดยค่าที่ได้จะเป็นค่า การทำนายเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด โดยค่าจากการทำนายค่า  $Y$   $Y > 0.5$  ซึ่งมากกว่าค่าเฉลี่ย จึงจัดอยู่ในกลุ่มของ 1  $Y < 0.5$  ซึ่งน้อยกว่าค่าเฉลี่ยจึงจัดอยู่ในกลุ่มของ 0

ถ้าค่า  $Y$  จากการทำนายมีค่าตรงกับค่าอ้างอิงก็จะสรุปว่าการทำนายนี้ถูกต้อง

### 3.6 การทดสอบความแม่นยำของการวัดค่าทางเคมี

การทดสอบความแม่นยำของการวัดค่าทางเคมี โดยการวัดค่า Repeatability และค่า Reproducibility โดยค่า Repeatability (Rep) คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดตัวอย่างซ้ำ โดยผู้วัดทราบว่าเป็นตัวอย่างอะไร (Duplicate sample) ซึ่งในการทดลองนี้มีการนำตัวอย่างเข้ามาวัดซ้ำเป็น ส่วนค่า Reproducibility คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดตัวอย่างซ้ำ โดยผู้วัดไม่ทราบว่าเป็นตัวอย่างที่ซ้ำเป็นตัวอย่างอะไร (Blind sample) ซึ่งในการทดลองนี้มีการวัดซ้ำ 2 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่าง ในระหว่างการทดลอง (ไม่พร้อมกัน) ซึ่ง Dardenne (2009) [84] ได้อธิบายว่า  $R^2$  จะสูงสุด ( $R^2_{Max}$ ) เมื่อไม่มี error ในสเปกตรัมหรือแบบจำลอง และชี้ให้เห็นว่าค่า  $SD_y$  และ Rep ก็เพียงพอที่จะใช้ตัดสินใจว่าควรสร้างแบบจำลอง NIR ต่อไปหรือไม่ ค่า  $R^2_{Max}$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R^2_{Max} = \frac{SD_y^2 - Rep^2}{SD_y^2} \quad (3.3)$$

$SD_y$  คือ ค่า standard deviation ของค่าสารที่ตรวจสอบ (ตัวแปรตาม) ของชุด calibration

## บทที่ 4

## ผลการทดลอง

## 4.1 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ 4.1 สถิติคุณภาพการรับประทานของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว สี ความหวาน ปริมาณความชื้นและปริมาณมวลแห้ง

อายุ	สี			ความหวาน	ปริมาณความชื้นและปริมาณมวลแห้ง	
	L*	a*	b*	SS	MC	DM
80	86.97 ±2.91a	-0.15 ±0.95c	22.11 ±4.60d	13.2 ±0.56e	87.4459 ±2.32a	12.5541 ±2.32e
90	85.96 ±3.60ab	-0.19 ±0.62c	26.61 ±4.92c	17.2 ±6.16de	82.323 ±4.95b	17.6770 ±4.95d
100	85.36 ±3.60bc	0.55 ±1.16bc	33.72 ±4.96b	24.9 ±9.27c	68.8831 ±7.04c	31.1169 ±7.04c
110	86.27 ±2.25ab	0.14 ±0.87b	35.76 ±4.28b	19.3 ±4.47d	66.3005 ±4.45d	33.6995 ±4.45b
120	85.02 ±2.01bc	1.08 ±0.81a	39.76 ±3.61a	34.9 ±11.36a	61.2229 ±2.67e	38.7771 ±2.67a
127	84.12 ±2.92c	1.36 ±0.91a	40.67 ±4.85a	30.5 ±6.17b	60.5029 ±2.36e	39.4972 ±2.36a

หมายเหตุ = (color) L\* a\* b\*. soluble solids content (SSC), moisture content (MC) and dry matter (DM)

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าทางสถิติคุณภาพการรับประทานของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว สีที่มีผลกับทุเรียนโดยตรงคือสีเหลือง b ค่าความเป็นสีเหลืองของเนื้อทุเรียนมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามอายุการเก็บเกี่ยวของทุเรียน มีรายงานกล่าวไว้ว่า สีขึ้นอยู่กับพันธุ์ทุเรียน สีเหลืองที่เพิ่มขึ้นเกิดจากแคโรทีนอยด์ (Wei et al, 2014) ค่าความชื้น MC มีค่าลดลงตามอายุการเก็บเกี่ยว ซึ่งสวนทางกับ DM ที่มีปริมาณมากขึ้นตามอายุการเก็บเกี่ยว ค่า DM คือคาร์โบไฮเดรต, คาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้ (น้ำตาล) และ แป้งที่ไม่ละลายน้ำ (Gibson, 2012; Suni, Nyman, Eriksson, Bjork, & Bjork, 2000). ตารางที่ 4.2 แสดงค่าทางสถิติคุณภาพการรับประทานของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยวของเนื้อสัมผัส จะเห็นค่าเนื้อสัมผัสตั้งแต่ 80-110 วัน มีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ แต่เมื่อถึง 120-127 วัน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ

ตารางที่ 4.2 สถิติคุณภาพการรับประทานของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว เนื้อสัมผัส

อายุ	เนื้อสัมผัส						
	IF	RF	AF	RD	T	APF	PE
80	3.067 ±1.46bc	23.645 ±8.60a	4.313 ±1.92a	5.979 ±1.76a	63.554 ±31.70a	17.472 ±7.47a	68.596 ±37.93a
90	4.897 ±4.62ab	18.089 ±12.34ab	5.065 ±4.59a	5.343 ±2.52ab	42.053 ±33.95b	13.628 ±9.30ab	77.177 ±72.62a
100	4.157 ±3.87ab	13.554 ±11.87bc	3.681 ±3.96a	5.184 ±2.62ab	34.57 ±40.17b	11.733 ±10.45bc	64.229 ±71.17a
110	5.469 ±4.43a	19.886 ±13.33a	5.635 ±4.45a	4.578 ±1.96b	41.126 ±28.26b	16.280 ±11.65ab	99.632 ±81.00a
120	2.174 ±2.90c	8.085 ±9.85cd	1.625 ±2.09b	5.364 ±1.56ab	27.244 ±41.66bc	6.785 ±9.74cd	30.428 ±46.59b
127	1.110 ±0.89c	3.828 ±3.51d	0.700 ±0.76b	6.004 ±1.79a	13.278 ±12.57c	2.618 ±3.20d	9.475 ±13.43b

หมายเหตุ = AF = Average force, IF = Initial firmness, RF = Rupture force, RD = Rupture distance, T = Toughness, APF = Average penetrating force and PE = Penetrating energy

ตารางที่ 4.3 สถิติคุณภาพการรับประทานของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว สี ความหวาน และความชื้นสำหรับตัวอย่างที่เป็นตัวอย่างใหม่ (Unknown)

อายุ	สี			ความหวาน	ปริมาณความชื้นและปริมาณมวลแห้ง	
	L*	a*	b*	ss	MC	DM
80	56.08±1.15a	-0.126±0.21e	11.47±2.57f	18.00±0.57e	88.2301±3.24a	11.7698±3.24d
90	56.84±1.57a	-0.13±0.13e	13.85±3.32e	19.6±0.30de	82.3970±5.12b	17.6029±5.12d
100	56.89±0.79a	0.272±0.35d	19.48±1.61d	22.00±0.29c	70.1899±4.17c	29.8100±4.17d
110	55.99±0.84a	0.466±0.27c	21.56±1.66c	20.8±0.95cd	61.7293±1.95d	38.2706±1.95c
120	57.27±6.66a	0.834±0.32b	24.07±2.21b	24.8±1.01b	60.7861±1.42d	39.2138±1.42b
127	53.06±1.22b	1.277±0.33a	25.68±1.69a	37.2±0.94a	60.7554±0.73d	39.2445±0.73a

หมายเหตุ = (color) L\* a\* b\*, soluble solids content (SSC), moisture content (MC) and dry matter (DM)

จากตารางที่ 4.3 แสดงสถิติคุณภาพการรับประทาน (สี ความหวาน และความชื้น) ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว โดยค่า (สี) b\* แสดงเป็นค่าบวกแสดงถึงความเป็นสีเหลืองของวัตถุ (เนื้อทุเรียน) ซึ่งมีความสอดคล้องตามช่วงอายุ คือทุเรียนที่อายุเพิ่มมากขึ้นจะมีสีเหลืองเพิ่มขึ้น ค่าความหวานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความชื้น (MC) มีค่าลดลงตามอายุการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสวนทางกับค่า DM ที่มีปริมาณมากขึ้นตามอายุการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น

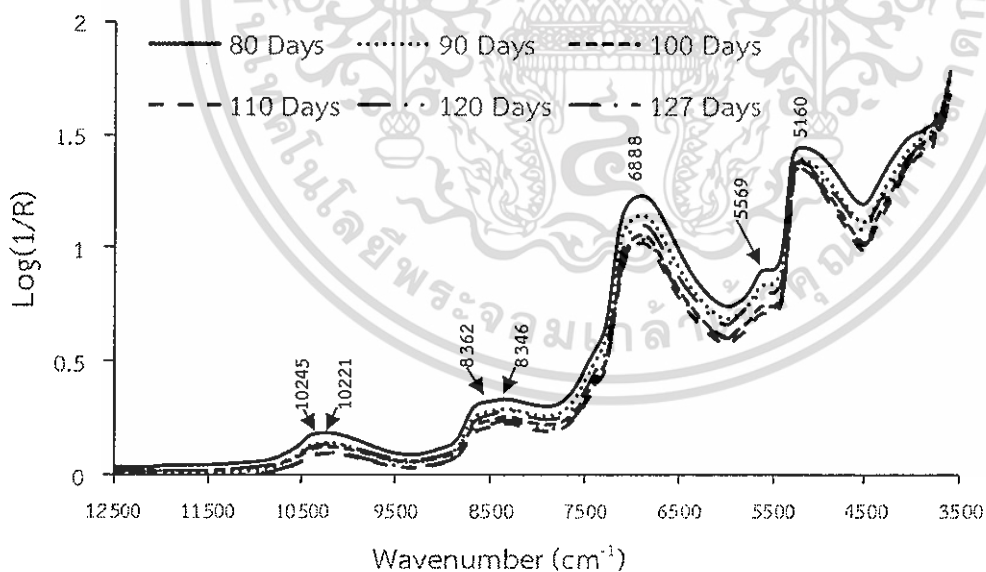
ตารางที่ 4.4 สถิติคุณภาพการรับประทานของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว เนื้อสัมผัสสำหรับ ตัวอย่างที่เป็นตัวอย่างใหม่

อายุ	เนื้อสัมผัส						
	IF	RF	AF	RD	T	APF	PE
80	4.010±1.25b	28.410±7.14a	5.151±1.79b	5.979±2.10a	87.253±38.90a	20.968±5.36b	79.152±42.17b
90	9.807±2.38a	30.706±6.72a	8.051±3.38a	4.557±2.27a	91.515±63.53a	26.120±5.52a	132.975±43.65a
100	9.868±4.25a	32.891±10.30a	7.459±3.71a	5.585±2.62a	110.990±77.52a	29.033±8.60a	133.057±76.46a
110	3.875±2.50b	16.700±10.73b	4.479±3.92b	5.003±2.56a	39.007±24.66b	14.422±8.88c	76.141±72.13b
120	0.836±0.25c	3.673±0.67c	0.648±0.13c	6.010±2.05a	10.951±2.40bc	2.091±1.29d	6.317±3.66c
127	0.481±0.20c	2.296±0.56c	0.399±0.10c	5.746±0.38a	6.763±1.92c	1.293±0.51d	5.505±2.21c

หมายเหตุ = AF = Average force, IF = Initial firmness, RF = Rupture force, RD = Rupture distance, T = Toughness, APF = Average penetrating force and PE = Penetrating energy

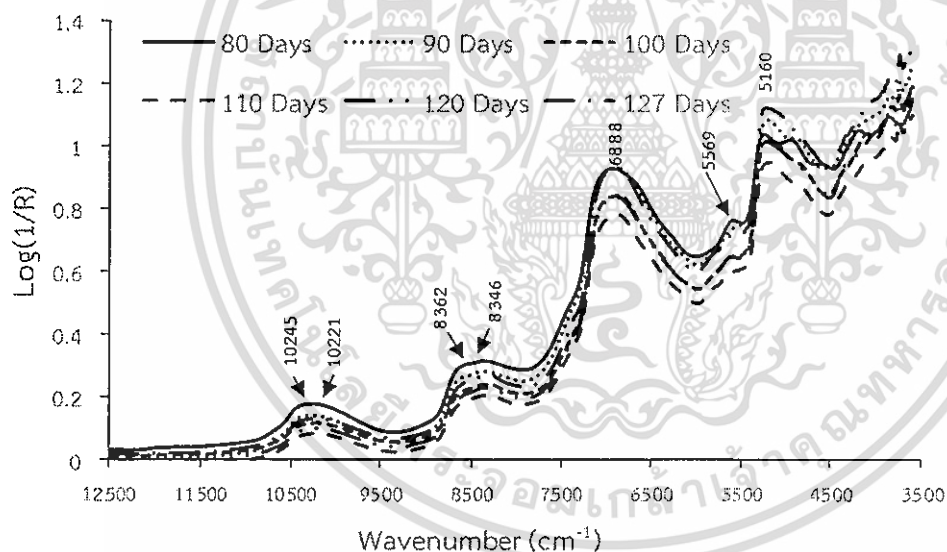
ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติเนื้อสัมผัส ของตัวอย่างใหม่ มีการเปลี่ยนแปลงดังนี้ ค่า IF AF APF และ PE ใน อายุการเก็บเกี่ยว 80 วัน มีค่าต่ำกว่าที่อายุ 90 วัน แล้วลดลงตามอายุการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่า RF RD และ T มีค่าสูงสุดที่อายุการเก็บเกี่ยว 80, 90 และ 100 วัน แล้วลดลงตามลำดับตามอายุการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น

#### 4.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมดิบ

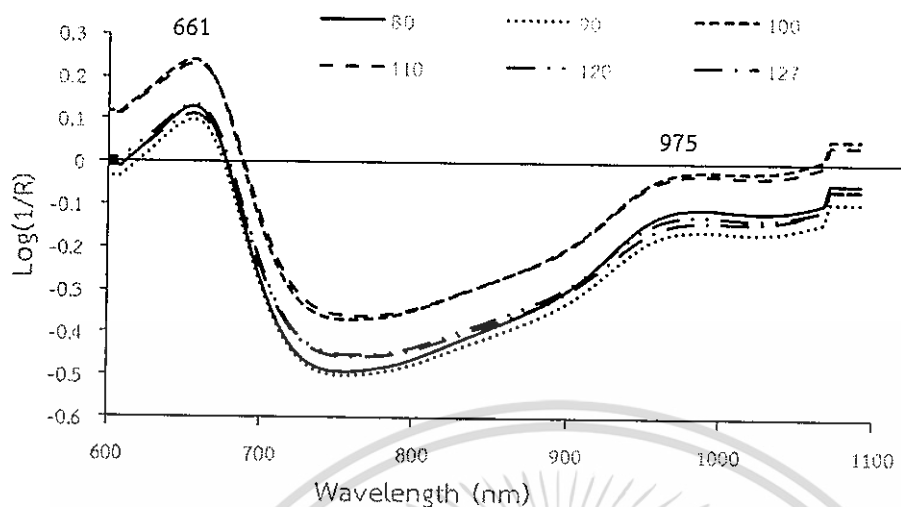


ภาพที่ 4.1 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพู่ที่ทำการวัดด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ใน ห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของเนื้อทุเรียนตามอายุการเก็บเกี่ยวตั้งแต่ 80-127 วันหลังดอกบาน ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ที่ จำนวนคลื่นระหว่าง  $12500-4000\text{ cm}^{-1}$  (ความยาวคลื่น  $800-2500\text{ nm}$ ) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพู ดังภาพที่ 4.1 และเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ดังภาพที่ 4.2 พบการดูดซับคลื่นที่จำนวนคลื่น  $10245-10221$ ,  $8362-8346$ ,  $6888$ ,  $5569$  และ  $5160\text{ cm}^{-1}$  ( $976-978$ ,  $1196-1198$ ,  $1452$ ,  $1796$  และ  $1938\text{ nm}$ ) โดยพีคที่  $10245-10221\text{ cm}^{-1}$  (บริเวณ  $970\text{ nm}$ ) เป็นการดูดซับคลื่นของ  $\text{H}_2\text{O}$  (Osborne and Fearn, 1986) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching พีคที่  $8362-8346\text{ cm}^{-1}$  ( $1198-1196\text{ nm}$ ) เป็นการดูดซับคลื่นของ ( $^2\text{H}_2\text{O}$  or  $\text{D}_2\text{O}$ ) (Workman and Weyer, 2007) พีคที่  $6888\text{ cm}^{-1}$  ( $1452\text{ nm}$ ) เป็นการดูดซับคลื่นของ starch or  $\text{H}_2\text{O}$  (Osborne and Fearn, 1986) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching พีคที่  $5569$  ( $1796\text{ nm}$ ) เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose (Osborne and Fearn, 1986) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C-H stretching นอกจากนี้พีคที่  $5160\text{ cm}^{-1}$  ( $1938\text{ nm}$ ) เกิดการสั่นสะเทือนของ O-H stretching + O-H ซึ่งเป็นโครงสร้างของ  $\text{H}_2\text{O}$  (Osborne and Fearn, 1986) ภาพที่ 4.2 แตกต่างจากภาพที่ 4.1 ที่บริเวณ  $4500-3500\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งปรากฏพีคของพลาสติก

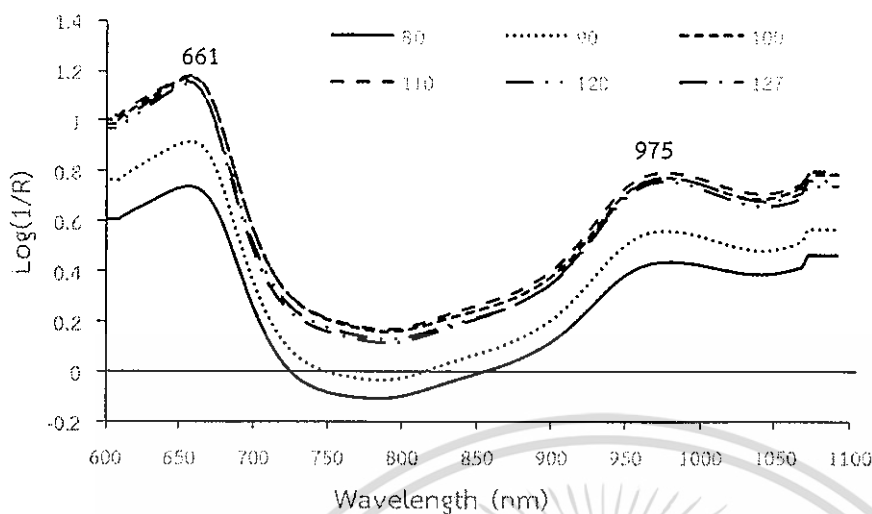


ภาพที่ 4.2 สเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกที่ทำการวัดด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน

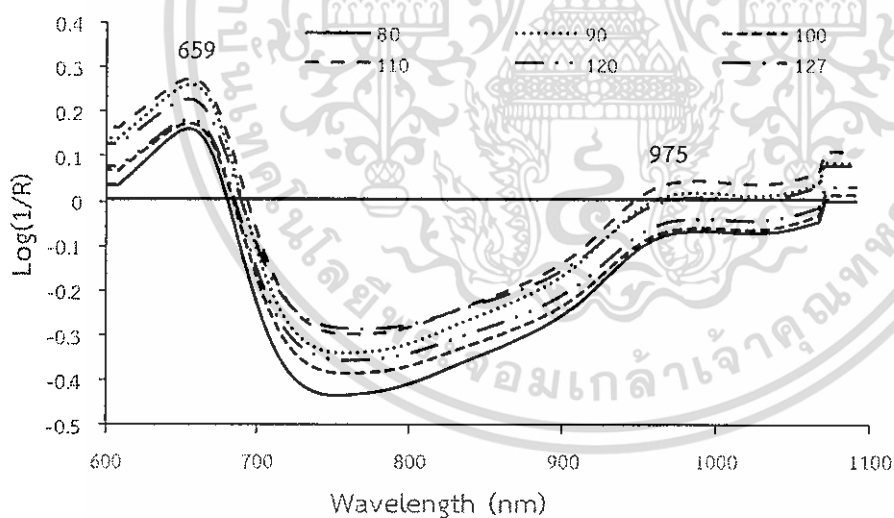


ภาพที่ 4.3 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณพุ่มที่ทำกรวัด ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในสวนทุเรียน ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน

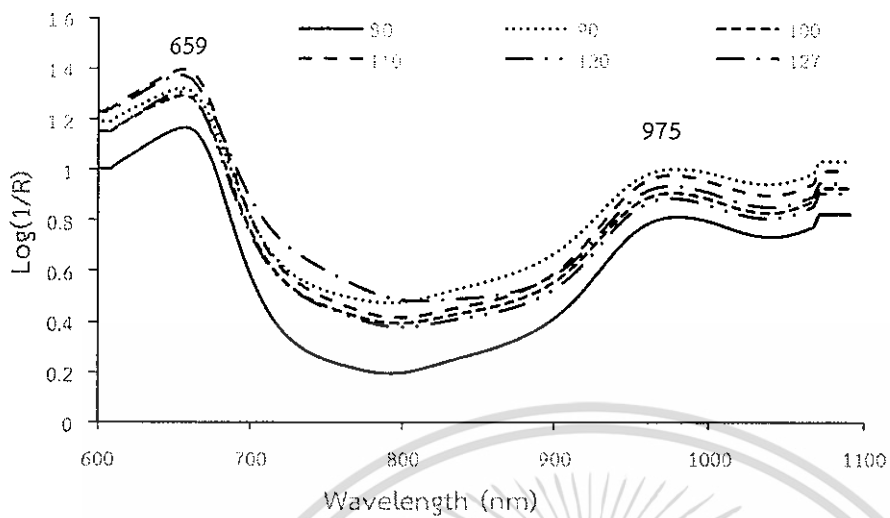
จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของเปลือกทุเรียนที่บริเวณพุ่มที่ทำกรวัดด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 600-1100 nm (ภาพที่ 4.3 4.4 4.5 และ 4.6) พบว่าเปลือกทุเรียนที่บริเวณพุ่ม, เปลือกทุเรียนที่บริเวณกัน, เปลือกทุเรียนที่บริเวณพุ่มในห้องปฏิบัติการ และเปลือกทุเรียนที่บริเวณกันในห้องปฏิบัติการ เกิดการดูดซับคลื่นที่ความยาวคลื่น 661 และ 975 nm โดยพีคที่ 661 และ 659 nm ซึ่งเป็นการดูดซับคลื่นของ chlorophyll ที่ 680 nm (Tkachuk, 1982) และพีคที่ 975 nm เกิดการสั่นสะเทือนของ O-H stretching เป็นการดูดซับคลื่นของ H<sub>2</sub>O ที่ 970 nm (Osborne and Fearn, 1986)



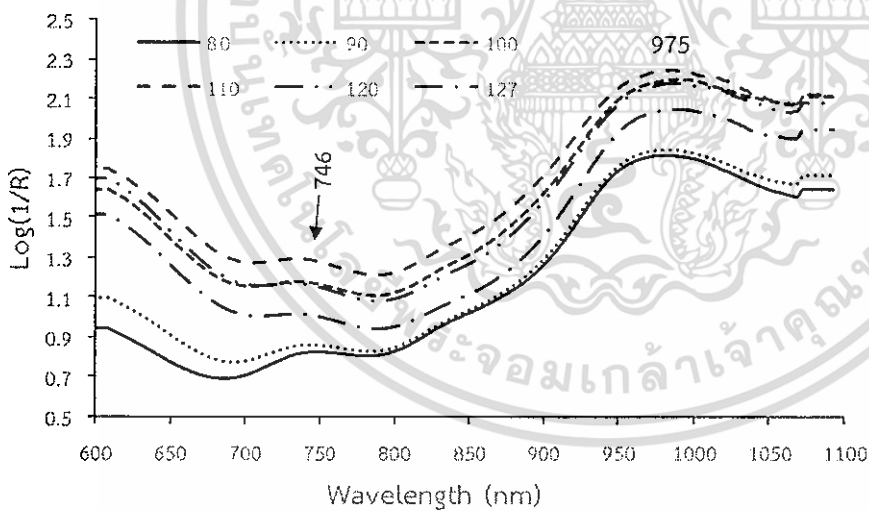
ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณกันที่ทำการวัด ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในสวนทุเรียนที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน



ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณพู่ ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน

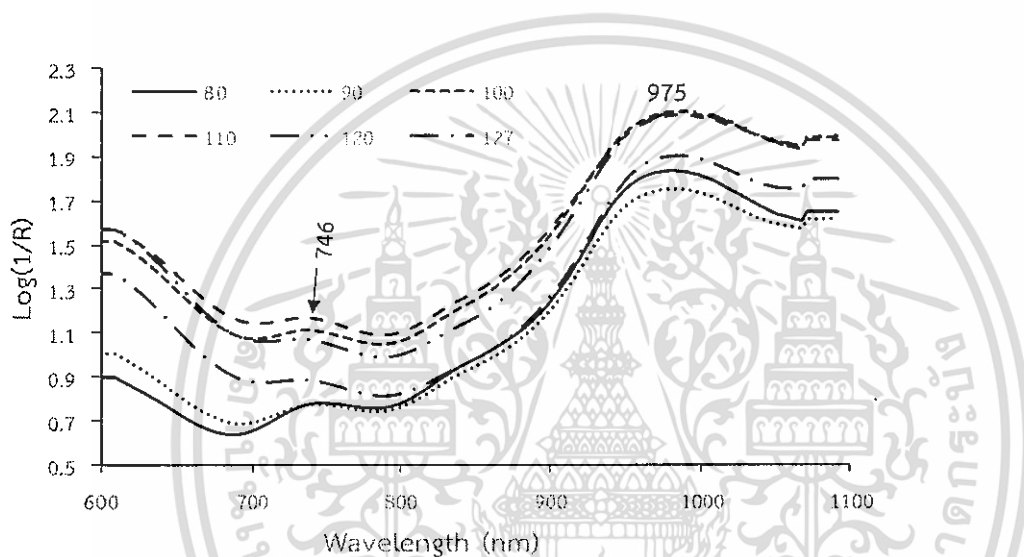


ภาพที่ 4.6 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณกัน ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน

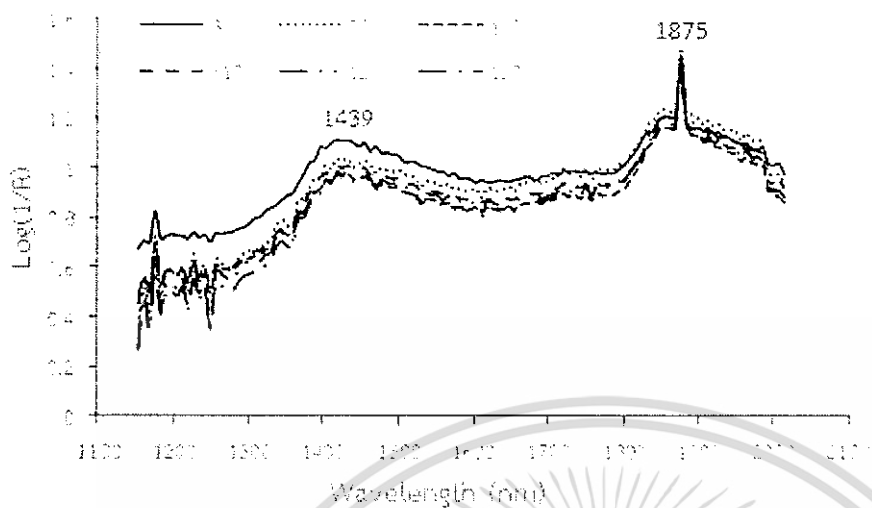


ภาพที่ 4.7 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพู ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพุ่มที่ทำการวัด ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ที่จำนวนคลื่นระหว่าง 600-1100 nm (ภาพที่ 4.7 และ 4.8) พบว่าเนื้อทุเรียนที่บริเวณพุ่มและเนื้อทุเรียนที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกเกิดการดูดซับคลื่นที่จำนวนคลื่น 746 และ 975 nm โดยพีคที่ 746 nm เกิดการสั่นสะเทือนของ O-H stretching ซึ่งเป็นการดูดซับคลื่นของ H<sub>2</sub>O ที่ 760 nm (Osborne and Fearn, 1986) และพีคที่ 975 nm เกิดการสั่นสะเทือนของ O-H stretching ที่ 970 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ H<sub>2</sub>O Osborne and Fearn (1986)

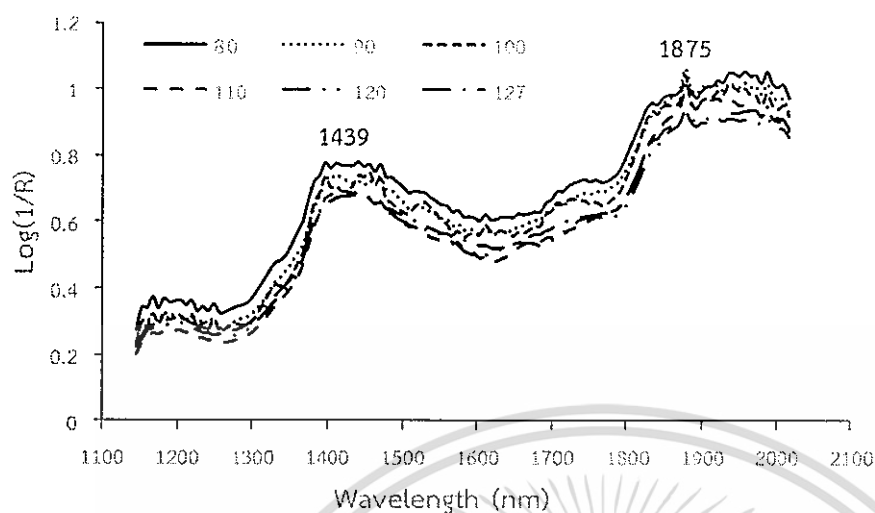


ภาพที่ 4.8 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพุ่มห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน

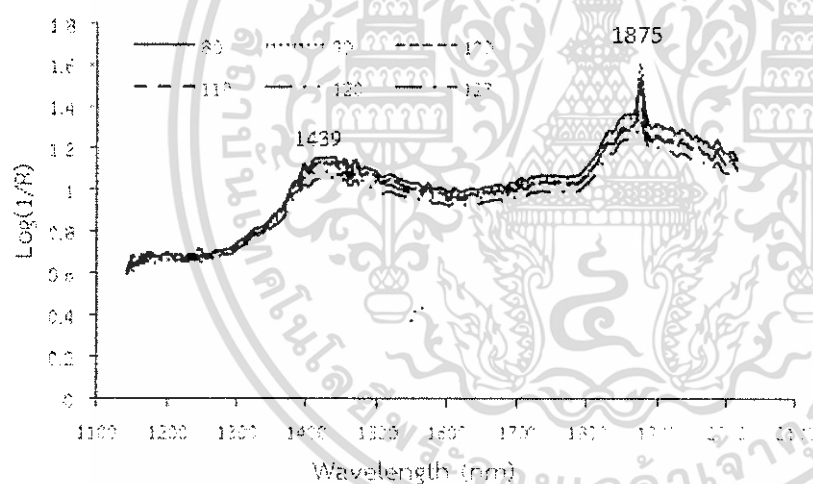


ภาพที่ 4.9 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณพูที่ทำการวัด ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในส่วนทุเรียนที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน

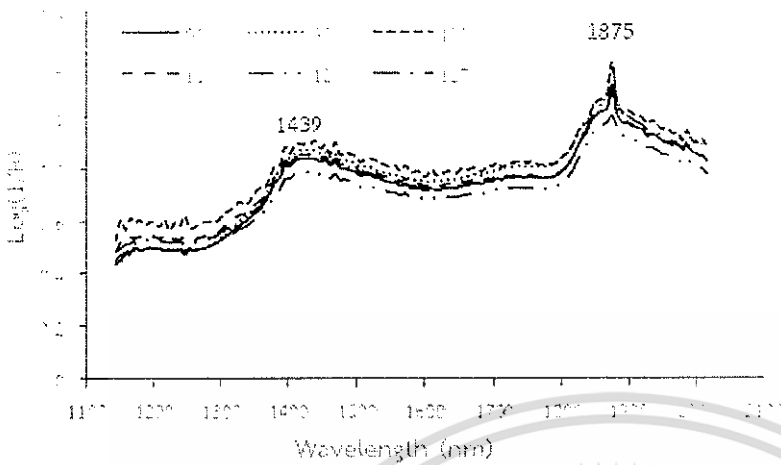
จากการวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณพูที่ทำการวัด ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 1100-2500 nm (ภาพที่ 4.9 4.10 4.11 4.12 4.13 และ 4.14) พบว่าเปลือกทุเรียนที่บริเวณพูที่สวน, เปลือกทุเรียนที่บริเวณก้นที่สวน, เปลือกทุเรียนที่บริเวณพูที่ทำการวัดในห้องปฏิบัติการ, เปลือกทุเรียนที่บริเวณก้นที่ทำการวัดในห้องปฏิบัติการ, เนื้อทุเรียนที่บริเวณพู และเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก เกิดการดูดซับคลื่นที่จำนวนคลื่น 1439 และ 1875 nm โดยพีคที่ 1439 nm เกิดการสั่นสะเทือนของ O-H stretching ซึ่งเป็นการดูดซับคลื่นของ H<sub>2</sub>O ที่ 1450 nm (Osborne and Fearn, 1986) และพีคที่ 1875 nm เกิดการสั่นสะเทือนของ O-H stretching + 2 x C-O stretching ที่ 1900 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ starch (Osborne and Fearn, 1986)



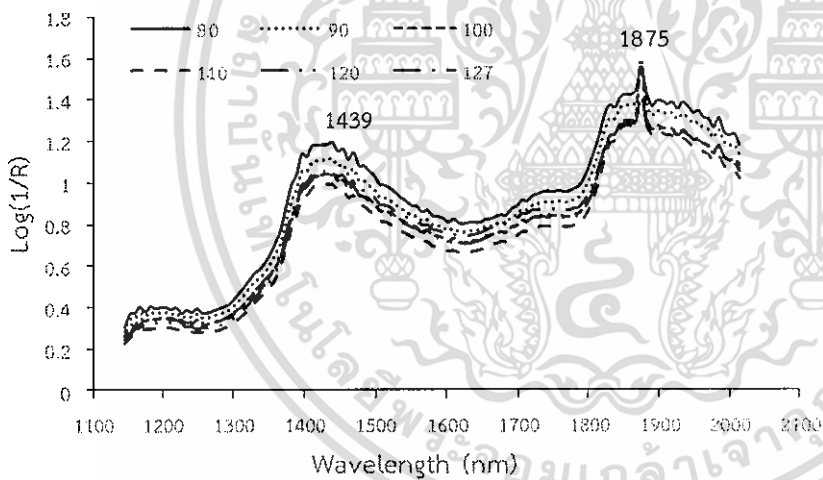
ภาพที่ 4.10 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณก้นที่ทำการวัด ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในสวนทุเรียนที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน



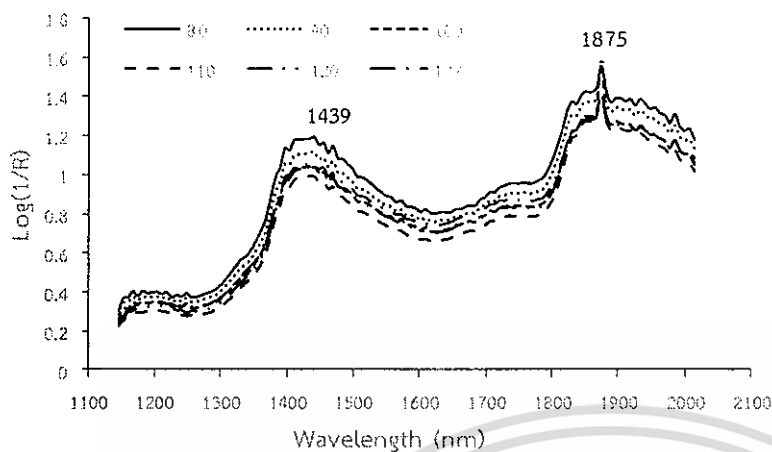
ภาพที่ 4.11 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณก้นที่ทำการวัด ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน



ภาพที่ 4.12 สเปกตรัมเฉลี่ยของเปลือกทุเรียนที่บริเวณกันที่ทำการวัด ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน



ภาพที่ 4.13 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพู ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน



ภาพที่ 4.14 สเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างเนื้อทุเรียนที่บริเวณพื้นที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน

#### 4.3 ข้อมูลทางสถิติเพื่อสร้างแบบจำลอง

ค่าทางสถิติของที่ใช้สร้างแบบจำลองทำนายโดยใช้วิธี Partial Least Squares Regression โดยแสดงจำนวนตัวอย่าง (N) ค่าเฉลี่ย (mean) ค่าสูงสุด (max) ค่าต่ำสุด (min) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลทางสถิติที่ใช้สร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม OPUS และโปรแกรม unscrambler X

	Calibration set					Prediction set					Validation set				
	No.	Max	Min	Mean	SD	No.	Max	Min	Mean	SD	No.	Max	Min	Mean	SD
DM (%)	74.5	56.18	8.96	29.34	11.33	74.5	45.30	9.01	28.58	11.11	120	42.24	8.38	29.32	11.40
SSC (%)	75	13.10	3.00	5.98	2.82	74	12.50	3.00	5.70	2.35	120	11.50	3.60	5.96	1.74
L*	75	90.39	75.10	85.58	3.01	74	89.88	76.49	85.65	2.81	120	76.72	50.79	56.03	3.17
a*	75	3.56	-1.22	0.47	1.02	74	3.00	-1.20	0.47	1.11	120	1.71	-0.42	0.43	0.58
b*	74	49.33	11.35	32.99	8.07	75	47.40	13.78	33.31	8.08	120	29.12	7.62	19.35	5.61
AF	75	14.73	0.09	3.75	4.04	74	12.33	0.18	3.23	3.25	120	14.39	0.25	4.36	3.98
APF	74	34.69	0.34	11.33	10.39	75	33.60	0.75	11.48	10.23	120	41.13	0.70	15.65	12.33
PE	74	219.71	0.02	60.59	67.34	75	205.74	0.04	55.70	62.04	120	228.22	0.00	72.19	71.02
RF	75	42.13	0.15	14.66	12.67	74	37.03	1.14	14.32	11.93	120	48.15	1.35	19.11	14.38
T	75	198.15	0.16	36.06	36.34	74	187.32	3.81	37.82	34.88	120	250.14	3.35	57.75	59.94

#### 4.4 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ ผลการทำนายของแบบจำลอง PLS

4.4.1 แบบจำลองเชิงปริมาณ เพื่อทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ และเนื้อสัมผัส โดยใช้สเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.6 ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งที่ละลายได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณพู สแกนด้วย FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Parameter	Pre-processing	Wavenumber Range (cm <sup>-1</sup> )	PLS - Factor	Calibration		Prediction			
				R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
L*	no spectral data preprocessing	9403.8-7498.3	2	0.52	2.96	0.11	2.65	1.06	0.07
a*	constant offset elimination	9403.8-7498.3	2	0.15	0.95	0.30	0.93	1.20	0.01
b*	first derivative+vector normalization	5778-5446.3	4	0.57	5.39	0.65	4.77	1.72	0.83
DM	first derivative+MSC	9403.8-7498.3 6102-5446.3 4605.4-4242.9	7	0.92	3.28	0.88	3.87	2.90	-0.55
SSC	no spectral data preprocessing	9403.8-7498.3 6102-5446.3 4605.4-4242.9	5	0.49	2.05	0.33	1.92	1.25	-0.43
AF	first derivative+MSC	9403.8-7498.3 6102-4597.7	5	0.50	2.72	0.59	2.09	1.58	-0.40
APF	vector normalization (SNV)	9403.8-5446.3	9	0.83	4.46	0.67	5.90	1.74	0.36
PE	first derivative+MSC	9403.8-7498.3 5454-4242.9	6	0.59	4.46	0.61	39.00	1.60	-4.62
RF	vector normalization (SNV)	9403.8-5446.3	9	0.82	5.56	0.70	6.58	1.82	0.39
T	no spectral data preprocessing	4605.4-4242.9	4	0.50	26.00	0.40	27.20	1.29	2.74

ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งที่ละลายได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณพู สแกนด้วย FT-NIR Spectrometer แสดงดังตารางที่ 4.6 แบบจำลองที่มีค่า R<sup>2</sup> สูงของการทำนาย คือ DM โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ first derivative + MSC มีค่า R<sup>2</sup> ของแบบจำลองเท่ากับ 0.92, RMSEE เท่ากับ 3.28 % ส่วนการทำนายให้ค่า r<sup>2</sup> เท่ากับ 0.88, RMSEP เท่ากับ 3.87 %, RPD เท่ากับ 2.90 และ bias เท่ากับ -0.55 % และค่า RF โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ vector normalization (SNV) มีค่า R<sup>2</sup> ของแบบจำลองเท่ากับ 0.82, RMSEE เท่ากับ 5.56 % ส่วนการทำนายให้ค่า r<sup>2</sup> เท่ากับ 0.70, RMSEP เท่ากับ 6.58%, RPD เท่ากับ 1.82 และ bias เท่ากับ 0.39 % โดยค่า R<sup>2</sup> อยู่ระหว่าง 0.83-0.90 ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 2.4-3.0 การประยุกต์ใช้ สามารถคัดเลือกแบ่งกลุ่มแบบหยาบๆ และ อยู่ระหว่าง 0.0-2.3 ไม่แนะนำให้ประยุกต์ใช้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.7 ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณกัน สแกนด้วย FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Parameter	Pre-processing	Wavenumber Range (cm <sup>-1</sup> )	PLS - Factor	Calibration		Prediction			
				R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
L*	vector normalization (SNV)	8454.9-7498.3	1	0.003	3.020	0.003	2.810	1.000	0.064
a*	min-max normalization	5454-4517.7	1	0.06	1.00	0.10	1.06	1.05	0.00
b*	first derivative+vector normalization (SNV)	6102-4597.7	7	0.48	5.96	0.36	6.45	1.26	0.50
DM	first derivative+MSC	9403.8-5446.3	4	0.53	7.98	0.55	7.45	1.49	-0.86
SSC	second derivative	7506-6796.3	4	0.28	2.44	0.31	1.94	1.23	-0.34
AF	second derivative	7506-5446.3	3	0.13	3.82	0.39	3.01	1.10	-0.62
APF	first derivative+MSC	4605.4-4242.9	1	0.07	10.10	0.03	10.10	1.02	-0.01
PE	second derivative	9403.8-8447.2 5778-5446.3	4	0.23	60.30	0.16	56.80	1.10	-7.07
RF	no spectral data preprocessing	7506-5446.3	2	0.18	11.60	0.08	11.50	1.04	-0.53
T	straight line subtraction	4605.4-4242.9	6	0.19	33.50	0.19	31.40	1.11	-2.03

ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณกัน สแกนด้วย FT-NIR Spectrometer แสดงดังตารางที่ 4.7 แบบจำลองที่มีค่า R<sup>2</sup> สูงสุดของการทำนาย คือ DM โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ first derivative + MSC มีค่า R<sup>2</sup> ของแบบจำลองเท่ากับ 0.53, RMSEE เท่ากับ 7.98 % ส่วนการทำนายให้ค่า r<sup>2</sup> เท่ากับ 0.55, RMSEP เท่ากับ 7.45 %, RPD เท่ากับ 1.49 และ bias เท่ากับ -0.86 % โดยให้ค่า R<sup>2</sup> ระหว่าง 0.50-0.64 แสดงว่าแบบจำลองเป็นไปได้สำหรับการคัดเลือกอย่างหยาบๆ (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 0.0-2.3 ไม่แนะนำให้ประยุกต์ใช้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.8 ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียน สแกนด้วย FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Parameter	Pre-processing	Wavenumber Range (cm <sup>-1</sup> )	PLS - Factor	Calibration		Prediction			
				R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
a*	constant offset elimination	9403.8-7498.3	2	0.52	2.96	0.11	2.65	1.06	0.07
b*	no spectral data preprocessing	9403.8-7498.3	2	0.16	0.95	0.30	0.93	1.20	0.01
b*	first derivative+vector normalization (SNV)	5778-5446.3	4	0.57	5.39	0.65	4.77	1.72	0.83
DM	First derivatives + MSC	8454.9-7498.3 6102-5446.3 4605.4-4242.9	8	0.90	3.62	0.89	3.60	3.27	-0.98
SSC	First derivatives +vector normalization (SNV)	6102-5770.3	3	0.43	2.08	0.55	1.63	1.51	-0.22
AF	first derivative+vector normalization (SNV)	9403.8-7498.3	3	0.57	2.46	0.58	2.37	1.56	0.40
APF	straight line subtraction	9403.8 6094.3	10	0.77	5.03	0.73	5.53	1.95	1.00
PE	first derivative+MSC	7506-5446.3 4605.4-4242.9	6	0.57	43.30	0.58	42.60	1.54	-1.24
RF	min-max normalization	9403.8-7498.3 6102-5446.3 4605.4-4242.9	9	0.78	6.06	0.74	6.15	1.96	0.07
T	multiplicative scattering correction	9403.8-7498.3 4605.4-4242.9	2	0.35	30.10	0.43	25.80	1.33	0.54

ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียน สแกนด้วย FT-NIR Spectrometer แสดงดังตารางที่ 4.8 แบบจำลองที่มีค่า R<sup>2</sup> สูงสุดของการทำนาย คือ DM โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ first derivative + MSC มีค่า R<sup>2</sup> ของแบบจำลองเท่ากับ 0.90, RMSEE เท่ากับ 3.62% ส่วนการทำนายให้ค่า r<sup>2</sup> เท่ากับ 0.89, RMSEP เท่ากับ 3.60%, RPD เท่ากับ 3.27 และ bias เท่ากับ -0.98% และเนื้อสัมผัสที่ดีที่สุดคือ RF โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ min-max normalization มีค่า R<sup>2</sup> ของแบบจำลองเท่ากับ 0.78, RMSEE เท่ากับ 6.06% ส่วนการทำนายให้ค่า r<sup>2</sup> เท่ากับ 0.74, RMSEP เท่ากับ 6.15%, RPD เท่ากับ 1.96 และ bias เท่ากับ 0.07% โดยค่า R<sup>2</sup> อยู่ระหว่าง 0.83-0.90 และ 0.66-0.81 ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย และใช้สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบๆ (Williams, 2007) RPD อยู่ระหว่าง 1.3-4.9 และ 0.0-2.3 การประยุกต์ใช้ สามารถคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) ได้ และ ไม่แนะนำให้ประยุกต์ใช้ (Williams, 2007) ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) ได้ผลที่ไม่ดีเพราะขั้นตอนการทดลองวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้มีขั้นตอนที่ซับซ้อนมีความคลาดเคลื่อนได้ง่าย

ตารางที่ 4.9 ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Parameter	Pre-processing	Wavenumber Range (cm <sup>-1</sup> )	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
				R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
L*	no spectral data preprocessing	9403.8-7498.3	2	0.12	2.85	0.14	2.61	1.08	0.09
a*	no spectral data preprocessing	4605.4-4242.9	9	0.28	0.90	0.36	0.89	1.27	-0.14
b*	vector normalization (SNV)	8454.9-7498.3 6102-5446.3	2	0.51	5.68	0.54	5.49	1.48	0.50
DM	multiplicative scattering correction	9403.8-5446.3	6	0.86	4.32	0.83	4.60	2.42	-0.22
SSC	second derivative	9403.8-5446.3	5	0.35	2.33	0.36	1.88	1.26	-0.28
AF	no spectral data preprocessing	8454.9-7498.3 4605.4-4242.9	4	0.38	3.24	0.56	2.16	1.51	0.07
APF	first derivatives	9403.8-5446.8 4605.4-4242.9	5	0.54	7.17	0.49	7.28	1.43	1.31
PE	straight line subtraction	7506-4597.7	4	0.44	51.50	0.48	44.60	1.39	3.58
Rf	straight line subtraction	7506-4597.7	3	0.48	9.30	0.54	8.06	1.50	1.19
T	second derivative	9403.8-7498.3 4605.4-4242.9	5	0.28	31.60	0.39	27.30	1.29	2.61

ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย FT-NIR Spectrometer แสดงดังตารางที่ 4.9 แบบจำลองที่มีค่า R<sup>2</sup> สูงสุดของการทำนาย คือ DM โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ first derivative + MSC มีค่า R<sup>2</sup> ของแบบจำลองเท่ากับ 0.86, RMSEE เท่ากับ 4.32% ส่วนการทำนายให้ค่า r<sup>2</sup> เท่ากับ 0.83, RMSEP เท่ากับ 4.60%, RPD เท่ากับ 2.42 และ bias เท่ากับ -0.22% โดยค่า R<sup>2</sup> อยู่ระหว่าง 0.83-0.90 ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 2.4-3.0 การประยุกต์ใช้ คัดเลือกแบ่งกลุ่มแบบหยาบๆ (Williams, 2007)

4.4.2 แบบจำลองเชิงปริมาณ เพื่อทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส โดยใช้สเปกตรัมที่ได้จาก Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.10 ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนที่บริเวณพู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
L*	2	0.06	2.86	NA	2.97	2.98	-0.25
a*	11	0.41	0.82	NA	1.14	1.15	0.04
b*	11	0.53	5.61	0.47	5.75	6.06	1.02
DM	20	0.83	4.65	0.44	8.26	8.63	1.32
SSC	9	0.24	2.26	0.29	2.21	2.20	-0.26
AF	5	0.16	3.35	NA	3.85	3.85	-0.44
APF	15	0.49	7.36	NA	11.37	11.54	0.81
PE	12	0.39	50.64	NA	66.50	66.91	-2.62
RF	14	0.50	8.67	0.18	11.18	11.31	0.61
T	12	0.32	28.85	NA	38.32	38.61	0.85

ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนที่บริเวณพู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทำนายค่าสี (L\*, a\* และ b\*) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และเนื้อสัมผัส (AF, APF, PE, RF และ T) จะเห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายพารามิเตอร์ต่างๆได้

ตารางที่ 4.11 ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนที่บริเวณกัน สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
L*	1	0.00	2.94	NA	2.84	2.86	-0.15
a*	4	0.16	0.97	0.08	1.03	1.04	-0.06
b*	4	0.25	7.05	0.38	6.18	6.16	-0.87
DM	5	0.37	8.94	0.29	9.29	9.35	-0.28
SSC	5	0.22	2.30	0.27	2.23	2.24	-0.04
AF	4	0.19	3.30	0.03	3.65	3.68	-0.02
APF	4	0.23	9.02	0.02	10.29	10.11	-2.25
PE	4	0.23	9.02	0.02	10.29	10.11	-2.25
RF	5	0.23	10.78	0.19	11.15	11.22	0.01
T	8	0.28	29.63	NA	39.97	40.33	1.49

ผลการทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนที่บริเวณกัน สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทำนายค่า สี (L\*, a\* และ b\*) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และเนื้อสัมผัส (AF, APF, PE, RF และ T) จะเห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายพารามิเตอร์ต่างๆได้

ตารางที่ 4.12 ผลการทำนายค่า สี L\* และ a\* ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS - Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	R <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
L*	2	0.07	2.84	0.06	2.73	2.74	-0.219
a*	4	0.27	0.91	0.19	0.97	0.97	-0.051

ผลการทำนายค่า สี  $L^*$  และ  $a^*$  ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่ฟู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.12 แสดงผลการทำนายของค่า สี ( $L^*$  และ  $a^*$ ) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าสี ( $L^*$  และ  $a^*$ ) ได้

ตารางที่ 4.13 ผลการทำนายค่า สี  $b^*$  ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่ฟู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		$R^2$	RMSEE	$r^2$	RMSEP	RPD	Bias
Raw	4	0.50	5.74	0.58	5.08	5.12	0.09
Mean	3	0.49	5.81	0.59	5.02	5.06	-0.01
Max	3	0.47	5.93	0.58	5.08	5.11	0.02
Range	5	0.47	5.92	0.62	4.85	4.88	0.06
1st5pts	3	0.52	5.64	0.60	4.97	5.00	-0.19
1st11pts	3	0.50	5.77	0.61	4.93	4.96	-0.04
1st21pts	3	0.50	5.79	0.61	4.91	4.94	0.03
2nd5pts	1	0.08	7.81	NA	7.96	8.00	-0.48
2nd11pts	6	0.51	5.69	0.42	6.00	6.01	-0.56
2nd21pts	3	0.40	6.13	0.42	5.99	6.03	-0.13
Baseline	3	0.51	5.69	0.62	4.86	4.91	0.19
SNV	2	0.37	6.47	0.55	5.27	5.31	0.01
SNV+Det	6	0.43	6.17	0.44	5.86	5.90	-0.22
Detrend	4	0.41	6.26	0.44	5.89	5.92	-0.23
MSC	1	0.30	6.81	0.49	5.62	5.70	0.38

ผลการทำนายค่า สี  $b^*$  ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่ฟู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.13 แบบจำลองที่มีค่า  $R^2$  สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ range-normalization มีค่า  $R^2$  ของแบบจำลองเท่ากับ 0.47, RMSEE เท่ากับ 5.92 % ส่วนการทำนายให้ค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.62, RMSEP เท่ากับ 4.87 %, RPD เท่ากับ 4.88 และ

bias เท่ากับ 0.06 % โดยให้ค่า  $R^2$  ระหว่าง 0.50-0.64 แสดงว่าแบบจำลองเป็นไปได้สำหรับการคัดเลือกอย่างหายาก (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 3.1-4.9. การประยุกต์ใช้คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) ได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.14 ผลการทำนายค่า ปริมาณมวลแห้ง (DM) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่ทุ สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		$R^2$	RMSEE	$r^2$	RMSEP	RPD	Bias
Raw	4	0.75	5.59	0.75	5.51	6.18	1.57
Mean	4	0.74	5.71	0.76	5.37	5.73	1.08
Max	3	0.72	5.98	0.74	5.63	6.22	1.47
Range	3	0.65	6.70	0.64	6.59	7.03	1.35
1st5pts	3	0.78	5.33	0.70	6.08	6.36	0.98
1st11pts	3	0.77	5.46	0.72	5.80	6.17	1.14
1st21pts	3	0.76	5.50	0.73	5.71	6.17	1.28
2nd5pts	3	0.26	9.70	NA	11.10	11.14	-0.88
2nd11pts	6	0.72	5.97	0.46	8.11	8.15	-0.47
2nd21pts	7	0.76	5.55	0.67	6.36	6.56	0.81
Baseline	3	0.76	5.56	0.75	5.56	6.06	1.33
SNV	2	0.61	7.03	0.63	6.68	7.44	1.82
SNV+Det	8	0.71	6.04	0.60	7.00	7.12	0.57
Detrend	5	0.65	6.67	0.47	8.02	8.04	-0.68
MSC	2	0.59	7.25	0.57	7.23	7.92	1.81

ผลการทำนายค่า ปริมาณมวลแห้ง (DM) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่ทุ สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.14 แบบจำลองที่มีค่า  $R^2$  สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ Baseline มีค่า  $R^2$  ของแบบจำลองเท่ากับ 0.76, RMSEE เท่ากับ 5.56 % ส่วนการทำนายให้ค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.75, RMSEP เท่ากับ 5.56 %, RPD เท่ากับ 6.06 และ

bias เท่ากับ 1.33 % โดยให้ค่า  $R^2$  ระหว่าง 0.66-0.81 แสดงว่าแบบจำลองเป็นไปได้สำหรับการคัดเลือกและการประมาณค่าอย่างหยาบๆ (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 5.0-6.4 การประยุกต์ใช้ ใช้ควบคุมคุณภาพได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.15 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		$R^2$	RMSEE	$r^2$	RMSEP	RPD	Bias
Raw	3	0.34	2.12	0.44	1.96	1.97	-0.18
Mean	3	0.36	2.08	0.43	1.97	1.98	-0.15
Max	4	0.37	2.06	0.45	1.95	1.96	-0.09
Range	4	0.34	2.10	0.41	2.00	2.02	-0.04
1st5pts	3	0.45	1.93	0.37	2.08	2.10	0.10
1st11pts	3	0.42	1.98	0.44	1.96	1.98	0.05
1st21pts	3	0.40	2.01	0.47	1.91	1.92	0.02
2nd5pts	1	0.08	2.49	NA	2.69	2.71	-0.03
2nd11pts	6	0.50	1.83	0.25	2.26	2.29	0.09
2nd21pts	4	0.44	1.95	0.31	2.17	2.21	0.16
Baseline	3	0.36	2.07	0.47	1.90	1.91	-0.07
SNV	2	0.29	2.19	0.40	2.02	2.03	-0.13
SNV+Det	6	0.40	2.01	0.35	2.10	2.12	0.08
Detrend	6	0.43	1.95	0.38	2.07	2.09	0.07
MSC	3	0.30	2.17	0.37	2.08	2.09	-0.04

ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่

4.15 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) ได้

ตารางที่ 4.16 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (AF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่ฟู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
Raw	4	0.61	2.30	0.32	3.07	0.24	0.56
Mean	4	0.58	2.37	0.08	3.56	3.92	0.91
Max	4	0.59	2.35	0.12	3.48	3.67	0.63
Range	4	0.57	2.40	0.09	3.54	3.66	0.48
1st5pts	3	0.63	2.23	0.00	3.71	3.93	0.70
1st11pts	3	0.61	2.28	0.07	3.58	3.80	0.70
1st21pts	3	0.60	2.31	0.10	3.52	3.74	0.70
2nd5pts	1	0.16	3.37	NA	3.83	3.86	0.09
2nd11pts	7	0.69	2.05	NA	4.17	4.32	0.59
2nd21pts	5	0.63	2.22	NA	3.87	4.13	0.77
Baseline	5	0.60	2.31	0.09	3.54	3.76	0.68
SNV	5	0.61	2.29	0.09	3.55	3.82	0.78
SNV+Det	4	0.56	2.43	0.08	3.57	3.72	0.57
Detrend	4	0.59	2.33	NA	3.78	4.07	0.83
MSC	3	0.53	2.51	0.07	3.57	3.77	0.65

ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (AF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่ฟู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.16 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (AF) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าเนื้อสัมผัส (AF) ได้

ตารางที่ 4.17 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (APF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
Raw	2	0.65	6.70	0.64	6.25	6.46	0.82
Mean	3	0.54	7.00	0.47	7.56	7.64	0.37
Max	4	0.60	6.53	0.55	6.95	7.01	0.18
Range	4	0.57	6.75	0.61	6.52	6.00	0.41
1st5pts	3	0.63	6.23	0.53	7.12	7.17	-0.32
1st11pts	3	0.60	6.46	0.58	6.73	6.77	-0.27
1st21pts	3	0.59	6.58	0.58	6.72	6.76	-0.25
2nd5pts	1	0.15	9.47	NA	11.11	11.18	-0.54
2nd11pts	14	0.77	4.96	0.20	9.34	9.46	0.59
2nd21pts	5	0.63	6.25	0.53	7.13	7.18	0.06
Baseline	6	0.62	6.30	0.58	6.78	6.81	-0.50
SNV	3	0.52	7.09	0.50	7.34	7.39	0.11
SNV+Det	7	0.63	6.27	0.56	6.91	6.99	0.40
Detrend	4	0.55	6.90	0.57	6.86	6.90	0.06
MSC	3	0.52	7.13	0.50	7.37	7.43	0.25

ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (APF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.17 แบบจำลองที่มีค่า R<sup>2</sup> สูงสุดของการทำนาย มีค่า R<sup>2</sup> ของแบบจำลองเท่ากับ 0.65, RMSEE เท่ากับ 6.70 % ส่วนการทำนายให้ค่า r<sup>2</sup> เท่ากับ 0.64, RMSEP เท่ากับ 6.25 %, RPD เท่ากับ 6.46 และ bias เท่ากับ 0.82 % โดยให้ค่า R<sup>2</sup> ระหว่าง 0.50–0.64 แสดงว่าแบบจำลองเป็นไปได้สำหรับการคัดเลือกอย่างหยาบๆ (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 5.0–6.4 การประยุกต์ใช้ ใช้ควบคุมคุณภาพได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.18 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (PE) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
Raw	4	0.61	40.65	0.41	49.87	51.86	7.44
Mean	5	0.52	44.58	0.31	53.99	54.60	2.91
Max	5	0.55	43.52	0.37	51.54	53.00	6.18
Range	4	0.50	45.61	0.41	50.17	52.41	8.02
1st5pts	3	0.58	42.16	0.37	51.66	53.41	6.97
1st11pts	3	0.54	44.05	0.40	50.41	52.23	7.08
1st21pts	4	0.55	43.62	0.31	53.85	55.58	7.03
2nd5pts	1	0.15	59.63	NA	67.87	68.08	-5.87
2nd11pts	6	0.63	39.55	0.23	57.25	62.03	13.14
2nd21pts	4	0.55	43.19	0.33	53.38	55.50	7.94
Baseline	6	0.56	42.79	0.39	50.68	52.15	6.17
SNV	5	0.54	43.87	0.33	53.36	55.04	6.87
SNV+Det	4	0.49	46.16	0.33	53.30	53.96	3.24
Detrend	4	0.50	45.58	0.37	51.28	52.28	3.95
MSC	3	0.45	48.09	0.37	51.57	52.91	5.82

ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (PE) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.18 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (PE) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าเนื้อสัมผัส (PE) ได้

ตารางที่ 4.19 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (RF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
Raw	3	0.67	7.10	0.48	8.89	6.68	-2.17
Mean	5	0.60	7.76	0.49	8.81	8.86	-0.37
Max	4	0.57	8.02	0.53	8.45	8.50	-0.07
Range	6	0.61	7.72	0.72	10.53	10.52	-1.33
1st5pts	3	0.67	7.10	0.43	9.34	9.29	-1.39
1st11pts	3	0.64	7.42	0.54	8.35	8.35	-0.93
1st21pts	3	0.61	7.63	0.54	8.35	8.34	-1.04
2nd5pts	1	0.15	11.34	NA	13.36	13.57	-2.05
2nd11pts	6	0.65	7.25	0.33	10.13	10.17	-0.77
2nd21pts	5	0.62	7.55	0.58	8.00	8.03	-0.63
Baseline	6	0.63	7.43	0.50	8.77	8.74	-1.28
SNV	4	0.62	7.56	NA	14.98	14.82	-2.79
SNV+Det	8	0.64	7.36	0.22	10.88	10.91	-0.95
Detrend	8	0.67	7.03	0.42	9.43	9.37	-1.54
MSC	4	0.57	8.10	0.23	10.88	10.92	-0.86

ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (RF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.19 แบบจำลองที่มีค่า R<sup>2</sup> สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ range-normalization มีค่า R<sup>2</sup> ของแบบจำลองเท่ากับ 0.61, RMSEE เท่ากับ 7.72 % ส่วนการทำนายให้ค่า r<sup>2</sup> เท่ากับ 0.72, RMSEP เท่ากับ 10.53%, RPD เท่ากับ 10.52 และ bias เท่ากับ -1.33 % โดยให้ค่า R<sup>2</sup> ระหว่าง 0.66–0.81 แสดงว่าแบบจำลองเป็นไปได้สำหรับการคัดเลือกและการประมาณค่าอย่างหยาบๆ (Williams, 2007) และ RPD อยู่ที่ 8.1+ แสดงว่าแบบจำลองใช้ได้ทุกการประยุกต์ใช้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.20 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	R <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
Raw	3	0.43	26.30	0.39	29.67	29.57	-4.17
Mean	2	0.33	28.47	0.36	30.24	30.05	-4.87
Max	3	0.36	27.82	0.38	29.79	29.55	-5.06

ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย shortwave VIS-NIR diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.20 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (T) จะเห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าเนื้อสัมผัส (T) ได้

ตารางที่ 4.21 ผลการทำนายค่า สี L\* a\* และ b\* ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พูที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
L*	2	0.09	2.81	0.11	2.66	2.69	0.084
a*	3	0.24	0.93	0.21	0.96	0.96	-0.003
b*	5	0.59	5.19	0.55	5.29	5.66	1.09

ผลการทำนายค่า สี L\* a\* และ b\* ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พูที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.21 แสดงผลการทำนายของค่าสี (L\*, a\* และ b\*) จะเห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าสี (L\*, a\* และ b\*) ได้

ตารางที่ 4.22 ผลการทำนายค่าปริมาณมวลแห้งด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู่ที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
Raw	4	0.80	5.05	0.83	4.53	4.65	0.52
Mean	3	0.82	4.85	0.85	4.26	4.35	0.38
Max	3	0.81	4.93	0.84	4.40	4.48	0.38
Range	6	0.83	4.56	0.87	4.02	4.12	0.44
1st5pts	3	0.81	4.87	0.84	4.48	4.64	0.64
1st11pts	3	0.81	4.91	0.84	4.43	4.58	0.60
1st21pts	3	0.81	4.94	0.84	4.41	4.57	0.62
2nd5pts	18	0.86	4.19	0.56	7.33	7.38	-0.19
2nd11pts	7	0.81	4.94	0.77	5.26	5.28	-0.41
2nd21pts	7	0.83	4.59	0.73	5.95	5.90	0.81
Baseline	3	0.80	5.07	0.82	4.68	4.77	0.40
SNV	4	0.81	4.96	0.82	4.66	4.76	0.48
SNV+Det	10	0.85	4.43	0.80	4.93	5.10	0.65
Detrend	8	0.82	4.78	0.75	5.52	5.69	0.70
MSC	4	0.79	5.13	0.84	4.46	4.52	0.32

ผลการทำนายค่าปริมาณมวลแห้งด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู่ที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกสแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer จากตารางที่ 4.22 แบบจำลองที่มีค่า R<sup>2</sup> สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ range-normalization มีค่า R<sup>2</sup> ของแบบจำลองเท่ากับ 0.83, RMSEE เท่ากับ 4.56 % ส่วนการทำนายให้ค่า r<sup>2</sup> เท่ากับ 0.87, RMSEP เท่ากับ 4.02%, RPD เท่ากับ 4.12 และ bias เท่ากับ -0.44 % โดยให้ค่า R<sup>2</sup> ระหว่าง 0.83-0.90 แสดงว่าแบบจำลองใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 3.1-4.9 ใช้คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) ได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.23 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
Raw	2	0.36	2.05	0.45	1.94	1.95	-0.03
Mean	2	0.39	2.03	0.45	1.94	1.95	-0.04
Max	2	0.39	2.03	0.46	1.93	1.94	-0.02
Range	3	0.40	2.01	0.44	1.96	1.97	0.04
1st5pts	2	0.45	1.92	0.47	1.90	1.91	-0.12
1st11pts	2	0.42	1.98	0.45	1.95	1.96	-0.07
1st21pts	3	0.43	1.96	0.48	1.88	1.90	0.03
2nd5pts	1	0.11	2.45	0.05	2.55	2.55	-0.31
2nd11pts	9	0.63	1.57	0.50	1.85	1.86	-0.16
2nd21pts	4	0.49	1.85	0.40	2.02	2.03	-0.02
Baseline	3	0.42	1.98	0.44	2.00	1.97	0.02
SNV	2	0.40	2.00	0.45	1.94	1.95	0.04
SNV+Det	5	0.45	1.93	0.45	1.94	1.96	0.03
Detrend	4	0.41	2.00	0.38	2.06	2.07	0.02
MSC	2	0.40	2.01	0.45	1.94	1.96	0.03

ผลการทำนายค่าค่า ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.23 ผลการทำนายของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (SSC) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (SSC) ได้

ตารางที่ 4.24 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (AF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู่ที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
Raw	3	0.67	2.11	0.44	2.77	2.79	0.04
Mean	2	0.58	2.38	0.32	3.05	3.08	-0.03
Max	2	0.62	2.26	0.33	3.03	3.05	-0.03
Range	3	0.63	2.22	0.37	2.95	2.96	-0.11
1st5pts	2	0.59	2.33	0.24	3.24	3.24	-0.41
1st11pts	3	0.61	2.28	0.33	3.04	3.06	-0.14
1st21pts	3	0.61	2.29	0.33	3.03	3.05	-0.16
2nd5pts	3	0.38	2.89	0.00	3.71	3.67	-0.66
2nd11pts	4	0.60	2.33	0.14	3.44	3.45	-0.31
2nd21pts	4	0.62	2.27	0.31	3.07	3.10	-0.05
Baseline	4	0.61	2.30	0.28	3.15	3.17	-0.13
SNV	3	0.62	2.27	0.36	2.97	2.99	-0.05
SNV+Det	4	0.62	2.27	0.33	3.05	3.07	-0.11
Detrend	4	0.61	2.29	0.33	3.05	3.07	-0.13
MSC	3	0.62	2.27	0.36	2.98	3.00	-0.05

ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (AF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู่ที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.24 แสดงผลการทำนายของค่าเนื้อสัมผัส (AF) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าเนื้อสัมผัส (AF) ได้

ตารางที่ 4.25 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (APF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู่ที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	R <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
Raw	2	0.63	5.79	0.71	5.61	5.60	-0.72
Mean	2	0.58	6.64	0.65	6.20	6.24	-0.06
Max	4	0.69	5.72	0.72	5.48	5.47	-0.70
Range	4	0.69	5.69	0.72	5.54	5.54	-0.62
1st5pts	3	0.72	5.47	0.53	7.13	6.90	-1.94
1st11pts	3	0.69	5.70	0.52	7.18	7.00	-1.81
1st21pts	5	0.72	5.43	0.56	6.91	6.66	-2.00
2nd5pts	3	0.41	7.93	NA	10.46	10.42	-1.51
2nd11pts	11	0.80	4.56	0.57	6.79	6.64	-1.61
2nd21pts	5	0.73	5.35	0.58	6.77	6.59	-1.72
Baseline	8	0.75	5.13	0.52	7.22	6.97	-2.05
SNV	3	0.65	6.04	0.61	6.47	6.40	-1.21
SNV+Det	6	0.71	5.50	0.47	7.58	7.36	-1.98
Detrend	6	0.73	5.37	0.54	7.06	6.89	-1.76
MSC	3	0.65	6.06	0.61	6.49	6.42	-1.20

ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (APF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู่ที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.25 แบบจำลองที่มีค่า R<sup>2</sup> สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ max-normalization มีค่า R<sup>2</sup> ของแบบจำลองเท่ากับ 0.69, RMSEE เท่ากับ 5.72 % ส่วนการทำนายให้ค่า r<sup>2</sup> เท่ากับ 0.72, RMSEP เท่ากับ 5.48%, RPD เท่ากับ 5.47 และ bias เท่ากับ -0.70 % โดยให้ค่า R<sup>2</sup> ระหว่าง 0.66-0.81 แสดงว่าแบบจำลองใช้สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบๆ (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 5.0-6.4 ให้ความคมคุณภาพได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.26 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (PE) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู่ที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
Raw	2	0.64	38.89	0.59	41.72	42.00	-0.66
Mean	4	0.60	41.10	0.49	46.42	46.63	-3.10
Max	5	0.67	37.35	0.42	49.59	49.92	-0.96
Range	4	0.65	38.53	0.47	47.37	47.67	-1.56
1st5pts	3	0.64	38.87	0.52	45.13	45.44	0.49
1st11pts	3	0.59	41.20	0.54	44.17	44.46	-0.83
1st21pts	5	0.64	38.73	0.49	46.49	46.78	-1.59
2nd5pts	1	0.20	57.77	NA	65.86	66.23	-3.35
2nd11pts	8	0.74	32.68	0.14	60.46	60.88	0.24
2nd21pts	6	0.69	35.94	0.37	51.71	52.04	-1.30
Baseline	6	0.63	39.38	0.51	45.45	45.76	-0.22
SNV	5	0.64	38.93	0.46	47.76	48.09	-0.22
SNV+Det	4	0.62	40.03	0.40	50.31	50.65	-0.60
Detrend	4	0.62	40.04	0.45	48.15	48.44	-1.72
MSC	5	0.64	38.95	0.45	48.20	48.52	-0.40

ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (PE) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู่ที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.26 แสดงผลการทำนายของค่าเนื้อสัมผัส (PE) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าเนื้อสัมผัส (PE) ได้

ตารางที่ 4.27 การสร้างแบบจำลองการทำนายเนื้อทุเรียนบริเวณพูที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกกับค่า เนื้อสัมผัส (RF) ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer โดยวิธี Partial Least Square Regression

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
Raw	2	0.72	6.54	0.68	7.04	7.01	-1.06
Mean	4	0.67	7.06	0.64	7.36	7.30	-1.27
Max	5	0.72	6.45	0.63	7.50	7.42	-1.37
Range	4	0.72	6.55	0.64	7.39	7.31	-1.37
1st5pts	3	0.73	6.40	0.61	7.75	7.75	-0.90
1st11pts	3	0.71	6.66	0.60	7.83	7.85	-0.79
1st21pts	3	0.70	6.74	0.59	7.95	7.96	-0.86
2nd5pts	3	0.34	10.01	0.02	12.25	12.28	-1.22
2nd11pts	10	0.80	5.43	0.59	7.92	7.86	-1.34
2nd21pts	5	0.74	6.25	0.58	8.04	8.04	-0.91
Baseline	8	0.75	6.10	0.64	7.42	7.45	-0.48
SNV	5	0.74	6.27	0.42	9.37	9.31	-1.54
SNV+Det	5	0.72	6.49	0.37	9.82	9.76	-1.56
Detrend	6	0.74	6.31	0.58	8.01	8.02	-0.83
MSC	5	0.74	6.27	0.44	9.27	9.22	-1.49

การสร้างแบบจำลองการทำนายเนื้อทุเรียนบริเวณพูที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกกับค่า เนื้อสัมผัส (RF) ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.27 แบบจำลองที่มีค่า R<sup>2</sup> สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ max-normalization มีค่า R<sup>2</sup> ของแบบจำลองเท่ากับ 0.72, RMSEE เท่ากับ 6.54% ส่วนการทำนายให้ค่า r<sup>2</sup> เท่ากับ 0.68, RMSEP เท่ากับ 7.04%, RPD เท่ากับ 7.01 และ bias เท่ากับ -1.06 % โดยให้ค่า R<sup>2</sup> ระหว่าง 0.66-0.81 แสดงว่าแบบจำลองใช้สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบๆ (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 6.5-8.0 ใช้ควบคุมกระบวนการได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.28 การสร้างแบบจำลองการทำนายเนื้อทุเรียนบริเวณพูที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกกับค่า เนื้อสัมผัส (T) ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer โดยวิธี Partial Least Square Regression

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
Raw	3	0.46	25.72	0.24	33.01	32.88	-4.82
Mean	2	0.43	26.24	0.18	34.29	34.23	-4.50
Max	2	0.45	25.97	0.18	34.23	34.18	-4.44
Range	6	0.58	22.66	0.19	34.05	33.69	-6.31
1st5pts	2	0.46	25.53	0.16	34.68	34.53	-5.15
1st11pts	3	0.47	25.35	0.21	33.72	33.61	-4.78
1st21pts	2	0.42	26.47	0.19	34.08	34.01	-4.49
2nd5pts	2	0.37	27.66	NA	37.99	37.85	-5.44
2nd11pts	3	0.47	25.48	0.01	37.73	37.77	-4.08
2nd21pts	3	0.48	25.15	0.15	34.96	34.68	-5.98
Baseline	4	0.47	25.34	0.22	33.42	33.42	-3.93
SNV	5	0.53	23.89	0.09	36.09	35.56	-7.42
SNV+Det	6	0.54	23.70	0.17	35.84	35.42	-6.86
Detrend	6	0.51	24.42	0.11	35.65	35.28	-6.58
MSC	5	0.53	23.78	0.06	36.70	36.14	-7.65

การสร้างแบบจำลองการทำนายเนื้อทุเรียนบริเวณพูที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกกับค่า เนื้อสัมผัส (T) ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.28 แสดงผลการทำนายของค่าเนื้อสัมผัส (T) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าเนื้อสัมผัส (T) ได้

4.4.3 แบบจำลองเชิงปริมาณ เพื่อทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้งและเนื้อสัมผัส โดยใช้สเปกตรัมที่ได้จาก Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.29 ผลการทำนายค่า สี L\* a\* และ b\* ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือทุเรียนบริเวณพูสแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	R <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
L*	1	0.004	2.94	0.07	2.73	2.75	0.05
a*	5	0.26	0.92	NA	1.19	1.21	0.10
b*	13	0.66	4.72	0.31	6.51	6.50	-0.85

ผลการทำนายค่า สี L\* a\* และ b\* ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณพู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.29 แสดงผลการทำนายค่า สี (L\*, a\* และ b\*) จะเห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าสี (L\*, a\* และ b\*) ได้

ตารางที่ 4.30 ผลการทำนายค่า ปริมาณมวลแห้ง (DM) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณพู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
Raw	15	0.73	5.85	0.58	7.12	7.15	-0.49
Mean	14	0.73	5.82	0.57	7.20	7.23	-0.51
Max	13	0.70	6.18	0.51	7.72	7.77	-0.01
Range	13	0.69	6.30	0.50	7.78	7.84	0.03
1st5pts	11	0.69	6.31	0.64	6.63	6.64	-0.66
1st11pts	16	0.68	6.43	0.62	6.81	6.84	-0.51
1st21pts	18	0.69	6.33	0.59	7.08	7.00	-1.31
2nd5pts	9	0.67	6.47	0.52	7.64	7.68	-0.43
2nd11pts	10	0.68	6.40	0.59	7.09	7.07	-0.98
2nd21pts	16	0.70	6.23	0.56	7.33	7.34	-0.68
Baseline	14	0.71	6.05	0.57	7.25	7.29	-0.29
SNV	13	0.68	6.40	0.51	7.75	7.82	0.27
SNV+Det	13	0.70	6.20	0.50	7.82	7.90	0.41
Detrend	13	0.72	5.93	0.54	7.48	7.53	0.05
MSC	12	0.67	6.48	0.51	7.69	7.77	0.37

ผลการทำนายค่า ปริมาณมวลแห้ง (DM) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณพู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.30 แบบจำลองที่มีค่า  $R^2$  สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ 1<sup>st</sup> derivative ที่ 5pts มีค่า  $R^2$  ของแบบจำลอง เท่ากับ 0.69, RMSEE เท่ากับ 6.31% ส่วนการทำนายให้ค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.64, RMSEP เท่ากับ 6.63%, RPD เท่ากับ 6.64 และ bias เท่ากับ -0.66 % โดยให้ค่า  $R^2$  ระหว่าง 0.50–0.64 แสดงว่าแบบจำลองใช้สำหรับการ คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) อย่างหยาบๆ (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 6.5-8.0 ใช้ควบคุมกระบวนการได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.31 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และ ค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RF) และ (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณพู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		$R^2$	RMSEE	$r^2$	RMSEP	RPD	Bias
SSC	13	0.49	1.86	0.34	2.13	2.18	0.24
AF	9	0.24	3.19	NA	3.90	3.89	-0.55
APF	11	0.37	8.14	NA	10.57	10.57	-1.25
PE	11	0.27	55.38	0.11	61.46	61.88	-0.75
RF	10	0.37	9.72	NA	12.97	13.05	-0.41
T	3	0.09	33.23	NA	38.76	39.02	-0.53

ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และ ค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RF) และ (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียนบริเวณพู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.31 แสดงผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และ ค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RF) และ (T) จะเห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และ ค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RF) และ (T) ได้

ตารางที่ 4.32 ผลการทำนายค่า สี ( $L^*$ ) ( $a^*$ ) และ( $b^*$ ) ค่า ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และ ค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RF) และ (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียน บริเวณกัน สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
L*	1	0.02	2.91	NA	2.88	2.90	-0.06
a*	9	0.29	0.90	NA	1.08	1.09	0.05
b*	16	0.68	4.58	0.45	5.82	5.82	-0.66
DM	15	0.69	6.32	0.65	6.54	6.58	-0.31
SSC	16	0.60	1.63	0.37	2.08	2.14	0.25
AF	7	0.18	3.32	NA	3.83	3.83	-0.46
APF	6	0.14	9.55	NA	10.74	10.79	-0.67
PE	10	0.31	53.63	NA	89.59	90.71	5.46
RF	13	0.37	9.79	NA	12.45	12.54	0.01
T	1	0.01	34.74	0.03	37.34	37.56	-1.54

ผลการทำนายค่าสี ( $L^*$ ) ( $a^*$ ) และ( $b^*$ ) ค่า ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และ ค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RF) และ (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเปลือกทุเรียน บริเวณกัน สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.32 ผลการทำนายค่า สี ( $L^*$ ) ( $a^*$ ) และ( $b^*$ ) ค่า ปริมาณมวลแห้ง (DM) ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และ ค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RF) และ (T) จะเห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่า สี ( $L^*$ ) ( $a^*$ ) และ( $b^*$ ) ค่า ปริมาณมวลแห้ง (DM) ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และ ค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RF) และ (T) ได้

ตารางที่ 4.33 ผลการทำนายค่า สี ( $L^*$ ) และ ( $a^*$ ) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		$R^2$	RMSEE	$R^2$	RMSEP	RPD	Bias
$L^*$	5	0.13	2.75	0.02	2.79	2.81	0.019
$a^*$	4	0.27	0.91	0.24	0.94	0.937	-0.091

ผลการทำนายค่า สี ( $L^*$ ) และ ( $a^*$ ) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.33 ผลการทำนายค่า สี ( $L^*$ ) และ ( $a^*$ ) จะเห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่า สี ( $L^*$ ) และ ( $a^*$ ) ได้

ตารางที่ 4.34 ผลการทำนายค่า สี ( $b^*$ ) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		$R^2$	RMSEE	$r^2$	RMSEP	RPD	Bias
Raw	6	0.57	5.31	0.63	4.80	4.94	0.57
Mean	5	0.56	5.42	0.66	4.60	4.63	-0.07
Max	8	0.59	5.24	0.54	5.33	5.35	-0.46
Range	8	0.58	5.25	0.50	5.58	5.59	-0.54
1st5pts	11	0.71	4.35	0.48	5.67	5.73	0.34
1st11pts	8	0.64	4.87	0.54	5.36	5.40	-0.15
1st21pts	9	0.64	4.86	0.57	5.15	5.19	0.52
2nd5pts	12	0.77	3.92	0.17	7.18	7.30	0.58
2nd11pts	13	0.78	3.78	0.28	6.66	7.04	1.23
2nd21pts	8	0.61	5.08	0.63	4.77	4.79	-0.15
Baseline	11	0.66	4.72	0.46	5.80	5.84	-0.02
SNV	8	0.60	5.17	0.54	5.36	5.37	-0.59
SNV+Det	7	0.58	5.26	0.52	5.43	5.42	-0.67
Detrend	10	0.66	4.72	0.55	5.28	5.36	0.40
MSC	7	0.60	5.17	0.53	5.37	5.37	-0.59

ผลการทำนายค่า สี (b\*) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.34 แบบจำลองที่มีค่า  $R^2$  สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ mean-normalization มีค่า  $R^2$  ของแบบจำลองเท่ากับ 0.56, RMSEE เท่ากับ 5.42% ส่วนการทำนายให้ค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.66, RMSEP เท่ากับ 4.60%, RPD เท่ากับ 4.63 และ bias เท่ากับ -0.07% โดยให้ค่า  $R^2$  ระหว่าง 0.66–0.81 แสดงว่าแบบจำลองใช้สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบๆ (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 3.1-4.9 ใช้คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) ได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.35 ผลการทำนายค่าปริมาณมวลแห้ง (DM) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS- Factor	Calibration		Prediction			
		$R^2$	RMSEE	$r^2$	RMSEP	RPD	Bias
Raw	6	0.84	4.50	0.84	4.35	4.38	-0.22
Mean	5	0.85	4.36	0.86	4.15	4.15	-0.47
Max	5	0.82	4.79	0.81	4.87	4.89	-0.38
Range	5	0.82	4.80	0.80	4.91	4.93	-0.38
1st5pts	6	0.86	4.29	0.83	4.52	4.55	-0.17
1st11pts	6	0.85	4.34	0.84	4.48	4.51	-0.24
1st21pts	4	0.83	4.59	0.82	4.68	4.69	-0.47
2nd5pts	6	0.86	4.29	0.82	4.64	4.66	-0.35
2nd11pts	5	0.84	4.54	0.81	4.85	4.88	-0.02
2nd21pts	4	0.84	4.56	0.79	5.03	5.05	-0.39
Baseline	8	0.86	4.20	0.84	4.44	4.47	-0.01
SNV	5	0.84	4.54	0.83	4.59	4.57	-0.64
SNV+Det	4	0.84	4.53	0.82	4.71	4.70	-0.58
Detrend	6	0.85	4.35	0.81	4.83	4.86	-0.19
MSC	7	0.87	4.13	0.85	4.29	4.31	-0.33

ผลการทำนายค่าปริมาณมวลแห้ง (DM) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.35 แบบจำลองที่มีค่า  $R^2$  สูงสุดของการ

ทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ MSC มีค่า  $R^2$  ของแบบจำลองเท่ากับ 0.87, RMSEE เท่ากับ 4.13% ส่วนการทำนายให้ค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.85, RMSEP เท่ากับ 4.29%, RPD เท่ากับ 4.31 และ bias เท่ากับ -0.33 % โดยให้ค่า  $R^2$  ระหว่าง 0.83–0.90 แสดงว่าแบบจำลองใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 3.1-4.9 ใช้คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) ได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.36 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		$R^2$	RMSEE	$r^2$	RMSEP	RPD	Bias
Raw	11	0.59	1.67	0.51	1.84	1.85	-0.11
Mean	9	0.56	1.71	0.51	1.83	1.84	-0.10
Max	10	0.58	1.69	0.54	1.78	1.78	-0.11
Range	10	0.58	1.69	0.54	1.77	1.78	-0.12
1st5pts	9	0.59	1.66	0.49	1.87	1.88	-0.07
1st11pts	9	0.58	1.69	0.45	1.94	1.94	-0.17
1st21pts	8	0.52	1.80	0.52	1.81	1.82	-0.06
2nd5pts	6	0.50	1.84	0.53	1.79	1.80	-0.06
2nd11pts	8	0.56	1.71	0.51	1.84	1.85	-0.01
2nd21pts	8	0.56	1.72	0.47	1.91	1.92	-0.07
Baseline	11	0.59	1.67	0.51	1.83	1.83	-0.12
SNV	9	0.56	1.72	0.49	1.87	1.88	-0.13
SNV+Det	9	0.58	1.67	0.54	1.78	1.79	-0.12
Detrend	9	0.59	1.67	0.52	1.81	1.82	-0.10
MSC	9	0.57	1.70	0.52	1.81	1.82	-0.08

ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer จากตารางที่ 4.36 แสดงผลการ

ทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) จะเห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) ได้

ตารางที่ 4.37 ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RE) และ (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อหุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	r <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
AF	5	0.42	2.79	0.45	2.76	2.81	0.22
APF	5	0.57	6.72	0.53	7.10	7.13	-0.59
PE	5	0.44	48.48	0.41	50.09	52.40	8.14
RE	20	0.76	6.03	0.43	9.34	9.38	-0.57
T	4	0.45	25.74	0.32	31.28	30.47	-7.91

ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RE) และ (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อหุเรียนที่พู สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer จากตารางที่ 4.37 แสดงผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RF) และ (T) จะเห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าเนื้อสัมผัส (AF) (APF) (PE) (RF) และ (T) ได้

ตารางที่ 4.38 ผลการทำนายค่า สี ( $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$ ) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และเนื้อสัมผัส (AF, APF, PE, RF และ T ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู่ที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R <sup>2</sup>	RMSEE	R <sup>2</sup>	RMSEP	RPD	Bias
L*	5	0.20	2.63	NA	2.99	3.01	-0.01
a*	4	0.25	0.92	NA	1.12	1.12	-0.06
b*	8	0.52	5.65	0.19	7.06	7.34	1.06
DM	14	0.71	6.10	0.54	7.52	7.71	0.85
SSC	11	0.39	2.03	2.20	2.34	2.35	-0.03
AF	6	0.43	2.76	0.09	3.54	3.56	-0.09
APF	7	0.41	7.87	0.31	8.65	9.50	2.18
PE	5	0.42	49.30	0.00	64.96	64.90	-7.98
RF	10	0.53	8.47	0.14	11.47	11.78	1.33
T	13	0.48	25.07	0.17	34.56	34.16	-6.53

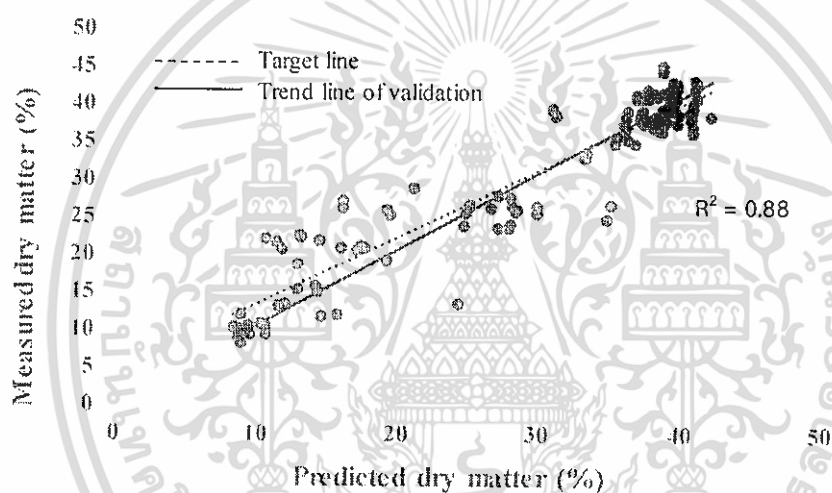
ผลการทำนายค่า สี ( $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$ ) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และเนื้อสัมผัส (AF, APF, PE, RF และ T ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่พู่ที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก สแกนด้วย Longwave linear variable filter spectrometer จากตารางที่ 4.38 แสดงผลการทำนายค่า สี ( $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$ ) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และเนื้อสัมผัส (AF, APF, PE, RF และ T จะเห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าสี ( $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$ ) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SSC) และเนื้อสัมผัส (AF, APF, PE, RF และ T) ได้

#### 4.4.4 การใช้แบบจำลองตัวอย่างแบบดั้งเดิมวิเคราะห์ปริมาณมวลแห้ง (DM) กับตัวอย่างใหม่

การทดลองเพื่อทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนกับตัวอย่างใหม่ โดยใช้วิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ได้เลือกใช้เครื่องที่มีเทคนิคแตกต่างกันคือ 1) FT-NIR Spectrometer 2) shortwave VIS-NIR diode array spectrometer และ 3) Longwave linear variable filter spectrometer สำหรับสแกนเนื้อทุเรียนด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกันคือ ที่เนื้อ และที่เนื้อทุเรียนหุ้มพลาสติก ตารางที่ 4.39 สรุปผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดของแต่ละเทคนิค

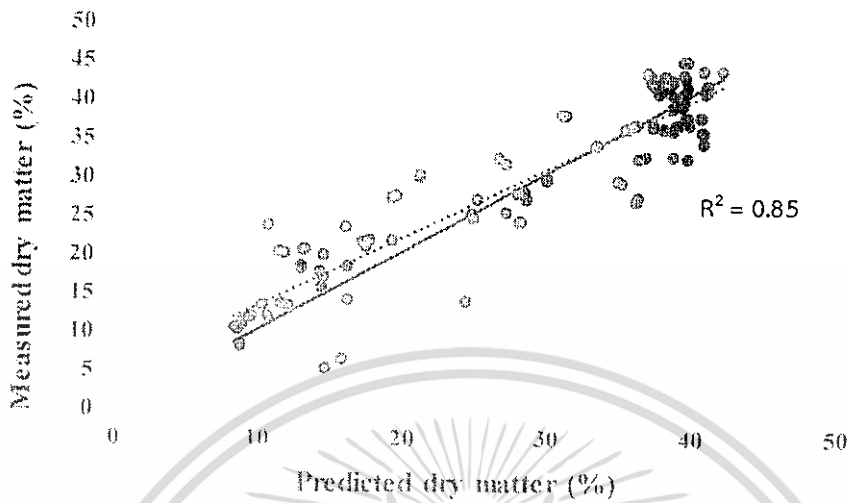
ตารางที่ 4.39 สรุปค่าการวิเคราะห์ปริมาณมวลแห้ง (DM) ของตัวอย่างใหม่โดยใช้แบบจำลองที่ดีที่สุด

Model types	Samples	$r^2$	r	RMSEP (%)	Bias (%)	SEP (%)	RPD
FT-NIR ที่เนื้อ	120	0.88	0.94	4.09	-1.15	3.94	2.90
FT-NIR ที่เนื้อหุเรียนหุ้มพลาสติก	120	0.85	0.92	4.49	-1.05	4.39	2.61
Shortwave ที่เนื้อหุเรียนหุ้มพลาสติก, Range-normalization	120	0.71	0.84	7.36	-1.86	7.15	1.59
Longwave ที่เนื้อ, MSC	120	0.74	0.86	6.98	3.87	9.71	1.17

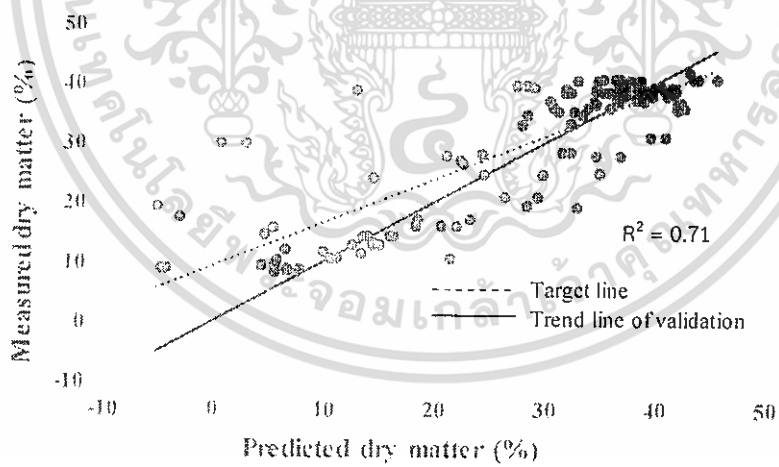


ภาพที่ 4.15 การเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ในเนื้อหุเรียน ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จากเครื่อง FT-NIR Spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่

ภาพที่ 4.15 และ 4.16 แสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ในเนื้อหุเรียนที่ทำนายจากข้อมูลสเปกตรัมที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่ สำหรับเนื้อหุเรียนและเนื้อหุเรียนที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ตามลำดับ จากผลดังกล่าวพบว่า การใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer สแกนที่เนื้อหุเรียนโดยตรงให้ผลดีกว่าสแกนผ่านพลาสติกหุ้ม แต่อย่างไรก็ตามสมรรถนะการทำนายของการสแกนทั้งสองแบบไม่ต่างกัน และสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของยุคที่ใช้งานจริง นอกจากนี้ ผลที่แสดงดังกล่าวยังสอดคล้องกับการศึกษาของ (Williams, 2007) ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ตั้งแต่ 0.83-0.90 สามารถใช้ได้ ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

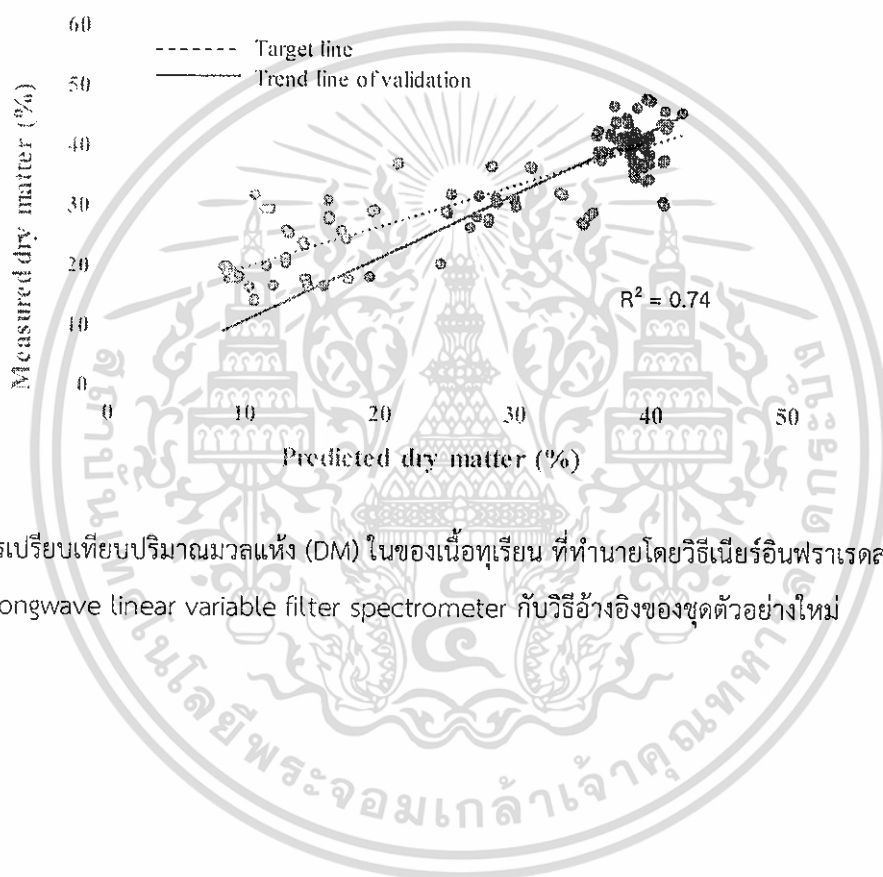


ภาพที่ 4.16 การเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ในของเนื้อุเรียนที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่



ภาพที่ 4.17 การเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ในของเนื้อุเรียนหุ้มพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่

ภาพที่ 4.17 และ 4.18 แสดงผลการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) ในเนื้อทุเรียนโดยใช้เครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer สแกนที่เนื้อทุเรียนหุ้มพลาสติก และ Longwave linear variable filter spectrometer ในการสแกนเนื้อทุเรียนโดยตรง ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้เครื่องทั้งสองชนิดซึ่งเป็นแบบพกพาในการสแกนทุเรียนมีสมรรถนะการทำนายที่ต่ำกว่าเครื่อง FT-NIR Spectrometer อย่างไรก็ตาม จากการรายงานของ Williams (2007) กล่าวว่า ค่า  $R^2$  ตั้งแต่ 0.66-0.81 สามารถประยุกต์ใช้ได้ สำหรับการคัดแยกแบบประมาณ



ภาพที่ 4.18 การเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ในของเนื้อทุเรียน ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่

#### 4.5 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ ผลการทำนายของแบบจำลอง SIMCA และ PLS-DA

ตารางที่ 4.40 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของ Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ที่สแกนบริเวณพูนต้น ด้วยวิธี SIMCA

อายุการเก็บเกี่ยว	ทำนายตัวเองถูก %	ทำนายกลุ่มอื่นถูก %	การทำนายถูกโดยรวม %
80 days	55.0	22.0	27.5
90 days	60.0	71.0	75.0
100 days	20.0	97.0	96.7
110 days	10.0	98.0	98.3
120 days	0.0	92.0	90.0
127 days	20.0	75.0	77.5
การทำนายถูกโดยรวมเฉลี่ย %			77.5

จากตารางที่ 4.40 แสดงผลของการคัดแยกกลุ่มโดย Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ที่สแกนบริเวณพูนต้น ด้วยวิธี SIMCA ที่อายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วัน หลังดอกบาน สามารถทำนายตัวเองถูก 55%, 60%, 20%, 10%, 0% และ 20% ตามลำดับ ทำนายกลุ่มอื่นถูก 22% 71% 97% 98% 92% และ 75% ตามลำดับ และการทำนายถูกโดยรวมเฉลี่ย 77.5%

ตารางที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของ Longwave linear variable filter spectrometer ที่สแกนบริเวณพูนต้น ด้วยวิธี SIMCA

อายุการเก็บเกี่ยว	ทำนายตัวเองถูก %	ทำนายกลุ่มอื่นถูก %	การทำนายโดยรวม %
80 days	100.0	62.0	68.3
90 days	85.0	62.0	65.8
100 days	70.0	67.0	67.5
110 days	100.0	44.0	53.3
120 days	100.0	44.0	53.3
127 days	80.0	1.0	14.2
การทำนายถูกโดยรวมเฉลี่ย %			53.8

จากตารางที่ 4.41 แสดงผลของการคัดแยกกลุ่มโดย Longwave linear variable filter spectrometer ที่สแกนบริเวณพูนต้นไม่ ด้วยวิธี SIMCA ที่อายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน สามารถทำนายตัวเองถูก 100%, 85%, 70%, 100%, 100% และ 80% ตามลำดับ ทำนายกลุ่มอื่นถูก 62% 62% 67% 44% 44% และ 1% ตามลำดับ และการทำนายถูกโดยรวมเฉลี่ย 53.8%

#### 4.42 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของ Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ที่สแกนบริเวณพูนต้น ด้วยวิธี PLS-DA

อายุการเก็บเกี่ยว	ทำนายตัวเองถูก %	ทำนายกลุ่มอื่นถูก %	การทำนายโดยรวม %
80 days	20.0	4.0	6.7
90 days	0.0	0.0	0.0
100 days	20.0	0.0	3.3
110 days	0.0	0.0	0.0
120 days	0.0	1.0	0.8
127 days	0.0	1.0	0.8
การทำนายถูกโดยรวมเฉลี่ย %			1.9

จากตารางที่ 4.42 แสดงผลของการคัดแยกกลุ่มโดย Longwave linear variable filter spectrometer ที่สแกนบริเวณพูนต้นด้วยวิธี PLS-DA ที่อายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน สามารถทำนายตัวเองถูก 20%, 0%, 20%, 0%, 0% และ 0% ตามลำดับ ทำนายกลุ่มอื่นถูก 4% 0% 0% 0% 1% และ 1% ตามลำดับ และการทำนายถูกโดยรวมเฉลี่ย 1.9%

#### ตารางที่ 4.43 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของ Longwave linear variable filter spectrometer ที่สแกนบริเวณพูนต้น ด้วยวิธี PLS-DA

อายุการเก็บเกี่ยว	ทำนายตัวเองถูก %	ทำนายกลุ่มอื่นถูก %	การทำนายโดยรวม %
80 days	65.0	1.0	11.7
90 days	55.0	7.0	15.0
100 days	0.0	0.0	0.0
110 days	0.0	1.0	0.8
120 days	0.0	1.0	0.8
127 days	60.0	0.0	10.0
การทำนายถูกโดยรวมเฉลี่ย %			6.4

ตารางที่ 4.43 แสดงผลของการคัดแยกกลุ่มโดย Longwave linear variable filter spectrometer ที่สแกนบริเวณพูนต้น ด้วยวิธี PLS-DA ที่อายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน สามารถทำนายตัวเองถูก 65%, 55%, 0%, 0%, 0% และ 60% ตามลำดับ ทำนายกลุ่มอื่นถูก 1% 7% 0% 1% 1% และ 0% ตามลำดับ และการทำนายถูกโดยรวมเฉลี่ย 6.4% จากการวิเคราะห์เชิงคุณภาพระหว่าง SIMCA และ PLS-DA แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์ด้วยวิธี SIMCA ให้ผลที่ดีกว่า PLS-DA

## บทที่ 5

### สรุปผล

#### 5.1 ความเป็นไปได้ในการใช้งานแบบจำลอง

สรุปเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการประเมินความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการส่งออกและการประเมินคุณภาพการรับประทาน (เนื้อสัมผัส ความชื้น และความหวาน) สามารถวัดความสุกแก่ของทุเรียนได้ด้วยแบบจำลองที่ดีที่สุดคือปริมาณมวลแห้ง (DM) ที่เนื้อทุเรียน ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer, ซึ่งให้ค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.89, RMSEP เท่ากับ 3.60%, RPD เท่ากับ 3.27 และ bias เท่ากับ 0.98% การดูดซับคลื่นที่มี Regression coefficient สูงที่สุด ได้แก่  $5446\text{ cm}^{-1}$  (1836 nm) บริเวณ 1820 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose การดูดซับคลื่นที่มี X-loading สูงที่สุด  $5492\text{ cm}^{-1}$  (1821 nm) บริเวณ 1820 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose (Osborne and Fearn, 1986) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching และของเนื้อทุเรียนที่หุ้มด้วยพลาสติก ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.83, RMSEP เท่ากับ 4.60%, RPD เท่ากับ 2.42 และ bias เท่ากับ -0.22% การดูดซับคลื่นที่มี Regression coefficient สูงที่สุด  $6572\text{ cm}^{-1}$  (1521 nm) บริเวณ 1528 nm ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching เป็นการดูดซับคลื่นของ starch (Osborne and Fearn, 1986) การดูดซับคลื่นที่มี X-loading สูงที่สุด  $6942\text{ cm}^{-1}$  (1440 nm) บริเวณ 1440 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ sucrose, starch (Osborne and Fearn, 1986) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching ที่เนื้อห่อหุ้มพลาสติก ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer (FQA-NIR GUN Fantec, Japan)  $r^2$  เท่ากับ 0.87, RMSEP เท่ากับ 4.02%, RPD เท่ากับ 4.12 และ bias เท่ากับ -0.44 % การดูดซับคลื่นที่มี Regression coefficient ที่มีผลกับทุเรียน 746 nm และ 927 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ  $\text{CH}_2$  (Osborne and Fearn, 1986) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C-H stretching การดูดซับคลื่นที่มี X-loading สูงที่สุด 996 nm ซึ่งเป็นการดูดซับคลื่นของ starch ที่ 990 nm (Osborne and Fearn, 1986) เกิดการสั่นสะเทือนของ O-H stretching ที่เนื้อทุเรียนด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer (MICRONIR JDSU, USA)  $r^2$  เท่ากับ 0.86, RMSEP เท่ากับ 4.15%, RPD เท่ากับ 4.15 และ bias เท่ากับ -0.47 % การดูดซับคลื่นที่มี Regression coefficient สูงที่สุด 1210 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ  $\text{CH}_2$  (Osborne and Fearn, 1986) 1215 nm เกิดการสั่นสะเทือนของ C-H stretching การดูดซับคลื่นที่มี X-loading สูงที่สุด 1173 nm บริเวณ 1195 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ  $\text{CH}_3$  (Osborne and

Fearn, 1986) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C-H stretching แบบจำลองที่ได้จะเห็นได้ว่าแบบจำลองของเครื่อง FT-NIR Spectrometer ที่เนื้อทุเรียน ดีที่สุด

ผลการทำนายของ ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (SSC) ค่าเนื้อสัมผัส และค่าสี ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer, Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer และ Longwave linear variable filter spectrometer ที่เปลือกทุเรียนทุเรียน ที่เปลือกทุเรียนทุเรียน เนื้อทุเรียน และที่เนื้อทุเรียน เนื้อทุเรียนพลาสติก จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.50-0.64 ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกอย่างหยาบๆ และแบบจำลองที่มีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.66-0.81 ยอมรับได้สำหรับคัดเลือก และประมาณค่าอย่างหยาบๆ (Williams, 2007)

$r^2$	พารามิเตอร์	เครื่องสเปกโตรมิเตอร์	ตำแหน่งที่สแกน
0.50-0.64	b*	FT-NIR	เปลือกทุเรียนทุเรียน เนื้อทุเรียน เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	DM	FT-NIR	เปลือกทุเรียนทุเรียนทุเรียน
	SSC	FT-NIR	เนื้อทุเรียน
	AF	FT-NIR	เปลือกทุเรียนทุเรียน เนื้อทุเรียน เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	PE	FT-NIR	เปลือกทุเรียนทุเรียน เนื้อทุเรียน
	RF	FT-NIR	เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	b*	short wavelength	เนื้อทุเรียน เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	SSC	short wavelength	เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	APF	short wavelength	เนื้อทุเรียน
	PE	short wavelength	เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	DM	Longwavelength Longwavelength Longwavelength	เปลือกทุเรียนทุเรียน เปลือกทุเรียนทุเรียน เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	SSC	Longwavelength	เนื้อทุเรียน
	APF	Longwavelength	เนื้อทุเรียน

$r^2$	พารามิเตอร์	เครื่องสเปกโตรมิเตอร์	ตำแหน่งที่สแกน
0.66-0.81	APF	FT-NIR	เปลือกทุเรียนทุเรียน เนื้อทุเรียน
	RF	FT-NIR	เปลือกทุเรียนทุเรียน เนื้อทุเรียน
	APF	short wavelength	เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	RF	short wavelength	เนื้อทุเรียน เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	b*	Longwavelength	เนื้อทุเรียน

## 5.2 สรุปผลการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการประเมินความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองกับตัวอย่างใหม่

สรุปค่าการวิเคราะห์ตัวอย่างใหม่โดยใช้แบบจำลองที่ดีที่สุดคือ ปริมาณมวลแห้ง (DM) การใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer ที่เนื้อทุเรียน และที่เนื้อทุเรียนหุ้มพลาสติก  $r^2$  เท่ากับ 0.88, RMSEP เท่ากับ 4.09%, RPD เท่ากับ 2.90 และ bias เท่ากับ -1.15 % และ  $r^2$  เท่ากับ 0.85, RMSEP เท่ากับ 4.49%, RPD เท่ากับ 2.61 และ bias เท่ากับ -1.05 % การสแกนที่เนื้อทุเรียนโดยตรงให้ผลดีกว่าสแกนผ่านพลาสติกหุ้ม แต่อย่างไรก็ตามสมรรถนะการทำนายของการสแกนทั้งสองแบบไม่ต่างกัน และสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้งานจริง ผลการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) ในเนื้อทุเรียนโดยใช้เครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer สแกนที่เนื้อทุเรียนหุ้มพลาสติก และ Longwave linear variable filter spectrometer  $r^2$  เท่ากับ 0.71, RMSEP เท่ากับ 7.36%, RPD เท่ากับ 1.59 และ bias เท่ากับ -1.15 % และ  $r^2$  เท่ากับ 0.74, RMSEP เท่ากับ 6.98%, RPD เท่ากับ 1.17 และ bias เท่ากับ 3.87 % ในการสแกนเนื้อทุเรียนโดยตรง ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้เครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer และ Longwave linear variable filter spectrometer ซึ่งเครื่องมือทั้งสองชนิดซึ่งเป็นแบบพกพาในการสแกนทุเรียนมีสมรรถนะการทำนายที่ต่ำกว่าเครื่อง FT-NIR Spectrometer

## เอกสารอ้างอิง

1. กระทรวงพาณิชย์ 2556. ตลาดส่งออกของไทย  
[http://www.dps3.moc.go.th/online/Menu/Online/Export/Export\\_topn\\_re/#](http://www.dps3.moc.go.th/online/Menu/Online/Export/Export_topn_re/#)
2. จริงแท้ ศิริพานิช. 2538. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ. กำแพงแสน จ. นครปฐม หน้า 77
3. จริงแท้ ศิริพานิช. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2542.
4. ทรงพล สมศรี. 2531. พันธุ์และการดูแลรักษาทุเรียน. การสัมมนาทางวิชาการ 25-26 กพ. 31. สวทท และกระทรวงวิทยาศาสตร์ฯ. หน้า 5.
5. ทิम्मพร นาทวรทัต. 2530. ความถ่วงจำเพาะและการสูญเสียน้ำหนักของทุเรียนพันธุ์ชะนี หมอนทอง และก้านยาวที่เก็บเกี่ยวในอายุต่างกัน. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี ภาควิชาพืชสวนคณะ เกษตรมก. กำแพงแสน.
6. ธงชัย สุวรรณสิขณณ์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช. 2555. การวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ. เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
7. นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์. 2545. หลักการพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้สเปกโตรสโคปี. ในการอบรมเชิงปฏิบัติการ: ควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและ อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
8. นรินนาม. การดูแลทุเรียนแก่. โครงการรณรงค์ไม้ตัดทุเรียนอ่อนออกจำหน่าย. สนง.ส่งเสริมการเกษตรภาคตะวันออกเฉียง. แผ่นใบปลิว.
9. ปานมนัส ศิริสมบุรณ์, รวิภัทร ลากเจริญสุข, กรรณพต แก้วสอน, พลนน อ่อนไสว, บัณฑิต ทองสร้อย, นัฐกรณีสอนสงวน, สมชาย กลัดสุข, ศิวตล รัตนโอภา, อภิชาติ สมผิว และกิ่งดาว ชนะโชติ. 2556. การคาลิเบรชันแบบตัวแปรพหุ แนะนำเชิงปฏิบัติสำหรับการพัฒนาแบบจำลองในเคมีวิเคราะห์. [Online]. Available: <http://www.nirsresearch.com>.
10. ปานมนัส ศิริสมบุรณ์. 2556. เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีสำหรับผลผลิตเกษตรและอาหาร. [Online]. Available: <http://www.nirsresearch.com>.

### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

11. ปานมนัส ศิริสมบุรณ์. 2555. เทคโนโลยีเนื้อสัมผัสของผลผลิตเกษตรและอาหาร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
12. พิจิตร โชควัฒนา. [2537]. ชื่อเรื่อง. ทูเรียน. โครงการหนังสือเกษตรชุมชน. ลักษณะทางกายภาพ. 72 หน้า กรุงเทพฯ.
13. พิมพร วัชรวงศ์กุล 2556 ปริมาณน้ำตาลในผลไม้. กองโภชนาการ. <http://www.gotoknow.org/posts/153542>.
14. ภาพร เกษมสำราญ. 2555. หลักพื้นฐานของสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. เทคโนโลยีอินฟราเรด ย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
15. รณฤทธิ์ ฤทธิธรม. 2555. การวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ. เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
16. รศ.ดร.วิชัย ทฤทัยธนาสันต์, วารุณี ธนะแพสย์, ดร.ศุมาพร เกษมสำราญ, ดร.ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, รศ.ดร. ธงชัย สุวรรณสิขณัน, ผศ.ดร. ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, ดร.อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, ผศ.ดร.รณฤทธิ์ ฤทธิธรม, ดร.สิรินนภา ศรีณย์วงศ์, ดร.ณัฐภรณ์ สุทธิวิจิตรภักดี. 2555. เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 211 หน้า.
17. รัชฎา เศรษฐวงศ์ และจิ่งแท้ ศิริพานิช. 2531. กายวิภาคของก้านผลทุเรียนที่มีอายุเก็บเกี่ยวต่าง ๆ กัน. รายงานการประชุมทางวิชาการ มก. ครั้งที่ 36. หน้า 405-412.
18. วิกิพีเดีย 2556, ชูโครส, <http://th.wikipedia.org/wiki/ชูโครส>.
19. วิกิพีเดีย 2556, ทูเรียน <http://th.wikipedia.org/wiki/ทูเรียน>.
20. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. สีและแสง การวัดการดูดกลืน. [Online]. Available: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/index.html>.
21. สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2546. มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ มกอช. 3 2546: ทูเรียน ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป. เล่ม 120. ตอนพิเศษ 145 ง. 19 ธันวาคม 2546.

### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

22. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2556. สถิติการส่งออก (Export) - ทุเรียนสด : ปริมาณและมูลค่าการส่งออกรายเดือน. [http://www.oae.go.th/annual\\_report/export\\_import/export\\_result.php](http://www.oae.go.th/annual_report/export_import/export_result.php).
23. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2556 ทุเรียน : เนื้อที่ยืนต้น เนื้อที่ให้ผล ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ปี 2554-2556 <http://www.oae.go.th/download/prcai/farmcrop/durian52-54.pdf>
24. สุดารัตน์ สุดพันธ์. 2536. การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อทุเรียนพันธุ์ชะนี และพันธุ์หมอนทอง ภายหลังจากเก็บเกี่ยว. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์บัณฑิตวิทยาลัย.
25. อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. เทคนิคทางวิศวกรรมแบบไม่ทำลายสำหรับผลผลิตเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2558.
26. Bicu I. and Mustata F. 2013. Optimization of isolation of cellulose from orange peel using sodium hydroxide and chelating agents Carbohydrate Polymers. 98. 341-348.
27. Bruker Optics. Mahalonobis distance: OPUS online help. [Program] OPUS Program Version 7.0.129
28. Cho J. H. 2556. Vibration spectroscopy techniques and applications: Chemometrics tools for Multivariate Analysis. ในโครงการสัมมนาวิชาการเรื่องการควบคุมคุณภาพสินค้าอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิตด้วยระบบอินฟราเรดย่านใกล้แบบ On Line. สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
29. Cozen J. P. 2006. Multivariate Calibration. 2<sup>nd</sup> English edition, Bruker Optik GmbH.
30. Dong T., Xia R., Wang M., Xiao Z. and Liu P. 2008. Changes in dietary fibre, polygalacturonase, cellulase of navel orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck 'Cara Cara') fruits under different storage conditions Scientia Horticulturae, 116, 414-420.
31. Gibson L.J. 2012. The hierarchical structure and mechanics of plant materials Journal of the Royal Society. pp. 1-18 Suni et al. 2000 M.
32. J. Workman and J.R.L. Weyer. 2007. Practical Guide to Interpretive Near-Infrared Spectroscopy. Taylor & Francis, Boca Raton, FL, pp. 240-262.
33. Kawano S. and Abe H. 1995. Development of a calibration equation with temperature compensation for determining the Brix value in intact peaches. J. Near Infrared Spectroscopy. 3. 211-218.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

34. National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards. 2005. Thai Agricultural Standard, TAS 9503 2005: Compost. Published in the Royal Gazette Vol.120 Section 115D, dated 2 October B.E. 2546.
35. Nicolai B.M., Beullens K., Bobelyn E., Peirs A., Saeys W., Theron K.I. and Lammertyn J. Nondestructive measurement of fruit and vegetables quality by means of NIR spectroscopy: a review. *Postharvest Biology Technology*. vol. 46, 2007. Pp. 99-108
36. Ognjanov V., Dinka Vujanić-Varga, Mišić P.D., Verešbaranji I., Macet K., Tešović Ž., Marija Krstić and Petrović N. 1995. Anatomical and biochemical studies of fruit development in peach, *Scientia Horticulturae*, 64, 33-48.
37. Osborne B. G. and Fearn T. 1986. Near infrared spectroscopy in food analysis (1<sup>st</sup> published, pp. 117). Longman Science & Technical. UK.
38. Osborne B.G., Fearn T. and Hindle P.H. 1993. Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis. New York: John Wiley and Sons.
39. Ozaki Y., McClure W.F. and Christy A.A. 2006. Near infrared spectroscopy in food science and technology. New Jersey: John Wiley and Sons.
40. Pasquini C. 2003. Near Infrared Spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. vol.1 4(2). Pp. 198-219.
41. Tkachuk R. and Kuzina F.D. 1982. Chlorophyll analysis of whole rape-seed kernels by near infrared reflectance *Can. J. Plant Sci.* 62 pp. 875-884.
42. Shenk J.S., Workman Jr., J.J., and Westerhaus M.O. 2001. Application of NIR spectroscopy to agricultural products. In: *Handbook of Near-Infrared Analysis*. Burns, D.A. and Ciurczak, E.M. (eds.). Marcel Dekker. Inc. New York. 419-471.
43. Sirisomboon P. 2001. Studies on the relationship between texture and pectin constituents of Japanese pear. Ph.D. Thesis. United Graduate School of Agriculture Kagoshima University. (Saga University). Japan.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

44. Suni M, Nyman N.-A, Eriksson and L. Björk I. 2000. Carbohydrate composition and content of organic acids in fresh and stored apples. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80. pp. 1538-1544
45. Venkatachalam K. and Meenune M. 2012. changes in physiochemical quality and browning related enzyme activity of longkong fruit during four different weeks of on-tree maturation *Food Chemistry*. e 131, 1437-1442.
46. Voon Y.Y., Hamid N, Sheikh Abdul, Rusul G., Osman A. and Quek S.Y. 2006. Physicochemical, microbial and sensory changes of minimally processed durian (*Durio zibethinus* cv. D24) during storage at 4 and 28°C. *Postharvest Biology and Technology*. vol. 42 issue 2. November. p. 168-175.
47. Wei T., Ting L., Qingliang Li., Yuanpeng Du. and Heng Z. 2014. The phenotype of grape leaves caused by acetochlor or fluoroglycofen and effects of latter herbicide on grape leaves. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 114. 102-107.
48. Wikipedia. 2015. Halogen lamp. [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Halogen\\_lamp#Spectrum](http://en.wikipedia.org/wiki/Halogen_lamp#Spectrum).
49. Williams P. 2007. Near-infrared Technology-Getting the Best Out of Light. PDK Grain. Nanaimo. British Columbia, and Winnipeg. Manitoba. Canada.
50. Williams P. and Norris K. 2001. Near infrared technology in the agricultural and industries. Second ed. American Association of Cereal Chemist, Minnesota, USA.
51. Williams P. 2007. Near-infrared Technology-Getting the best out of light. Edition 5.0. A short course in the practical implementation of near-infrared spectroscopy for the user. PDK Grain. Nanaimo. Canada. 2007