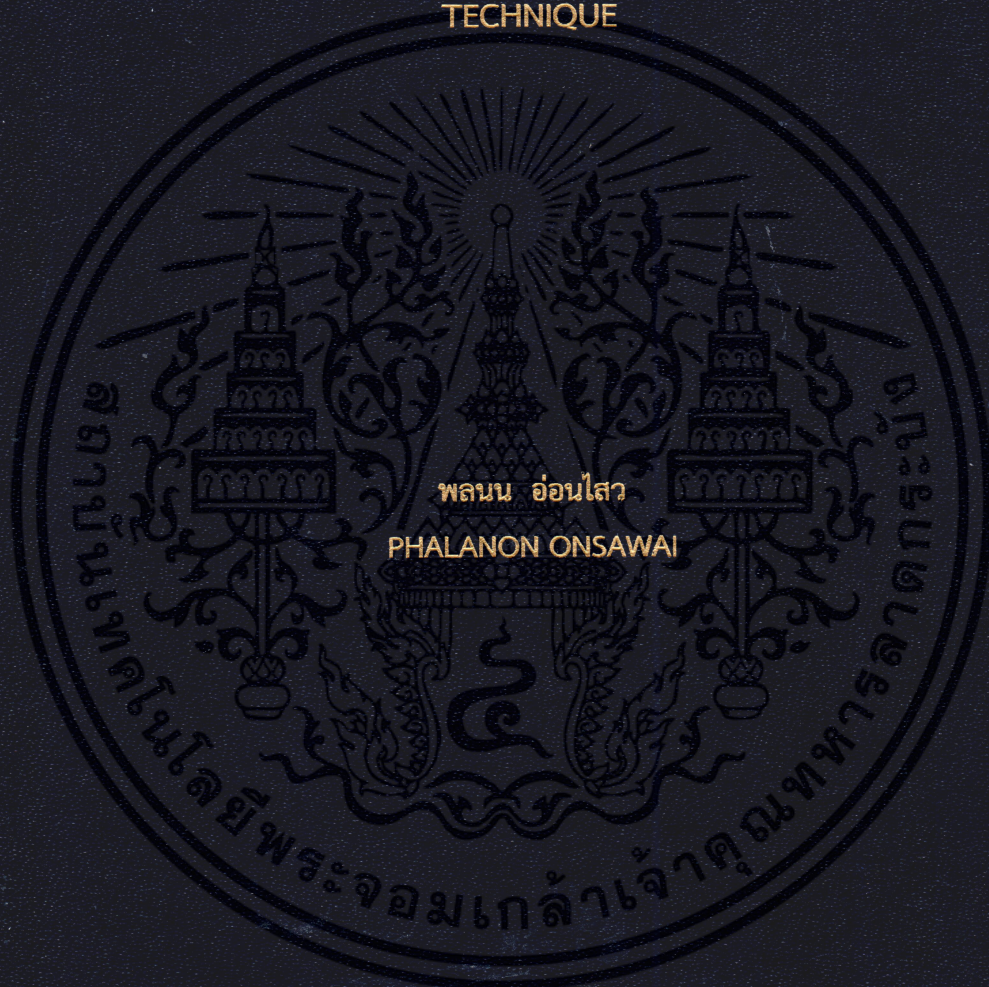


การประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยใช้
เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

EVALUATION OF EATING QUALITY OF DURIAN (*DURIO ZIBETHINUS*
MURRAY CV. MON THONG) PULP BY NEAR INFRARED SPECTROSCOPY
TECHNIQUE



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-D-108-166

การประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยใช้
เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

EVALUATION OF EATING QUALITY OF DURIAN (*DURIO ZIBETHINUS*
MURRAY CV. MON THONG) PULP BY NEAR INFRARED SPECTROSCOPY
TECHNIQUE



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-D-108-166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EVALUATION OF EATING QUALITY OF DURIAN (*DURIO ZIBETHINUS*
MURRAY CV. MON THONG) PULP BY NEAR INFRARED SPECTROSCOPY
TECHNIQUE



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

KMITL-2018-EN-D-108-0166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทอง โดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
นักศึกษา	นายพลนน อ่อนใส
รหัสนักศึกษา	55610552
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุรณ์

บทคัดย่อ

เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีถูกใช้เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายในการประเมินคุณภาพการรับประทาน (เนื้อสัมผัส ปริมาณเมล็ดแห้ง และความหวาน) ของเนื้อทุเรียน (พันธุ์หมอนทอง) ทุเรียน 25 ผล ถูกสแกนบริเวณพูเอก ด้วยเครื่อง Short wavelength Diode Array Spectrometer (FQA-NIR GUN, Fantec, Japan) and longwave linear variable filters near infrared spectrometer (Micro NIR, JDSU, Germany) ในทุกๆ 10 วัน นับจาก 80 วันจนถึง 127 วันหลังดอกบาน (80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วัน) ตัวอย่างทั้ง 6 ช่วงระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวครอบคลุมความสุกแก่ทุเรียนตั้งแต่ทุเรียนอ่อนจนทุเรียนสุก ใช้ Ethephon ทาที่ขั้วผลทุเรียนเก็บรักษาไว้ 3 วัน ที่อุณหภูมิห้องและปล่อยให้สุก ทำการทดลองทั้งหมดที่อุณหภูมิห้อง $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$ สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany), FQA-NIR GUN และ Micro NIR ตามลำดับ หลังจากนั้นนำไปหา เนื้อสัมผัส ปริมาณเมล็ดแห้ง และความหวาน สร้างแบบจำลองโดยใช้วิธี partial least squares regression และพิสูจน์สมการโดยวิธี Test set validation ผลการทำนายพบว่าแบบจำลอง ปริมาณเมล็ดแห้ง (DM) Rupture Force (RF) และ Average Penetrating Force (APF) ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination; R^2) เป็นที่ยอมรับได้แบบจำลองที่ดีที่สุดคือปริมาณเมล็ดแห้ง (DM) ที่เนื้อทุเรียน และเนื้อทุเรียนที่หุ้มพลาสติก ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ให้ค่า coefficient of determination ของการทำนาย 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 เมื่อทดสอบกับตัวอย่างใหม่จำนวน 120 ตัวอย่าง พบว่าปริมาณเมล็ดแห้ง (DM) ส่งผลให้ค่า r^2 เท่ากับ 0.88 และ 0.85 ตามลำดับ แบบจำลองอื่นๆคือ แบบจำลองปริมาณเมล็ดแห้ง (DM) ที่เนื้อทุเรียนที่หุ้มพลาสติก ด้วยเครื่อง FQA-NIR GUN, แบบจำลองปริมาณเมล็ดแห้ง (DM) ที่เนื้อทุเรียน ด้วยเครื่อง Micro NIR, แบบจำลอง Rupture Force (RF) ที่เนื้อทุเรียน ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer และแบบจำลอง Average Penetrating Force (APF) ที่เนื้อทุเรียน ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ให้ค่า coefficient of determination r^2 เท่ากับ 0.87, RMSEP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 4.02%, r^2 เท่ากับ 0.86, RMSEP เท่ากับ 4.15%, r^2 เท่ากับ 0.74, RMSEP เท่ากับ 6.15 N, และ r^2 เท่ากับ 0.73, RMSEP เท่ากับ 5.53 N, ตามลำดับ เมื่อทดสอบกับตัวอย่างใหม่จำนวน 120 ตัวอย่าง พบว่าแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) ที่เนื้อทุเรียนที่หุ้มพลาสติก ด้วยเครื่อง FQA-NIR GUN, ปริมาณมวลแห้ง (DM) ที่เนื้อทุเรียน ด้วยเครื่อง Micro NIR, Rupture Force (RF) ที่เนื้อทุเรียน ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer และ Average Penetrating Force (APF) ที่เนื้อทุเรียน ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ส่งผลให้ค่า r^2 , เท่ากับ 0.71, 0.74, 0.79 และ 0.75 ตามลำดับ



Thesis Title:	Evaluation of eating quality of durian (<i>Durio zibethinus</i> Murray cv. Mon thong) pulp by near infrared spectroscopy technique
Student	Mr. Phalanon Onsawai
Student ID.	55610552
Degree	Doctor of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Panmanas Sirisomboon

ABSTRACT

Near infrared spectroscopy was used as a non-destructive technique for the evaluation of eating quality (Texture, Dry matter and Soluble solids) of durian pulp (*Durio zibethinus* Murray cv. Mon thong). A set of 25 fruits was randomly scanned at the cheek of the largest 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 (Micro NIR, 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 ambient temperature and allowed to ripen. The laboratory experiment was performed at ambient temperature (27 ± 1 °C). Fourier transform near infrared (MPA, Bruker, Germany), FQA-NIR GUN and Micro NIR Spectrometers were used to scan the spectrum at the cheek of the largest locule of fruit, the bottom of fruit, the durian pulp and the plastic wrap-covered pulp. Then, the texture, dry matter content and soluble solids content were immediately determined by reference methods. The calibration equations for prediction were developed by partial least squares (PLS) regression. The equation performance was evaluated by test set validation. The prediction result showed that the models for dry matter (DM), rupture force (RF) and average penetrating force (APF) provided acceptable coefficient of determination; R^2 . The best 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%, and 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. Other models were obtained from dry matter determination scanning at the plastic wrap-covered pulp by FQA-NIR GUN, models obtained for dry matter determination scanning from the durian pulp by Micro NIR, model for rupture force (RF) determination scanning for the durian pulp by FT-NIR Spectrometer and models for average penetrating force (APF) determination scanning for the durian pulp by FT-NIR Spectrometer. It showed the coefficient of determination for prediction r^2 and root mean square error of prediction (RMSEP) of 0.87, and 4.02% for FQA-NIR GUN, 0.86, and 4.15% for Micro NIR, 0.74, and 6.15 N as well as 0.73, and 5.53 N for FT-NIR Spectrometer respectively. In addition, when the models were used for prediction of 120 unknown durian samples, the r^2 were 0.71, 0.74, 0.79 and 0.75 for the dry matter model from plastic wrap-covered pulp by FQA-NIR GUN, the dry matter model from durian pulp by Micro NIR, the Rupture Force (RF) model from durian pulp by FT-NIR Spectrometer and the Average Penetrating Force (APF) model from durian pulp by FT-NIR Spectrometer, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุรณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือให้คำชี้แนะแก้ไขปัญหา ตลอดจนความรู้ที่อาจารย์ได้สั่งสอน และเป็นกำลังใจให้สู้จนเรียนจบ ขอขอบคุณอาจารย์ ในภาควิชาวิศวกรรมเกษตร และเจ้าหน้าที่ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในการเรียนจนจบ

ขอขอบคุณพ่อแม่และญาติพี่น้องอันเป็นที่รักยิ่งที่คอยผลักดันให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่สำคัญยิ่งในทุกด้าน

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคนที่ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจเสมอมา

งานการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุน งบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ซึ่งคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

นายพลนน อ่อนไสว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	5
1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทูเรียนพันธุ์หมอนทอง.....	6
2.2 คลื่นเนียร์อินฟราเรด (Near Infrared Radiation).....	9
2.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy).....	11
2.4 PLS Modelling.....	21
2.5 คุณสมบัติการรับประทานทุเรียน.....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 การเตรียมผลทุเรียนสำหรับการทดลอง.....	32
3.2 การเตรียมผลทุเรียนสำหรับการทดลองกับตัวอย่างใหม่.....	32
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	33
3.4 วิธีการทดลอง.....	37
3.5 การตรวจวัดคุณภาพเนื้อทุเรียน.....	39
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
3.7 การทดสอบความแม่นยำของการวัดค่าทางเคมี.....	43
3.8 ขั้นตอนของการปฏิบัติงานวิจัย.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	47
4.1 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	47
4.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมดิบ.....	50
4.3 ข้อมูลทางสถิติเพื่อสร้างแบบจำลอง.....	54
4.4 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ ผลการทำนายของแบบจำลอง PLS.....	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	101
5.1 ความเป็นไปได้ในการใช้งานแบบจำลอง.....	101
5.2 สรุปผลการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการประเมินความสุกแก่ของ ทุเรียนพันธุ์หมอนทองกับตัวอย่างใหม่.....	103
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	104
บรรณานุกรม.....	105
ภาคผนวก ก ผลการทดลองจากวิธีการทดลองมาตรฐาน.....	111
ภาคผนวก ข ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่.....	137

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเนื้อทุเรียน.....	2
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง.....	8
2.2 ตำแหน่งพีคในแถบสเปกตรัม NIR ที่เด่นชัดขององค์ประกอบต่างๆ ในผลผลิตทางการเกษตร....	12
2.3 การแปลความหมายของค่า R และ R ²	28
2.4 การอธิบายผลของค่า RPD และ RER.....	29
4.1 สถิติคุณภาพการรับประทานของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว สี ความหวาน ปริมาณความชื้นและปริมาณมวลแห้ง.....	47
4.2 สถิติคุณภาพการรับประทานของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว เนื้อ สัมผัส.....	48
4.3 สถิติคุณภาพการรับประทานของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว สี ความหวาน และความชื้นสำหรับตัวอย่างที่เป็นตัวอย่างใหม่ (Unknown).....	48
4.4 สถิติคุณภาพการรับประทานของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว เนื้อสัมผัส สำหรับตัวอย่างที่เป็นตัวอย่างใหม่ (Unknown).....	49
4.5 ข้อมูลทางสถิติที่ใช้สร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม OPUS และโปรแกรม unscrambler X.....	54
4.6 ผลการทำนายค่า ผลการทำนายค่า สี (L* a* และ b*) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (SS) และค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	55
4.7 ผลการทำนายค่า (L* a* และ b*) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (SS) และค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	56
4.8 ผลการทำนายค่า สี L* และ a* ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	57

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 ผลการทำนายค่า สี b* ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	58
4.10 ผลการทำนายค่า ปริมาณมวลแห้ง (DM) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	59
4.11 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	60
4.12 ผลการทำนายค่า Average Firmness (AF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	61
4.13 ผลการทำนายค่า Average penetrating force (APF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	62
4.14 ผลการทำนายค่า Penetrating energy (PE) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	63
4.15 ผลการทำนายค่า Rupture force (RF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	64
4.16 ผลการทำนายค่า Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	65

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.17 ผลการทำนายค่า สี L^* a^* และ b^* ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	65
4.18 ผลการทำนายค่าปริมาณมวลแห้งด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	66
4.19 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	67
4.20 ผลการทำนายค่า Average Firmness (AF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	68
4.21 ผลการทำนายค่า Average penetrating force (APF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	69
4.22 ผลการทำนายค่า Penetrating energy (PE) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	70
4.23 การสร้างแบบจำลองการทำนายเนื้อทุเรียนบริเวณบริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกกับค่า Rupture force (RF) ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer โดยวิธี Partial Least Square Regression.....	71
4.24 การสร้างแบบจำลองการทำนาย Toughness (T) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer โดยวิธี Partial Least Squares Regression.....	72
4.25 ผลการทำนายค่า สี (L^*) และ (a^*) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	73
4.26 ผลการทำนายค่า สี (b^*) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.27 ผลการทำนายค่าปริมาณมวลแห้ง (DM) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพู่อก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	75
4.28 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพู่อก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	76
4.29 ผลการทำนายค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพู่อก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	77
4.30 ผลการทำนายค่า สี (L^* , a^* และ b^*) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) และค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพู่อกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ.....	78
4.31 สรุปค่าการวิเคราะห์ปริมาณมวลแห้ง (DM) ของตัวอย่างใหม่โดยใช้แบบจำลองที่ดีที่สุด.....	79
4.32 การสันสະເຫຼອນຂອງພັນຮະທີ່ມີຜົນຕໍ່ການທຳນາຍປຶກມວນແຫ້ງ (DM) ພິຈາລະນາຈາກ Regression coefficient ທີ່ມີຄ່າສູງຂອງແບບຈຳລອງປຶກມວນແຫ້ງ (DM) ຂອງເນື້ອຖູເຣຍນທີ່ບຶກມວນພູເອກ ທີ່ທຳນາຍໂດຍວິທີເນີຣ໌ອິນຟຣາເຣດສເປກໂທຣສໂກປີຈາກເຄື່ອງ FT-NIR Spectrometer.....	82
4.33 ການສັນສະເຫຼອນຂອງພັນຮະທີ່ມີຜົນຕໍ່ການທຳນາຍປຶກມວນແຫ້ງ (DM) ພິຈາລະນາຈາກ X-loading weight ທີ່ມີຄ່າສູງຂອງແບບຈຳລອງປຶກມວນແຫ້ງ (DM) ເນື້ອຖູເຣຍນທີ່ບຶກມວນພູເອກ ທີ່ທຳນາຍໂດຍວິທີເນີຣ໌ອິນຟຣາເຣດສເປກໂທຣສໂກປີຈາກເຄື່ອງ FT-NIR Spectrometer.....	83
4.34 ການສັນສະເຫຼອນຂອງພັນຮະທີ່ມີຜົນຕໍ່ການທຳນາຍປຶກມວນແຫ້ງ (DM) ພິຈາລະນາຈາກ Regression coefficient ທີ່ມີຄ່າສູງຂອງແບບຈຳລອງປຶກມວນແຫ້ງ (DM) ໃນເນື້ອຖູເຣຍນທີ່ບຶກມວນພູເອກທີ່ເອກຖູເຣຍນດ້ວຍພລາສຕິກ ທີ່ທຳນາຍໂດຍວິທີເນີຣ໌ອິນຟຣາເຣດສເປກໂທຣສໂກປີຈາກເຄື່ອງ FT-NIR Spectrometer.....	85
4.35 ການສັນສະເຫຼອນຂອງພັນຮະທີ່ມີຜົນຕໍ່ການທຳນາຍປຶກມວນແຫ້ງ (DM) ພິຈາລະນາຈາກ X-loading weight ທີ່ມີຄ່າສູງຂອງແບບຈຳລອງປຶກມວນແຫ້ງ (DM) ເນື້ອຖູເຣຍນທີ່ບຶກມວນພູເອກ ທີ່ທຳນາຍໂດຍວິທີເນີຣ໌ອິນຟຣາເຣດສເປກໂທຣສໂກປີຈາກເຄື່ອງ FT-NIR Spectrometer.....	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.36 การสันสະเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) พิจารณาจาก Regression coefficient ที่มีค่าสูงของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer.....	89
4.37 การสันสະเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) พิจารณาจาก X-loading weight ที่มีค่าสูงของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer.....	89
4.38 การสันสະเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) พิจารณาจาก Regression coefficient ที่มีค่าสูงของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer.....	92
4.39 การสันสະเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) พิจารณาจาก X-loading weight ที่มีค่าสูงของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer.....	93
4.40 สรุปค่าการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของตัวอย่างใหม่โดยใช้แบบจำลองที่ดีที่สุด.....	93
4.41 การสันสະเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนาย Rupture Force (RF) พิจารณาจาก Regression coefficient ที่มีค่าสูงของแบบจำลอง Rupture Force (RF) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	96
4.42 การสันสະเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนาย Rupture Force (RF) พิจารณาจาก X-loading weight ที่มีค่าสูงของแบบจำลอง Rupture Force (RF) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	97
4.43 การสันสະเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนาย Average Penetrating Force (APF) พิจารณาจาก Regression coefficient ที่มีค่าสูงของแบบจำลอง Average Penetrating Force (APF) ในเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.44 การสันนสะท้อนของพันธะที่มีผลต่อการทำนาย Average Penetrating Force (APF) พิจารณาจาก X-loading weight ที่มีค่าสูงของแบบจำลอง Average Penetrating Force (APF) ในเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	100
5.1 ผลการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) ค่าเนื้อสัมผัสและค่าสี จากสเปกตรัมของเปลือกทุเรียนบริเวณพูเอก ที่เปลือกทุเรียนกัน ที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก และที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกห่อหุ้มพลาสติกที่สแกนด้วยเครื่อง spectrometer แบบต่างๆ.....	103



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลซูโครส.....	3
2.1 ช่วงสเปกตรัมของคลื่นแสงอินฟราเรด.....	9
2.2 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานการสั่น.....	10
2.3 การเปลี่ยนแปลงพันธะของโมเลกุลในรูปแบบต่างๆ.....	11
2.4 การออกแบบเครื่องมือแบบพื้นฐาน A = light source; B = wavelength selection system; C = detector; D = computer; S = sample.....	13
2.5 ความแตกต่างของ path length ระหว่างเครื่องมือแบบ transmittance และแบบ reflectance.....	13
2.6 แบบวิธีการวัดด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี a. การส่องผ่าน (transmittance) b. การส่องผ่านสะท้อน (transflectance) c. การสะท้อนแบบแพร่ (diffuse reflectance) d. อินเทอร์แอกแตนซ์ (interactance) e. การส่องผ่านตัวอย่างที่มีการกระเจิงแสง (transmittance through scattering medium) (I_0 = incident light, I_s = light comes from the sample).....	14
2.8 ปริมาณแสงที่ถูกลดทอนโดยตัวกลาง.....	15
2.9 ไดอะแกรมการทำงานของฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	19
2.10 การทำแบบจำลองแคลิเบรชันด้วยวิธี MLR, PCR และ PLS.....	25
2.11 ชุดตัวอย่างในการ full cross validation.....	26
2.12 ชุดตัวอย่างในการ Prediction testing.....	27
3.1 เครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	34
3.2 เครื่อง Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer.....	34
3.3 เครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer.....	34
3.4 เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ Brix Refractometer	35
3.5 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส Texture Analyzer.....	35
3.6 เครื่องวัดสี MiniScan XE Plus.....	35
3.7 เครื่องบด.....	36
3.8 เครื่องชั่งความละเอียด 0.001 g Shimadzu BX300 และเครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 g AR2140 Adventurer.....	36

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.9 เครื่อง Microcentrifuge.....	36
3.10 ตู้อบลมร้อน.....	37
3.11 ฟิล์มยืดหุ้มอาหารพีวีซีใส.....	37
3.12 การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	38
3.13 การสแกนด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer.....	39
3.14 การสแกนด้วยเครื่อง Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer.....	39
3.15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของการเจาะเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก.....	40
3.16 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำวิจัย.....	46
4.1 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ทำการวัดด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	50
4.2 สเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกที่ทำการวัดด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	51
4.3 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	51
4.4 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	52
4.5 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	53
4.6 สเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน.....	54
4.7 การเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่.....	80
4.8 Regression coefficient plot ของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	81

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.9 X-loading weight plot ของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	82
4.10 การเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่.....	83
4.11 Regression coefficient plot ของแบบจำลองเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	84
4.12 X-loading weight plot ของแบบจำลองการเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	85
4.13 การเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่.....	86
4.14 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer.....	87
4.15 X-loading weight plot ของแบบจำลองการเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer.....	88
4.16 การเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่.....	90
4.17 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer.....	90
4.18 X-loading weight plot ของแบบจำลองการเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer.....	92

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.19 การเปรียบเทียบ Rupture Force (RF) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่.....	94
4.20 Regression coefficient plot ของแบบจำลอง Rupture Force (RF) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	94
4.21 X-loading weight plot ของแบบจำลอง Rupture Force (RF) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	95
4.22 การเปรียบเทียบ Average Penetrating Force (APF) ของเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่.....	97
4.23 Regression coefficient plot ของแบบจำลอง Average Penetrating Force (APF) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	98
4.24 X-loading weight plot ของแบบจำลอง Average Penetrating Force (APF) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทุเรียนเป็นสินค้าเกษตรที่ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกที่สำคัญของโลก เนื้อที่ให้ผลทุเรียนในปี พ.ศ. 2560 ของประเทศเป็น 592,750 ไร่ ผลผลิตทุเรียนเท่ากับ 616,121 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2560) คิดเป็นมูลค่าในการส่งออกในปี 2560 เท่ากับ 44,360,712 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2560) ตลาดส่งออกที่สำคัญของทุเรียนไทย 5 ลำดับ ได้แก่ ประเทศจีน เวียดนาม ฮองกง ไต้หวัน และ มาเลเซีย ในปี 2561 (กระทรวงพาณิชย์ 2561) ทุเรียนมีแนวโน้มที่จะส่งออกเพิ่มขึ้น สืบเนื่องจากข้อตกลงการค้าเสรีอาเซียน การกีดกันทางการค้าที่ไม่ใช่ภาษีของการนำเข้าทุเรียนในแต่ละประเทศแตกต่างกัน ดังนั้นคณะกรรมการสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติออกประกาศกำหนดมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ เรื่อง ทุเรียน ไว้ใช้เป็นมาตรฐานสมัครใจเพื่อให้ทุเรียนของไทยเป็นที่ยอมรับในระดับชาติและระดับสากล เพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภคและส่งเสริมการส่งออก ลักษณะภายนอกของผลทุเรียนที่แก่ได้ที่ ตามที่กำหนดในมาตรฐาน ได้แก่ ขั้วผลแข็ง สีเข้ม เมื่อสัมผัสขั้วจะรู้สึกสากมือ บริเวณรอยต่อระหว่างขั้วผลและก้านผล ซึ่งเรียกว่าปากปลิงบวมโต เมื่อจับขั้วผลแล้วแกว่งผลทุเรียนจะรู้สึกขั้วผลแข็ง และมีสปริงมากขึ้น ร่องหนามห่าง เมื่อบีบปลายหนามเข้าหากันจะรู้สึกว่ามีสปริง ปลายหนามเริ่มแห้ง มีสีน้ำตาล สังเกตเห็นรอยเป็นแนวยาวบนสันพูได้ชัดเจน ยกเว้นพันธุ์ก้านยาว ลักษณะภายในชั้นต่ำของผลแก่ได้ที่ของทุเรียนพันธุ์หอมทองได้แก่เนื้อสีขาวปนเหลืองอ่อน ผิวเมล็ดจากสีครีม เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล และมีน้ำหนักเนื้อแห้งชั้นต่ำ 32 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักเนื้อแห้งดังกล่าวเทียบเท่ากับทุเรียนที่มีจำนวนวันสุกหลังการเก็บเกี่ยวในสภาพธรรมชาติประมาณ 6-9 วัน (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2546) Siriphanich and Sangwanankul 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 วิธีการนี้

ถึงแม้จะได้ค่าแน่นอน แต่เป็นวิธีการที่ต้องทำให้ตัวอย่างเสียหาย (destructive) และใช้เวลานาน โดยต้องใช้ตัวอย่างขนาด 2 กรัม อบจนแห้งในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ใช้เวลา 5 ชั่วโมง และต้องทำการวิเคราะห์โดยการสุ่มซีกตัวอย่าง ไม่สามารถทำได้ทุกผลหรือทุกพู นอกจากนี้คุณภาพที่เกี่ยวกับการรับประทานของเนื้อทุเรียนได้แก่ สี เนื้อสัมผัส ความชื้น ปริมาณมวลแห้ง และความหวาน เป็นสมบัติที่ผู้บริโภคคำนึงถึงเป็นสิ่งที่ควรตรวจสอบโดยวิธีไม่ทำลายโดยให้ได้ค่าทั้งหมดในการวัดในคราวเดียว ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาวิธีวัดโดยไม่ทำลาย (non-destructive) และรวดเร็วทำได้ทุกผลหรือทุกพู โดยใช้วิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (near infrared Spectroscopy; NIRS) เพื่อคัดแยกทุเรียนตามความสุกแก่โดยไม่ทำลายหรือทำให้เสียหาย ใช้เวลาในการวัดน้อย และสามารถตรวจวัดความสุกแก่ได้ทุกผลก่อนเก็บ และตรวจคุณภาพเนื้อที่เกี่ยวกับการรับประทานได้ทุกพูโดยไม่ทำลาย สำหรับการขายในห้างสรรพสินค้าซึ่งจะเพิ่มการยอมรับในระดับชาติและระดับสากล เพิ่มความมั่นใจให้ผู้บริโภค ผู้ขาย และชาวสวน

1.2 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

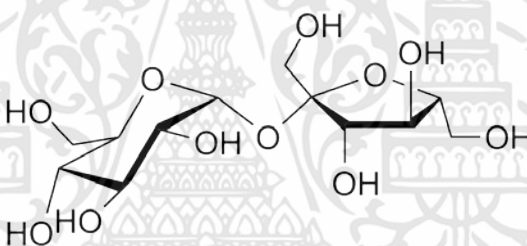
องค์ประกอบหลักทางเคมีของเนื้อทุเรียน แสดงดังตารางที่ 1.1 จะเห็นว่าเนื้อทุเรียนมีน้ำเป็นองค์ประกอบถึง 65% คาร์โบไฮเดรตในเนื้อทุเรียนมีถึง 27% ประกอบด้วยแป้งและน้ำตาลในเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีปริมาณแป้ง 9-10% ของน้ำหนักเนื้อ (จริงแท้, 2538) ปริมาณน้ำตาลของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่มีความสุกพอเหมาะในการรับประทาน 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, 2561)

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 ซึ่งเป็นการดูดซับคลื่นแสงของตัวอย่าง ในกรณีนี้คือ เนื้อทุเรียน กับองค์ประกอบทางเคมีที่

สนใจ เช่นในกรณีงานวิจัยนี้คือ เนื้อสัมผัส ความชื้น ปริมาณมวลแห้ง และความหวาน หรือความสุกแก่ ความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคนี้มาใช้คือ การที่องค์ประกอบทางเคมีมีการดูดซับคลื่นเนียร์อินฟราเรดที่ ความยาวคลื่นเฉพาะ 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. กรณีการวัดปริมาณมวลแห้งจะเห็นว่าน้ำหนักปริมาณมวลแห้งมีค่าเท่ากับ 100-เปอร์เซ็นต์ความชื้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการประเมินค่าปริมาณมวลแห้งโดยใช้เทคนิคนี้เช่นกัน กรณีการวัดความหวานของเนื้อทุเรียน ซึ่งมีน้ำตาลซูโครสเป็นองค์ประกอบหลัก จะเห็นว่าจากโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลซูโครส (ภาพที่ 1.1) จะเห็นว่า มีพันธะ 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, 2561)

สำหรับสมบัติเนื้อสัมผัสของผลไม้ จริงแท้ (2538) กล่าวว่า การอ่อนนุ่มของผลไม้เกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวหรืออ่อนตัวของผนังเซลล์ประการหนึ่ง นอกจากนั้นยังเกิดจากการที่แป้งซึ่งสะสมไว้ในผล เปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลและเกิดจากการสูญเสียน้ำออกไปจากผลผลิตผล 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 สี เนื้อสัมผัส ความชื้น ปริมาณ

มวลแห้ง และความหวาน เนื่องจากการดูดซับคลื่นเนียร์อินฟราเรดขององค์ประกอบที่เกี่ยวข้องซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามสรีระของเนื้อทุเรียน เช่น เปลี่ยนแปลงตามความสุกแก่ของเนื้อทุเรียน อย่างไรก็ตามเมื่อความสุกแก่ของเนื้อทุเรียนเปลี่ยนแปลง มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนเซลล์และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเซลล์ (Ognjanov et al., 1995) ปริมาณ chelating-soluble pectin และ acid soluble pectin ของเปลือกกล้วย (Bicu and Mustata, 2013) เมื่อเก็บผลส้ม navel ไว้บนต้นหลังการบริบูรณ์ insoluble dietary fiber และ water soluble pectin มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Dong et al., 2008) เปลือกของลูกองมีการลดลงของไทรโคม (Trichome) และมีการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อพาเรงคิมา (Parenchyma cell) ในระหว่าง 13-16 สัปดาห์ของความสุกแก่ (Venkatachalam and Meenune, 2012) การเปลี่ยนแปลงของผลไม้เช่นนี้นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดของเนื้อทุเรียน ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีบ่งบอกความสุกแก่ของเนื้อทุเรียน

นอกจากนี้ เนื่องจากความสุกแก่ของทุเรียนมีความสัมพันธ์กับปริมาณมวลแห้งของเนื้อทุเรียน จึงจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดโดยการตรวจที่เนื้อโดยตรงกับปริมาณมวลแห้งของเนื้อทุเรียนในงานนี้ ดังนั้น การนำเทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรด มาใช้ประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการขายในห้างสรรพสินค้าจึงมีความเป็นไปได้ อย่างไรก็ตาม การที่จะมองเห็นความเปลี่ยนแปลงในรูปแบบการดูดกลืนแสงโดยตรงนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของทุเรียนมีรูปแบบการดูดกลืนแสง (Absorption band) ขนาดใหญ่ครอบคลุมรูปแบบการดูดกลืนคลื่นของสารเคมีชนิดอื่นและการซ้อนทับของแถบการดูดกลืนของคลื่นขององค์ประกอบที่มีความซับซ้อน ดังนั้นจึงต้องนำการใช้หลักการทาง Chemometric เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลแบบตัวแปรพหุ (Multivariate analysis) มาช่วยในการขจัดตัวแปรรบกวนออกไปแล้วสร้างแบบจำลองในการทำนาย (Calibration model) ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จึงเป็นการทำทนายที่จะได้องค์ความรู้ใหม่จากโครงการวิจัยที่ได้นำเสนอนี้พร้อมกับการสามารถประยุกต์ใช้ได้ในส่วนทุเรียนและห้างสรรพสินค้า หรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อเพิ่มความมั่นใจให้ผู้บริโภค และผู้ขาย และเป็นความรู้ใหม่ในการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อการประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการขายในห้างสรรพสินค้า

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.3.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อการประเมินคุณภาพการรับประทาน (สี เนื้อสัมผัส ความชื้น ปริมาณมวลแห้ง และความหวาน) ของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทอง

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ใช้ทุเรียนพันธุ์หมอนทองจากสวนที่ผลิตเพื่อการส่งออกเท่านั้นและการวิจัยจะใช้

1. FT-NIR Spectrometer ซึ่งมีลักษณะการวัดแบบ Diffuse Reflectance ที่ช่วงคลื่นระหว่าง $12500-3500\text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่น 700-2500 nm)
2. Longwave linear variable filter spectrometer (MICRO NIR JDSU, USA) ซึ่งมีลักษณะการวัดแบบ Interactance มีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 1150-2150 nm
3. Visible and NIR Short Wavelength Diode Array Spectrometer (FQA-NIR GUN Fantec, Japan) ซึ่งมีลักษณะการวัดแบบ Interactance มีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 600-1100 nm

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1. ได้แบบจำลองเพื่อการประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการขายในห้างสรรพสินค้าโดยตรงด้วยวิธีไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
- 1.5.2 สามารถประยุกต์แบบจำลองที่ได้ใน 1.5.1 ใช้จริงในห้างสรรพสินค้าเพื่อเพิ่มความมั่นใจให้ผู้บริโภค ผู้ชาย และชาวสวน หรือหน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจคุณภาพของเนื้อทุเรียนเพื่อลดเวลา และแรงงานในการตรวจสอบซึ่งหมายถึงการลดต้นทุนในการผลิต
- 1.5.3 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อการประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการขายในห้างสรรพสินค้า
- 1.5.4 สามารถเพิ่มศักยภาพของการปรับปรุงและประกันคุณภาพของการผลิตทุเรียนทั้งเพื่อการบริโภคภายในประเทศได้ ทำให้ผู้บริโภค ผู้ชาย และชาวสวนสามารถมั่นใจในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผลงานสามารถจดสิทธิบัตร หรือเผยแพร่ในวารสารระดับชาติและระดับนานาชาติได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทูเรียนพันธุ์หมอนทอง

ทูเรียนพันธุ์หมอนทองเป็นทูเรียนพันธุ์ที่นิยมปลูกกันมาก เพราะตลาดต้องการและการขายได้ราคาดี เป็นพันธุ์ที่อยู่ในตระกูลหลวง ลำต้นมีลักษณะลุ่มๆตอมๆไม่ค่อยกลม กิ่งตั้งฉากกับลำต้นแต่เนื่องจากกิ่งอ่อนจึงทำให้ลู่ลง ขนาดของโคนกิ่งไม่ใหญ่จึงไม่แข็งแรง ขณะเดียวกันกิ่งมีแขนงยาวจึงทำให้กิ่งทอดลง แต่กิ่งที่แตกออกมาใหม่ๆ ปลายกิ่งจะชูขึ้นตามปกติ ลักษณะทรงพุ่มโปร่ง กิ่งแขนงห่างช่วงใบแต่ละใบก็ห่างกันด้วย ลักษณะใบยาว ปลายใบเรียวเด่นชัดกว่าพันธุ์อื่นๆ ผลมีขนาดใหญ่ยาวประมาณ 30 เซนติเมตร เนื้อหนา สีเนื้อเหลืองอ่อน รสหวานมัน ร่องพุ่มองเห็นไม่ชัด พบว่าพูใหญ่เพียงอันเดียวเรียกว่าพูเอก เมล็ดค่อนข้างเล็ก เนื้อไม่แฉะ เก็บไว้ได้นานไม่และไม่น่าเสีย แต่ผลผลิตต่อต้นไม่มากนัก (พิจิตร, 2537)

2.1.1 ดัชนีการเก็บเกี่ยว

เพื่อให้การเก็บเกี่ยวผลทูเรียนสัมฤทธิ์ผลตามวัตถุประสงค์ ดัชนีการเก็บเกี่ยวผลทูเรียนจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องทราบ ดังนั้นอายุของผลทูเรียนและลักษณะที่เหมาะสมที่จะเก็บเกี่ยวผลทูเรียนโดยมีจุดมุ่งหมายที่จะเก็บเกี่ยวในอายุที่เหมาะสมและมีความแก่ตามที่ตลาดต้องการทั้งภายในประเทศและต่างประเทศลำดับได้ดังนี้ (ทิฆัมพร, 2530 ; ทรงพล, 2531 ; นิรนาม ; รัชฎา และ จริงแท้, 2531)

1) การนับอายุ โดยเริ่มต้นนับตั้งแต่ดอกแรก หรือดอกทั้งต้นบานเป็นส่วนใหญ่นักสืบดอกร่วงหมด หรือเรียกตามคนสวน คือ หางแย้ จนกระทั่งผลแก่และเริ่มเก็บเกี่ยวได้ ดังนั้นดัชนีการเก็บเกี่ยวโดยอาศัยการนับอายุจึงมีการแนะนำเป็นช่วงซึ่งมีค่าแตกต่างกันอยู่ระหว่าง 10-20 วัน (ทรงพล, 2531 ; นิรนาม ; รัชฎา และ จริงแท้, 2531) ซึ่งทูเรียนหมอนทอง จังหวัด จันทบุรี อยู่ในช่วง 115-130 วันหลังดอกบาน การนับอายุนี้มีความผันแปรด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ แหล่งปลูก อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน ความแตกต่างของแต่ละช่อดอกและแต่ละผลในต้นเดียวกัน

2) สีผล (หนาม) ผลอ่อนหนามมีสีเขียวหรือน้ำตาลอ่อน เมื่อผลแก่ปลายหนามมีสีน้ำตาลเข้มติดกับสีโคนหนามและร่องหนามซึ่งเป็นสีอ่อนกว่า ทั้งนี้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ถ้าผลทูเรียนได้แสงแดดไม่เท่ากัน โดยเฉพาะผลที่ได้รับแสงแดดมากย่อมมีลักษณะผิวกร้าน ฯลฯ

3) ร่องหนาม ผลแก่นอกจากปลายหนามจะสีเข้มแล้ว ร่องหนามก็ขยายออกเล็กน้อย ทำให้ร่องหนามห่าง นอกจากนี้สีของร่องหนามก็จะเข้มมากขึ้นตามอายุด้วย

4) ก้านผล เมื่อผลแก่ ก้านผลทุเรียนขยายใหญ่ (ดูอ้วนขึ้น) ซึ่งแข็งแรง ในหมอนทองจะเห็นได้ชัดเจน สีของขั้วในส่วนที่กับก้านผลจะคล้ำกว่าส่วนที่ติดกับกิ่ง

5) ปากปลิง (รอยตรงปลายกิ่งที่ต่อกับปลายก้านผล) ผลทุเรียนแก่ ปากปลิงขยายโตขึ้น ทุเรียนพันธุ์หมอนทองเห็นเด่นชัดในผลที่สมบูรณ์

6) ความยืดหยุ่นของปลายหนาม ทุเรียนแก่ ปลายหนามมีความยืดหยุ่น มีแรงตีดกลับ คล้ายสปริงเมื่อบีบปลายหนามเข้าหากัน ส่วนทุเรียนที่อ่อนปลายหนามจะแข็งไม่มีความยืดหยุ่น

7) ร่องพู รอยต่อระหว่างพูจะดูห่างมากขึ้นและมองเห็นเป็นเส้นตรงมาก

8) การเคาะผล ผลทุเรียนแก่จะให้เสียงโพรก เสียงโพร้งมากกว่าผลอ่อน ทั้งนี้ในช่วงเข้าหรือมีความชื้นมากการเคาะผลก็ทำให้ข้อสรุปที่คลาดเคลื่อนได้

9) การดูน้ำที่ก้านผล ทุเรียนแก่จะมีน้ำใส ส่วนทุเรียนอ่อนน้ำจะขุ่นเหนียวมียางติดมือเมื่อสัมผัส

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง (สุตารัตน์, 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%) (สุตารัตน์, 2536) ได้รายงานไว้ว่า พันธุ์ทุเรียนที่แตกต่างกันจะมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ต่างกัน เช่น ทุเรียนพันธุ์ชะนี มีคาร์โบไฮเดรต 22.3% ในขณะที่ทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีคาร์โบไฮเดรตมากถึง 29.6%

3) ไขมัน เป็นสารอาหารที่มีรองมาจากคาร์โบไฮเดรต ซึ่งในทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีปริมาณไขมันเพียง 3.3 % ซึ่งน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนพันธุ์อื่น เช่น พันธุ์กระดุม พันธุ์ชะนีพันธุ์ก้านยาว

4) โปรตีน โปรตีนเป็นส่วนประกอบที่มีปริมาณเล็กน้อยในทุเรียนและทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีโปรตีนเพียง 2.1% ซึ่งน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนพันธุ์อื่น ๆ

2.1.3 องค์ประกอบอื่น ๆ เช่นเกลือแร่ และวิตามิน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

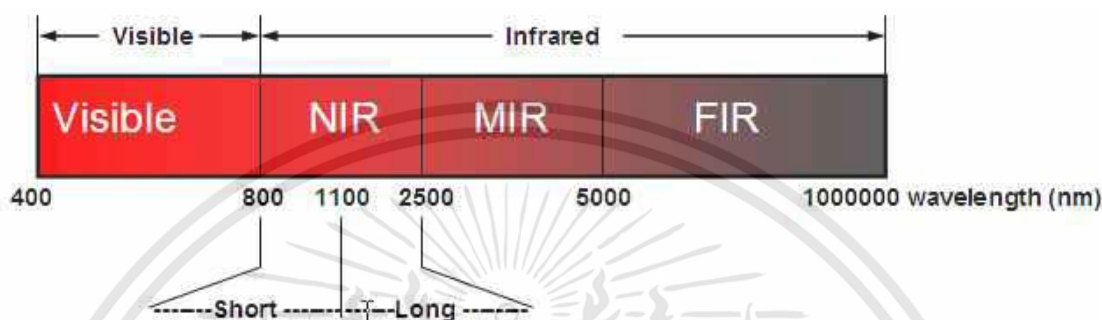
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง (สุดารัตน์, 2536)

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 (β -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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คลื่นเนียร์อินฟราเรด (Near Infrared Radiation)

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



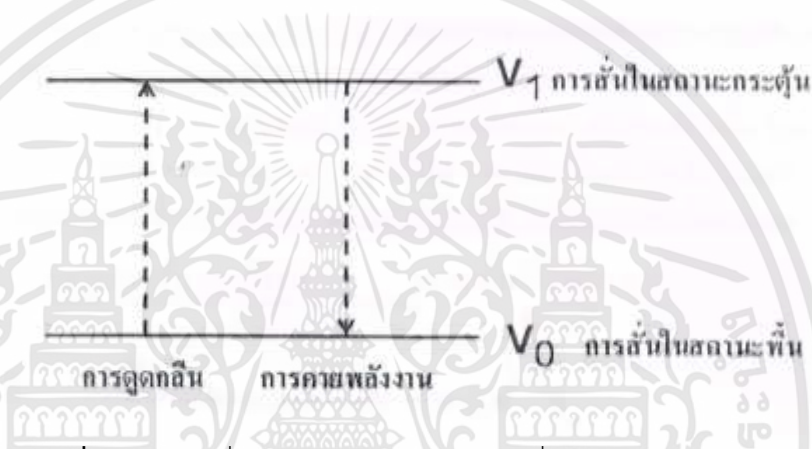
ภาพที่ 2.1 ช่วงสเปกตรัมของคลื่นแสงอินฟราเรด (Osborne et al., 1993)

คลื่นแสง NIR มีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 800-2500 นาโนเมตร สามารถแบ่งช่วงความยาวคลื่นออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงคลื่นสั้นที่มีความยาวคลื่น 800-1100 นาโนเมตร และช่วงคลื่นยาวที่มีความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร (Osborne et al., 1993) พลังงานของคลื่นแสง NIR จะอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับการสั่น (vibration) ของพันธะภายในโมเลกุล หากการสั่นของพันธะใดเกิดที่ความถี่ที่ตรงกับความถี่ของคลื่นแสง NIR ก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนขึ้น ซึ่งการดูดกลืนแสง NIR ใช้มากในการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพของสารประกอบอินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ

การสั่นของพันธะในลักษณะต่างๆ จะมีการดูดกลืนพลังงานที่เป็นเฉพาะของมัน เนื่องจากโมเลกุลหนึ่งๆ มีพันธะได้หลายแบบ ซึ่งแต่ละพันธะก็มีรูปแบบการสั่นได้อีกหลายรูปแบบ ทำให้โมเลกุลหนึ่งๆ จะแสดงการดูดกลืนแสง NIR ได้หลายช่วงคลื่นพร้อมกัน ลักษณะการดูดกลืนแสงจะเกิดเป็นแถบ (band) หรือ พีค (peak) แสดงถึงพลังงานคลื่นแสง NIR ที่ถูกดูดกลืน ซึ่งสามารถวัดได้ใน 2 รูปแบบ คือรูปแบบความเข้มแสงที่ส่องผ่าน (transmittance) และรูปแบบความเข้มแสงสะท้อนออกมา (reflectance) แล้วนำค่าความเข้มแสงที่ได้ในแต่ละความยาวคลื่น มาเขียนกราฟโดยให้แกนนอนเป็นค่าความยาวคลื่น แกนตั้งเป็นค่าการดูดกลืนแสง จะได้กราฟการดูดกลืนแสงของตัวอย่างนั้นๆ กราฟที่ได้เรียกว่า เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม (NIR spectrum) โมเลกุลของสารแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างกัน เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจึงได้สเปกตรัมที่มีลักษณะต่างกัน (Osborne et al., 1993)

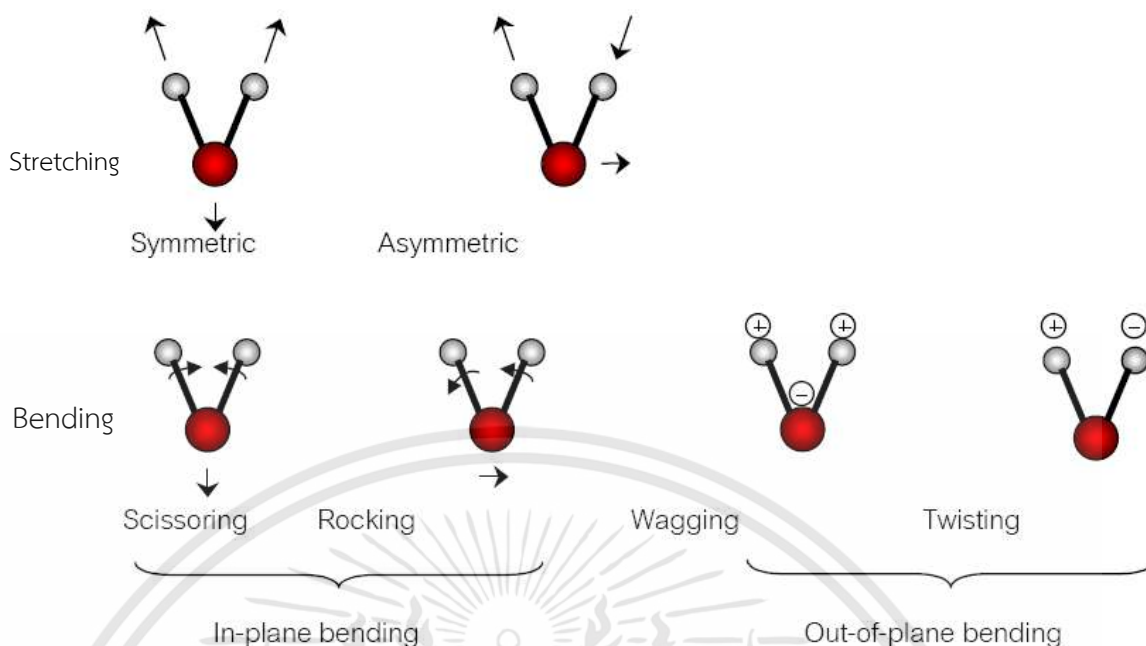
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎีของกลศาสตร์ควอนตัม อธิบายว่าโมเลกุลของสสารประกอบขึ้นด้วยอะตอมที่เชื่อมต่อกันด้วยการสร้างพันธะเคมี (chemical bonding) พันธะในโมเลกุลจะเกิดการสั่น (vibration) อยู่ตลอดเวลา เรียกการสั่นชนิดนี้ว่า การสั่นในสถานะพื้น (vibration ground state) ด้วยความถี่ซึ่งมีค่าเฉพาะ (quantized frequency) ถ้าโมเลกุลเกิดอันตรกิริยากับรังสี NIR จะดูดกลืนรังสีที่มีความถี่ตรงความถี่ค่าเฉพาะ จนทำให้เกิดการสั่นในสถานะกระตุ้น (vibration excited state) ระดับโอเวอร์โทน โมเลกุลไม่สามารถอยู่ในสถานะกระตุ้นได้จึงต้องคายพลังงานออกมาในรูปความร้อนเพื่อให้กลับคืนสู่การสั่นในสถานะพื้นตามเดิม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า แทรนซิชัน (transition) ดังภาพที่ 2.2. (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 ซึ่งทั้งหมดนี้อาจเกิดการเคลื่อนที่ที่อยู่ในระนาบเดียวกัน (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 จะพบโอเวอร์โทนระดับที่หนึ่ง และคอมบิเนชันโมเลกุลของสารที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วง 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 et al., 1993)

2.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy)

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นหนึ่งในเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจสอบคุณภาพสินค้าเกษตรและอาหาร เทคนิคนี้จะแสดงถึงการดูดซับคลื่นในแถบเนียร์อินฟราเรดที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และน้ำ Williams and Norris (2001) มีงานวิจัยหลายฉบับที่รายงานเกี่ยวกับการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งเป็นเทคนิคที่รวดเร็วและเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติและโครงสร้างของอาหารในการวิจัยขั้นพื้นฐานและเพื่อตรวจสอบกระบวนการแบบออนไลน์ (Ozaki et al., 2006 ; Nicolai et al., 2007)

ตารางที่ 2.2 แสดงตำแหน่งความยาวคลื่นแสงย่าน 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)

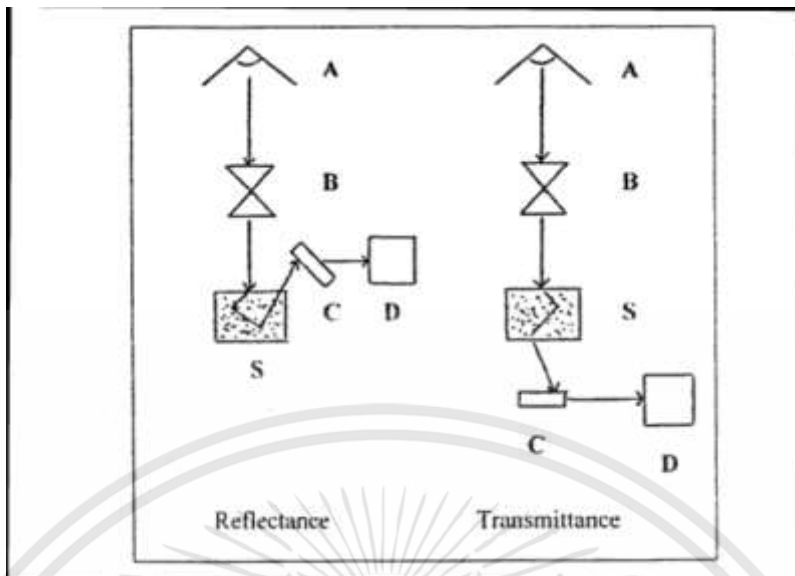
2.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Instrumentation for Near Infrared Spectroscopy)

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

2.3.2 ชนิดของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Type of NIRS Instrument)

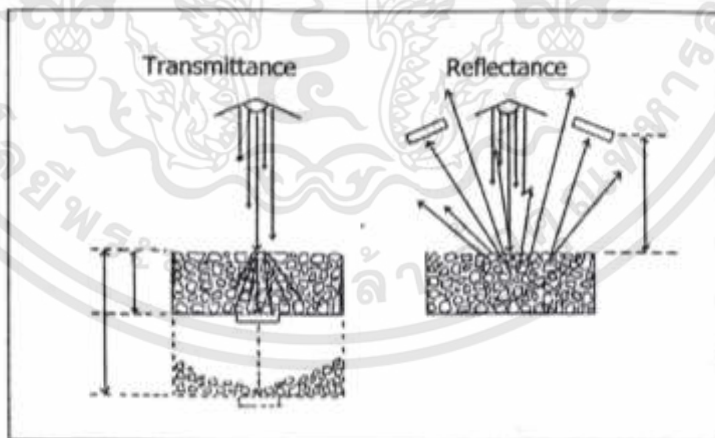
Williams (2007) อธิบายว่าเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี สามารถใช้ได้ทั้งแบบ reflectance และ transmittance เครื่องมือแบบ reflectance มักจะเรียกว่าเป็นเครื่อง NIR ส่วนเครื่องมือแบบ Transmittance จะอยู่ในส่วนของเครื่อง NIT เครื่องมือแบบ reflectance จะมีแหล่งกำเนิดแสงและ detector อยู่ภายในและอยู่ด้านเดียวกับตัวอย่าง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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

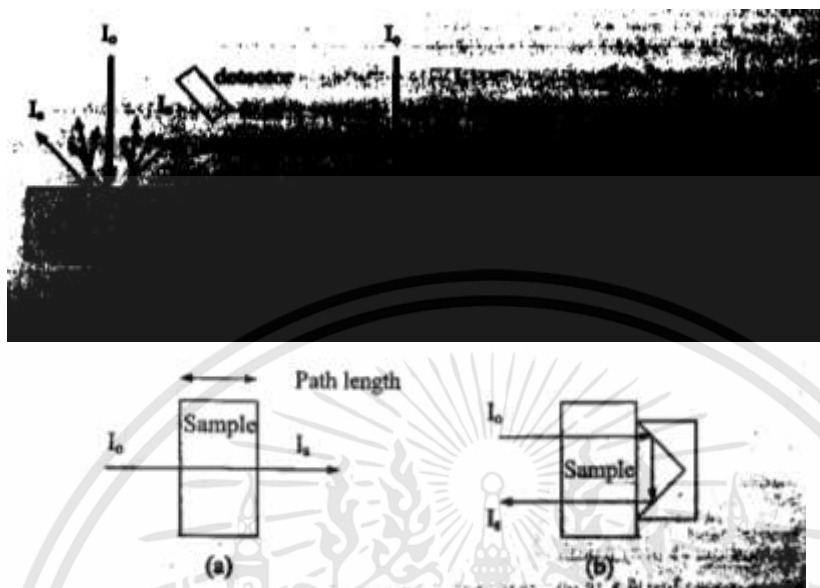
ภาพที่ 2.5 แสดงความแตกต่างของ path length ระหว่างเครื่องมือแบบ reflectance และแบบ transmittance ซึ่ง path length คือระยะทางระหว่างผิวหน้าของตัวอย่างกับ detector และเป็นค่าคงที่ที่สำคัญสำหรับเครื่องมือแบบ reflectance ส่วนเครื่องมือแบบ transmittance นั้น path length จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและการตั้งค่าที่เหมาะสมระหว่างการพัฒนาแบบจำลอง 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) จากตัวอย่างของแข็ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนที่จะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากแสงที่ส่องผ่านซึ่งสัญญาณจะอ่อน ซึ่งปัจจุบันวิธีการวัดสะท้อนแบบแพร่มีการใช้มากที่สุด ภาพที่ 2.6 แสดงแบบวิธีการวัดด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี



ภาพที่ 2.6 แบบวิธีการวัดด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี a. การส่องผ่าน (transmittance) b. การส่องผ่านสะท้อน (transflectance) c. การสะท้อนแบบแพร่ (diffuse reflectance) d. อินเทอร์แอกแตนซ์ (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) ของพันธะโมเลกุล รังสีบางส่วนจะเกิดการสะท้อน (reflection) บางส่วนจะเกิดการดูดซับ (absorption) เอาไว้ และบางส่วนจะผ่านออกมา

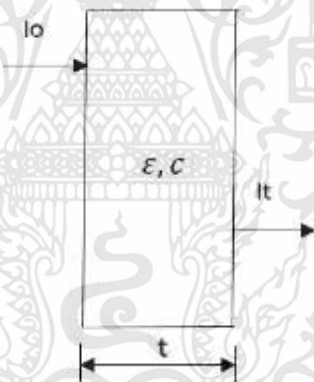
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(transmission) (Nicolai et al., 2007) ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) ความเข้มแสงของหนึ่งความยาวคลื่นที่ส่องผ่านไปตัวอย่าง (I_t) แล้ววัดความเข้มแสงที่ตกกระทบตัวอย่าง (I_0) ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์กับความหนาของตัวอย่าง (t) และความเข้มข้นของสสาร (c) (Osborne et al., 1993)

2.2.1 กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต

ปริมาณแสงที่ถูกลดทอนเมื่อส่องผ่านไปในตัวกลางที่ดูดกลืนแสง จะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีและจะมีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นอันเนื่องมาจากการกระเจิงแสง แสงภายนอก และผลตอบสนองที่ไม่คงตัวของเครื่องมือ ปริมาณแสงที่ถูกลดทอนอันเนื่องมาจากการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ไม่มีการกระเจิงแสงอธิบายได้ด้วย กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต เมื่อตัวกลางเป็นเนื้อเดียวกันไม่ทำให้เกิดการกระเจิงแสง และสมบัติในการดูดกลืนแสงเนื่องมาจากองค์ประกอบเพียงองค์ประกอบเดียวในตัวกลาง กฎของเบียร์-แลมเบิร์ตกล่าวไว้ว่า การดูดกลืนแสงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาตัวอย่างที่ดูดกลืน กฎของเบียร์กล่าวไว้ว่า การดูดกลืนแสงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของตัวอย่าง (Osborne et al., 1993)

1. วัดแบบส่องผ่าน



ภาพที่ 2.8 ปริมาณแสงที่ถูกลดทอนโดยตัวกลาง

$$-\frac{dI}{I} = Kdn$$

$$-\int_{I_0}^{I_t} \frac{dI}{I} = K \int_0^n dn$$

$$-\ln(I_t - I_0) = K(n \leftarrow 0)$$

$$\ln I_0 - \ln I_t = Kn$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln \frac{I_0}{I_t} = Kn$$

$$\frac{1}{T} = e^{kn}$$

$$\log \frac{1}{T} = \log e^{kn}$$

$$A = \log \frac{1}{T} = Kn = \text{etc}$$

$$\ln \frac{1}{T} = \ln \frac{1}{I_t/I_0} = \ln \frac{I_0}{I_t}$$

I_t คือ ความเข้มแสงที่ส่องผ่าน สัมพันธ์กับจำนวนโมเลกุลที่ดูดกลืน

I_0 คือ ความเข้มแสงเริ่มต้น

K คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient)

t คือ ความหนาหรือระยะทางที่แสงแพร่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ดูดกลืนแสง (เช่น กรณีสารละลายในหลอดสี่เหลี่ยม ความหนาของหลอดคือ t)

\mathcal{E} คือ การดูดกลืนโมลาร์ (molar absorptivity) มีหน่วยเป็น liter/ (mole cm)

c คือ ความเข้มข้น มีหน่วยเป็น mole/liter

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

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 g^{-1}dm^3 หรือ mol L^{-1} หรือ molar

2. วัดแบบการสะท้อน kugelka and munk (1931) พบว่าวัสดุที่มีความหนาเป็นอนันต์ (ไม่มีแสงทะลุผ่าน) ค่า reflectance ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับแสงและการกระเจิงแสงของวัสดุนั้น

$$\frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} = \frac{K}{S}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R คือ ค่าการสะท้อนแสงที่มีความหนาเป็นอนันต์

K คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient, ϵ) กับความเข้มข้นของสารตัวกลาง (concentration, c)

S คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง (scattering coefficient)

ต่อมา Karl Noris ได้ทำการทดลองวัดค่า reflectance ของสารละลายและเปรียบเทียบกับค่า reflectance ของวัสดุมาตรฐานที่ไม่มีการดูดซับคลื่นแสง พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ดี กับค่าความเข้มข้น (c) ของสารละลาย

$$\log \left(\frac{R'}{R} \right) = \frac{\epsilon c}{s}$$

$$\log \left(\frac{1}{R} \times R' \right) = \frac{\epsilon c}{s}$$

$$\log \frac{1}{R} \times \log R' = \frac{\epsilon c}{s}$$

$$\log \frac{1}{R} = \frac{\epsilon c}{s}$$

R' คือ ค่าสะท้อนแสงของวัสดุมาตรฐาน

R คือ ค่าสะท้อนแสงของตัวอย่าง

2.3.3.2 องค์ประกอบของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง (light source) อุปกรณ์แยกลำแสงเป็นแต่ละความยาวคลื่นหรือโมโนโครเมเตอร์

(monochromater) ช่องใส่ตัวอย่าง (sample cell) ตัวตรวจวัด (Detector) และ คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

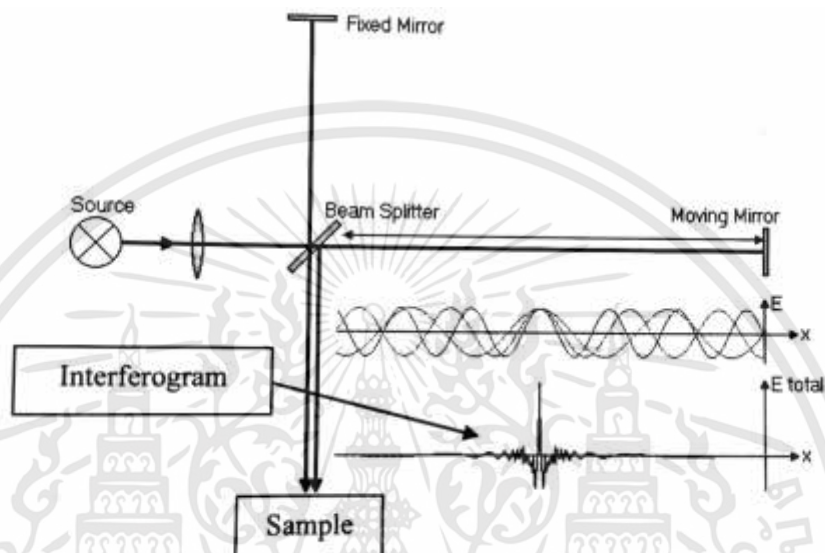
1. แหล่งกำเนิดแสง (light source) แหล่งกำเนิดแสงที่ให้ช่วงคลื่นเนียร์อินฟราเรดส่วนใหญ่จะใช้หลอดทังสเตนฮาโลเจน (Tungsten halogen) เพราะราคาถูก อายุการใช้งานนาน ให้แสงคงที่สม่ำเสมอ (ปานมนัส, 2556) มีช่วงคลื่น Near Ultraviolet จนถึงอินฟราเรด จะให้ความยาวคลื่นครอบคลุมตั้งแต่ 300-2500 nm (Wikipedia. "Halogen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

2. อุปกรณ์แยกลำแสงเป็นแต่ละความยาวคลื่นหรือโมโนโครเมเตอร์ (monochromator) เป็นส่วนที่ใช้แยกความยาวคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งเป็นแสงที่มีหลายๆความยาวคลื่น (polychromatic wavelength) ให้เป็นแถบแสงในช่วงแคบๆ หรือเป็นความยาวคลื่นเดียว (monochromatic wavelength) ปัจจุบันโมโนโครเมเตอร์จะใช้แบบเกรตติง (grating) สะท้อนแสงซึ่งมีลักษณะเป็นร่องเล็กๆ ขนานกันจำนวนมาก แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะตกกระทบลงบนผิวหน้าของร่อง แล้วสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เฉพาะความยาวคลื่นที่เราเลือกเท่านั้นจึงจะผ่านช่องแสงออก (exit slit) ไปสู่สารตัวอย่าง (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล สีและแสง การวัดการดูดกลืน, 2561)

3. อินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ (interferometer) เป็นอุปกรณ์เลือกความยาวคลื่นแสงโดยมีหลักการคือ แสงแต่ละความยาวคลื่นจะถูกแยกเป็นสองลำแสงตั้งฉากกันด้วยอุปกรณ์แยกลำแสง (beam splitter) ลำแสงหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับด้วยกระจกที่อยู่กับที่ (fixed mirror) มาพบกับแสงอีกลำหนึ่งที่ถูกสะท้อนด้วยกระจกที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมา (moving mirror) ลำแสงทั้งสองจะมีทางเดินแสงทั้งที่เท่ากันและแตกต่างกันเป็นลำดับตามจังหวะการเคลื่อนที่ของกระจกที่เคลื่อนกลับไปกลับมาถ้าลำแสงทั้งสองสะท้อนและเดินทางมาพบกันโดยมีทางเดินแสงที่ทำให้เฟสเท่ากันจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (constructive interference) ทำให้ความเข้มแสงสูงที่สุด แต่ถ้าทางเดินแสงทั้งสองพบกันในจังหวะที่มีเฟสไม่เท่ากันแสงจะเกิดการแทรกสอดแบบทำลาย (destructive interference) ความเข้มแสงที่รวมกันจะน้อยกว่าลำแสงเดียวเป็นลำดับ ดังนั้นการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาด้วยความเร็วคงที่ของกระจกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงที่วัดได้เป็นแบบคลื่นไซน์ที่มีความถี่ค่าหนึ่งโดยความถี่ของคลื่นไซน์จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากกระบวนการเกิดแทรกสอดแบบทำลายและแบบเสริมจะแตกต่างกันตามความยาวคลื่นเมื่อนำระยะเคลื่อนที่ของกระจกมาพลอตในแกนแนวนอนและความเข้มแสงแต่ละความยาวคลื่นมาพลอตในแนวตั้งจะได้กราฟเหมือนกับคลื่นไซน์ (sine wave) และเมื่อนำค่าความเข้มแสงดังกล่าวของทุกความยาวคลื่นมาพลอตรวมกันจะได้อินเทอร์เฟอโรแกรม (interferogram) ดังแสดงในภาพที่ 3.4 เมื่อนำไปผ่านกระบวนการฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มจะได้สเปกตรัม (อนุพันธ์, 2558)



ภาพที่ 2.9 ไดอะแกรมการทำงานของฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (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) ใช้ในช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 nm และ PbS ควบคู่กับ Silicon photodiodes จะใช้ในช่วงเนียร์อินฟราเรด (400-2600 nm) (ปานมนัส, 2556)

2.3.3.3 การทำงานของเครื่อง เมื่อวางวัตถุที่บรรจุอยู่ในภาชนะที่มีส่วนของควอทซ์หรือแก้ว แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะผ่านโมโนโครเมเตอร์ทำให้มีความยาวคลื่นที่

ต้องการออกมาแล้วส่องผ่านไปยังวัตถุ 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) ตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันจะทำให้ได้เส้นสเปกตรัมที่ต่างกันด้วย 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 ซึ่งความแตกต่างของสเปกตรัมนี้จะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน แต่สามารถส่งผลกระทบต่อความแม่นยำสมการได้มาก (Kawano and Abe, 1995)

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

2.4 PLS Modeling

2.4.1 การแปลงหรือการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัม (spectrum pretreatment)

การแปลงข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ NIR เพื่อลดอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวมาข้างต้น 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 and Norris, 2001) โดยการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 1 (first derivative) สามารถลดปัญหาการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแกน Y ทำให้เส้นสเปกตรัมเลื่อนมาชิดกัน แต่พีคของสเปกตรัมยังมีฐานกว้าง จึงไม่สามารถแยกพีคออกจากกันอย่างชัดเจนได้ อีกทั้งวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 ให้ความหมายเป็นค่าความชันของสเปกตรัมแต่ละความยาวคลื่นซึ่งทำให้แปลความหมายได้ยาก แต่การแปลงข้อมูลด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 (second derivative) สามารถลดผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแกน Y ที่ชัดเจนกว่าวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 และแยกพีคสเปกตรัมที่มีการซ้อนทับกันออกจากกันอย่างชัดเจน ทำให้ทราบตำแหน่งความยาวคลื่น แต่สเปกตรัมมีลักษณะหัวกลับลงมาด้านล่าง (Osborne et al., 1993) ดังนั้น การคำนวณการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 จึงเป็นที่นิยมมากกว่าวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 โดยการเพิ่มอันดับของอนุพันธ์สูงขึ้น ก็จะได้สเปกตรัมที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นข้อมูลที่ตีในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ แต่การทำอนุพันธ์ที่สูงเกินไปทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณวัดกับสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ลดลง เนื่องจากแถบสัญญาณรบกวนมักมีรูปร่างแคบชัน ดังนั้นเมื่อแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์สเปกตรัมที่ได้ของสัญญาณรบกวน จึงมีแอมพลิจูด (amplitude) แค้นชัดมากยิ่งขึ้นจนสามารถรบกวนการวิเคราะห์ได้

2) multiplicative scatter correction (MSC) เป็นการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสเปกตรัม เพื่อลดอิทธิพลของการกระเจิงของแสงที่เกิดจากสาเหตุที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการลดค่าผิดพลาด การใช้ NIRS แบบวัดการสะท้อนกลับของแสง เพื่อหา

ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดพืชโดยแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี MSC พบว่ามีค่าผิดพลาดของสมการต่ำกว่าสมการของสเปกตรัมดั้งเดิม (original spectrum) (ปานมนัส และคณะ, 2556)

3) smoothing เป็นวิธีการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมเพื่อลดสัญญาณรบกวนจากภายนอก ทำให้เส้นสเปกตรัมราบเรียบต่อเนื่องขึ้น มี 2 วิธีนิยมใช้คือ

3.1 running mean smooth or N-point smooth) เป็นการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่มีข้อดีคือเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด โดยมีการแทนค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความยาวคลื่นด้วยค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีจุดศูนย์กลางของช่วงความยาวคลื่นตรงกับจุดที่ถูกแทนที่ ต่อจากนั้นเลื่อนช่วงไปหนึ่งความยาวคลื่นแล้วคำนวณซ้ำจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ซึ่งสามารถลดปัญหาของสัญญาณรบกวนต่อค่าการดูดกลืนแสง โดยจะได้สเปกตรัมที่มีลักษณะเหมือนสเปกตรัมดั้งเดิม แต่จะเรียบสม่ำเสมอมากกว่า

3.2 Savitzky-Golay smooth เป็นวิธีที่นิยมใช้มาก ใช้ในกรณีที่มีข้อมูลมีสัญญาณรบกวนมาก ต้องการทำให้สัญญาณเรียบและยังคงรูปร่างของสเปกตรัมเหมือนเดิม และรูปร่างของสเปกตรัมมียอดแหลมเป็นจำนวนมาก วิธีการนี้เริ่มจากการกำหนดช่วงความยาวคลื่น ($n=2m+1$) เหมือนวิธี Running mean smooth จากนั้นนำข้อมูลสเปกตรัมในช่วงที่กำหนดมาหาสมการโพลีโนเมียลด้วยวิธี least square เพื่อให้ได้สมการที่ต่อเนื่องและเป็นตัวแทนของข้อมูลในช่วงดังกล่าว เมื่อได้สมการแล้วนำมาคำนวณค่าสเปกตรัมที่จุดศูนย์กลางช่วง แล้วนำค่าที่คำนวณได้ไปแทนค่าสเปกตรัมเดิมที่จุดหรือความยาวคลื่นนั้น ค่าที่คำนวณได้จะใกล้เคียงกับค่าจริงมากขึ้น เนื่องจากสัญญาณรบกวนได้ถูกกำจัดออกไปแล้ว จากนั้นทำซ้ำโดยเลื่อนไปที่ช่วงความยาวคลื่นถัดไปจนตลอดทุกช่วงความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมข้อมูล (ปานมนัส และคณะ, 2556)

3.3 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)

3.4 normalization เป็นวิธีการปรับแก้กลุ่มของสเปกตรัมเพื่อให้ได้สเปกตรัมที่มีจุดสำคัญที่เด่นชัด และเป็นการกำจัดความแปรปรวนอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งจะช่วยให้สามารถศึกษาทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้ดีขึ้น หรือเป็นการลดความซับซ้อนของข้อมูล ช่วยให้นำข้อมูลสเปกตรัมไปทำสมการทำนาย (calibration equation) ได้ง่ายขึ้น (ปานมนัส และคณะ, 2556)

วิธีการแปลงข้อมูลสเปกตรัมที่ดีที่สุดก็คือ วิธีที่ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้สมการทำนายที่มีความสามารถในการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้ใกล้เคียงที่สุด อย่างไรก็ตามไม่มีกฎตายตัวแน่นอนสำหรับในการตัดสินใจเลือกวิธีที่จะใช้ในการแปลงข้อมูล วิธีที่ดีที่สุดคือ การลองผิดลองถูกในการทดลองใช้แต่ละวิธีจนกว่าจะได้สมการทำนายที่แม่นยำสุด โดยต้องเข้าใจความหมายและคำนึงถึงข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีให้ชัดเจน (ปานมนัส และคณะ, 2556)

2.4.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis)

การวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยทั่วไป ต้องมีการสร้างสมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (calibration equation developed) ในการสร้างสมการทำนายจำเป็นต้องมีกลุ่มตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการถดถอยเชิงเส้นระหว่างข้อมูลวิเคราะห์ทางเคมีกับข้อมูลสเปกตรัม กลุ่มตัวอย่างที่ดีจะต้องมีจำนวนตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์อย่างพอเพียงทั้งตัวอย่างในปัจจุบันและตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ในอนาคต โดยเฉพาะปริมาณองค์ประกอบทางเคมี จะต้องมามีค่าครอบคลุมปริมาณทั้งต่ำสุดและสูงสุดของตัวอย่าง โดยมีการสุ่มตัวอย่าง (sampling) ที่ถูกต้อง เพียงพอ และเป็นตัวแทนที่ดีของประชากร การสุ่มตัวอย่างถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการที่จะได้สมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ดี ทำให้ค่าผิดพลาดที่ได้จากการทดลองลดลง นอกจากนี้ควรพิจารณาวิธีวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งควรเป็นวิธีที่เป็นมาตรฐานและมีความแม่นยำเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องเนื่องจากส่งผลต่อสมการที่สร้างขึ้นต่อไป (Kawano and 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 เป็นไปไม่ได้ที่จะใช้

ความยาวคลื่นใดความยาวคลื่นหนึ่งในการหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้ เนื่องจากตัวอย่างประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิดด้วยกันตั้งที่กล่าวมาแล้ว 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 โดยใช้ตัวแปรอิสระที่ได้จากการเลือกความยาวคลื่นมากกว่าหนึ่งความยาวคลื่น มาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม การสร้างสมการด้วยวิธี MLR มีข้อเสียคือ ในการคัดเลือกตัวแปรอิสระหรือความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดมาสร้างสมการอาจได้ข้อมูลที่ไม่ครอบคลุมมากพอ ทำให้ค่าที่ทำนายได้จากวิธีนี้ มีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่แท้จริง (Osborne et al., 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

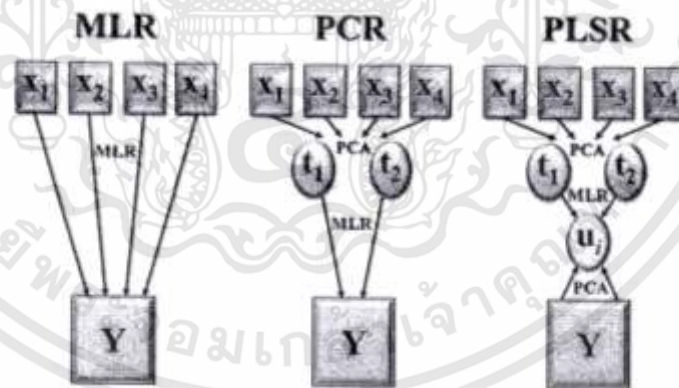
1.1.3 partial least squares regression (PLSR) เป็นเทคนิคในการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) เช่นเดียวกับวิธี PCR แต่จะแตกต่างตรงที่ในช่วงจัดกลุ่มการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) โดยการสร้างแพกเตอร์นั้นจะมีการนำข้อมูลตัวแปรตาม (Y) เข้ามารวมในการสร้างแพกเตอร์ด้วย ซึ่งในการหาค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นมีน้ำหนัก (loading weight; W) แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ได้จากวิธีทางเคมีที่นำมาหาความสัมพันธ์กัน 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 2.10 การทำแบบจำลองแคลิเบรชันด้วยวิธี MLR, PCR และ PLS (Cho, 2556)

Cho (2556) ได้อธิบายภาพที่ 2.8 ซึ่งแสดงการทำแบบจำลองแคลิเบรชันด้วยวิธี MLR, PCR และ PLS โดยเมื่อนำตัวอย่างมาสแกนได้สเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด ซึ่งจะได้ข้อมูลเชิงแสง เช่น ค่าการดูดซับคลื่นที่ความยาวคลื่นใดๆ 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) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

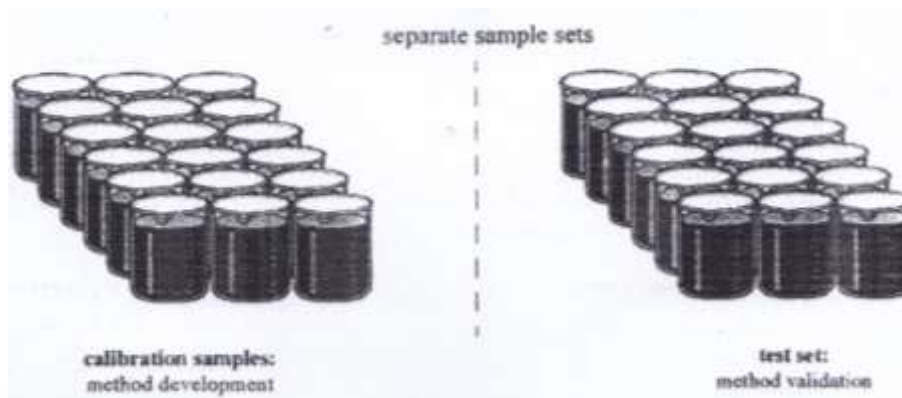
หลังจากที่ได้สร้างแบบจำลองที่ใช้ทำนายเรียบร้อยแล้ว จะต้องทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองนั้นก่อนนำไปใช้จริง ซึ่งวิธีการทดสอบที่นิยมมีด้วยกัน 2 วิธี คือ

1) การพิสูจน์ภายใน (Internal validation) หรือการพิสูจน์แบบไขว้ (full cross validation) (ปานมนัส และคณะ, 2556) การพิสูจน์ภายในนั้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบแบบจำลองก็คือตัวอย่างชุดมาตรฐานทั้งหมดที่ใช้สร้างแบบจำลองนั่นเอง โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ ตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐาน จากนั้นใช้ตัวอย่างมาตรฐานที่เหลือทำการสร้างแบบจำลอง นำแบบจำลองที่ได้ประเมินค่าทางเคมีของตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ที่ตัดออกไป (ภาพที่ 2.11) หลังจากนั้นใส่ตัวอย่างมาตรฐานที่ 1 กลับคืน ขั้นตอนต่อไปตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 2 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐาน ทำขั้นตอนข้างต้นซ้ำจนกระทั่งครบทุกตัวอย่าง จากนั้นหาค่า root mean square error of cross validation (RMSECV)



ภาพที่ 2.11 ชุดตัวอย่างในการ full cross validation (Cozen, 2006)

2) การทดสอบผลการประเมิน (prediction testing) วิธีนี้เป็นการพิสูจน์ภายนอก (external validation) โดยการนำตัวอย่างชุดใหม่มาทำการวิเคราะห์ในสภาวะการทดลองเช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐาน เรียกชุดตัวอย่างที่นำมาทดสอบแบบจำลองนี้ว่า ชุดทดสอบ (testing set) ดังภาพที่ 2.12 วิธีการเตรียมตัวอย่างทำเช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐานทุกขั้นตอน แต่ที่ต้องระวังก็คือปริมาณค่าทางเคมีที่จะหาในตัวอย่างชุดทดสอบต้องอยู่ในช่วงชุดมาตรฐาน หลังจากได้สเปกตรัมของชุดทดสอบแล้ว ให้นำข้อมูลที่ได้ไปหาค่าทางเคมีจากแบบจำลอง พิจารณาจากค่าทางสถิติที่ได้เพื่อประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งค่าทางสถิติที่ควรพิจารณา ได้แก่ ค่าความคลาดเคลื่อน (bias) และค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการทำนาย (Root mean square error of prediction; RMSEP)



ภาพที่ 2.12 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 ในที่นี้ ข้อมูล X คือข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิง ข้อมูล Y คือข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีเนียร์อินฟราเรด-สเปกโทรสโกปี) สอดคล้องซึ่งกันและกัน ความสอดคล้องที่สมบูรณ์จะไม่มี ความแตกต่างกันเลยระหว่าง 2 ชุดข้อมูล ผลของค่า R จะเท่ากับ 1.00 ในทางปฏิบัตินั้น เป็นไปไม่ได้ และ X และ Y อาจจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงบวกหรือลบก็ได้ โดยคำนวณได้จากสมการ

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

เมื่อ	X	คือ	ค่าที่ได้จากการทดสอบทางเคมี
	Y	คือ	ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIR
	N	คือ	จำนวนตัวอย่าง

2. สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R²) (Williams, 2007) แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดยความแปรปรวนในข้อมูล Y ค่าของ R² จะเป็นบวกเสมอ เช่น ถ้า R = 0.97 แล้ว R² = 0.941 หมายความว่า 94.1 เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนในข้อมูล X และ 5.9 เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวนในข้อมูล X เกิดขึ้นจากตัวแปรอื่น เช่น การเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดลองอ้างอิงและอื่นๆ ค่า R² เป็นบวกเสมอโดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของ R ในทางปฏิบัติ R² ให้ข้อมูลและใช้กันมากกว่า R การแปลความหมายของค่า R และ R² (ปานมนัส และคณะ, 2556) แสดงดังตารางที่ 2.3 และคำนวณได้จากสมการ

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

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

ตารางที่ 2.3 การแปลความหมายของค่า R และ R² (Williams, 2007 ปานมันส์ 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 ใช้ได้กับการประยุกต์ใช้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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) ได้อธิบายผลของค่า RPD แสดงดังตารางที่ 2.4

$$RPD = \frac{SD}{SEP_{bias}} \tag{2.10}$$

ซึ่ง

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

และ

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

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) แบบ
3.1-4.9	13-20	พอใช้	หยาบๆ
5.0-6.4	21-30	ดี	คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) ได้
6.5-8.0	31-40	ดีมาก	ควบคุมคุณภาพได้
8.1+	41+	ดีเยี่ยม	ควบคุมกระบวนการได้ ได้ทุกการประยุกต์ใช้

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

bias คือ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดด้วยวิธีอ้างอิงและค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เป็นการวัดความแม่นยำโดยรวมของแบบจำลอง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สมบัติการรับประทานเนื้อทุเรียน

2.5.1 เนื้อสัมผัส (texture)

เนื้อสัมผัสของผลิตผลแต่ละอย่างแตกต่างกันไป และภายหลังจากการเก็บเกี่ยวการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสก็แตกต่างกันด้วย บางอย่างเปลี่ยนจากกรอบเป็นเหนียว บางอย่างเปลี่ยนจากแน่นแข็งเป็นนิ่มและ บางอย่างจากเนื้อแห้งเป็นแฉะ ลักษณะที่ดีขึ้นอยู่กับผู้บริโภค การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสทำได้หลายวิธี เช่น 1. การวัดการเสียรูปทรง หรือ deformation test ซึ่งเป็นวิธีเลียนแบบการตรวจสอบความอ่อนนุ่มของผลไม้ของคนทั่วไป ซึ่งใช้มือบีบดูว่าผลไม้แข็งหรืออ่อนนุ่ม 2. เป็นการวัดลักษณะความแข็งหรืออ่อนนุ่มของเนื้อผลิตผลโดยตรงเช่นเดียวกับการกัดและเคี้ยวบดด้วยปากและฟัน วิธีนี้มักใช้เครื่องมือที่มีลักษณะต่างๆ กดลงบนผลิตผลจนทะลุเข้าไปในเนื้อแล้วอ่านค่าแรงที่ใช้จนทะลุ (จริงแท้, 2542)

เนื้อสัมผัส หมายถึง การตอบสนองของวัสดุต่อแรงกระทำ แสดงถึงการต้านทานแรงต่อวัสดุ เนื้อสัมผัสเป็นสมบัติเชิงกลที่เกิดจากการตอบสนองของผลิตผลทางการเกษตรและอาหารต่อแรงที่กระทำ เช่น แรงที่เกิดจากการซ้อนทับกันของผักผลไม้หรือ แรงกระทำจากการบดเคี้ยวอาหารและอื่นๆ ตัวอย่างเนื้อสัมผัสของผลิตผลทางการเกษตรได้แก่ 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 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (soluble solids) ผลไม้หลายชนิดสะสมอาหารในรูปของน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่ เช่น องุ่นและลำไย ยิ่งมีอายุมากขึ้นยิ่งมีการสะสมน้ำตาลมากขึ้น น้ำตาลในผลจึงเป็นดัชนีความบริบูรณ์และดัชนีการเก็บเกี่ยวที่ดี แต่ในผลไม้ประเภท climacteric ซึ่งจะสะสมอาหารในรูปของแป้งแล้วจึงเปลี่ยนเป็นน้ำตาลภายหลังการวัดปริมาณน้ำตาลประเภทนี้จึงอาจสายเกินไปสำหรับการเก็บเกี่ยวแต่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพ การวัดปริมาณน้ำตาลอาจทำได้ง่าย เช่น ในแปลงใช้ hand refractometer วัดหาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ จากน้ำคั้น ซึ่งหมายถึงปริมาณสารประกอบต่างๆที่ละลายน้ำได้ หรือปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ รวมทั้งกรดอินทรีย์ต่างๆ แต่ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาล ดังนั้นผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว มีกรดสะสมอยู่มากการวัด soluble solids อาจให้ค่าที่ไม่ถูกต้องนัก (จริงแท้, 2542)

2.5.3 สี (color) การเปลี่ยนแปลงของผลไม้เป็นดัชนีความบริบูรณ์ตามธรรมชาติที่เห็นได้ชัดเจนที่สุด และใช้เป็นดัชนีการเก็บเกี่ยวอย่างแพร่หลาย แต่การเปลี่ยนสีของผลไม้จะขึ้นเมื่อผลไม้เข้าสู่กระบวนการสุก สีจึงเป็นดัชนีที่เหมาะสมกับผลไม้ ผลไม้หลายอย่างไม่สามารถเก็บเกี่ยวก่อนการเปลี่ยนสีได้เช่น มังคุด เงาะ และสตรอเบอร์รี่ ในผลไม้บางชนิดการเปลี่ยนสีในระยะที่เหมาะสมกับการเก็บเกี่ยวอาจไม่ชัดเจน อาจทำให้การเก็บเกี่ยวผิดพลาดได้ง่าย ส่วนเนื้อของผลไม้แม้ว่าจะไม่มี

คลอโรฟิลล์ แต่มักมีการสร้างสีขึ้นในระยะเก็บเกี่ยวเช่นเดียวกัน เห็นได้ชัดในมะม่วง และทุเรียนผลไม้ บางอย่างเนื้อผลมีการเปลี่ยนแปลงสีก่อนที่สีผิวจะเปลี่ยนแปลงดังนั้นการเปลี่ยนสีของเนื้อเป็นดัชนี ความบริบูรณ์ได้เช่นเดียวกัน (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 แต่ ถ้า a* เป็นลบ วัตถุจะมีสีออกสีเขียว) ค่า b* แสดงสีเหลืองและสีน้ำเงิน (ถ้าค่า b* เป็นบวกวัตถุจะมีสี ออกสีเหลืองแต่ถ้าค่า b* เป็นลบวัตถุจะมีสีออกสีน้ำเงิน)

2.5.4 มวลแห้ง (dry matter) ลักษณะภายในของทุเรียนพันธุ์หมอนทองได้แก่เนื้อสีขาวปน เหลืองอ่อน ผิวเมล็ดสีครีมเป็นน้ำตาล และมีน้ำหนักเนื้อแห้งขั้นต่ำร้อยละ 32 มวลแห้ง เป็นดัชนี มาตรฐานชี้วัดความสุกแก่ของทุเรียนเพื่อใช้ประโยชน์ทางการค้า การอบแห้ง (drying) คือ การเอาน้ำ ออกจากวัสดุที่ต้องการทำให้ปริมาณน้ำในวัสดุนั้นลดลง (ความชื้นลดลง) เมื่อน้ำออกจากวัสดุหมดสิ่ง ที่เหลือเราจะเรียกว่ามวลแห้ง (dry matter) วิธี 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 ในปี 2013

สุ่มเก็บทุเรียนจำนวน 24-25 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 การเตรียมผลทุเรียนสำหรับการทดลอง กับตัวอย่างใหม่

การเก็บตัวอย่างทุเรียนพันธุ์หมอนทองจาก อำเภอมะขาม จังหวัด จันทบุรี ทำโดยสุ่มต้นทุเรียนที่ออกดอก จากนั้นรอวันที่ดอกบานนำป้ายพลาสติกผูกติดกับช่อดอกพร้อมเขียนระบุวันที่ดอกบานรวมทั้งหมด 300 ดอก แล้วปล่อยให้ทุเรียนเจริญเติบโต

3.2.1 การเก็บเกี่ยวทุเรียนที่อายุต่างๆ ในปี 2015

สุ่มเก็บทุเรียนจำนวน 10 ผล 6 ครั้ง เพื่อตรวจสอบคุณภาพ ดังนี้

เมื่อทุเรียนครบ 80 วันหลังดอกบานสุ่มเก็บทุเรียนรวม 10 ผล

เมื่อทุเรียนครบ 90 วันหลังดอกบานสุ่มเก็บทุเรียนรวม 10 ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทุเรียนครบ 100 วันหลังดอกบานสุ่มเก็บทุเรียนรวม 10 ผล

เมื่อทุเรียนครบ 110 วันหลังดอกบานสุ่มเก็บทุเรียนรวม 10 ผล

เมื่อทุเรียนครบ 120 วันหลังดอกบานสุ่มเก็บทุเรียนรวม 10 ผล

เมื่อทุเรียนครบ 127 วันหลังดอกบานสุ่มเก็บทุเรียนรวม 10 ผล

3.3 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 (MICRO NIR JDSU, USA) (ภาพที่ 3.3)
4. เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Brix Refractometer, ATAGO Pock PAL-1, Japan) (ภาพที่ 3.4)
5. เครื่องวัดเนื้อสัมผัส รุ่น (TA HD Plus, Texture Analyzer, Stable Micro System, London, UK) (ภาพที่ 3.5)
6. เครื่องวัดสี MiniScan XE Plus, Hunter Lab, USA (ภาพที่ 3.6)
7. เครื่องบด (OKU SAN NO, Malaysia) (ภาพที่ 3.7)
8. เครื่องชั่ง ความละเอียด 0.001 g (SHIMADZU BX300) และความละเอียด 0.0001 g (AR2140 Adventurer, OHAUS, USA) (ภาพที่ 3.8)
9. เครื่อง Microcentrifuge (Spectrafuge 7M, Labnet, USA) (ภาพที่ 3.9)
10. ตู้อบลมร้อน (ULM 500, Memmert, USA) (ภาพที่ 3.10)
11. ฟิล์มยืดหุ้มอาหารพีวีซีใส 30 ซม.*30 ซม. 10 ไมครอน (VS WRAP) (ภาพที่ 3.11)
12. ป้ายพลาสติก สายรัดพลาสติก ตะกร้า ปากกา เป็นต้น
13. 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 (MICRO NIR, JDSU, USA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



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



ภาพที่ 3.6 เครื่องวัดสี MiniScan XE Plus, Hunter Lab, USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.7 เครื่องบด (OKU SAN NO, Malaysia)



(a)



(b)

ภาพที่ 3.8 เครื่องชั่ง (a) ความละเอียด 0.001 g (SHIMADZU BX300) และเครื่องชั่ง (b) ความละเอียด 0.0001 g (AR2140 Adventurer, OHAUS, USA)



ภาพที่ 3.9 เครื่อง Microcentrifuge (Spectrafuge 7M, Labnet, USA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.10 ตู้อบลมร้อน (ULM 500, Memmert, USA)



ภาพที่ 3.11 ฟิล์มยืดหุ้มอาหารพีวีซีใส 30ซม.×30ม. 10 ไมครอน (VS WRAP)

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การสแกนด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ผลทุเรียนบนต้นจำนวนครั้งละ 25 ลูก จำนวน 6 ครั้ง เมื่อทุเรียนมีอายุ 80 90 100 110 120 และ 127 หลังดอกบาน และทำการป้ายยาเอทีฟอน ก่อนออกจากสวน เพื่อกำหนดเวลา 3 วันให้ทุเรียนสุก นำผลทุเรียนมาไว้ที่ศูนย์วิจัยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลผลิตทางการเกษตร และอาหารเป็นระยะเวลา 3 วัน เมื่อครบกำหนดความสุกแก่ทุเรียนตามที่กำหนด วันที่ 4 ก่อนทำการทดลองควบคุมอุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR

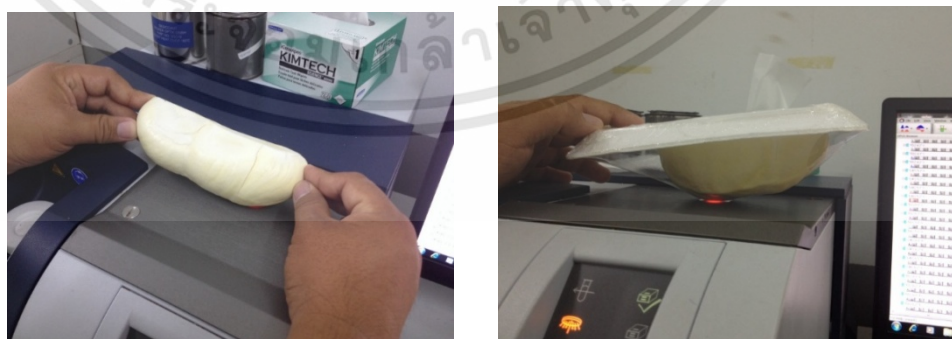
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Spectrometer, Longwave linear variable filter spectrometer (MICRO NIR JDSU, USA) และ Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer ตามลำดับ หลังจากนั้นนำไปหาเนื้อสัมผัส มวลแห้ง และความหวาน ด้วยวิธีทางเคมี

1) การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ซึ่งมีลักษณะการวัดแบบ Diffuse Reflectance ที่ช่วงคลื่นระหว่าง $12500-3500\text{ cm}^{-1}$ (ความยาวคลื่น $700-2500\text{ nm}$) สแกนทุกๆ 16 cm^{-1} สแกนซ้ำ 32 ครั้งต่อ 1 สเปกตรัม โดยเลือก Sample form แบบ Integrating sphere rotating (Sphere Macrosample) โดยการสแกนที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกและที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกหุ้มพลาสติก ดังภาพที่ 3.12

2) การสแกนด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer (MICRO NIR JDSU, USA) ซึ่งมีลักษณะการวัดแบบ Interactance มีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $1150-2150\text{ nm}$ ทุกๆ 7 nm Integrating time $1000\text{ }\mu\text{s}$ และจำนวนตัวอย่างเพื่อหาสเปกตรัมเฉลี่ย เท่ากับ 5000 สแกน ที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก และที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก หุ้มพลาสติก สแกนจำนวน 2 ครั้งต่อตัวอย่าง ดังภาพที่ 3.13

3) การสแกนด้วยเครื่อง Visible and NIR Short Wavelength Diode Array Spectrometer (FQA-NIR GUN Fantec, Japan) ซึ่งมีลักษณะการวัดแบบ Interactance มีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $600-1100\text{ nm}$ ทุกๆ 2 nm integration time 25 ms คลุมเครื่องสแกนพร้อมกับตัวอย่างด้วยผ้าสีดำเพื่อป้องกันแสงรบกวนจากภายนอก โดยสแกน ที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกและที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกหุ้มพลาสติก สแกนจำนวน 2 ครั้งต่อตัวอย่าง ดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.12 การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker Ltd., Germany)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.13 การสแกนด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer (MICRO NIR JDSU, USA)



ภาพที่ 3.14 การสแกนด้วยเครื่อง Visible and NIR Short wavelength Diode Array Spectrometer (FQA-NIR Gun, Shizuoka Shibuya Seiki, Hamamatsu, Japan)

3.5 การตรวจวัดคุณภาพเนื้อทุเรียน

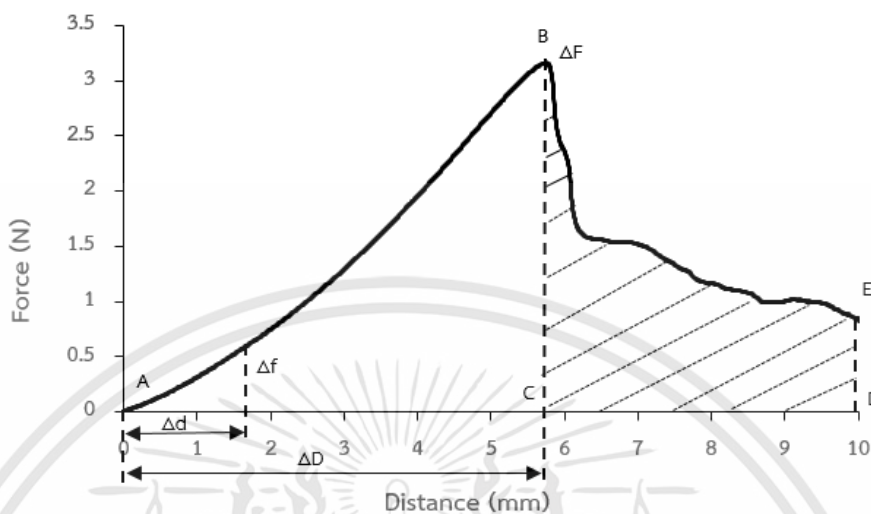
3.5.1 ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture)

วัดค่าแรงกดของเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกโดยดัดแปลงจาก (Voon et al., 2006) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส รุ่น TA.HD. Plus (ภาพที่ 3.5) โดยใช้หัวกดทรงกระบอกปลายเรียบ เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm กดลงบนเนื้อทุเรียนด้วยความเร็วก่อนกดถึงเนื้อทุเรียน 2 mm/min เป็น, ความเร็วในเนื้อทุเรียน 1 mm/min และความเร็วหลังกดขณะยกหัวกดขึ้นด้วยความเร็ว 5 mm/min ให้หัวกดลึกลงไป 10 มิลลิเมตร และทำการวัดแรงที่กระทำเป็นค่า

$$\text{(Initial firmness: N/mm)} = \frac{\Delta f}{\Delta d} ; \text{(Average firmness: N/mm)} = \frac{\Delta F}{\Delta D} ; \text{(Rupture}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

distance mm) = AC ; (Rupture force: N) = B ; (Toughness: N.mm) = ABC ; (Average penetrating force: N) = BE ; และ (Penetrating energy: N.mm) = BCDE



ภาพที่ 3.15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของการเจาะเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก

3.5.2 ความชื้น ปริมาณมวลแห้ง และความหวาน

นำเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกที่ผ่านการวัดเนื้อสัมผัสจำนวน 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 (สุดารัตน์, 2536)

การทดลองครั้งนี้เพื่อวัดค่าความชื้นของเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก โดยใช้ตู้อบแห้งแบบลมร้อน (ULM 500, Memmert, USA) เขียนหมายเลขที่ aluminum can นำใส่โถดูดความชื้น เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที จำนวน 50 กระป๋อง ทำการชั่งน้ำหนัก aluminum can และบันทึกค่า นำเนื้อทุเรียนที่ปั่น มาชั่งน้ำหนักประมาณ 5 g และบันทึกค่า และเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60-65 °C เมื่อครบ 6 ชั่วโมง จึงนำตัวอย่างออกจากตู้อบแห้ง ใส่โถดูดความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 10-15 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่า และทุกๆ 3 ชั่วโมง ทุกครั้งที่เอาออกจากตู้อบต้อง ใส่โถดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิ้งไว้ ให้เย็นประมาณ 10-15 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนัก จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ โดยมีค่าความแตกต่างระหว่างครั้งที่วัดกับครั้งที่วัดต่อมาไม่เกินระหว่าง 0.003-0.005 g แล้วมาคำนวณหา %MC และ %DM ตามสมการที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ

3.5.3 การวัดสี

นำเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก มาวางบนเครื่อง MiniScan XE Plus, Hunter Lab, USA ตั้งค่าแหล่งแสงประดิษฐ์ (illuminant) คือ D65 แสงเที่ยงวัน (noon daylight) มุมมองภาพ (observer angle) 10 องศาแกน 3 ซ้ำและเฉลี่ย วัดค่า CIE L* a* และ b*

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.6.1 การวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม

การตรวจดูความผิดปกติของสเปกตรัมดั้งเดิม หากพบบางเส้นอยู่ในตำแหน่งผิดปกติจากกลุ่ม จุดบันทึกและพิจารณาตัดข้อมูล นอกจากนี้ยังวิเคราะห์จากแถบการดูดซับคลื่นที่ปรากฏในสเปกตรัม โดยพิจารณาให้สอดคล้องกับองค์ประกอบที่มีในตัวอย่าง (รณฤทธิ์, 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 ที่คำนวณโดยวิธีการนี้จะทำให้แน่ใจว่าระยะ Mahalanobis ของสเปกตรัมเกือบทั้งหมดหรือทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดนี้ ถ้าเกินขีดจำกัดก็จะเป็น Outlier

3.6.2 การวิเคราะห์ค่านอกกลุ่มของค่าทางเคมี

การตรวจสอบพิสัยของค่าทางเคมี เป็นการตรวจสอบการกระจายค่าทางเคมีของประชากรกลุ่มตัวอย่าง หากตัวอย่างมีค่าทางเคมีสูงหรือต่ำจากการกระจายค่าทางเคมีแบบปกติ (Normal distribution) ตัวอย่างเหล่านั้นอาจไม่อยู่ในกลุ่มประชากรที่สนใจ หากค่าสัมบูรณ์ของค่าทางสถิติคะแนน t ตัวอย่างใดมีค่ามากกว่า 3 หมายถึงตัวอย่างนั้นอยู่นอกกลุ่มประชากรตัวอย่างที่สนใจที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์ ให้พิจารณาตัดตัวอย่างนั้นทิ้ง (รณฤทธิ์, 2555)

3.6.3 การเตรียมสเปกตรัมของเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก และเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกที่หุ้มด้วยพลาสติกเพื่อการสร้างสมการในการทำนาย

ก่อนที่จะนำสเปกตรัมไปสร้างสมการในการทำนาย จำเป็นต้องแปลงข้อมูลก่อนนำไปสร้างแบบจำลองในการทำนาย ดังนี้

- 1) สเปกตรัมจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer ไม่ต้องการแปลงไฟล์ใดๆ
- 2) สเปกตรัมจากเครื่อง VIS-NIR diode array spectrometer จำเป็นต้องเปลี่ยนลักษณะการวัดแบบ Interactance ให้เป็น Absorbance ในโปรแกรม Ca Maker ซึ่งจะได้ข้อมูลเป็น Text File จากนั้นนำไป Export ให้เป็นไฟล์ Unscramble X (Camo, Norway)
- 3) สเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ได้ข้อมูลออกมาในรูปของ Excel จากนั้นนำไป Export ให้เป็นไฟล์ Unscrambler X (Camo, Norway)

3.6.4 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) ที่ไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นหรือที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นโดยวิธี 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 จากนั้นจะบันทึกค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficients of determination; R^2), RMSEP อัตราส่วนระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of standard error of validation to the standard deviation; RPD), ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (bias) และบันทึกค่า regression coefficient และ X-loading weight ที่จำนวนคลื่นต่างๆ หรือความยาวคลื่นต่างๆ

3.6.5 การสร้างแบบจำลองเชิงปริมาณในการทำนาย ใน Unscrambler X

การสร้างแบบจำลองการทำนายเชิงปริมาณทำโดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสง (Optical data) สี เนื้อสัมผัส ปริมาณมวลแห้ง และความหวาน ที่วัดด้วยวิธีมาตรฐาน โดยวิธี Partial เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

least squares regression (PLSR) โดยใช้โปรแกรม Unscrambler 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

3.7 การทดสอบความแม่นยำของการวัดค่าทางเคมี

การทดสอบความแม่นยำของการวัดค่าทางเคมี โดยการวัดค่า Repeatability และค่า Reproducibility โดยค่า Repeatability (Rep) คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดตัวอย่างซ้ำ โดยผู้วัดทราบว่าเป็นตัวอย่างอะไร (Duplicate sample) ซึ่งในการทดลองนี้มีการนำตัวอย่างเข้ามาวัดซ้ำ ส่วนค่า Reproducibility คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดตัวอย่างซ้ำ โดยผู้วัดไม่ทราบว่าเป็นตัวอย่างที่ซ้ำเป็นตัวอย่างอะไร (Blind sample) ซึ่งในการทดลองนี้มีการวัดซ้ำ 2 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่าง ในระหว่างการทดลอง (ไม่พร้อมกัน) ซึ่ง Dardenne (2009) 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

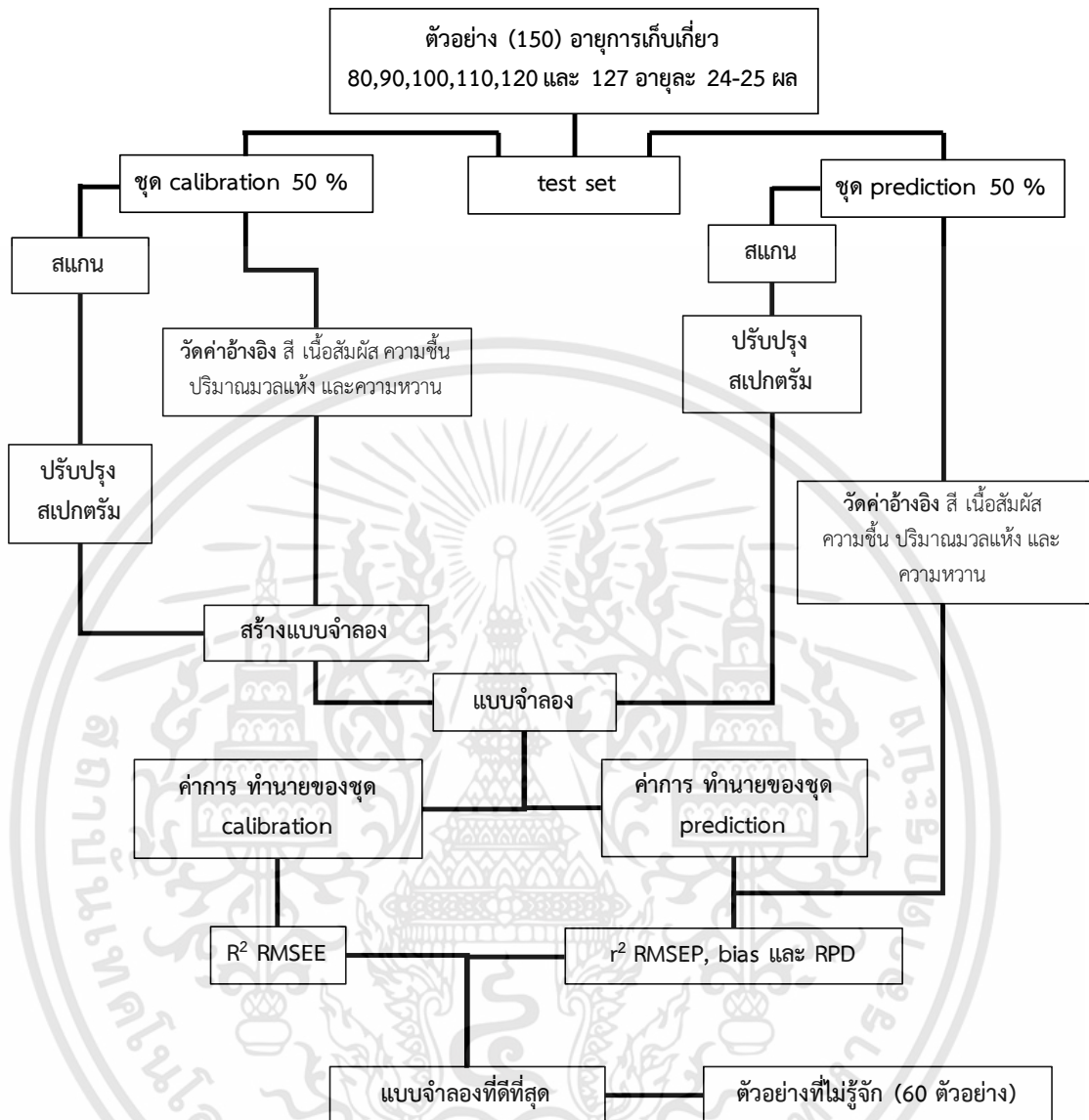
3.8 ขั้นตอนของการปฏิบัติงานวิจัย

ขั้นตอนของการปฏิบัติในงานวิจัยนี้แสดงโดยสรุปดังภาพที่ 3.16

1. ศึกษากระบวนการผลิตทุเรียนในสวนทุเรียนเพื่อบริโภครภายในประเทศ ทั้งนี้เน้นกระบวนการการเก็บเกี่ยวและการบรรจุภัณฑ์ส่งออก
2. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการขายเนื้อทุเรียนให้ห้างสรรพสินค้าและตรวจวัดคุณภาพที่เกี่ยวข้องกับการรับประทาน เนื้อทุเรียน
3. ผูกป้ายชื่อเมื่อดอกทุเรียนบานจำนวน 500 ดอกโดยสุ่มผูกตามต้นต่างๆทั่วบริเวณสวนทุเรียน
4. ในระหว่างรอวันครบกำหนดเก็บเกี่ยวทุเรียน ฝักการสแกนผลทุเรียนและเนื้อทุเรียนพร้อมฝักวัดคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องของการรับประทาน (เนื้อสัมผัส สี ความชื้น น้ำหนักเนื้อแห้ง และความหวาน) โดยใช้ทุเรียนที่ซื้อจากท้องตลาด
5. สุ่มตัวอย่างผลทุเรียนที่สวนทุเรียนเพื่อการส่งออก ที่อายุการเก็บเกี่ยวแตกต่างกัน 6 ระดับคือ 80, 90, 100, 110 (ช่วง100-110วันเป็นวันเก็บเกี่ยวเชิงการค้า), 120, และ127 วันหลังดอกบาน จำนวน 25 ผลต่ออายุการเก็บเกี่ยว
6. แล้วเก็บตัวอย่างทุเรียนที่สแกนนำมาป้ายยาเอธิฟอน (ethephon) โดยมีสัดส่วนน้ำต่อน้ำยา 2:1 ที่ปลายข้าว แล้วนำมายังศูนย์วิจัยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 3 วัน (เป็นเวลาที่ชาวสวนแจ้งว่าทุเรียนจะสุก)
7. ในวันที่ 4 นำทุเรียนเข้าไปไว้ในห้อง เพื่อปรับอุณหภูมิก่อนการสแกน $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง สแกนที่ผลทุเรียน ปอกทุเรียนเพื่อนำเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกมาสแกนที่กลางพู ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer (MICRO NIR JDSU, USA) ช่วงความยาวคลื่น 1150-2150 nm เครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer (FQA-NIR GUN Fantec, Japan) ช่วงความยาวคลื่น 600-1100 nm และเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ช่วงจำนวนคลื่น 12500-3600 cm^{-1}
8. นำเนื้อทุเรียนใส่ถาดโฟมแล้วหุ้มด้วยพลาสติกโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) ใส ความหนา 10 ไมโครเมตร แล้วสแกนด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer (MICRO NIR 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 cm^{-1}
9. วัดค่าสีด้วยเครื่อง (MiniScan XE Plus, Hunter Lab, USA) ทำการวัด 3 ซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. นำเนื้อทุเรียนทั้งพูไปวัดเนื้อสัมผัสบริเวณที่ผ่านการสแกนด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (TA HD Plus, Texture Analyzer, Stable Micro System, London, UK) โดยใช้หัววัดแบบทรงกระบอกหัวตัดเรียบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm กดลงบนพูทุเรียนด้วยความเร็วก่อนกดถึงเนื้อทุเรียน 2 mm/min, ความเร็วในเนื้อทุเรียน 1 mm/min และความเร็วหลังกดขมยยกหัวกดขึ้นด้วยความเร็ว 5 mm/min ให้หัวกดลึกลงไป 10 มิลลิเมตร และทำการวัดแรงที่กระทำเป็นค่า (Initial firmness: N/mm) ; (Average firmness: N/mm) ; (Rupture distance mm) ; (Rupture force: N) ; (Toughness: N.mm) = ; (Average penetrating force: N) ; และ (Penetrating energy: N.mm) ของเนื้อทุเรียน
11. นำเนื้อทุเรียนที่ผ่านการวัดเนื้อสัมผัสจำนวน 80 g มาปั่นด้วยเครื่องปั่นให้ละเอียดแล้วแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 วัดความชื้น น้ำหนักเนื้อแห้งโดยใช้เนื้อทุเรียนปริมาณ 5 g จำนวน 2 ซ้ำ โดยใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ส่วนที่ 2 วัดความหวานโดยใช้เนื้อทุเรียน 1 ส่วน ต่อน้ำ 3 ส่วน โดยปริมาตร ผสมให้เข้ากันแล้วนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Microcentrifuge (Spectrafuge 7M, Labnet, USA) ที่ความเร็วรอบ 6000 rpm เป็นเวลา 10 min แล้ววัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Soluble solids content) ซึ่งเป็นเสมือนความหวานของเนื้อทุเรียนโดยรินส่วนบนที่เป็นของเหลวใสลงใน Digital Refractometer (Pal 1, ATAGO, Japan) ทั้งนี้ต้องคุณค่าที่ได้ด้วย 4
12. นำข้อมูลทั้งหมดมาสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพที่เกี่ยวกับการรับประทาน (สี เนื้อสัมผัส ความชื้น น้ำหนักเนื้อแห้งและความหวาน) กับ สเปกตรัมของผลทุเรียนและเนื้อทุเรียน โดยวิธีทาง Chemometric แบบ Partial least squares regression
13. ทดสอบแบบจำลองเพื่อใช้ประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทอง โดยทดสอบแบบจำลองคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองของตัวอย่างที่เป็น Unknown โดยพิจารณาจาก Coefficient of determination (R^2) Standard error of prediction (SEP) และ Bias



ภาพที่ 3.16 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงสี ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (ความหวาน) ปริมาณความชื้น และปริมาณมวลแห้งของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว

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	82.3230 ±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

Means sharing the same letter in a column are not significantly $p>0.05$ (different from one another. (color) L* a* b*, soluble solids (SS), 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 et al., 2000) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) ที่ 80-90 วัน มีค่าที่ไม่แตกต่างกัน ที่ 90 วัน และ 110 วันมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน และที่มีค่าสูงสุดคือ 120 วัน ตารางที่ 4.2 แสดงค่าทางสถิติของเนื้อสัมผัสของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว Initial firmness (IF) มีค่าเพิ่มขึ้น 80-110 วัน แต่เมื่อ 120-127 วัน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ Rupture force (RF) 80-110 วันมีการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อ 120-127 วันไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ Average force (AF) 80-110 วันไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ และ 120-127 วัน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ Rupture distance (RD) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ ตั้งแต่ 80-127 วัน Toughness (T) มีค่าลดลงตามอายุการเก็บเกี่ยว ตั้งแต่ 80-127 วัน Average penetrating force (APF) 80-110 วันไม่มีการ

เปลี่ยนแปลงทางสถิติ และ 120-127 วัน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ Penetrating energy (PE) 80-110 วันไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ และ 120-127 วัน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ

ตารางที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว

อายุ	เนื้อสัมผัส						
	IF (N/mm)	RF (N)	AF (N/mm)	RD (mm)	T (N.mm)	APF (N)	PE (N.mm)
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

Means sharing the same letter in a column are not significantly $p > 0.05$ (different from one another. 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 การเปลี่ยนแปลงสี ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (ความหวาน) และความชื้นสำหรับตัวอย่างที่เป็นตัวอย่างใหม่ (Unknown) ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว

อายุ	สี			ความหวาน SS (%)	ปริมาณความชื้นและปริมาณมวลแห้ง	
	L*	a*	b*		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±5.12c
100	56.89±0.79a	0.272±0.35d	19.48±1.61d	22.00±0.29c	70.1899±4.17c	29.8100±4.17b
110	55.99±0.84a	0.466±0.27c	21.56±1.66c	20.8±0.95cd	61.7293±1.95d	38.2706±1.95a
120	57.27±6.66a	0.834±0.32b	24.07±2.21b	24.8±1.01b	60.7861±1.42d	39.2138±1.42a
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

Means sharing the same letter in a column are not significantly $p > 0.05$ (different from one another. (color) L* a* b*, soluble solids (SS), moisture content (MC) and dry matter (DM)

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

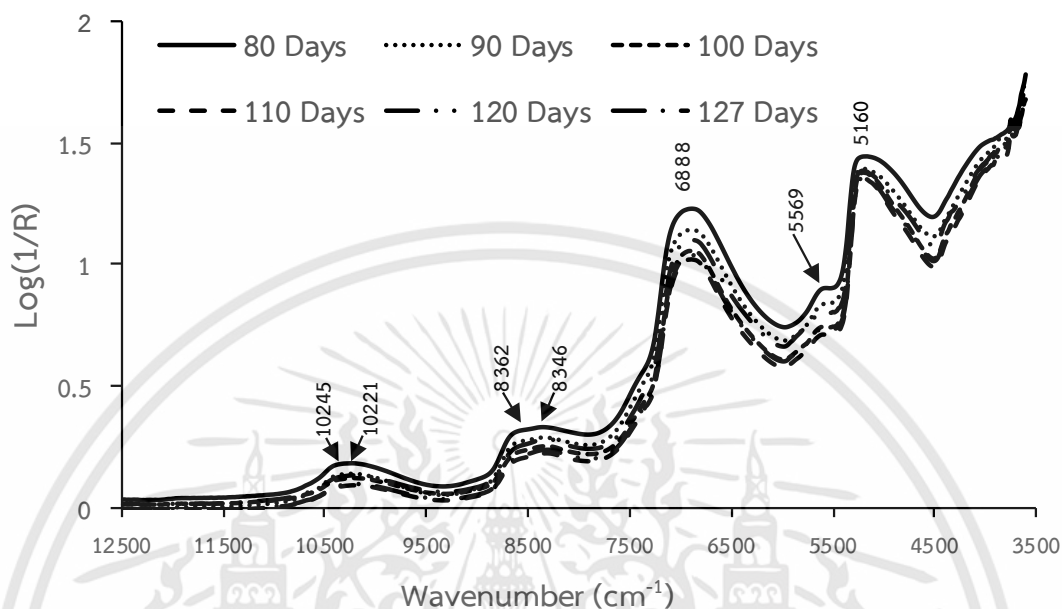
ตารางที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสสำหรับตัวอย่างที่เป็นตัวอย่างใหม่ (Unknown) ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองตามอายุการเก็บเกี่ยว

อายุ	เนื้อสัมผัส						
	IF (N/mm)	RF (N)	AF (N/mm)	RD (mm)	T (N.mm)	APF (N)	PE (N.mm)
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

Means sharing the same letter in a column are not significantly $p > 0.05$ (different from one another. AF =Average force, IF =Initial firmness, RF =Rupture force, RD =Rupture distance, T =Toughness, APF =Average penetrating force and PE =Penetrating energy

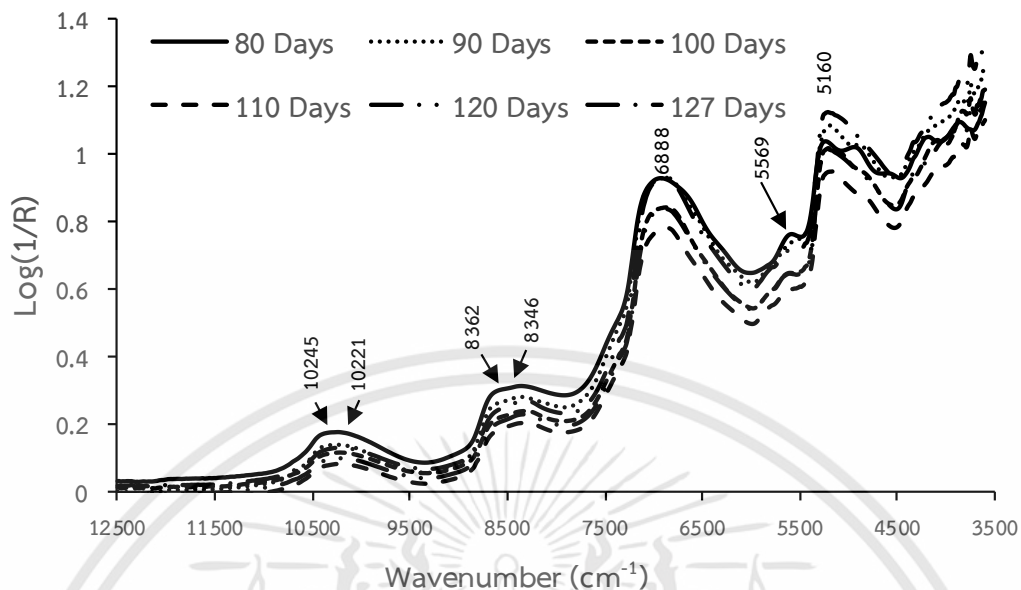
ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติเนื้อสัมผัส ของตัวอย่างใหม่ มีการเปลี่ยนแปลงดังนี้ ค่า IF AF APF และ PE ในอายุการเก็บเกี่ยว 80 วัน มีค่าต่ำกว่าที่อายุ 90 วัน แล้วลดลงตามอายุการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่า RF RD และ T มีค่าสูงสุดที่อายุการเก็บเกี่ยว 80, 90 และ 100 วัน แล้วลดลงตามลำดับตามอายุการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้น

4.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมดิบ

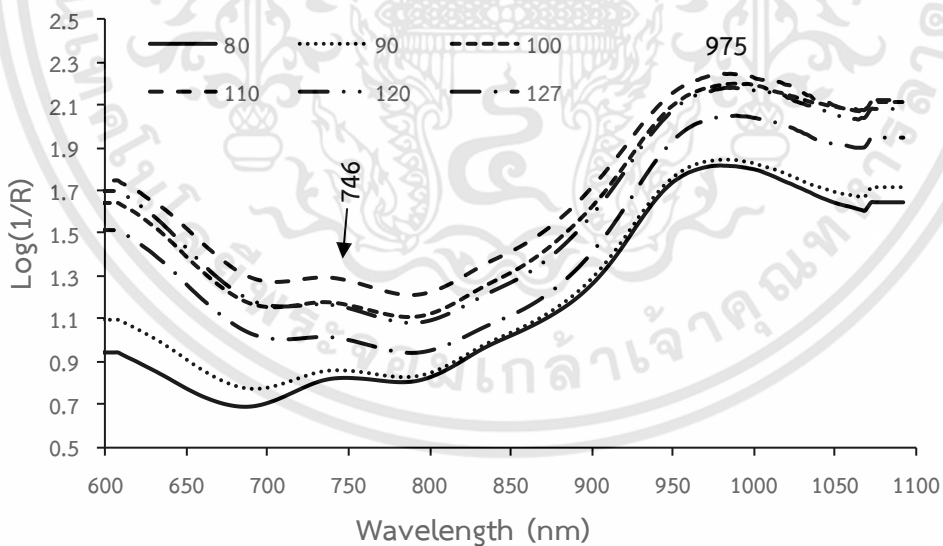


ภาพที่ 4.1 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ทำการวัดด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของเนื้อทุเรียนตามอายุการเก็บเกี่ยวตั้งแต่ 80-127 วันหลังดอกบาน ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ที่ จำนวนคลื่นระหว่าง 12500-4000 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 800-2500 nm) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ดังภาพที่ 4.1 และเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ดังภาพที่ 4.2 พบการดูดซับคลื่นที่จำนวนคลื่น 10245-10221, 8362-8346, 6888, 5569 และ 5160 cm^{-1} (976-978, 1196-1198, 1452, 1796 และ 1938 nm) โดยพีคที่ 10245-10221 cm^{-1} (บริเวณ 970 nm) เป็นการดูดซับคลื่นของ H_2O (Osborne and Fearn, 1986) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching พีคที่ 8362-8346 cm^{-1} (1198-1196 nm) เป็นการดูดซับคลื่นของ ($^2\text{H}_2\text{O}$ or D_2O) (Workman and Weyer, 2007) พีคที่ 6888 cm^{-1} (1452 nm) เป็นการดูดซับคลื่นของ starch or H_2O (Osborne and Fearn, 1986) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching พีคที่ 5569 (1796 nm) เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose (Osborne and Fearn, 1986) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C-H stretching นอกจากนี้พีคที่ 5160 cm^{-1} (1938 nm) เกิดการสั่นสะเทือนของ O-H stretching + O-H ซึ่ง เป็นโครงสร้างของ H_2O (Osborne and Fearn, 1986) ภาพที่ 4.2 แตกต่างจากภาพที่ 4.1 ที่บริเวณ 4500-3500 cm^{-1} ซึ่งปรากฏพีคของพลาสติก

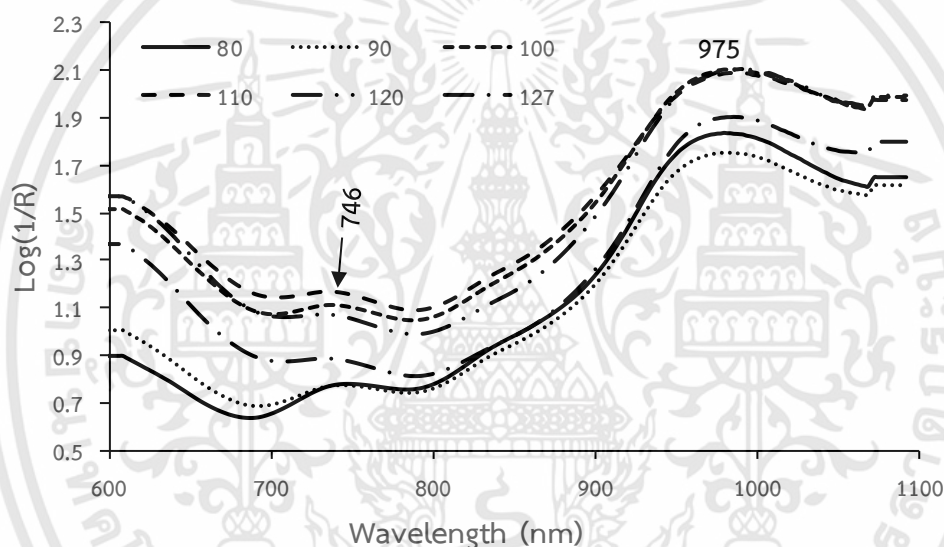


ภาพที่ 4.2 สเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างเนื้อทุเรียนที่บริเวณพวอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกที่ทำการวัดด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน



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

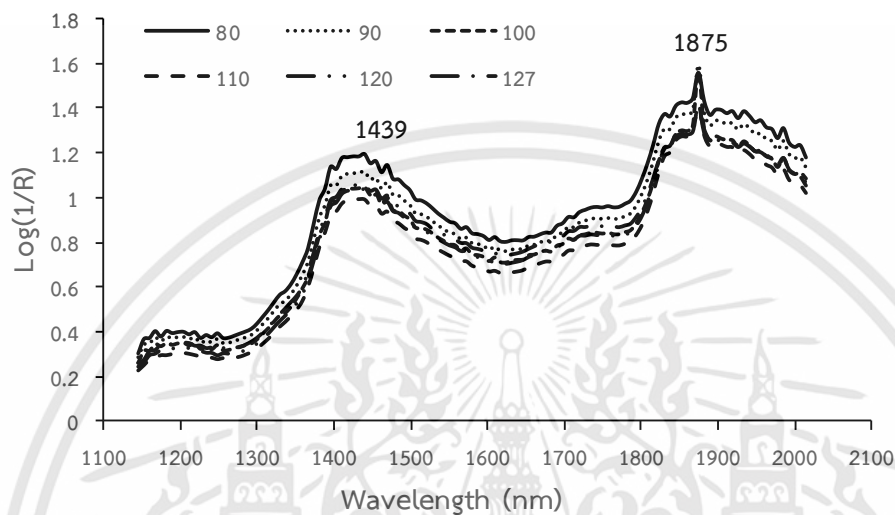
จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกและเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกที่หุ้มด้วยพลาสติกที่ทำกรวด ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ที่จำนวนคลื่นระหว่าง 600-1100 nm (ภาพที่ 4.3 และ 4.4) พบว่าเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกและเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกเกิดการดูดซับคลื่นที่จำนวนคลื่น 746 และ 975 nm โดยพีคที่ 746 nm เกิดการสั่นสะเทือนของ O-H stretching ซึ่งเป็นการดูดซับคลื่นของ H₂O ที่ 760 nm (Osborne and Fearn, 1986) และพีคที่ 975 nm เกิดการสั่นสะเทือนของ O-H stretching ที่ 970 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ H₂O Osborne and Fearn (1986)



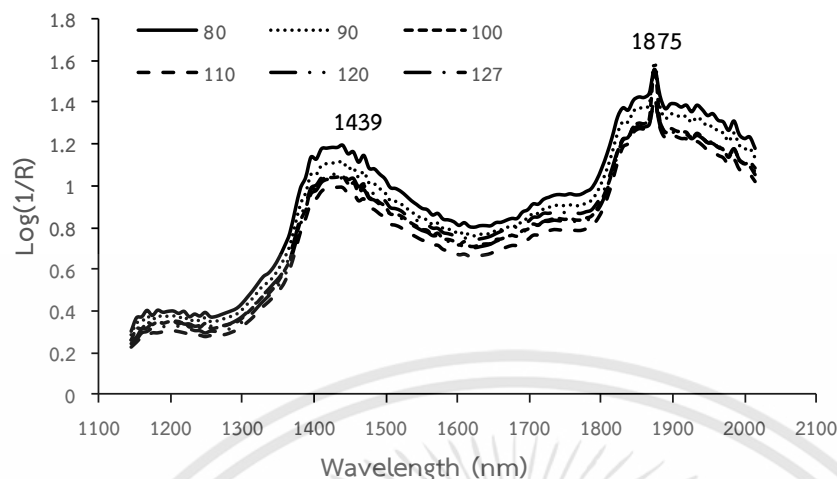
ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกและเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกที่หุ้มด้วยพลาสติกที่ทำกรวด ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 1100-2500 nm (ภาพที่ 4.5 และ 4.6) พบว่าเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก และเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก เกิดการดูดซับคลื่นที่จำนวนคลื่น 1439 และ 1875 nm โดยพีคที่ 1439 nm เกิดการสั่นสะเทือนของ O-H stretching ซึ่งเป็นการดูดซับคลื่นของ H₂O 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 4.5 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ ที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 80, 90, 100, 110, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน



ภาพที่ 4.6 สเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก 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					Unknown				
	No.	Max	Min	Mean	SD	No.	Max	Min	Mean	SD	No.	Max	Min	Mean	SD
DM (%)	76	56.18	8.96	29.10	11.10	73	51.22	8.98	28.82	11.35	60	42.24	8.38	29.32	11.40
SS (%)	75	13.10	3.00	5.73	2.74	74	12.90	3.00	5.95	2.44	60	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	60	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	60	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	60	29.12	7.62	19.35	5.61
AF (N/mm)	75	14.73	0.09	3.75	4.04	74	12.33	0.18	3.23	3.25	60	14.39	0.25	4.36	3.98
APF (N)	74	34.69	0.34	11.33	10.39	75	33.60	0.75	11.48	10.23	60	41.13	0.70	15.65	12.33
PE (N.mm)	74	219.71	0.02	60.59	67.34	75	205.74	0.04	55.70	62.04	60	228.22	0.00	72.19	71.02
RF (N)	75	42.13	0.15	14.66	12.67	74	37.03	1.14	14.32	11.93	60	48.15	1.35	19.11	14.38
T (N.mm)	75	198.15	0.16	36.06	36.34	74	187.32	3.81	37.82	34.88	60	250.14	3.35	57.75	59.94

4.4 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ ผลการทำนายของแบบจำลอง PLS

4.4.1 แบบจำลองเชิงปริมาณ เพื่อทำนายค่า สี ปริมาณมวลแห้ง ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และเนื้อสัมผัส โดยใช้สเปกตรัมที่ได้จาก FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.6 ผลการทำนายค่า ผลการทำนายค่า สี (L^* a^* และ b^*) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (SS) และค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Parameter	Pre-processing	Wavenumber Range (cm ⁻¹)	PLS - Factor	Calibration		Prediction			
				R ²	RMSEE	r ²	RMSEP	RPD	Bias
L*	constant offset elimination	9403.8-7498.3	2	0.52	2.96	0.11	2.65	1.06	0.07
a*	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
SS	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 (L^* a^* และ b^*) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (SS) และค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer แสดงดังตารางที่ 4.6 แบบจำลองที่มีค่า R² สูงสุดของการทำนาย คือ DM โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ first derivative + MSC มีค่า R² ของแบบจำลองเท่ากับ 0.90, RMSEE เท่ากับ 3.62% ส่วนการทำนายให้ค่า r² เท่ากับ 0.89, RMSEP เท่ากับ 3.60%, RPD เท่ากับ 3.27 และ bias เท่ากับ -0.98% และเนื้อสัมผัสที่ดีที่สุดคือ RF โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ min-max normalization มีค่า R² ของแบบจำลองเท่ากับ 0.78, RMSEE เท่ากับ 6.06% ส่วนการทำนายให้ค่า r² เท่ากับ 0.74, RMSEP เท่ากับ 6.15%, RPD เท่ากับ 1.96 และ bias เท่ากับ 0.07%

โดยค่า r^2 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 การ การประยุกต์ใช้ สามารถคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) ได้ และ ไม่แนะนำให้ประยุกต์ใช้ (Williams, 2007) ผลการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) ได้ผลที่ไม่ดี เพราะพีกของน้ำตาลไม่ปรากฏในสเปกตรัมดิบหรือพีกของ H_2O ได้บดบังพีกของน้ำตาลไป ค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณาสูงสุด (Maximum coefficient of determination) $R_{max} = 0.935$ บ่งบอกความแม่นยำของการวัด (SS)

ตารางที่ 4.7 ผลการทำนายค่า (L^* a^* และ b^*) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (SS) และค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Parameter	Pre-processing	Wavenumber Range (cm^{-1})	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
				R^2	RMSEE	r^2	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
SS	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 (L^* a^* และ b^*) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (SS) และค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer แสดงดังตารางที่ 4.7 แบบจำลองที่มีค่า R^2 สูงสุดของการทำนาย คือ DM โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ first derivative + MSC มีค่า R^2 ของแบบจำลองเท่ากับ 0.86, RMSEE เท่ากับ 4.32% ส่วนการทำนายให้ค่า r^2 เท่ากับ 0.83, RMSEP เท่ากับ 4.60%, RPD เท่ากับ 2.42 และ bias เท่ากับ -0.22% โดยค่า r^2 อยู่ระหว่าง 0.83-0.90 ใช้ด้วยความ

ระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 2.4-3.0 การประยุกต์ใช้ คัดเลือกแบ่งกลุ่มแบบหยาบๆ (Williams, 2007)

4.4.2 แบบจำลองเชิงปริมาณ เพื่อทำนายค่า (L^* a^* และ b^*) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (SS) และค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) โดยใช้สเปกตรัมที่ได้จาก isible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.8 ผลการทำนายค่า สี L^* และ a^* ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS - Factor	Calibration		Prediction			
		R ²	RMSEE	R ²	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^* ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.8 แสดงผลการทำนายของค่าสี (L^* และ a^*) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าสี (L^* และ a^*) ได้ เนื่องจาก แบบจำลองที่มีค่า r^2 ต่ำกว่า 0.25 ได้แก่ (L^* และ a^*) ไม่สามารถใช้ใน NIR calibration (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.9 ผลการทำนายค่า สี b^* ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง 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^* ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.9 แบบจำลองที่มีค่า R² สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ range-normalization มีค่า R² ของแบบจำลองเท่ากับ 0.47, RMSEE เท่ากับ 5.92 % ส่วนการทำนายให้ค่า r² เท่ากับ 0.62, RMSEP เท่ากับ 4.87 %, RPD เท่ากับ 4.88 และ bias เท่ากับ 0.06 % โดยให้ค่า r² ระหว่าง 0.50-0.64 แสดงว่าแบบจำลองเป็นไปได้สำหรับการคัดเลือกอย่างหยาบๆ (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 3.1-4.9. การประยุกต์ใช้คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) ได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.10 ผลการทำนายค่า ปริมาณมวลแห้ง (DM) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อุเรียนที่บริเวณพวอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง 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) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อุเรียนที่บริเวณพวอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.10 แบบจำลองที่มีค่า R² สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ Baseline มีค่า R² ของแบบจำลองเท่ากับ 0.76, RMSEE เท่ากับ 5.56 % ส่วนการทำนายให้ค่า r² เท่ากับ 0.75, RMSEP เท่ากับ 5.56 %, RPD เท่ากับ 6.06 และ bias เท่ากับ 1.33 % โดยให้ค่า r² ระหว่าง 0.66-0.81 แสดงว่าแบบจำลองเป็นไปได้สำหรับการคัดเลือกและการประมาณค่าอย่างหยาบๆ (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 5.0-6.4 การประยุกต์ใช้ ใช้ควบคุมคุณภาพได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.11 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพุ่มอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง 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 (SS) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพุ่มอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.11 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) ได้ เนื่องจากแบบจำลองมีค่า r² อยู่ระหว่าง 0.26-0.49 เป็นความสัมพันธ์ที่แย่ ควรหาเหตุผล (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.12 ผลการทำนายค่า Average Firmness (AF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง 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	0.61	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

ผลการทำนายค่า Average Firmness (AF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.12 ผลการทำนายค่า Average Firmness (AF) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่า Average Firmness (AF) ได้ เนื่องจากแบบจำลองมีค่า r² อยู่ระหว่าง 0.26-0.49 เป็นความสัมพันธ์ที่แย่ ควรหาเหตุผล (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.13 ผลการทำนายค่า Average penetrating force (APF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R ²	RMSEE	r ²	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

ผลการทำนายค่า Average penetrating force (APF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.13 แบบจำลองที่มีค่า R² สูงสุดของการทำนาย มีค่า R² ของแบบจำลองเท่ากับ 0.65, RMSEE เท่ากับ 6.70 % ส่วนการทำนายให้ค่า r² เท่ากับ 0.64, RMSEP เท่ากับ 6.25 %, RPD เท่ากับ 6.46 และ bias เท่ากับ 0.82 % โดยให้ค่า r² ระหว่าง 0.50–0.64 แสดงว่าแบบจำลองเป็นไปได้สำหรับการคัดเลือกอย่างหยาบๆ (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 5.0-6.4 การประยุกต์ใช้ ใช้ควบคุมคุณภาพได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.14 ผลการทำนายค่า Penetrating energy (PE) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง 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	0.61	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

ผลการทำนายค่า Penetrating energy (PE) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.15 ผลการทำนายค่า Penetrating energy (PE) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่า Penetrating energy (PE) ได้ เนื่องจากแบบจำลองมีค่า r² อยู่ระหว่าง 0.26-0.49 เป็นความสัมพันธ์ที่แย่ ควรหาเหตุผล (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.15 ผลการทำนายค่า Rupture force (RF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง 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	0.67	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

ผลการทำนายค่า Rupture force (RF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.15 แบบจำลองที่มีค่า R² สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ range-normalization มีค่า R² ของแบบจำลองเท่ากับ 0.61, RMSEE เท่ากับ 7.72 % ส่วนการทำนายให้ค่า r² เท่ากับ 0.72, RMSEP เท่ากับ 10.53%, RPD เท่ากับ 10.52 และ bias เท่ากับ -1.33 % โดยให้ค่า r² ระหว่าง 0.66–0.81 แสดงว่าแบบจำลองเป็นไปได้สำหรับการคัดเลือกและการประมาณค่าอย่างหายาก (Williams, 2007) และ RPD อยู่ที่ 8.1+ แสดงว่าแบบจำลองใช้ได้ทุกการประยุกต์ใช้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.16 ผลการทำนายค่า Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง 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	0.43	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

ผลการทำนายค่า Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง shortwave VIS-NIR diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.16 ผลการทำนายค่า Toughness (T) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่า Toughness (T) ได้ เนื่องจากแบบจำลองมีค่า r² อยู่ระหว่าง 0.26-0.49 เป็นความสัมพันธ์ที่แย่ ควรหาเหตุผล (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.17 ผลการทำนายค่า สี L* a* และ b* ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R ²	RMSEE	r ²	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* ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.17 แสดงผลการทำนายของค่าสี (L*, a* และ b*) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าสี (L*, a* และ b*) ได้ เนื่องจากแบบจำลองที่มีค่า r² อยู่ระหว่าง 0.26-

0.49 คือ (L^* และ a^*) เป็นความสัมพันธ์ที่แย่ ควรหาเหตุผล (Williams, 2007) และแบบจำลองที่มีค่า 0.50-0.64 คือค่า b^* ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกแบบหยาบๆ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.18 ผลการทำนายค่าปริมาณมวลแห้งด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง 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	0.80	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

ผลการทำนายค่าปริมาณมวลแห้งด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer จากตารางที่ 4.18 แบบจำลองที่มีค่า R^2 สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ range-normalization มีค่า R^2 ของแบบจำลองเท่ากับ 0.83, RMSEE เท่ากับ 4.56 % ส่วนการทำนายให้ค่า r^2 เท่ากับ 0.87, RMSEP เท่ากับ 4.02%, RPD เท่ากับ 4.12 และ bias เท่ากับ -

0.44 % โดยให้ค่า r^2 ระหว่าง 0.83–0.90 แสดงว่าแบบจำลองใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 3.1-4.9 ใช้คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) ได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.19 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R ²	RMSEE	r ²	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 (SS) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.19 ผลการทำนายของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (SS) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

(SS) เนื่องจากแบบจำลองมีค่า r^2 อยู่ระหว่าง 0.50-0.64 ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกแบบหยายๆ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.20 ผลการทำนายค่า Average Firmness (AF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง 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	0.67	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

ผลการทำนายค่า Average Firmness (AF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.20 แสดงผลการทำนายของค่า Average Firmness (AF) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่า Average Firmness (AF) ได้ เนื่องจากแบบจำลองมีค่า r^2 อยู่ระหว่าง 0.26-0.49 เป็นความสัมพันธ์ที่แย่ ควรหาเหตุผล (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.21 ผลการทำนายค่า Average penetrating force (APF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R ²	RMSEE	R ²	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

ผลการทำนายค่า Average penetrating force (APF) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.21 แบบจำลองที่มีค่า R² สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ max-normalization มีค่า R² ของแบบจำลองเท่ากับ 0.69, RMSEE เท่ากับ 5.72 % ส่วนการทำนายให้ค่า r² เท่ากับ 0.72, RMSEP เท่ากับ 5.48%, RPD เท่ากับ 5.47 และ bias เท่ากับ -0.70 % โดยให้ค่า R² ระหว่าง 0.66–0.81 แสดงว่าแบบจำลองใช้สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบๆ (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 5.0-6.4 ใช้ควบคุมคุณภาพได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.22 ผลการทำนายค่า Penetrating energy (PE) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R ²	RMSEE	r ²	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

ผลการทำนายค่า Penetrating energy (PE) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.22 แสดงผลการทำนายของค่า Penetrating energy (PE) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่า Penetrating energy (PE) เนื่องจากแบบจำลองมีค่า r² อยู่ระหว่าง 0.50-0.64 ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกแบบหยาบๆ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.23 การสร้างแบบจำลองการทำนายเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกกับค่า Rupture force (RF) ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer โดยวิธี Partial Least Square Regression

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R ²	RMSEE	r ²	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

การสร้างแบบจำลองการทำนาย Rupture Force (RF) ของ เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.23 แบบจำลองที่มีค่า R² สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ max-normalization มีค่า R² ของแบบจำลองเท่ากับ 0.72, RMSEE เท่ากับ 6.54% ส่วนการทำนายให้ค่า r² เท่ากับ 0.68, RMSEP เท่ากับ 7.04%, RPD เท่ากับ 7.01 และ bias เท่ากับ -1.06 % โดยให้ค่า r² ระหว่าง 0.66–0.81 แสดงว่าแบบจำลองใช้สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบๆ (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 6.5-8.0 ใช้ควบคุมกระบวนการได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.24 การสร้างแบบจำลองการทำนาย Toughness (T) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer โดยวิธี Partial Least Squares Regression

Pre-processing	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R ²	RMSEE	r ²	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

การสร้างแบบจำลองการทำนายเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกกับค่า Toughness (T) ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.24 แสดงผลการทำนายของค่า Toughness (T) จะเห็นได้ว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่า Toughness (T) ได้ เนื่องจากแบบจำลองมีค่า r² ต่ำกว่า 0.25 ไม่สามารถใช้ใน NIR calibration (Williams, 2007)

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

ตารางที่ 4.25 ผลการทำนายค่า สี (L^*) และ (a^*) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง 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^*) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.25 ผลการทำนายค่า สี (L^*) และ (a^*) จะเห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่า สี (L^*) และ (a^*) ได้ เนื่องจากแบบจำลองที่มีค่า r^2 ต่ำกว่า 0.25 คือ (L^* และ a^*) ไม่สามารถใช้ใน NIR calibration (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.26 ผลการทำนายค่า สี (b^*) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง 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^*) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.26 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 4.27 ผลการทำนายค่าปริมาณมวลแห้ง (DM) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง 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) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer แสดงจากตารางที่ 4.27 แบบจำลองที่มีค่า R² สูงสุดของการทำนาย โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ MSC มีค่า R² ของแบบจำลองเท่ากับ 0.87, RMSEE เท่ากับ 4.13% ส่วนการทำนายให้ค่า r² เท่ากับ 0.85, RMSEP เท่ากับ 4.29%, RPD เท่ากับ 4.31 และ bias เท่ากับ -0.33 % โดยให้ค่า r² ระหว่าง 0.83-0.90 แสดงว่าแบบจำลองใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย (Williams, 2007) และ RPD อยู่ระหว่าง 3.1-4.9 ใช้คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) ได้ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.28 ผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง 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 (SS) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer จากตารางที่ 4.28 แสดงผลการทำนายค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) ได้เนื่องจากแบบจำลองที่มีค่า r² อยู่ระหว่าง 0.50-0.64 ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกแบบหยาบๆ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.29 ผลการทำนายค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูกอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Parameters	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R ²	RMSEE	r ²	RMSEP	RPD	Bias
AF	5	0.42	2.79	0.45	2.76	1.16	0.22
APF	5	0.57	6.72	0.53	7.10	1.43	-0.59
PE	5	0.44	48.48	0.41	50.09	1.18	8.14
RF	20	0.76	6.03	0.43	9.34	1.27	-0.57
T	4	0.45	25.74	0.32	31.28	1.14	-7.91

ผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูกอก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer จากตารางที่ 4.29 แสดงผลการทำนายค่าเนื้อสัมผัส Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) จะเห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) ได้ เนื่องจากแบบจำลองมีค่า r² อยู่ระหว่าง 0.26-0.49 Average force (AF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) เป็นความสัมพันธ์ที่แย่ ควรหาเหตุผล (Williams, 2007) และแบบจำลองที่มีค่า r² อยู่ระหว่าง 0.50-0.64 คือ Average penetrating force (APF) ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกแบบหยาบๆ (Williams, 2007)

ตารางที่ 4.30 ผลการทำนายค่า สี (L^* , a^* และ b^*) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) และค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ในห้องปฏิบัติการ

Parameters	PLS-Factor	Calibration		Prediction			
		R ²	RMSEE	R ²	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
SS	11	0.39	2.03	0.20	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 (SS) และค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) ด้วยแบบจำลองที่สร้างด้วยสเปกตรัมเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ด้วยสเปกตรัมจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer จากตารางที่ 4.30 แสดงผลการทำนายค่า สี (L^* , a^* และ b^*) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) และค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) จะเห็นว่าแบบจำลองไม่สามารถทำนายค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) และค่า Average force (AF), Average penetrating force (APF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) ได้ เนื่องจากแบบจำลองมีค่า r^2 ต่ำกว่า 0.25 คือ (L^* , a^* และ b^*) ปริมาณของแข็งทั้งหมด

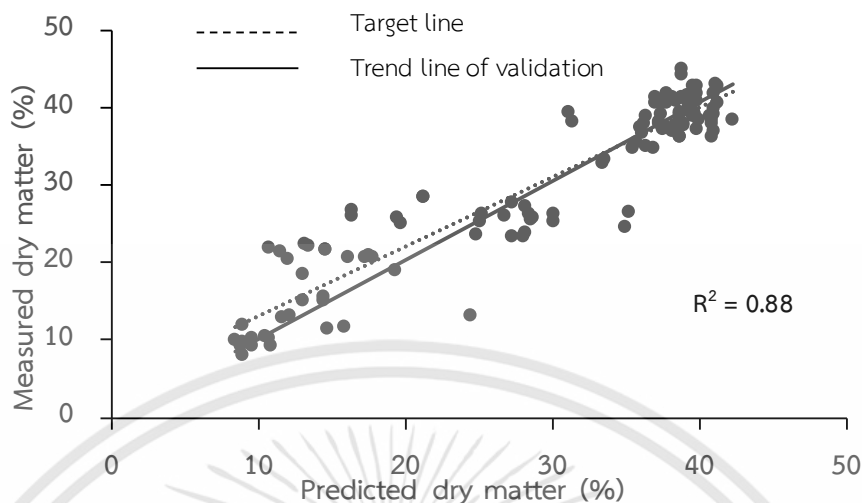
ที่ละลายน้ำได้ (SS) และ ค่า Average force (AF), Penetrating energy (PE), Rupture force (RF) และ Toughness (T) เป็นความสัมพันธ์ที่แย้ ควรหาเหตุผล (Williams, 2007) แบบจำลองที่มีค่า อยู่ระหว่าง 0.26-0.49 Average penetrating force (APF), เป็นความสัมพันธ์ที่แย้ ควรหาเหตุผล (Williams, 2007) และแบบจำลองที่มีค่า r^2 0.50-0.64 ปริมาณมวลแห้ง (DM) ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกแบบหยาบๆ (Williams, 2007)

4.4.4 การใช้แบบจำลองตัวอย่างแบบดั้งเดิมวิเคราะห์ปริมาณมวลแห้ง (DM) กับตัวอย่างใหม่

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

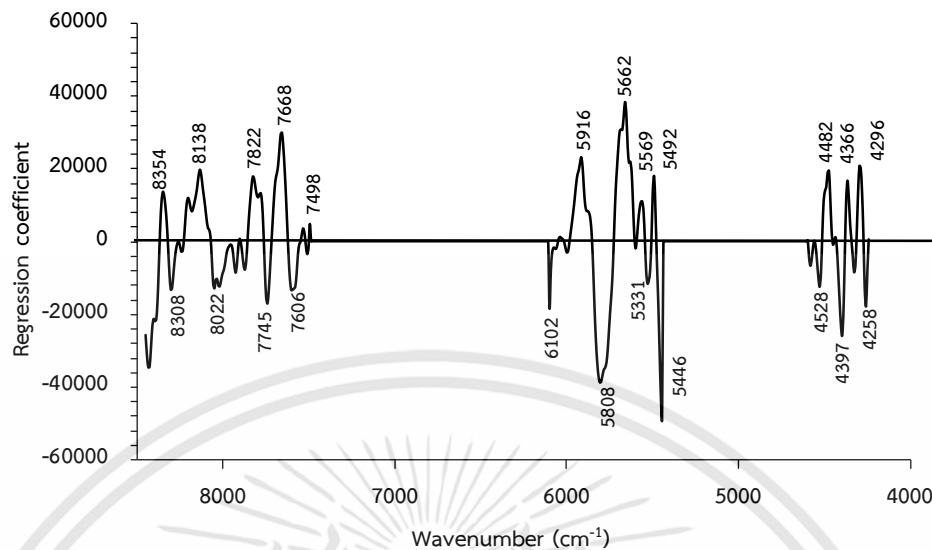
ตารางที่ 4.31 สรุปค่าการวิเคราะห์ปริมาณมวลแห้ง (DM) ของตัวอย่างใหม่โดยใช้แบบจำลองที่ดีที่สุด

Model types	Samples	r^2	r	RMSEP (%)	Bias (%)	SEP (%)	RPD
FT-NIR ที่เนื้อทุเรียน	60	0.88	0.94	4.09	-1.15	3.94	2.90
FT-NIR ที่เนื้อทุเรียนหุ้มพลาสติก	60	0.85	0.92	4.49	-1.05	4.39	2.61
Shortwave ที่เนื้อทุเรียนหุ้มพลาสติก	60	0.71	0.84	7.36	-1.86	7.15	1.59
Longwave ที่เนื้อทุเรียน	60	0.74	0.86	6.98	3.87	9.71	1.17



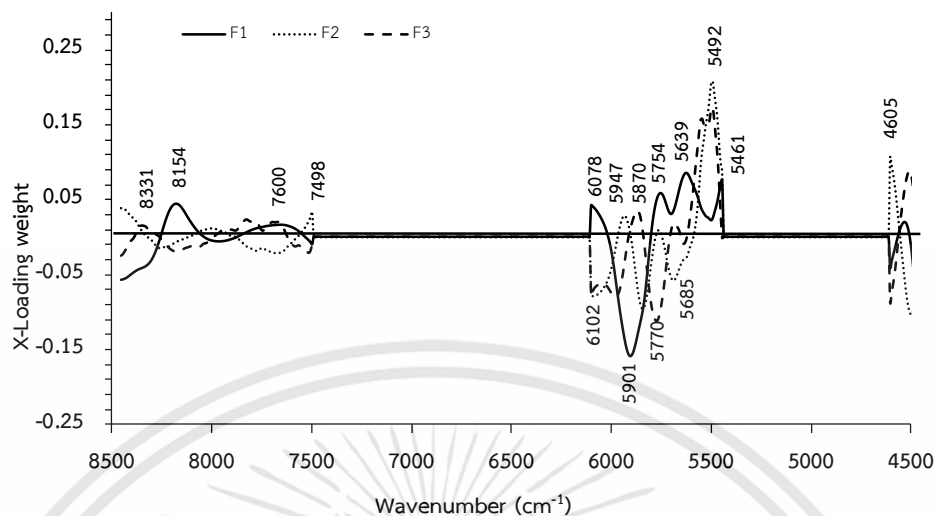
ภาพที่ 4.7 การเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์ อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่

ภาพที่ 4.7 และ 4.10 แสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายจากข้อมูลสเปกตรัมที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่ สำหรับเนื้อุเรียนและเนื้อุเรียนที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ตามลำดับ จากผลดังกล่าวพบว่า การใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer สแกนที่เนื้อุเรียนโดยตรงให้ผลดีกว่าสแกนผ่านพลาสติกหุ้ม แต่อย่างไรก็ตาม สมรรถนะการทำนายของการสแกนทั้งสองแบบไม่ต่างกัน และสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้งานจริง นอกจากนี้ ผลที่แสดงดังกล่าวยังสอดคล้องกับการศึกษาของ (Williams, 2007) ซึ่งได้กล่าวว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ตั้งแต่ 0.83-0.90 สามารถใช้ได้ ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ



ภาพที่ 4.8 Regression coefficient plot ของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer

ภาพที่ 4.8 Regression coefficient plot แสดงการสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อุเรียนที่บริเวณพูเอก โดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer จะเห็นได้ว่าพีคที่สูงที่สุดคือ 5446 cm^{-1} (1836 nm) ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับ cellulose การสัมพันธ์ของ O-H stretching + $2 \times$ C-O stretching (1820 nm) (Osborne and Fearn, 1986) ในการทำนาย DM ของเนื้อุเรียน นอกจากนี้ยังมีการสัมพันธ์ของกรดไขมัน CH_2 ได้แก่ 5808 cm^{-1} และ 5662 cm^{-1} (1722 nm และ 1766 nm) ซึ่งอยู่ใกล้กับ 1725 nm และ 1765 nm C-H stretching first overtone (Osborne and Fearn, 1986) ภาพที่ 4.9 แสดงกราฟ X-loading weight plot ของแบบจำลองในเนื้อุเรียน ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer ซึ่งผลที่ได้ค่า X-loading weight สูง ดังตารางที่ 4.33 ซึ่งแสดงการสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 5492 cm^{-1} (1818 nm) แสดงค่า X-loading weight สูงสุดคือ PLS factor 2 และ PLS factor 3 ใกล้เคียงกับ cellulose ซึ่งเป็นการสัมพันธ์ O-H stretching + $2 \times$ C-O stretching (1820 nm) (Osborne and Fearn, 1986) X-loading weight สูงอันดับที่ 2 พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 5901 cm^{-1} (1695 nm) คือ PLS factor 1 ใกล้เคียงกับ CH_3 ซึ่งเป็นการสัมพันธ์ C-H stretching first overtone (1695 nm) (Osborne and Fearn, 1986)



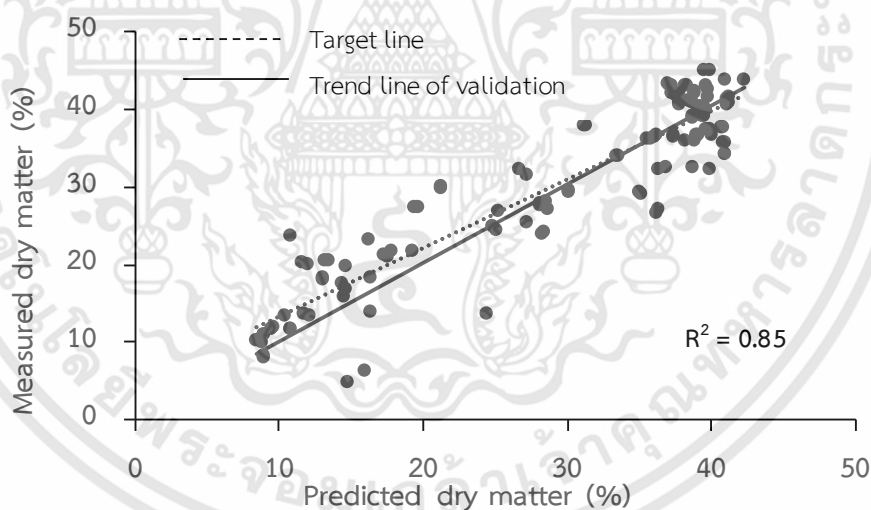
ภาพที่ 4.9 X-loading weight plot ของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer

ตารางที่ 4.32 การสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) พิจารณาจาก Regression coefficient ที่มีค่าสูงของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer

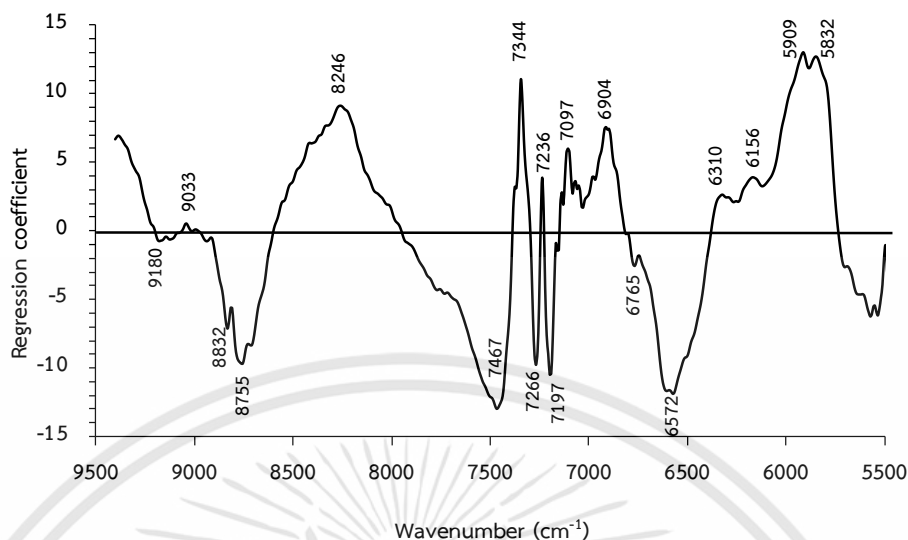
Wavenumber (cm ⁻¹)	Wavelength (nm)	Wavelength (nm) referred from reference	Bond vibration/structure
5446	1836	1820	O-H stretching + 2 × C-O stretching/cellulose
5808	1722	1725	C-H stretching first overtone/CH ₂
5662	1766	1765	C-H stretching first overtone/CH ₂

ตารางที่ 4.33 การสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) พิจารณาจาก X-loading weight ที่มีค่าสูงของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อุเรียนที่บริเวณพุ่มอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.

Wavenumber (cm ⁻¹)	Wavelength (nm)	PLS factor	Wavelength (nm) referred from reference	Bond vibration/structure
5492	1818	F2, F3	1820	O-H stretching + 2 × C-O stretching/cellulose
5901	1695	F1	1695	C-H stretching first overtone/ CH ₃
5770	1733	F3	1725	C-H stretching first overtone/CH ₂



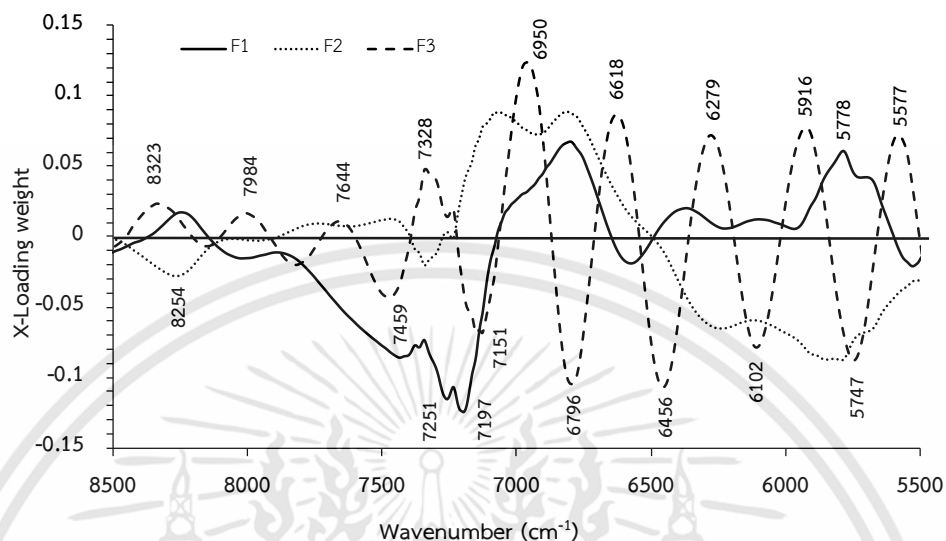
ภาพที่ 4.10 การเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อุเรียนที่บริเวณพุ่มอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่



ภาพที่ 4.11 Regression coefficient plot ของแบบจำลองเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer

ภาพที่ 4.11 Regression coefficient plot แสดงการสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก โดยวิธีอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer จะเห็นได้ว่าพีคที่สูงที่สุดคือ 7467 cm^{-1} (1339 nm) ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับ CH_3 การสัมพันธ์ของ $2 \times \text{C-H stretching} + \text{C-H deformation}$ (1360 nm) (Osborne and Fearn, 1986) ในการทำนาย DM ของเนื้อทุเรียนที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก นอกจากนี้ยังมีการสัมพันธ์ของ starch ได้แก่ 6572 cm^{-1} (1521 nm) ซึ่งอยู่ใกล้กับ 1528 nm O-H stretching first overtone (Osborne and Fearn, 1986) และมีการสัมพันธ์ของ CH_2 ได้แก่ 7197 cm^{-1} (1389 nm) ซึ่งอยู่ใกล้กับ 1395 nm $2 \times \text{C-H stretching} + \text{C-H deformation}$ (Osborne and Fearn, 1986) ภาพที่ 4.12 แสดงกราฟ X-loading weight plot ของแบบจำลอง ซึ่งผลที่ได้ค่า X-loading weight สูง ดังตารางที่ 4.35 ซึ่งแสดงการสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 7197 cm^{-1} (1389 nm) แสดงค่า X-loading weight สูงสุดคือ PLS factor 1 ใกล้เคียงกับ CH_2 ซึ่งเป็นการสัมพันธ์ $2 \times \text{C-H stretching} + \text{C-H deformation}$ (1395 nm) (Osborne and Fearn, 1986) X-loading weight สูงอันดับที่ 2 พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 6950 cm^{-1} (1438 nm) คือ PLS factor 3 ใกล้เคียงกับ sucrose, starch ซึ่งเป็นการสัมพันธ์ O-H stretching first overtone (1440 nm) (Osborne and Fearn, 1986) และ X-loading weight สูงอันดับที่ 3 พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 6796 cm^{-1} (1471

nm) คือ PLS factor 1 PLS factor 2 และ PLS factor 3 ใกล้เคียงกับ glucose ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือน O-H stretching first overtone (1480 nm) (Osborne and Fearn, 1986)



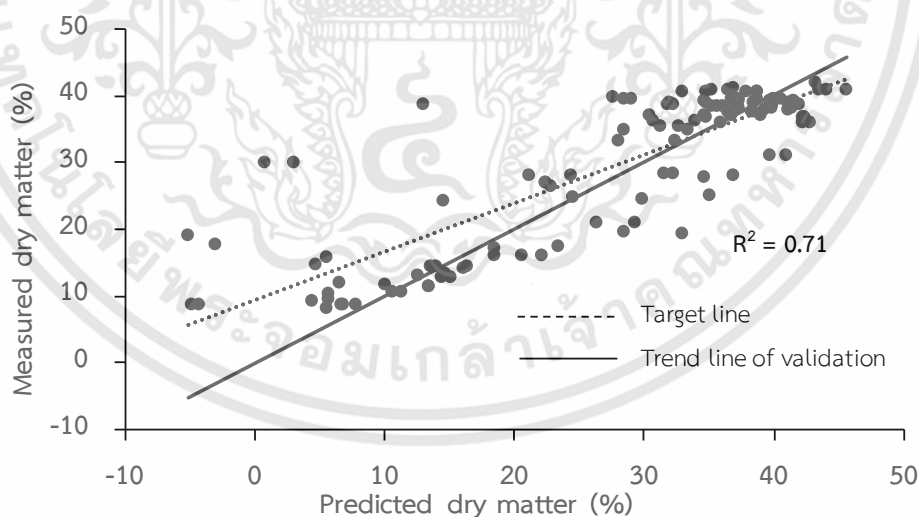
ภาพที่ 4.12 X-loading weight plot ของแบบจำลองการเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer

ตารางที่ 4.34 การสั่นสะเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) พิจารณาจาก Regression coefficient ที่มีค่าสูงของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) ในเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer

Wavenumber (cm ⁻¹)	Wavelength (nm)	Wavelength (nm) referred from reference	Bond vibration/structure
7467	1339	1360	2 x C-H stretching + C-H deformation /CH ₃
6572	1521	1528	O-H stretching first overtone/starch
7197	1389	1395	2 x C-H stretching + C-H deformation /CH ₂

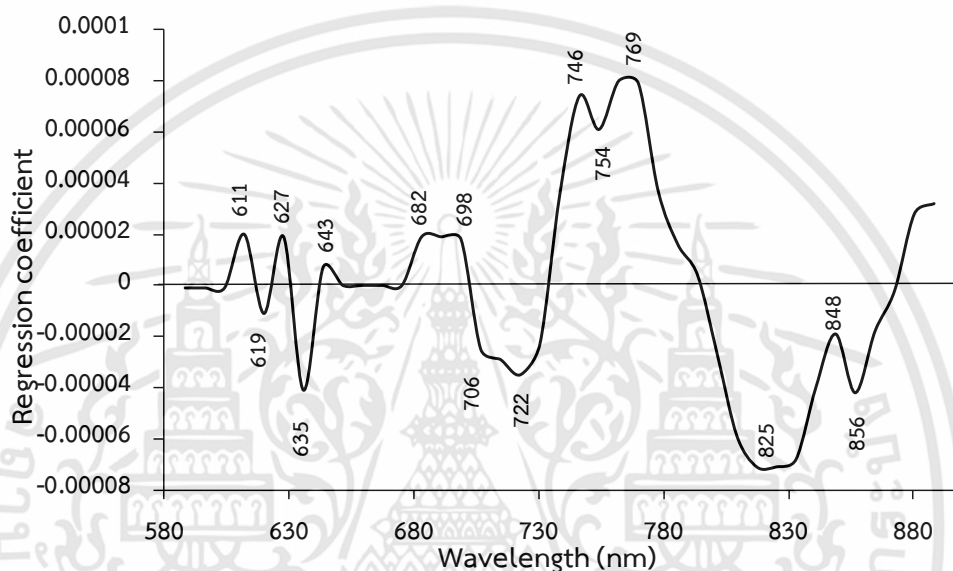
ตารางที่ 4.35 การสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) พิจารณาจาก X-loading weight ที่มีค่าสูงของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.

Wavenumber (cm ⁻¹)	Wavelength (nm)	PLS factor	Wavelength (nm) referred from reference	Bond vibration/structure
7197	1389	F1	1395	2 x C-H stretching + C-H deformation /CH ₂
6950	1438	F3	1440	O-H stretching first overtone/starch
6796	1471	F1,F2 และ F3	1480	O-H stretching first overtone/glucose



ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่

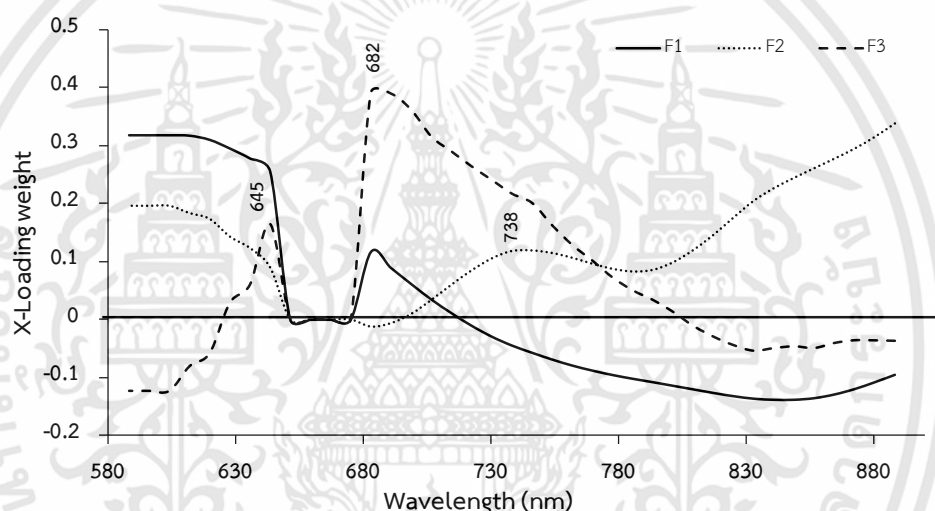
ภาพที่ 4.13 และ 4.16 แสดงผลการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อุเรียนที่บริเวณพวอกโดยใช้เครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer สแกนที่เนื้อุเรียนหุ้มพลาสติก และ Longwave linear variable filter spectrometer ในการสแกนเนื้อุเรียนโดยตรง ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้เครื่องทั้งสองชนิดซึ่งเป็นแบบพกพาในการสแกนเนื้อุเรียนมีสมรรถนะการทำนายที่ต่ำกว่าเครื่อง FT-NIR Spectrometer อย่างไรก็ตาม จากการรายงานของ Williams (2007) กล่าวว่า ค่า R^2 ตั้งแต่ 0.66-0.81 สามารถประยุกต์ใช้ได้สำหรับการคัดแยกแบบประมาณ



ภาพที่ 4.14 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อุเรียนที่บริเวณพวอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer

ภาพที่ 4.14 Regression coefficient plot แสดงการสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อุเรียนที่บริเวณพวอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก โดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer จะเห็นได้ว่า พิกที่สูงสุดคือ 746 nm ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับ CH_2 การสัมพันธ์ของ C-H stretching fourth overtone (746 nm) (Osborne and Fearn, 1986) นอกจากนี้ยังมีการสัมพันธ์ของ H_2O ได้แก่ 769 nm ซึ่งอยู่ใกล้กับ 760 nm O-H stretching third overtone (Osborne and Fearn, 1986) และมีการสัมพันธ์ของ CH_3 ได้แก่ 722 nm ซึ่งอยู่ใกล้กับ 740 nm C-H stretching fourth overtone (Osborne and Fearn, 1986) ภาพที่ 4.15 แสดงกราฟ X-loading weight plot ของแบบจำลอง ซึ่งผลที่ได้ค่า X-loading weight สูง ดังตารางที่ 4.37 ซึ่งแสดงการสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนาย

ปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 682 nm แสดงค่า X-loading weight สูงสุดคือ PLS factor 1 PLS factor 2 และ PLS factor 3 ใกล้เคียงกับ 680 nm คือ chlorophyll (Tkachuk, 1982) X-loading weight สูงอันดับที่ 2 พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 645 nm คือ PLS factor 1 PLS factor 2 และ PLS factor 3 ใกล้เคียงกับ chlorophyll 650 nm (Merzlyak, 2003) และ X-loading weight สูงอันดับที่ 3 พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 738 nm คือ factor 2 ใกล้เคียงกับ CH_3 ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือน C-H stretching fourth overtone (740 nm) (Osborne and Fearn, 1986)



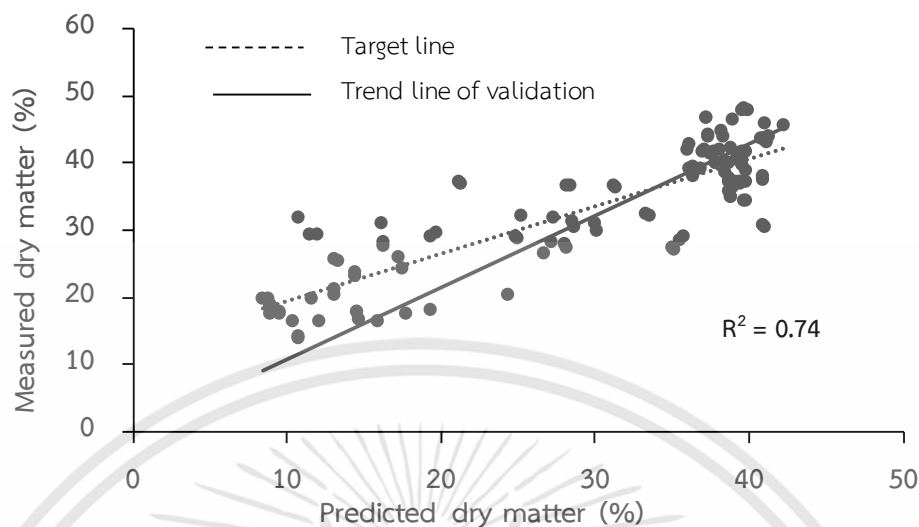
ภาพที่ 4.15 X-loading weight plot ของแบบจำลองการเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพุ่มอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer

ตารางที่ 4.36 การสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) พิจารณาจาก Regression coefficient ที่มีค่าสูงของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อุเรียนที่บริเวณพู่เอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer

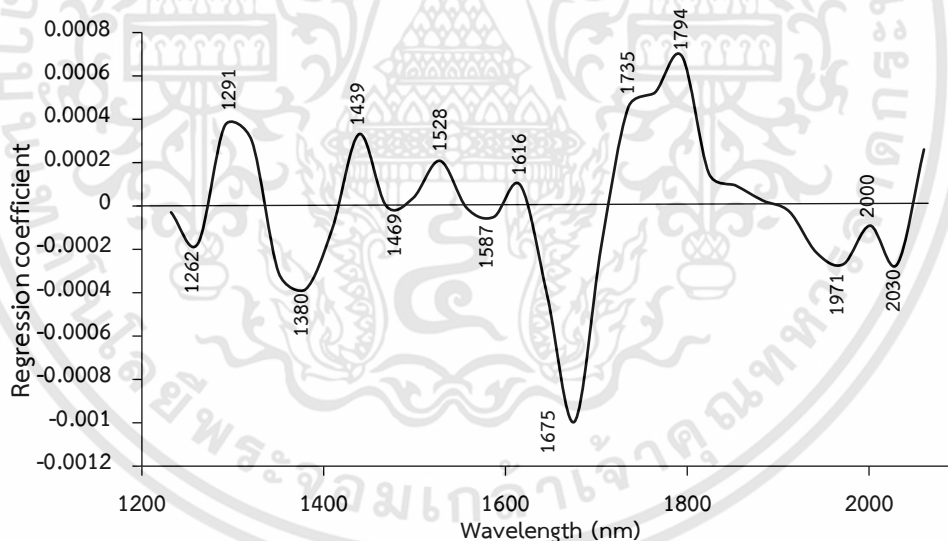
Wavelength (nm)	Wavelength (nm) referred from reference	Bond vibration/structure
746	746	C-H stretching fourth overtone/CH ₂
769	760	O-H stretching third overtone/H ₂ O
722	740	C-H stretching fourth overtone/CH ₃

ตารางที่ 4.37 การสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) พิจารณาจาก X-loading weight ที่มีค่าสูงของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อุเรียนที่บริเวณพู่เอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer

Wavelength (nm)	PLS factor	Wavelength (nm) referred from reference	Bond vibration/structure
682	F1,F2 และ F3	680	Chlorophyll
645	F1,F2 และ F3	650	ChlorophyB
738	F2	740	C-H stretching fourth overtone/CH ₂



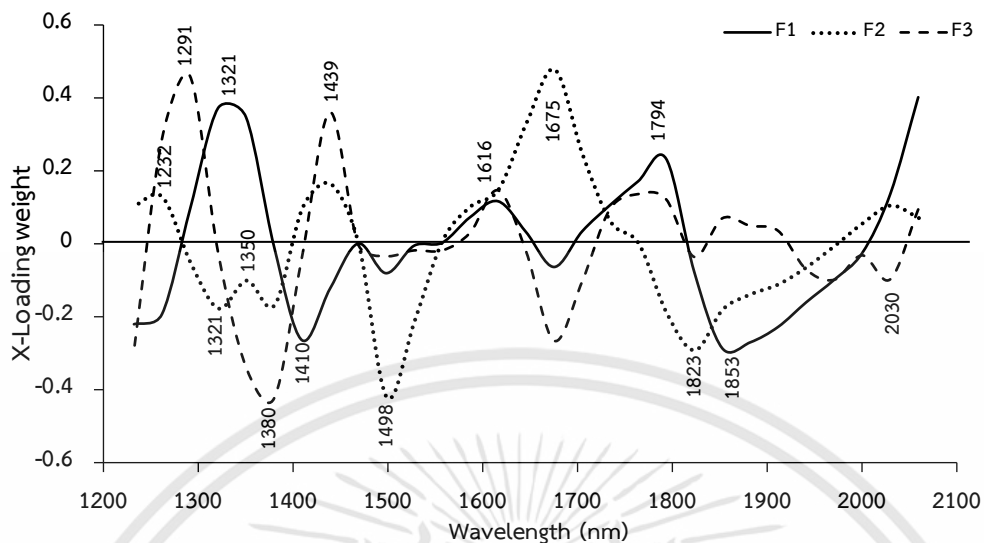
ภาพที่ 4.16 การเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่



ภาพที่ 4.17 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer

ภาพที่ 4.17 Regression coefficient plot แสดงการสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อุเรียนที่บริเวณพูเอก โดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง

Longwave linear variable filter spectrometer จะเห็นได้ว่าพีคที่สูงที่สุดคือ 1675 nm ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับ aromatic การสั่นสะเทือนของ C-H stretching first overtone (1685 nm) (Osborne and Fearn, 1986) นอกจากนี้ยังมีการสั่นสะเทือนของ cellulose ได้แก่ 1794 nm ซึ่งอยู่ใกล้กับ 1780 nm C-H stretching first overtone (Osborne and Fearn, 1986) และมีการสั่นสะเทือนของ CH₂ ได้แก่ 1735 nm ซึ่งอยู่ใกล้กับ 1725 nm C-H stretching first overtone (Osborne and Fearn, 1986) ภาพที่ 4.18 แสดงกราฟ X-loading weight plot ของแบบจำลองการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียน โดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer ซึ่งผลที่ได้ค่า X-loading weight สูง ดังตารางที่ 4.39 ซึ่งแสดงการสั่นสะเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) ของเนื้อทุเรียน พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 1675 nm แสดงค่า X-loading weight สูงสุดคือ PLS factor 1 PLS factor 2 และ PLS factor 3 ใกล้เคียงกับ aromatic ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือน C-H stretching first overtone (1685 nm) (Osborne and Fearn, 1986) X-loading weight สูงอันดับที่ 2 พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 1291 nm คือ PLS factor 3 ใกล้เคียงกับ CH₃ ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือน 2 × C-H stretching + C-H deformation 1360 nm (Osborne and Fearn, 1986) และ X-loading weight สูงอันดับที่ 3 พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 1439 nm คือ factor 2 และ PLS factor 3 ใกล้เคียงกับ sucrose และ starch ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือน O-H stretching first overtone (1440 nm) (Osborne and Fearn, 1986)



ภาพที่ 4.18 X-loading weight plot ของแบบจำลองการเปรียบเทียบปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียน ที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer

ตารางที่ 4.38 การสันสะเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) พิจารณาจาก Regression coefficient ที่มีค่าสูงของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอกที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer

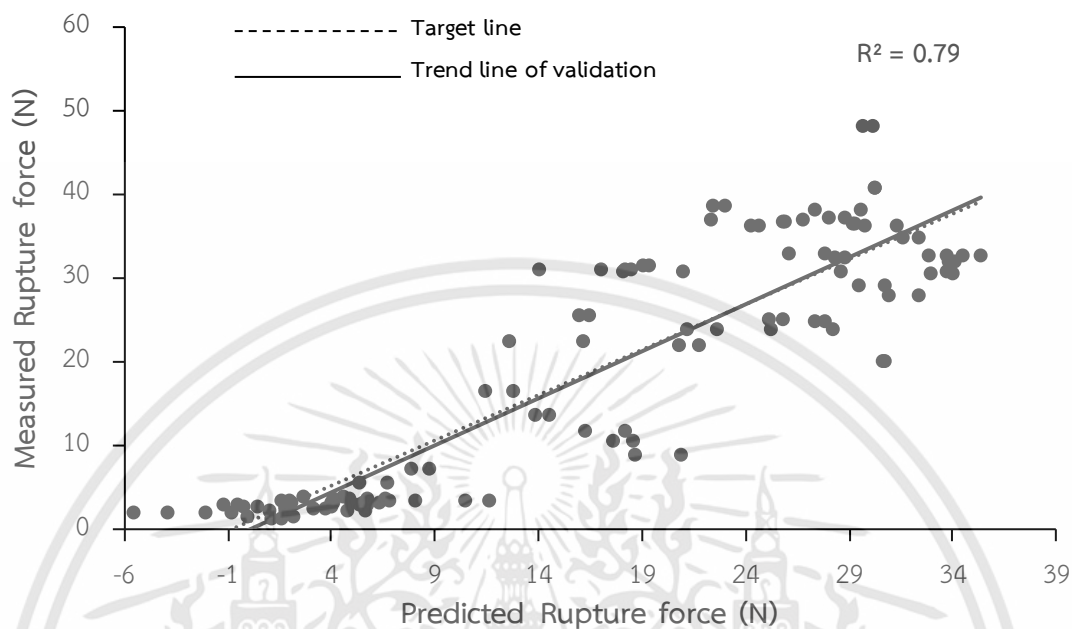
Wavelength (nm)	Wavelength (nm) referred from reference	Bond vibration/structure
1675	1685	C-H stretching first overtone/aromatic
1794	1780	C-H stretching first overtone /cellulose
1735	1725	C-H stretching first overtone/CH ₂

ตารางที่ 4.39 การสั่นสะเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) พิจารณาจาก X-loading weight ที่มีค่าสูงของแบบจำลองปริมาณมวลแห้ง (DM) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer

Wavelength (nm)	PLS factor	Wavelength (nm) referred from reference	Bond vibration/structure
1675	F1,F2 และ F3	1685	C-H stretching first overtone/aromatic
1291	F3	1360	2 x C-H stretching+C-H deformation/CH ₃
1439	F2 และ F3	1440	O-H stretching first overtone/sucrose, starch

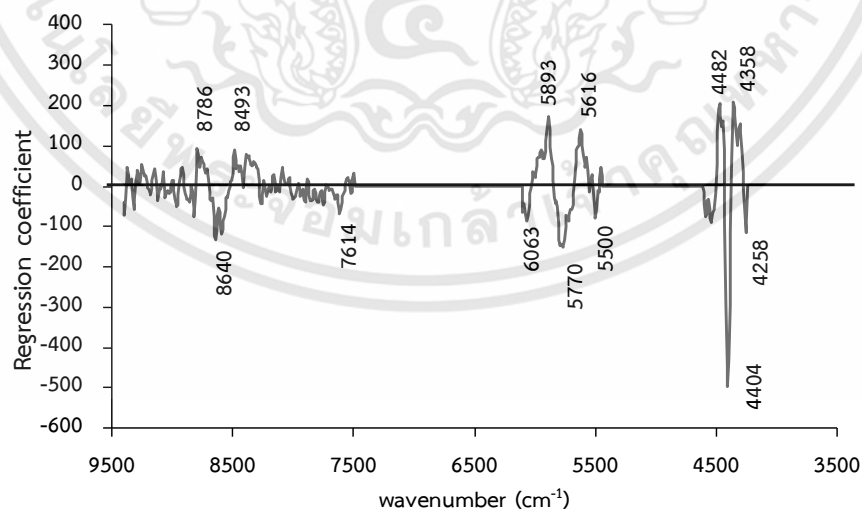
ตารางที่ 4.40 สรุปค่าการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของตัวอย่างใหม่โดยใช้แบบจำลองที่ดีที่สุด

Model types	Samples	r ²	r	RMSEP (N)	Bias (N)	SEP (N)	RPD
FT-NIR ที่เนื้อ RF	60	0.79	0.89	6.93	2.35	6.50	2.21
FT-NIR ที่เนื้อ APF	60	0.75	0.87	7.32	3.98	4.09	2.01



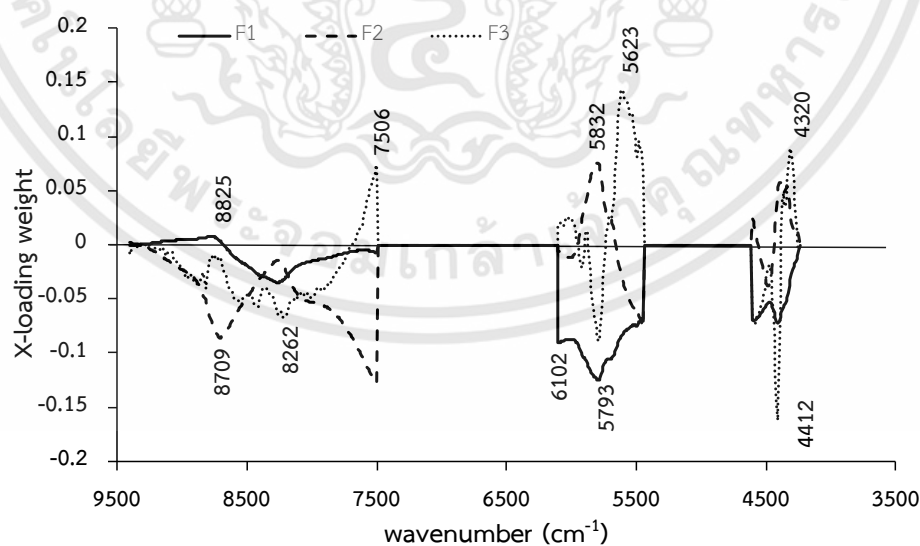
ภาพที่ 4.19 การเปรียบเทียบ Rupture Force (RF) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่

ภาพที่ 4.19 แสดงผลการทำนาย Rupture Force (RF) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก โดยใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer สแกนที่เนื้อทุเรียนโดยตรง จากการรายงานของ Williams (2007) กล่าวว่า ค่า R^2 ตั้งแต่ 0.66-0.81 สามารถประยุกต์ใช้ได้สำหรับการคิดแยกแบบประมาณ



ภาพที่ 4.20 Regression coefficient plot ของแบบจำลอง Rupture Force (RF) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer

ภาพที่ 4.20 Regression coefficient plot แสดงการสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนาย Rupture Force (RF) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพุ่มอก โดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer จะเห็นได้ว่าพีคที่สูงที่สุดคือ 4404 cm^{-1} (2270 nm) ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับ starch การสัมพันธ์ของ O–H stretching + C–C stretching (2276 nm) (Osborne and Fearn, 1986) นอกจากนี้ยังมีการสัมพันธ์ของ amino acid ได้แก่ 4358 cm^{-1} และ 4482 cm^{-1} (2294 nm และ 2231 nm) ซึ่งอยู่ใกล้กับ 2294 nm และ 2242 nm N–H stretching + C=O stretching และ N–H stretching + NH_3^+ deformation (Osborne and Fearn, 1986) ภาพที่ 4.21 แสดงกราฟ X-loading weight plot ของแบบจำลองในเนื้อทุเรียน ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer ซึ่งผลที่ได้ค่า X-loading weight สูง ดังตารางที่ 4.42 ซึ่งแสดงการสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนาย Rupture Force (RF) พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 4412 cm^{-1} (2266 nm) แสดงค่า X-loading weight สูงสุดคือ PLS factor 1, PLS factor 2 และ PLS factor 3 ใกล้เคียงกับ starch ซึ่งเป็นการสัมพันธ์ของ O–H stretching + C–C stretching (2266 nm) (Osborne and Fearn, 1986) X-loading weight สูงอันดับที่ 2 พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 5623 cm^{-1} (1778 nm) คือ PLS factor 3 ใกล้เคียงกับ cellulose ซึ่งเป็นการสัมพันธ์ของ C–H stretching first overtone (1780 nm) (Osborne and Fearn, 1986) X-loading weight สูงอันดับที่ 3 พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 5793 cm^{-1} (1726 nm) คือ PLS factor 1 และ PLS factor 3 ใกล้เคียงกับ CH_2 ซึ่งเป็นการสัมพันธ์ของ C–H stretching first overtone (1725 nm) (Osborne and Fearn, 1986)



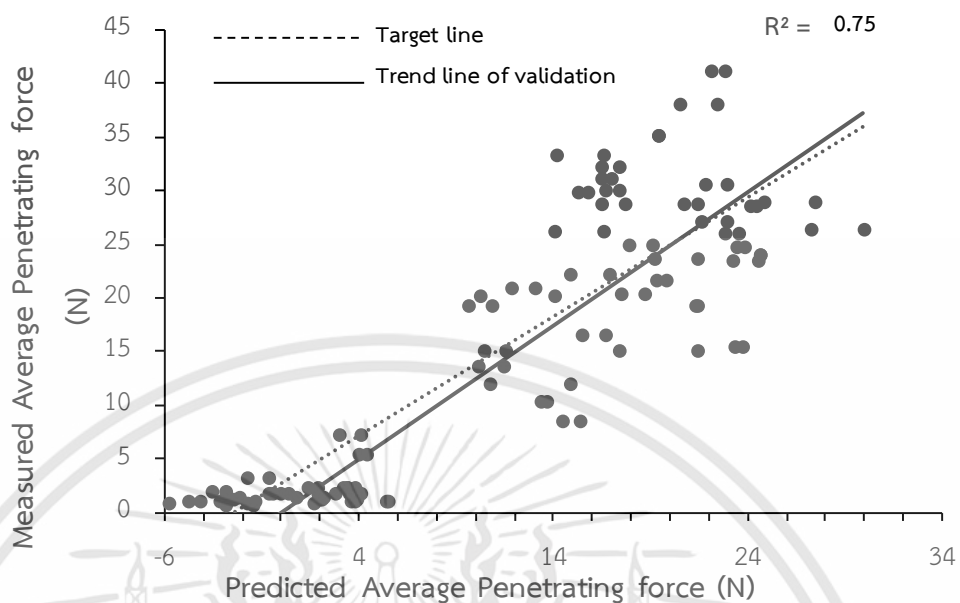
ภาพที่ 4.21 X-loading weight plot ของแบบจำลอง Rupture Force (RF) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพุ่มอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer

ตารางที่ 4.41 การสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนาย Rupture Force (RF) พิจารณาจาก Regression coefficient ที่มีค่าสูงของแบบจำลอง Rupture Force (RF) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer

Wavenumber (cm ⁻¹)	Wavelength (nm)	Wavelength (nm) referred from reference	Bond vibration/structure
4404	2270	2276	O-H stretching + C-C stretching /starch
4358	2294	2294	N-H stretching + C=O stretching /amino acid
4482	2231	2242	N-H stretching + NH ₃ ²⁺ deformation / amino acid

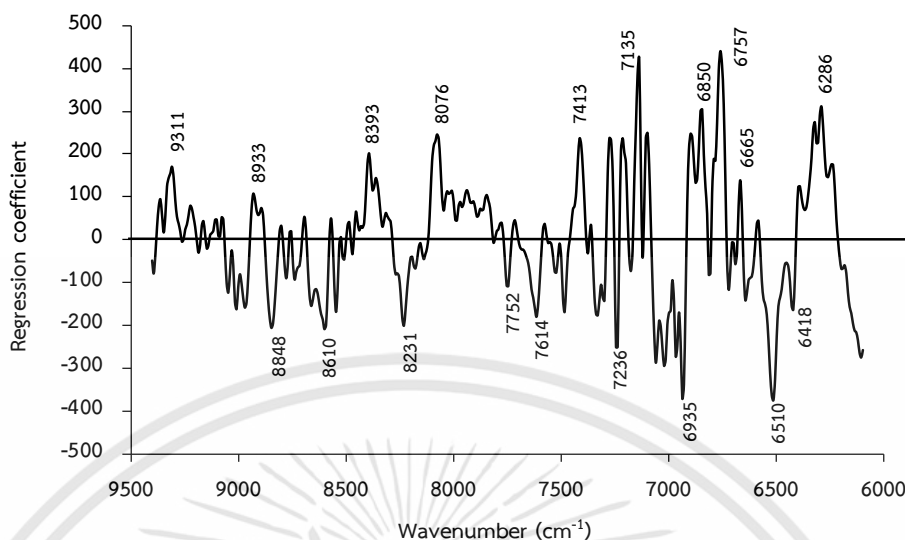
ตารางที่ 4.42 การสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนาย Rupture Force (RF) พิจารณาจาก X-loading weight ที่มีค่าสูงของแบบจำลอง Rupture Force (RF) เนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.

Wavenumber (cm ⁻¹)	Wavelength (nm)	PLS factor	Wavelength (nm) referred from reference	Bond vibration/structure
4412	2266	F1, F2 และ F3	1820	O-H stretching + C-C stretching/starch
5623	1778	F3	1695	C-H stretching first overtone/cellulose
5793	1726	F1 และ F3	1725	C-H stretching first overtone/CH ₂



ภาพที่ 4.22 การเปรียบเทียบ Average Penetrating Force (APF) ของเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer กับวิธีอ้างอิงของชุดตัวอย่างใหม่

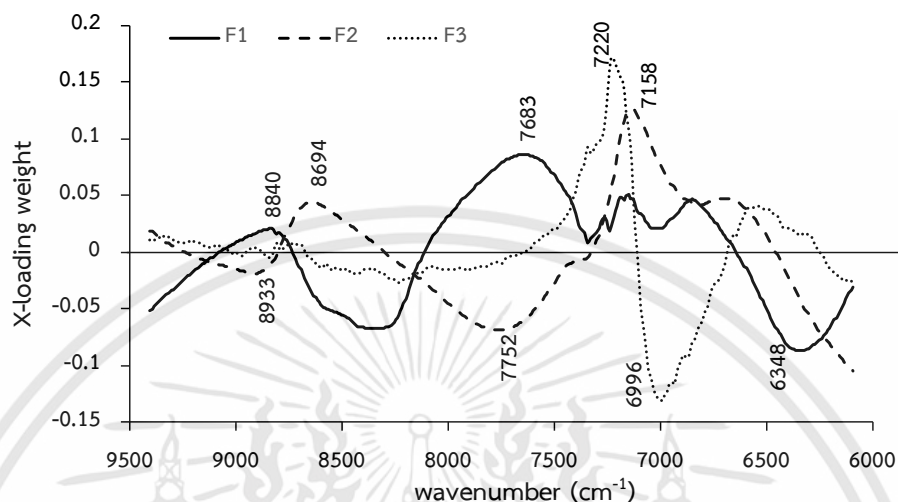
ภาพที่ 4.22 แสดงผลการทำนาย Average Penetrating Force (APF) ในเนื้อทุเรียนโดยใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer สแกนที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกโดยตรง จากการรายงานของ Williams (2007) กล่าวว่า ค่า R^2 ตั้งแต่ 0.66-0.81 สามารถประยุกต์ใช้ได้สำหรับการคัดแยกแบบประมาณ



ภาพที่ 4.23 Regression coefficient plot ของแบบจำลอง Average Penetrating Force (APF) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพุ่มอกที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer

ภาพที่ 4.23 Regression coefficient plot แสดงการสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนาย Average Penetrating Force (APF) ของเนื้อทุเรียนบริเวณพุ่มอก โดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer จะเห็นได้ว่าพิกที่สูงสุดคือ 6757 cm^{-1} (1479 nm) ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับ glucose การสัมพันธ์ของ O-H stretching overtone (1480 nm) (Osborne and Fearn, 1986) Average Penetrating Force (APF) ของเนื้อทุเรียนนอกจากนี้ยังมีการสัมพันธ์ของ CH_2 ได้แก่ 7135 cm^{-1} (1401 nm) ซึ่งอยู่ใกล้กับ 1395 nm $2 \times \text{C-H stretching} + \text{C-H deformation}$ (Osborne and Fearn, 1986) และ มีการสัมพันธ์ของ sucrose และ starch 6935 cm^{-1} (1441 nm) ซึ่งอยู่ใกล้กับ 1440 nm O-H stretching first overtone (Osborne and Fearn, 1986) ภาพที่ 4.24 แสดงกราฟ X-loading weight plot ของแบบจำลองในเนื้อทุเรียน ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer ซึ่งผลที่ได้ค่า X-loading weight สูง ดังตารางที่ 4.44 ซึ่งแสดงการสัมพันธ์ของพันธะที่มีผลต่อการทำนาย Average Penetrating Force (APF) พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 7220 cm^{-1} และ 7158 cm^{-1} (1385 nm และ 1397 nm) แสดงค่า X-loading weight สูงสุดคือ PLS factor 3 และ PLS factor 2 ใกล้เคียงกับ CH_2 ซึ่งเป็นการสัมพันธ์ของ $2 \times \text{C-H stretching} + \text{C-H deformation}$ (1395 nm) (Osborne and Fearn, 1986) X-loading weight สูงอันดับที่ 2 พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 6996 cm^{-1} (1429 nm) คือ PLS factor 3 ใกล้เคียง

กับ aromatic ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือน $2 \times \text{C-H stretching} + \text{C-H deformation}$ (1417nm) (Osborne and Fearn, 1986)



ภาพที่ 4.24 X-loading weight plot ของแบบจำลอง Average Penetrating Force (APF) ของเนื้อทุเรียนที่บริเวณพุ่มอก ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer

ตารางที่ 4.43 การสันสเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนาย Average Penetrating Force (APF) พิจารณาจาก Regression coefficient ที่มีค่าสูงของแบบจำลอง Average Penetrating Force (APF) ในเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer

Wavenumber (cm ⁻¹)	Wavelength (nm)	Wavelength (nm) referred from reference	Bond vibration/structure
6757	1479	1480	O-H stretching overtone /glucose
7135	1401	1395	2 x C-H stretching + C-H deformation/CH ₂
6935	1441	1440	O-H stretching first overtone/sucrose, starch

ตารางที่ 4.44 การสันสเทือนของพันธะที่มีผลต่อการทำนาย Average Penetrating Force (APF) พิจารณาจาก X-loading weight ที่มีค่าสูงของแบบจำลอง Average Penetrating Force (APF) ในเนื้อทุเรียนที่บริเวณพูเอก ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer.

Wavenumber (cm ⁻¹)	Wavelength (nm)	PLS factor	Wavelength (nm) referred from reference	Bond vibration/structure
7220	1385	F1 และ F2	1395	O-H stretching + C-C stretching/ CH ₂
7158	1397	F1 และ F2	1395	C-H stretching first overtone/CH ₂
6996	1429	F3	1417	2 x C-H stretching + C-H deformation /aromatic

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 ความเป็นไปได้ในการใช้งานแบบจำลอง

สรุปเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อการประเมินคุณภาพการรับประทาน (เนื้อสัมผัส ความชื้น และความหวาน) ของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองเพื่อการส่งออกและการขายในห้างสรรพสินค้า แบบจำลองที่ดีที่สุดคือแบบจำลองที่ใช้ทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM), Rupture Force (RF) และ Average Penetrating Force (APF)

ผลการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) จากสเปกตรัมของเนื้อทุเรียนบริเวณพวเอกที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ให้ค่า r^2 เท่ากับ 0.89, RMSEP เท่ากับ 3.60%, RPD เท่ากับ 3.27 และ bias เท่ากับ 0.98% การดูดซับคลื่นที่มี Regression coefficient สูงที่สุด ได้แก่ 5446 cm^{-1} (1836 nm) บริเวณ 1820 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose การดูดซับคลื่นที่มี X-loading สูงที่สุดที่ 5492 cm^{-1} (1821 nm) บริเวณ 1820 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose (Osborne and Fearn, 1986) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching ผลการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) จากสเปกตรัมของเนื้อทุเรียนบริเวณพวเอกหุ้มด้วยพลาสติกที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ให้ค่า r^2 เท่ากับ 0.83, RMSEP เท่ากับ 4.60%, RPD เท่ากับ 2.42 และ bias เท่ากับ -0.22% การดูดซับคลื่นที่มี Regression coefficient สูงที่สุดที่ 6572 cm^{-1} (1521 nm) บริเวณ 1528 nm ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching เป็นการดูดซับคลื่นของ starch (Osborne and Fearn, 1986) การดูดซับคลื่นที่มี X-loading สูงที่สุดที่ 6942 cm^{-1} (1440 nm) บริเวณ 1440 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ sucrose, starch (Osborne and Fearn, 1986) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ O-H stretching ผลการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) จากสเปกตรัมของเนื้อทุเรียนบริเวณพวเอกห่อหุ้มพลาสติกที่สแกนด้วยเครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer (FQA-NIR GUN Fantec, Japan) ให้ r^2 เท่ากับ 0.87, RMSEP เท่ากับ 4.02%, RPD เท่ากับ 4.12 และ bias เท่ากับ -0.44 % การดูดซับคลื่นที่มี Regression coefficient สูงที่ 746 nm และ 927 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ 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) เกิดการ

สั่นสะเทือนของ O-H stretching ผลการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) จากสเปกตรัมของเนื้อทุเรียน บริเวณพวอก ที่สแกนด้วยเครื่อง Longwave linear variable filter spectrometer (MICRONIR JDSU, USA) ให้ r^2 เท่ากับ 0.86, RMSEP เท่ากับ 4.15%, RPD เท่ากับ 4.15 และ bias เท่ากับ -0.47 % การดูดซับคลื่นที่มี Regression coefficient สูงที่สุดที่ 1210 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ CH_2 (Osborne and Fearn, 1986) 1215 nm เกิดการสั่นสะเทือนของ C-H stretching การดูดซับคลื่นที่มี X-loading สูงที่สุดที่ 1173 nm บริเวณ 1195 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ CH_3 (Osborne and Fearn, 1986) ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของ C-H stretching ผลการทำนาย Rupture Force (RF) จากสเปกตรัมของเนื้อทุเรียนบริเวณพวอก ที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ซึ่งให้ค่า r^2 เท่ากับ 0.74, RMSEP เท่ากับ 6.15 N, RPD เท่ากับ 1.96 และ bias เท่ากับ 0.07 N การดูดซับคลื่นที่มี Regression coefficient สูงที่สุด ได้แก่ 4404 cm^{-1} (2270 nm) เป็นการดูดซับคลื่นของ starch การสั่นสะเทือนของ O-H stretching + C-C stretching (2276 nm) (Osborne and Fearn, 1986) 5446 พบว่าที่แถบการดูดซับคลื่นที่ 4412 cm^{-1} (2266 nm) เป็นการดูดซับคลื่นของ starch ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือน O-H stretching + C-C stretching (2266 nm) (Osborne and Fearn, 1986) ผลการทำนาย Average Penetrating Force (APF) จากสเปกตรัมของเนื้อทุเรียนบริเวณพวอก ที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ซึ่งให้ค่า r^2 เท่ากับ 0.73, RMSEP เท่ากับ 5.53 N, RPD เท่ากับ 1.95 และ bias เท่ากับ 1.00 N การดูดซับคลื่นที่มี Regression coefficient สูงที่สุด ได้แก่ 6757 cm^{-1} (1479 nm) เป็นการดูดซับคลื่นของ glucose การสั่นสะเทือนของ O-H stretching overtone (1480 nm) (Osborne and Fearn, 1986) การดูดซับคลื่นที่มี X-loading สูงที่สุดที่ 7220 cm^{-1} และ 7158 cm^{-1} (1385 nm และ 1397 nm) เป็นการดูดซับคลื่นของ CH_2 ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือน $2 \times \text{C-H stretching} + \text{C-H deformation}$ (1395 nm) (Osborne and Fearn, 1986) ผลการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) ค่าเนื้อสัมผัส และค่าสี จากสเปกตรัมของเปลือกทุเรียนบริเวณพวอก ที่เปลือกทุเรียนกัน ที่เนื้อทุเรียนบริเวณพวอก และที่เนื้อทุเรียนบริเวณพวอกห่อหุ้มพลาสติกที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer, Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer และ Longwave linear variable filter spectrometer แสดงดังตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองมีค่า r^2 เท่ากับ 0.50-0.64 ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกอย่างหยาบๆ และแบบจำลองที่มีค่า r^2 เท่ากับ 0.66-0.81 ยอมรับได้สำหรับคัดเลือก และประมาณค่าอย่างหยาบๆ (Williams, 2007)

ตารางที่ 5.1 ผล การทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (SS) ค่าเนื้อสัมผัส และค่าสี จากสเปกตรัมของเปลือกทุเรียนบริเวณพูเอก ที่เปลือกทุเรียนกัน ที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก และที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกห่อหุ้มพลาสติกที่สแกนด้วยเครื่อง spectrometer แบบต่างๆ

r^2	พารามิเตอร์	เครื่องสเปกโตรมิเตอร์	ตำแหน่งที่สแกน
0.50-0.64	b*	FT-NIR	เนื้อทุเรียน เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	SS	FT-NIR	เนื้อทุเรียน
	AF	FT-NIR	เนื้อทุเรียน เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	PE	FT-NIR	เนื้อทุเรียน
	RF	FT-NIR	เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	b*	short wavelength	เนื้อทุเรียน เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	SS	short wavelength	เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	APF	short wavelength	เนื้อทุเรียน
	PE	short wavelength	เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	DM	Longwavelength	เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	SS	Longwavelength	เนื้อทุเรียน
0.66-0.81	APF	short wavelength	เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	RF	short wavelength	เนื้อทุเรียน
			เนื้อที่หุ้มพลาสติก
	b*	Longwavelength	เนื้อทุเรียน

5.2 สรุปผลการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการประเมินคุณภาพการรับประทาน (เนื้อสัมผัส ปริมาณมวลแห้ง (DM) และความหวาน ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองกับตัวอย่างใหม่

สรุปค่าการวิเคราะห์ตัวอย่างใหม่โดยใช้แบบจำลองที่ดีที่สุดคือ ปริมาณมวลแห้ง (DM) โดยใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer ที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก และที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกหุ้มพลาสติก 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 % การสแกนที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกโดยตรงให้ผลดีกว่าสแกนผ่านพลาสติกหุ้ม แต่อย่างไรก็ตามสมรรถนะการทำนายของการ

สแกนทั้งสองแบบไม่ต่างกัน และสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้งานจริง ผลการทำนายปริมาณมวลแห้ง (DM) ในเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกโดยใช้เครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer สแกนที่เนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกหุ้มพลาสติก 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 % ในการสแกนเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกโดยตรง ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้เครื่อง Visible and NIR short wavelength diode array spectrometer และ Longwave linear variable filter spectrometer ซึ่งเครื่องมือทั้งสองชนิดซึ่งเป็นแบบพกพาในการสแกนทุเรียนมีสมรรถนะการทำนายที่ต่ำกว่าเครื่อง FT-NIR Spectrometer ผลการทำนาย Rupture Force (RF) และ Average Penetrating Force (APF) ในเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอก โดยใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer ให้ r^2 เท่ากับ 0.79, RMSEP เท่ากับ 6.93 N, RPD เท่ากับ 2.21 และ bias เท่ากับ 2.35 N และ r^2 เท่ากับ 0.75, RMSEP เท่ากับ 7.32 N, RPD เท่ากับ 2.01 และ bias เท่ากับ 3.98 N ในการสแกนเนื้อทุเรียนบริเวณพูเอกโดยตรง ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer ให้แบบจำลอง Rupture Force (RF) และ Average Penetrating Force (APF) ให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน

5.3 ข้อเสนอแนะ

การประเมินคุณภาพการรับประทานของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการศึกษาครั้งนี้ แบบจำลองค่าของปริมาณมวลแห้งที่ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุดที่ใช้ทำนายตัวอย่างใหม่ (unknown) ซึ่งมีค่าที่ออกนอกช่วงจากชุด calibration จึงควรตัดค่าที่อยู่นอกช่วงออกและ เพื่อค่าการทำนายดีขึ้น

บรรณานุกรม

สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์ 2560. ตลาดส่งออกของไทย

<https://prachatai.com/journal/2018/07/78050>

จิ่งแท้ ศิริพานิช. 2538. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ. กำแพงแสน จ. นครปฐม หน้า 77

จิ่งแท้ ศิริพานิช. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2542.

ทรงพล สมศรี. 2531. พันธุ์และการดูแลรักษาทุเรียน. การสัมมนาทางวิชาการ 25-26 กพ. 31. สวทท และกระทรวงวิทยาศาสตร์ฯ. หน้า 5.

ทิมมพร นาทวรทัต. 2530. ความถ่วงจำเพาะและการสูญเสียน้ำหนักของทุเรียนพันธุ์ชะนี หมอนทอง และก้านยาวที่เก็บเกี่ยวในอายุต่างๆกัน. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี ภาควิชาพืชสวนคณะ เกษตร มก. กำแพงแสน.

ธงชัย สุวรรณสิขณน์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช. 2555. การวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ. เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์. 2545. หลักการพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้สเปกโทรสโกปี. ใน การอบรมเชิงปฏิบัติการ: ควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวที การค้าโลก. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและ อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิรนาม. การดูแลทุเรียนแก่. โครงการรณรงค์ไม้ตัดทุเรียนอ่อนออกจำหน่าย. สนง.ส่งเสริมการเกษตร ภาคตะวันออก จ.ระยอง. แผ่นใบปลิว.

ปานมนัส ศิริสมบุรณ์, รวิภัทร ลาภเจริญสุข, กรรณพต แก้วสอน, พลนน อ่อนไสว, บัณฑิต ทองสร้อย, นัฐกรณีสอนสงวน, สมชาย กลัดสุข, ศิวตล รัตน์โอภา, อภิชาติ สมผิว และกิ่งดาว ชนะโชติ. 2556. การคาลิเบรชันแบบตัวแปรพหุ แนวเชิงปฏิบัติสำหรับการพัฒนาแบบจำลองในเคมีวิเคราะห์. [Online]. Available: <http://www.nirsresearch.com>.

ปานมนัส ศิริสมบุรณ์. 2556. เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลิตผลเกษตรและอาหาร. [Online]. Available: <http://www.nirsresearch.com>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- ปานมนัส ศิริสมบุรณ์. 2555. เทคโนโลยีเนื้อสัมผัสของผลผลิตเกษตรและอาหาร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พิจิตร โชควัฒนา. [253?]. ชื่อเรื่อง ทูเรียน โครงการหนังสือเกษตรชุมชน. ลักษณะทางกายภาพ. 72 หน้า กรุงเทพฯ.
- พิมพ์ร วัชรวงศ์กุล 2556 ปริมาณน้ำตาลในผลไม้. กองโภชนาการ. [,http://www.gotoknow.org/posts/153542](http://www.gotoknow.org/posts/153542).
- ภาพร เกษมสำราญ. 2555. หลักพื้นฐานของสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รณฤทธิ์ ฤทธิธรม. 2555. การวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ. เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิชัย หลุทัยธนาสันต์, วารุณี ณะแพสย์, ศุมาพร เกษมสำราญ, ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, ธงชัย สุวรรณสิขณัน, ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, รณฤทธิ์ ฤทธิธรม, สิริรินภา ศรีณย์วงศ์, ณัฐภรณ์ สุทธิวิจิตรภักดี. 2555. เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 211 หน้า.
- รัชฎา เศรษฐวงศ์ และจรัสแท้ ศิริพานิช. 2531. กายวิภาคของก้านผลทุเรียนที่มีอายุเก็บเกี่ยวต่าง ๆ กัน. รายงานการประชุมทางวิชาการ มก. ครั้งที่ 36. หน้า 405-412.
- วิกิพีเดีย 2556, **ซูโครส**, <http://th.wikipedia.org/wiki/ซูโครส>.
- วิกิพีเดีย 2556, **ทูเรียน** <http://th.wikipedia.org/wiki/ทูเรียน>.
- สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. สีและแสง การวัดการดูดกลืน. 2561. [Online]. Available: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/index.html>.
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2546. **มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ มกอช. 3 2546: ทุเรียน ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป. เล่ม 120. ตอนพิเศษ 145 ง. 19 ธันวาคม 2546.**

บรรณานุกรม (ต่อ)

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2560. สถิติการส่งออก (Export) - ทูเรียนสด : ปริมาณและมูลค่าการส่งออกรายเดือน.

http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2560 ทูเรียน : เนื้อที่ยืนต้น เนื้อที่ให้ผล ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ปี 2559-2560 <http://www.oae.go.th/download/prcai/farmcrop/durian52-54.pdf>

สุดารัตน์ สุตพันธ์. 2536. การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อทุเรียนพันธุ์ชะนี และพันธุ์หมอนทอง ภายหลังจากเก็บเกี่ยว. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์บัณฑิตวิทยาลัย.

อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. เทคนิคทางวิศวกรรมแบบไม่ทำลายสำหรับผลผลิตเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2558.

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.

Bruker Optics. Mahalanobis distance: OPUS online help. [Program] OPUS Program Version 7.0.129

Cho J. H. 2556. Vibration spectroscopy techniques and applications: Chemometrics tools for Multivariate Analysis. ในโครงการสัมมนาวิชาการเรื่องการควบคุมคุณภาพสินค้าอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิตด้วยระบบอินฟราเรดย่านใกล้แบบ On Line. สถาบันคั้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Cozen J. P. 2006. **Multivariate Calibration**. 2nd English edition, Bruker Optik GmbH.

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.

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.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Workman J. and Weyer J.R.L. 2007. **Practical Guide to Interpretive Near-Infrared Spectroscopy**. Taylor & Francis, Boca Raton, FL, pp. 240–262.
- 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.
- Kubelka P and Munk F. 1931. “Ein Beitrag zur Optik der Farbanstrich, *Zeitschrift für technische Physik*.” Vol.12, PP. 593-604
- Merzlyak M.N., Solovchenko A.E. and Gitelson A.A. 2003. **Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit** *Postharvest Biology and Technology*, 27 pp. 88–103.
- 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.
- 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
- 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.
- Osborne B. G. and Fearn T. 1986. **Near infrared spectroscopy in food analysis (1st published, pp. 117)**. Longman Science & Technical. UK.
- 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.
- Ozaki Y., McClure W.F. and Christy A.A. 2006. **Near infrared spectroscopy in food science and technology**. New Jersey: John Wiley and Sons.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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
- 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.
- 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.
- 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.
- Wikipedia. 2015. **Halogen lamp.** [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Halogen_lamp#Spectrum.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Williams P. 2007. **Near-infrared Technology-Getting the Best Out of Light**. PDK Grain. Nanaimo. British Columbia. and Winnipeg. Manitoba. Canada.
- 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
- Williams P. and Norris K. 2001. **Near infrared technology in the agricultural and industries**. Second ed. American Association of Cereal Chemist, Minnesota, USA.





ภาคผนวก ก.

ผลการทดลองจากวิธีการทดลองมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก1 ผลการตรวจวัดปริมาณมวลแห้ง (DM)

จำนวน	DM%	จำนวน	DM%	จำนวน	DM%	จำนวน	DM%
1	12.2524	28	15.1057	55	10.1231	82	14.7968
2	11.6895	29	17.3309	56	10.3261	83	11.9732
3	13.3468	30	17.6539	57	14.2131	84	11.8454
4	12.9552	31	16.8022	58	14.1208	85	11.8928
5	13.7392	32	16.7106	59	19.9889	86	11.7810
6	13.8481	33	16.1703	60	19.5574	87	10.5901
7	11.6558	34	14.8837	61	13.2621	88	10.5703
8	11.0450	35	12.2026	62	12.9955	89	16.9111
9	13.2811	36	12.8049	63	23.5157	90	16.9253
10	12.6444	37	9.3948	64	23.6437	91	18.6076
11	9.1710	38	9.2157	65	23.6312	92	18.6573
12	9.6664	39	29.3413	66	23.8069	93	16.3913
13	11.3951	40	15.3947	67	16.2696	94	15.8077
14	11.6973	41	11.7535	68	16.2061	95	24.0272
15	11.5621	42	11.6504	69	23.7172	96	24.0210
16	11.4991	43	8.9826	70	23.8912	97	19.9662
17	8.9628	44	9.2018	71	25.8416	98	19.9980
18	9.9351	45	11.3595	72	25.9349	99	36.7005
19	13.0454	46	10.3670	73	12.7242	100	36.5839
20	12.6589	47	11.2006	74	12.8035	101	27.0619
21	9.0111	48	11.2086	75	22.6482	102	27.6470
22	9.0440	49	10.7939	76	22.5849	103	21.0332
23	11.7860	50	10.8482	77	22.9717	104	20.7248
24	11.2362	51	12.4617	78	22.8368	105	15.1657
25	11.9653	52	12.7029	79	15.5844	106	15.0226
26	12.3104	53	25.1075	80	15.3094	107	23.9130
27	15.9231	54	20.3074	81	14.6464	108	23.9156

ตารางที่ ก1 ผลการตรวจวัดปริมาณมวลแห้ง (DM) ต่อ

จำนวน	DM%	จำนวน	DM%	จำนวน	DM%	จำนวน	DM%
109	38.5691	136	27.2120	163	35.6510	190	32.5731
110	37.9419	137	35.4375	164	35.4392	191	37.3630
111	24.8690	138	35.5830	165	30.5794	192	37.9235
112	25.0559	139	39.8062	166	30.4568	193	39.2952
113	28.9201	140	39.4059	167	31.0727	194	39.8817
114	25.0692	141	20.4575	168	31.2686	195	39.0907
115	36.7461	142	20.3533	169	31.2074	196	40.5808
116	36.5649	143	33.2384	170	31.2018	197	35.3921
117	21.3613	144	33.5979	171	27.1186	198	35.6789
118	21.6770	145	37.7282	172	27.1994	199	34.0822
119	39.1773	146	37.6066	173	27.7453	200	34.1781
120	38.5555	147	38.6385	174	27.8612	201	34.6696
121	34.0028	148	39.5672	175	33.1172	202	34.1731
122	34.9053	149	32.2299	176	34.1071	203	43.2802
123	33.4708	150	31.8789	177	33.7540	204	42.8148
124	33.9360	151	31.2986	178	38.0469	205	21.8901
125	33.5425	152	31.6766	179	33.4772	206	34.8736
126	33.7260	153	44.6115	180	27.8049	207	42.5626
127	37.1820	154	44.1869	181	32.8705	208	42.5841
128	37.8978	155	34.7617	182	32.8409	209	39.2433
129	33.3438	156	35.0208	183	27.2258	210	39.3924
130	33.1087	157	38.8232	184	26.8035	211	40.0326
131	33.8145	158	38.9672	185	32.9450	212	39.7268
132	33.5189	159	35.8525	186	33.0920	213	39.6019
133	27.3517	160	35.6108	187	30.3057	214	39.4533
134	27.9472	161	33.0302	188	30.2555	215	38.5886
135	27.1881	162	33.2649	189	32.5357	216	38.6411

ตารางที่ ก1 ผลการตรวจวัดปริมาณมวลแห้ง (DM) ต่อ

จำนวน	DM%	จำนวน	DM%	จำนวน	DM%	จำนวน	DM%
217	36.1806	244	41.2719	271	40.8982	298	43.2375
218	36.0964	245	42.0353	272	40.8963		
219	51.2180	246	42.1071	273	41.5189		
220	39.2940	247	39.8332	274	41.6318		
221	33.7941	248	39.1728	275	40.8087		
222	39.9396	249	35.3806	276	42.4927		
223	39.0054	250	35.1424	277	38.1370		
224	38.7867	251	37.0570	278	37.9948		
225	37.3370	252	37.3638	279	38.2265		
226	37.1922	253	39.9748	280	38.2984		
227	38.0858	254	40.0223	281	40.5269		
228	38.8312	255	36.9532	282	40.5680		
229	41.7282	256	37.2917	283	35.3334		
230	42.1853	257	38.4217	284	35.4280		
231	36.5516	258	38.6292	285	40.0481		
232	36.9506	259	42.2393	286	39.9081		
233	39.7387	260	42.5795	287	38.0473		
234	39.3757	261	37.7845	288	37.7306		
235	35.6509	262	38.2526	289	38.4973		
236	33.6475	263	39.9606	290	39.0537		
237	39.4844	264	39.8705	291	40.2239		
238	38.6397	265	34.7013	292	40.3789		
239	39.4454	266	34.6672	293	45.3027		
240	39.1980	267	41.4040	294	40.2937		
241	41.4723	268	41.6341	295	56.1801		
242	41.9581	269	38.4306	296	35.9618		
243	42.8597	270	38.4306	297	41.0483		

ตารางที่ ก2 ผลการตรวจวัดปริมาณความชื้น (MC)

จำนวน	MC%	จำนวน	MC%	จำนวน	MC%	จำนวน	MC%
1	87.7476	28	84.8943	55	89.8769	82	85.2032
2	88.3105	29	82.6691	56	89.6739	83	88.0268
3	86.6532	30	82.3461	57	85.7869	84	88.1546
4	87.0448	31	83.1978	58	85.8792	85	88.1072
5	86.2608	32	83.2894	59	80.0111	86	88.2190
6	86.1519	33	83.8297	60	80.4426	87	89.4099
7	88.3442	34	85.1163	61	86.7379	88	89.4297
8	88.9550	35	87.7974	62	87.0045	89	83.0889
9	86.7189	36	87.1951	63	76.4843	90	83.0747
10	87.3556	37	90.6052	64	76.3563	91	81.3924
11	90.8290	38	90.7843	65	76.3688	92	81.3427
12	90.3336	39	70.6587	66	76.1931	93	83.6087
13	88.6049	40	84.6053	67	83.7304	94	84.1923
14	88.3027	41	88.2465	68	83.7939	95	75.9728
15	88.4379	42	88.3496	69	76.2828	96	75.9790
16	88.5009	43	91.0174	70	76.1088	97	80.0338
17	91.0372	44	90.7982	71	74.1584	98	80.0020
18	90.0649	45	88.6405	72	74.0651	99	63.2995
19	86.9546	46	89.6330	73	87.2758	100	63.4161
20	87.3411	47	88.7994	74	87.1965	101	72.9381
21	90.9889	48	88.7914	75	77.3518	102	72.3530
22	90.9560	49	89.2061	76	77.4151	103	78.9668
23	88.2140	50	89.1518	77	77.0283	104	79.2752
24	88.7638	51	87.5383	78	77.1632	105	84.8343
25	88.0347	52	87.2971	79	84.4156	106	84.9774
26	87.6896	53	74.8925	80	84.6906	107	76.0870
27	84.0769	54	79.6926	81	85.3536	108	76.0844

ตารางที่ ก2 ผลการตรวจวัดปริมาณความชื้น (MC) ต่อ

จำนวน	DM%	จำนวน	DM%	จำนวน	DM%	จำนวน	DM%
109	61.4309	136	72.7880	163	64.3490	190	67.4269
110	62.0581	137	64.5625	164	64.5608	191	62.6370
111	75.1310	138	64.4170	165	69.4206	192	62.0765
112	74.9441	139	60.1938	166	69.5432	193	60.7048
113	71.0799	140	60.5941	167	68.9273	194	60.1183
114	74.9308	141	79.5425	168	68.7314	195	60.9093
115	63.2539	142	79.6467	169	68.7926	196	59.4192
116	63.4351	143	66.7616	170	68.7982	197	64.6079
117	78.6387	144	66.4021	171	72.8814	198	64.3211
118	78.3230	145	62.2718	172	72.8006	199	65.9178
119	60.8227	146	62.3934	173	72.2547	200	65.8219
120	61.4445	147	61.3615	174	72.1388	201	65.3304
121	65.9972	148	60.4328	175	66.8828	202	65.8269
122	65.0947	149	67.7701	176	65.8929	203	56.7198
123	66.5292	150	68.1211	177	66.2460	204	57.1852
124	66.0640	151	68.7014	178	61.9531	205	78.1099
125	66.4575	152	68.3234	179	66.5228	206	65.1264
126	66.2740	153	55.3885	180	72.1951	207	57.4374
127	62.8180	154	55.8131	181	67.1295	208	57.4159
128	62.1022	155	65.2383	182	67.1591	209	60.7567
129	66.6562	156	64.9792	183	72.7742	210	60.6076
130	66.8913	157	61.1768	184	73.1965	211	59.9674
131	66.1855	158	61.0328	185	67.0550	212	60.2732
132	66.4811	159	64.1475	186	66.9080	213	60.3981
133	72.6483	160	64.3892	187	69.6943	214	60.5467
134	72.0528	161	66.9698	188	69.7445	215	61.4114
135	72.8119	162	66.7351	189	67.4643	216	61.3589

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก2 ผลการตรวจวัดปริมาณความชื้น (MC) ต่อ

จำนวน	MC%	จำนวน	MC%	จำนวน	MC%	จำนวน	MC%
217	63.8194	244	58.7281	271	59.1018	298	56.7625
218	63.9036	245	57.9647	272	59.1037		
219	48.7820	246	57.8929	273	58.4811		
220	60.7060	247	60.1668	274	58.3682		
221	66.2059	248	60.8272	275	59.1913		
222	60.0604	249	64.6194	276	57.5073		
223	60.9946	250	64.8576	277	61.8630		
224	61.2133	251	62.9430	278	62.0052		
225	62.6630	252	62.6362	279	61.7735		
226	62.8078	253	60.0252	280	61.7016		
227	61.9142	254	59.9777	281	59.4731		
228	61.1688	255	63.0468	282	59.4320		
229	58.2718	256	62.7083	283	64.6666		
230	57.8147	257	61.5783	284	64.5720		
231	63.4484	258	61.3708	285	59.9519		
232	63.0494	259	57.7607	286	60.0919		
233	60.2613	260	57.4205	287	61.9527		
234	60.6243	261	62.2155	288	62.2694		
235	64.3491	262	61.7474	289	61.5027		
236	66.3525	263	60.0394	290	60.9463		
237	60.5156	264	60.1295	291	59.7761		
238	61.3603	265	65.2987	292	59.6211		
239	60.5546	266	65.3328	293	54.6973		
240	60.8020	267	58.5960	294	59.7063		
241	58.5277	268	58.3659	295	43.8199		
242	58.0419	269	61.5694	296	64.0382		
243	57.1403	270	61.5694	297	58.9517		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก3 ผลการตรวจวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (SS)

จำนวน	%Brix	จำนวน	%Brix	จำนวน	%Brix	จำนวน	%Brix
1	3.3	28	3.7	55	3.5	82	3.3
2	3.3	29	3.0	56	3.3	83	3.4
3	3.5	30	3.0	57	4.2	84	3.3
4	3.7	31	3.4	58	3.8	85	3.6
5	3.4	32	3.4	59	4.5	86	3.6
6	3.3	33	3.7	60	5.1	87	3.2
7	3.5	34	3.5	61	3.6	88	3.3
8	3.4	35	3.2	62	3.8	89	3.6
9	3.4	36	3.2	63	3.4	90	3.2
10	3.3	37	3.3	64	3.5	91	4.6
11	3.2	38	3.3	65	5.9	92	5.6
12	3.3	39	3.3	66	6.0	93	3.3
13	3.3	40	3.4	67	3.0	94	3.3
14	3.3	41	3.3	68	3.1	95	9.6
15	3.1	42	3.3	69	3.0	96	9.1
16	3.2	43	3.2	70	3.1	97	3.5
17	3.2	44	3.2	71	6.6	98	4.0
18	3.2	45	3.2	72	6.6	99	6.7
19	3.3	46	3.2	73	3.7	100	6.9
20	3.2	47	3.2	74	3.7	101	5.5
21	3.4	48	3.2	75	4.0	102	5.6
22	3.4	49	3.3	76	4.5	103	3.6
23	3.2	50	3.3	77	4.9	104	3.6
24	3.2	51	3.7	78	4.2	105	5.9
25	3.4	52	3.7	79	3.3	106	5.2
26	3.4	53	7.1	80	3.2	107	8.0
27	3.4	54	7.0	81	3.3	108	9.5

ตารางที่ ก3 ผลการตรวจวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (SS) ต่อ

จำนวน	%Brix	จำนวน	%Brix	จำนวน	%Brix	จำนวน	%Brix
109	9.5	136	3.4	163	5.7	190	4.8
110	9.1	137	5.9	164	5.1	191	5.1
111	4.4	138	5.6	165	5.5	192	5.5
112	3.9	139	10.2	166	5.0	193	7.8
113	3.4	140	10.4	167	5.0	194	8.0
114	4.0	141	10.0	168	4.5	195	5.2
115	4.6	142	10.9	169	3.6	196	5.9
116	5.1	143	8.5	170	3.7	197	5.2
117	4.6	144	8.0	171	3.6	198	5.9
118	4.8	145	3.5	172	3.8	199	12.6
119	3.5	146	3.7	173	4.5	200	13.1
120	3.5	147	5.9	174	4.1	201	7.3
121	10.1	148	6.5	175	3.6	202	7.9
122	9.9	149	5.5	176	3.7	203	12.8
123	7.1	150	5.5	177	4.5	204	12.5
124	7.6	151	3.8	178	4.6	205	10.9
125	8.2	152	3.6	179	4.4	206	9.0
126	7.8	153	3.8	180	4.8	207	13.1
127	7.5	154	4.2	181	3.5	208	12.5
128	7.9	155	6.0	182	3.7	209	11.2
129	5.6	156	5.8	183	3.8	210	12.5
130	5.5	157	7.6	184	4.0	211	8.3
131	3.9	158	7.1	185	4.2	212	8.0
132	4.2	159	5.1	186	4.8	213	7.6
133	4.2	160	5.5	187	3.8	214	6.3
134	4.1	161	3.9	188	4.3	215	12.4
135	3.9	162	3.6	189	5.0	216	11.3

ตารางที่ ก3 ผลการตรวจวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (SS) ต่อ

จำนวน	%Brix	จำนวน	%Brix	จำนวน	%Brix	จำนวน	%Brix
217	9.8	244	5.0	271	6.9	298	7.2
218	8.7	245	10.5	272	6.5		
219	12.9	246	9.8	273	10.4		
220	11.5	247	6.2	274	10.8		
221	5.2	248	5.9	275	7.9		
222	5.2	249	6.0	276	7.8		
223	9.6	250	5.5	277	11.3		
224	8.7	251	7.4	278	10.8		
225	8.2	252	6.9	279	6.9		
226	8.0	253	6.5	280	6.8		
227	11.9	254	6.3	281	7.4		
228	10.5	255	7.0	282	7.1		
229	5.5	256	6.8	283	10.8		
230	5.2	257	5.5	284	10.3		
231	6.2	258	5.5	285	5.5		
232	5.4	259	6.5	286	5.5		
233	6.5	260	5.9	287	8.0		
234	5.8	261	8.7	288	8.0		
235	5.3	262	8.3	289	6.7		
236	5.3	263	7.8	290	6.5		
237	5.3	264	7.5	291	9.0		
238	5.2	265	8.7	292	8.5		
239	12.7	266	8.3	293	9.5		
240	11.5	267	6.6	294	9.2		
241	7.1	268	6.5	295	8.9		
242	6.5	269	7.2	296	8.3		
243	5.3	270	6.9	297	6.8		

ตารางที่ ก4 ผลการตรวจวัดค่า Rupture force (RF)

จำนวน	Rupture force/N	จำนวน	Rupture force/N	จำนวน	Rupture force/N
1	21.095	28	22.544	55	3.399
2	23.418	29	3.699	56	36.901
3	31.016	30	5.907	57	15.002
4	7.643	31	5.852	58	10.675
5	29.094	32	21.628	59	10.228
6	18.883	33	3.896	60	20.388
7	20.539	34	29.968	61	2.381
8	24.218	35	18.458	62	2.779
9	17.628	36	4.782	63	2.375
10	28.675	37	15.291	64	2.057
11	13.137	38	29.022	65	2.828
12	23.979	39	3.875	66	6.994
13	7.221	40	40.440	67	7.388
14	26.083	41	26.367	68	28.518
15	18.260	42	23.965	69	2.237
16	35.582	43	6.548	70	0.153
17	42.130	44	23.823	71	30.659
18	23.139	45	35.669	72	31.392
19	25.356	46	4.721	73	31.187
20	41.329	47	25.462	74	3.634
21	16.194	48	2.645	75	18.743
22	19.886	49	37.033	76	30.397
23	24.190	50	31.631	77	1.453
24	30.411	51	7.483	78	2.690
25	22.016	52	20.941	79	2.661
26	30.971	53	13.891	80	2.876
27	11.578	54	13.735	81	32.806

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก4 ผลการตรวจวัดค่า Rupture force (RF) ต่อ

จำนวน	Rupture force/N	จำนวน	Rupture force/N	จำนวน	Rupture force/N
82	3.064	109	2.058	136	2.657
83	35.994	110	2.499	137	3.011
84	21.428	111	4.521	138	1.651
85	32.471	112	2.951	139	1.859
86	21.011	113	29.255	140	4.436
87	33.490	114	3.895	141	4.537
88	31.647	115	6.748	142	2.811
89	34.597	116	3.257	143	16.356
90	26.695	117	5.672	144	2.826
91	33.614	118	7.989	145	3.260
92	19.222	119	2.944	146	2.107
93	22.539	120	2.829	147	2.948
94	32.674	121	2.487	148	2.693
95	33.986	122	6.278	149	3.163
96	3.175	123	27.706		
97	1.745	124	5.062		
98	3.080	125	13.612		
99	15.100	126	2.035		
100	25.610	127	5.376		
101	36.006	128	3.028		
102	4.220	129	2.016		
103	1.647	130	2.670		
104	3.473	131	3.372		
105	2.823	132	2.168		
106	3.356	133	1.144		
107	5.370	134	2.152		
108	3.461	135	3.814		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก5 ผลการตรวจวัดค่า Average firmness (AF)

จำนวน	Average firmness/N/mm	จำนวน	Average firmness/N/mm	จำนวน	Average firmness/N/mm
1	4.424	28	7.930	55	0.376
2	3.673	29	0.395	56	11.386
3	5.392	30	0.609	57	1.993
4	0.933	31	0.871	58	3.763
5	5.062	32	2.249	59	2.973
6	2.789	33	0.447	60	5.419
7	2.720	34	12.866	61	0.248
8	4.911	35	9.840	62	0.412
9	6.351	36	1.020	63	0.334
10	3.790	37	2.957	64	0.219
11	3.428	38	9.650	65	0.429
12	4.510	39	0.520	66	1.558
13	0.813	40	13.420	67	0.823
14	4.312	41	6.688	68	13.013
15	3.773	42	3.622	69	0.576
16	3.808	43	1.004	70	0.089
17	9.542	44	5.069	71	8.692
18	5.189	45	7.861	72	11.486
19	4.738	46	0.578	73	3.668
20	5.766	47	12.331	74	1.005
21	2.036	48	0.463	75	1.895
22	4.113	49	5.464	76	7.266
23	2.885	50	5.596	77	0.258
24	8.002	51	4.177	78	0.595
25	4.877	52	8.133	79	0.502
26	11.815	53	3.950	80	0.447
27	3.882	54	1.699	81	8.276

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก5 ผลการตรวจวัดค่า Average firmness (AF) ต่อ

จำนวน	Average firmness/N/mm	จำนวน	Average firmness/N/mm	จำนวน	Average firmness/N/mm
82	0.676	109	0.335	136	0.267
83	11.879	110	0.484	137	0.496
84	6.370	111	1.257	138	0.279
85	8.072	112	0.681	139	0.285
86	8.545	113	6.511	140	0.863
87	14.726	114	0.716	141	0.537
88	9.850	115	0.812	142	0.608
89	10.017	116	0.542	143	3.916
90	6.132	117	1.196	144	0.618
91	10.234	118	1.091	145	0.891
92	5.367	119	0.530	146	0.593
93	6.771	120	0.586	147	0.387
94	11.501	121	0.684	148	0.380
95	7.027	122	1.686	149	0.620
96	0.613	123	4.956		
97	0.175	124	1.675		
98	0.469	125	1.785		
99	3.215	126	0.320		
100	8.105	127	0.577		
101	4.689	128	0.374		
102	0.681	129	0.393		
103	0.392	130	0.511		
104	0.564	131	0.474		
105	0.347	132	0.372		
106	0.626	133	0.223		
107	0.684	134	0.380		
108	0.787	135	1.345		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก6 ผลการตรวจวัดค่า Toughness (T)

จำนวน	Toughness/N.mm	จำนวน	Toughness/N.mm	จำนวน	Toughness/N.mm
1	44.514	28	33.931	55	16.186
2	61.443	29	20.200	56	59.134
3	76.751	30	33.633	57	74.645
4	29.686	31	20.264	58	16.895
5	83.813	32	132.492	59	17.487
6	58.174	33	16.628	60	40.627
7	61.522	34	40.335	61	11.230
8	59.841	35	18.678	62	9.748
9	20.852	36	12.175	63	10.297
10	75.640	37	38.870	64	10.362
11	22.763	38	48.316	65	9.152
12	55.915	39	13.112	66	15.622
13	27.366	40	62.748	67	26.727
14	76.678	41	48.229	68	31.249
15	42.752	42	66.925	69	5.023
16	153.241	43	20.715	70	0.161
17	88.650	44	50.044	71	61.791
18	50.468	45	78.186	72	47.884
19	65.519	46	18.093	73	187.316
20	127.760	47	28.067	74	8.016
21	59.735	48	7.511	75	89.837
22	40.904	49	135.057	76	66.846
23	110.863	50	96.590	77	5.000
24	53.338	51	7.122	78	8.387
25	40.662	52	26.913	79	7.815
26	49.236	53	22.150	80	10.032
27	15.836	54	51.911	81	57.891

ตารางที่ ก6 ผลการตรวจวัดค่า Toughness (T) ต่อ

จำนวน	Toughness/N.mm	จำนวน	Toughness/N.mm	จำนวน	Toughness/N.mm
82	7.173	109	6.140	136	16.741
83	62.268	110	7.106	137	8.855
84	36.897	111	9.323	138	5.195
85	78.326	112	7.772	139	5.996
86	27.750	113	79.553	140	13.387
87	41.678	114	15.252	141	22.887
88	65.772	115	33.034	142	7.987
89	67.557	116	9.384	143	33.148
90	60.753	117	16.891	144	7.374
91	56.463	118	38.411	145	7.835
92	33.548	119	8.284	146	4.126
93	34.892	120	7.496	147	13.429
94	48.629	121	5.089	148	10.759
95	97.641	122	13.262	149	10.085
96	8.924	123	87.270		
97	10.063	124	9.283		
98	11.610	125	60.183		
99	32.400	126	7.014		
100	44.978	127	33.336		
101	198.151	128	12.271		
102	16.770	129	5.476		
103	4.348	130	6.889		
104	11.936	131	14.553		
105	12.454	132	7.397		
106	9.914	133	3.813		
107	19.133	134	5.997		
108	9.869	135	7.212		

ตารางที่ ก7 ผลการตรวจวัดค่า Average penetrating force (APF)

จำนวน	Average penetrating force/N	จำนวน	Average penetrating force/N	จำนวน	Average penetrating force/N
1	19.225	28	16.631	55	3.326
2	17.554	29	3.506	56	30.965
3	13.115	30	5.792	57	14.035
4	7.352	31	3.623	58	10.494
5	23.361	32	19.254	59	10.212
6	10.664	33	3.363	60	17.064
7	14.814	34	25.105	61	2.300
8	20.139	35	19.284	62	1.103
9	8.687	36	2.285	63	1.417
10	25.113	37	10.109	64	1.664
11	11.666	38	24.663	65	2.009
12	14.090	39	2.252	66	5.835
13	6.187	40	28.396	67	7.152
14	22.571	41	20.770	68	25.533
15	9.558	42	13.342	69	1.311
16	30.846	43	5.685	70	0.343
17	30.156	44	16.719	71	25.438
18	18.349	45	24.093	72	30.217
19	16.475	46	3.456	73	29.901
20	34.689	47	22.230	74	2.529
21	12.597	48	2.045	75	18.654
22	14.349	49	23.256	76	24.427
23	21.369	50	22.570	77	0.920
24	21.116	51	5.390	78	1.731
25	12.756	52	18.942	79	1.199
26	24.614	53	11.137	80	2.807
27	6.600	54	12.426	81	24.714

ตารางที่ ก7 ผลการตรวจวัดค่า Average penetrating force (APF) ต่อ

จำนวน	Average penetrating force/N	จำนวน	Average penetrating force/N	จำนวน	Average penetrating force/N
82	2.708	109	0.750	136	2.637
83	28.833	110	1.049	137	1.114
84	15.823	111	2.608	138	0.817
85	30.411	112	2.190	139	0.849
86	19.044	113	28.228	140	1.811
87	26.613	114	1.594	141	3.957
88	29.298	115	6.032	142	1.158
89	25.795	116	2.405	143	11.437
90	21.510	117	3.436	144	1.350
91	30.413	118	6.267	145	1.342
92	18.251	119	1.313	146	1.479
93	15.210	120	1.557	147	1.108
94	26.701	121	1.792	148	1.369
95	31.681	122	4.305	149	1.585
96	1.855	123	26.992		
97	1.717	124	2.821		
98	1.306	125	13.759		
99	5.381	126	1.628		
100	24.035	127	5.294		
101	33.603	128	1.298		
102	3.220	129	2.131		
103	1.221	130	1.136		
104	2.917	131	3.156		
105	2.832	132	1.425		
106	1.925	133	0.807		
107	3.641	134	0.784		
108	2.900	135	2.025		

ตารางที่ ก8 ผลการตรวจวัดค่า Penetrating energy (PE)

จำนวน	Penetrating energy/N.mm	จำนวน	Penetrating energy/N.mm	จำนวน	Penetrating energy/N.mm
1	100.660	28	119.097	55	4.160
2	63.651	29	2.248	56	209.510
3	55.750	30	1.830	57	34.961
4	13.277	31	11.942	58	75.203
5	99.540	32	16.193	59	67.002
6	34.457	33	4.442	60	108.120
7	36.384	34	192.704	61	0.704
8	102.124	35	156.797	62	3.625
9	62.819	36	12.134	63	4.273
10	61.174	37	48.888	64	0.892
11	72.046	38	172.664	65	6.802
12	66.025	39	5.701	66	32.302
13	6.936	40	198.515	67	7.338
14	89.290	41	127.654	68	199.440
15	49.375	42	45.176	69	8.081
16	20.389	43	20.984	70	2.795
17	168.453	44	88.710	71	164.861
18	101.764	45	131.693	72	219.710
19	76.706	46	6.362	73	59.383
20	98.379	47	176.532	74	16.213
21	25.837	48	8.777	75	1.977
22	74.125	49	75.025	76	142.191
23	34.639	50	98.317	77	4.061
24	131.046	51	44.284	78	9.565
25	70.044	52	141.513	79	5.648
26	181.798	53	72.233	80	10.275
27	46.374	54	23.995	81	149.295

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก8 ผลการตรวจวัดค่า Penetrating energy (PE) ต่อ

จำนวน	Penetrating energy/N.mm	จำนวน	Penetrating energy/N.mm	จำนวน	Penetrating energy/N.mm
82	14.854	109	2.856	136	0.016
83	203.154	110	5.392	137	4.400
84	105.239	111	17.294	138	3.516
85	181.885	112	12.450	139	3.030
86	143.706	113	155.562	140	8.795
87	205.743	114	7.296	141	6.236
88	199.108	115	10.140	142	6.195
89	168.984	116	9.551	143	66.629
90	121.661	117	18.164	144	7.380
91	204.557	118	18.337	145	8.524
92	117.282	119	5.930	146	9.565
93	101.620	120	8.081	147	2.693
94	191.342	121	11.409	148	4.177
95	166.673	122	27.021	149	7.761
96	8.914	123	119.195		
97	0.038	124	19.721		
98	4.461	125	32.967		
99	28.577	126	5.985		
100	164.665	127	3.684		
101	78.832	128	2.519		
102	12.256	129	10.411		
103	7.089	130	5.431		
104	11.132	131	9.202		
105	5.397	132	5.921		
106	8.999	133	3.893		
107	7.758	134	3.410		
108	16.183	135	14.532		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก9 ผลการตรวจวัดค่าสี L*

จำนวน	L*	จำนวน	L*	จำนวน	L*
1	86.17	28	85.64	55	85.32
2	89.10	29	82.83	56	85.36
3	89.88	30	88.40	57	85.00
4	87.49	31	87.83	58	86.89
5	83.68	32	75.10	59	84.96
6	89.11	33	87.98	60	76.16
7	88.36	34	86.27	61	80.13
8	88.23	35	89.43	62	82.99
9	90.39	36	85.85	63	81.16
10	87.59	37	88.39	64	87.13
11	88.35	38	86.04	65	86.29
12	89.25	39	86.71	66	88.61
13	76.49	40	89.03	67	88.86
14	88.85	41	89.17	68	88.62
15	83.94	42	81.80	69	85.52
16	86.08	43	89.23	70	86.71
17	83.11	44	84.16	71	86.81
18	87.97	45	85.52	72	89.05
19	88.00	46	78.65	73	84.33
20	88.27	47	87.26	74	86.08
21	88.22	48	87.56	75	85.06
22	85.30	49	88.23	76	85.84
23	85.45	50	87.12	77	82.83
24	88.41	51	89.24	78	83.77
25	86.50	52	86.41	79	89.56
26	89.39	53	88.72	80	88.99
27	82.49	54	76.48	81	87.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก9 ผลการตรวจวัดค่าสี L* ต่อ

จำนวน	L*	จำนวน	L*	จำนวน	L*
82	88.15	109	85.43	136	81.06
83	86.93	110	84.65	137	82.03
84	85.67	111	86.41	138	85.54
85	87.55	112	85.20	139	85.70
86	86.33	113	84.48	140	85.44
87	89.79	114	82.14	141	79.91
88	87.90	115	84.34	142	83.96
89	88.27	116	83.84	143	84.00
90	86.38	117	82.79	144	83.58
91	88.81	118	86.34	145	88.35
92	84.78	119	84.03	146	85.22
93	86.18	120	84.96	147	84.66
94	84.55	121	80.17	148	83.36
95	82.99	122	81.15	149	88.57
96	87.13	123	88.50		
97	80.87	124	86.18		
98	86.32	125	86.83		
99	84.26	126	81.85		
100	87.46	127	83.01		
101	86.66	128	83.84		
102	86.84	129	84.67		
103	83.45	130	83.30		
104	86.14	131	87.07		
105	85.72	132	82.94		
106	84.63	133	82.76		
107	87.39	134	84.50		
108	86.70	135	80.77		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก10 ผลการตรวจวัดค่าสี a*

จำนวน	a*	จำนวน	a*	จำนวน	a*
1	-0.52	28	0.08	55	0.94
2	-0.91	29	0.60	56	1.10
3	-1.04	30	-0.54	57	1.09
4	0.06	31	-0.48	58	-0.31
5	0.91	32	0.96	59	1.16
6	-0.16	33	-0.40	60	3.36
7	-0.86	34	-0.46	61	3.00
8	-0.33	35	-1.04	62	0.52
9	-0.93	36	-0.43	63	2.13
10	-0.18	37	-1.07	64	-0.12
11	-0.23	38	0.05	65	1.22
12	-0.47	39	-0.06	66	-0.77
13	3.56	40	-0.63	67	-0.61
14	-0.48	41	-0.69	68	-0.48
15	0.68	42	0.58	69	-0.03
16	0.36	43	-0.71	70	0.40
17	0.34	44	-0.23	71	0.14
18	-1.02	45	-0.26	72	-0.55
19	-0.38	46	1.42	73	1.63
20	-1.22	47	-0.57	74	-0.46
21	-0.55	48	-0.11	75	1.40
22	0.63	49	-0.31	76	0.66
23	0.07	50	0.10	77	1.29
24	-0.47	51	-0.35	78	1.09
25	-0.61	52	-0.02	79	-0.82
26	-0.78	53	-1.01	80	-0.57
27	0.59	54	1.70	81	-0.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก10 ผลการตรวจวัดค่าสี a* ต่อ

จำนวน	a*	จำนวน	a*	จำนวน	a*
82	-0.68	109	1.07	136	3.04
83	0.09	110	1.63	137	2.52
84	0.00	111	1.24	138	1.61
85	-0.43	112	0.83	139	0.94
86	-0.61	113	1.57	140	0.90
87	-1.20	114	2.29	141	1.31
88	-0.75	115	1.26	142	1.23
89	-1.04	116	1.84	143	1.84
90	0.52	117	3.00	144	1.98
91	-0.99	118	0.52	145	-0.31
92	1.03	119	1.64	146	0.26
93	-0.30	120	0.68	147	0.59
94	1.02	121	2.43	148	-0.22
95	0.78	122	1.34	149	-0.11
96	-0.09	123	-0.61		
97	1.75	124	0.71		
98	0.13	125	1.34		
99	1.34	126	2.50		
100	0.24	127	2.01		
101	0.30	128	1.35		
102	0.32	129	1.38		
103	1.37	130	1.44		
104	0.71	131	0.56		
105	0.87	132	1.64		
106	1.25	133	2.83		
107	0.01	134	1.05		
108	0.55	135	2.30		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก11 ผลการตรวจวัดค่าสี b*

จำนวน	b*	จำนวน	b*	จำนวน	b*
1	22.46	28	24.75	55	30.71
2	17.15	29	24.29	56	37.74
3	20.24	30	30.80	57	37.08
4	11.35	31	13.78	58	32.94
5	25.24	32	29.73	59	30.14
6	19.87	33	17.81	60	41.88
7	19.90	34	21.24	61	43.39
8	18.89	35	27.78	62	34.23
9	23.42	36	30.62	63	39.13
10	30.00	37	31.59	64	27.46
11	25.66	38	24.25	65	41.33
12	19.35	39	34.18	66	28.90
13	33.81	40	29.58	67	29.19
14	20.20	41	20.67	68	29.49
15	23.60	42	30.11	69	36.86
16	25.86	43	25.34	70	30.18
17	21.51	44	25.67	71	26.86
18	19.55	45	26.57	72	28.33
19	22.49	46	31.36	73	35.98
20	15.93	47	22.84	74	35.15
21	21.90	48	30.28	75	40.49
22	25.63	49	24.99	76	38.77
23	27.76	50	33.63	77	41.04
24	21.13	51	30.42	78	41.28
25	20.05	52	36.42	79	31.79
26	28.25	53	27.07	80	32.60
27	32.06	54	38.51	81	33.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก11 ผลการตรวจวัดค่าสี b* ต่อ

จำนวน	b*	จำนวน	b*	จำนวน	b*
82	31.86	109	41.98	136	49.33
83	37.72	110	35.35	137	44.41
84	31.36	111	44.68	138	42.88
85	35.70	112	40.63	139	38.38
86	35.98	113	41.43	140	40.32
87	32.19	114	44.81	141	32.20
88	28.21	115	41.47	142	40.17
89	35.87	116	44.51	143	42.23
90	40.13	117	47.32	144	45.72
91	29.56	118	34.30	145	31.26
92	39.75	119	39.05	146	36.76
93	39.33	120	42.17	147	37.39
94	35.13	121	39.92	148	33.03
95	34.14	122	35.13	149	35.53
96	27.86	123	33.30		
97	40.84	124	38.96		
98	38.54	125	39.92		
99	40.63	126	48.42		
100	36.12	127	43.19		
101	39.95	128	43.49		
102	40.36	129	43.17		
103	42.71	130	39.53		
104	38.54	131	39.48		
105	40.36	132	40.16		
106	38.33	133	47.40		
107	35.19	134	36.92		
108	37.48	135	45.45		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Determination of dry matter and soluble solids of durian pulp using diffuse reflectance near infrared spectroscopy

Phalanon Onsawai and Panmanas Sirisomboon*

Curriculum of Agricultural Engineering, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand. E-mail: kspanman@kmitl.ac.th

Fourier transform near infrared spectroscopy was used as a non-invasive technique for the determination of dry matter and soluble solids of durian pulp. A set of 25 fruit was randomly harvested every 10 days, starting from 80 days until 127 days after the onset of fruit development covering six levels of maturity (80 days, 90 days, 100 days, 110 days, 120 days and 127 days). After applying ethephon on the fruit stems, the fruits were kept for 3 days at room temperature and allowed to ripen. Only the pulp of the durian was scanned. The dry matter and soluble solids reference values of the samples were determined by a hot-air-oven method and using a refractometer, respectively. Prediction models using half the samples related the spectral data, and dry matter and soluble solids data were subsequently established using partial least-squares regression and validated using the other half of the samples in a prediction set. A full cross-validation was also generated using all 149 samples. Both the half-of-the-samples model and the all-sample model were then validated using a true validation set of samples collected in a later year. When tested against the validation half of the samples, the half-of-the-samples model predicted dry-matter content with a coefficient of determination (r^2) and root mean square error of prediction (RMSEP) of 0.89 and 3.60%, respectively, and for soluble solids content 0.55 and 1.63 °Brix (Bx), respectively. When tested on samples from a later season, the model for dry-matter content returned an r^2 , RMSEP and bias of 0.26, 6.10% and -2.16%, respectively, and for soluble solids content 0.27, 1.25 °Bx and 1.09 °Bx, respectively. The cross-validated model for dry matter yielded a slightly better r^2 and root mean square error of cross-validation (RMSECV) of 0.90 and 3.58%, respectively, however, the model for soluble solids did not provide a better r^2 and RMSECV: 0.51 and 1.81 °Bx, respectively. When tested on samples from a later season, the cross-validated models gave, r^2 , RMSEP and bias of 0.15, 5.17% and -1.49%, respectively, for dry-matter content, and for soluble solids content 0.37, 1.32 °Bx and 1.23 °Bx, respectively. The poor results obtained when predicting dry matter in samples in later seasons indicate that samples from several seasons must be included in the set of calibration samples. This is the first report on the application of NIR spectroscopy to evaluate the dry matter and soluble solids of durian pulp and could be useful to customers, exporters, importers and also postharvest technologists. However, prediction accuracy was not demonstrated in the model for durian pulp soluble solids, possibly because of the effect of ethephon applied after harvesting to induce ripening within 3 days to make the fruit suitable for consumption. In addition, it was found that the vibration bands of cellulose and fat, and those of aromatic, CH₂ and sucrose highly affected the predictions of dry matter and soluble solids in the durian pulp, respectively.

Keywords: durian, pulp, dry matter, soluble solids, near infrared spectroscopy

Introduction

Durio zibethinus, commonly known as durian, is an exotic, seasonal fruit popular in South East Asia owing to its unique

aroma, taste and texture. It is a climacteric fruit.¹⁻² Durian maturity is very difficult to determine from the external

appearance. Several indices are used in combination including numbers of days from anthesis, colour of the skin, colour of the spine tip, strength of the spine and the fruit stem, and the sound detected by knocking on the fruit.³

Lim and Luders⁴ described the following:

The "Monthong" cultivar is the prima donna of Thai durian clones and it means "Golden pillow" in English or "Bantal Mas" in Malay. It produces large, elongated, oval-cylindrical, tapering at the stylar end, i.e. pronounced beak, lobed, yellowish-brown large fruit of 2–6 kg weight. The peduncle is thick and moderately long and the rind is thick and covered with sharp, pointed, small, conical, densely packed spines. Each fruit has 10–15 arils and many small, shrunken (aborted) seeds. Each locule has usually three large, thick, creamy, smooth, pale yellow arils. The pulp is mildly odoriferous and of excellent quality, constituting more than 30% edible portion and has little physiological disorders. This cultivar is extremely amenable for processing of preserved frozen pulps. It bears fruit after 8 years.⁵

Siriphanich and Jerapat⁶ reported the growth and development of Monthong durian, and recommended that dry matter of the pulp was the best index to determine durian maturity. Data on sugar, starch, fat and carotenoid content, as well as pulp firmness and colour, were inconsistent.⁶ Following this, a minimum pulp dry matter of 32% was announced as the standard for "Monthong" durian maturity by the Ministry of Agriculture in Thailand.⁶ It would be useful for the customer or exporter to know whether the durian pulp is from the mature fruit or not by evaluating its dry matter non-destructively. Durian ripening results in an increase in soluble sugars and a decrease in starch and pulp firmness.⁷ Soluble solids content and dry matter are important traits used for determining the maturity of certain fruits and vegetables.⁸ The internal qualities of fruit are usually determined by traditional destructive approaches that are time-consuming, costly and laborious using a representative sample.^{9–10} A means of non-destructively measuring dry matter could thus be useful for a range of applications such as rapid and frequent measurement in the field, or grading of fruit during packing so that fruit would have similar dry-matter levels¹¹ and thus soluble solids.

Fourier transform near infrared (FT-NIR) spectroscopy is carried out at the manufacturing site and involves a simple operation, rapid measurement, easy/no sample preparation, low running costs and a nondestructive analysis.^{12–13} Thus, it is a very reliable technique for the positive identification and quantitation of many samples. FT-NIR spectroscopy was developed to overcome some of the limitations encountered with the dispersive NIR such as a low signal-to-noise ratio and low resolution. The advantages of FT-NIR spectroscopy include a higher speed, wavelength accuracy, self-calibration with an HeNe laser and wavelength, and simplified mechanics.¹⁴ This makes FT-NIR an invaluable tool for quality-control and quality-assurance applications.¹⁵ There have been a number of recent reports indicating that FT-NIR spectra have been used to predict product-quality constituents of agricultural products and food by partial least-squares (PLS) regression.¹⁶

FT-NIR spectroscopy has been used widely on intact fruit, such as apple¹⁷, avocado¹⁸ and apricot.¹⁹ However, it is rarely used to determine pulp properties. FT-NIR spectroscopy has been used to determine the moisture content of bael pulp²⁰ and to estimate the percentage (%) of dry matter of fruit and vegetables, for example, avocado¹⁸, pear²¹ and sugar beet pulp.²² Wedding *et al.*¹⁸ developed a calibration model for whole intact "Hass" avocado fruit encompassing fruit from three consecutive years and reported the following predictive statistics: coefficient of determination (R^2) of 0.89 and root mean square error of prediction (RMSEP) of 1.43% dry matter. Travers *et al.*²¹ obtained the regression models for predicting preharvest dry matter of pear with an r^2 of 0.78 and a root mean square error of cross-validation (RMSECV) of 0.78%. Fernandez *et al.*²² used an NIR reflectance spectrophotometer with a holographic grating to estimate the dry matter of dehydrated sugar beet pulp [R^2 of 0.97 and standard error of cross-validation of 0.57% fresh matter]. NIR spectroscopy have been applied to measure the soluble solids content of several fruit such as kiwi [$r^2 = 0.90$, RMSEP = 0.39 °Brix (Bx)],²³ pear [cv. Clara Frijs] [$r^2 = 0.84$, RMSECV = 0.44 °Bx],²¹ citrus fruit [$r^2 = 0.89$, RMSEP = 0.44 °Bx],²⁴ sugar beet slices [$r^2 = 0.89$ –0.95, RMSEP = 0.60–0.85 °Bx]²⁵ and mango [var. Namdokmai] [$R^2 = 0.99$].²⁶

However, there are no reports on the determination of dry matter and soluble solids of durian pulp using NIR spectroscopy. The models developed using spectra scanned on the pulp of durian may be useful for the durian market, where the durian lobes are normally removed from the fruit to sell to customers or to freeze before export. Therefore, the objective of this work was to apply a rapid predictive method based on near infrared diffuse reflectance spectroscopy to measure dry matter and soluble solids in durian pulp.

Materials and methods

Samples

Durian trees of the "Monthong" cultivar were randomly selected in orchards in Chantaburi, eastern Thailand. Fruit growth was followed by tagging flowers from the selected trees when the onset of fruit development was observed. A set of 25 fruit was randomly harvested in 2013, every 10 days starting from 80 days until 127 days after the onset of fruit development covering six levels of maturity (80 days, 90 days, 100 days, 110 days, 120 days and 127 days). The harvested dates were 1 May, 10 May, 20 May, 30 May, 9 June and 19 June 2013, respectively. The 149 harvested samples (one fruit was lost during transportation) from the six intervals provided a variation in maturity from the immature to the overmature stages. All samples were transported to the Near Infrared Spectroscopy Research Center for Agricultural Product and Food in King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand (www.nirsresearch.com). Before the samples were transported from the orchard, the ethephon was applied on the top of the fruit stem to help ripen the durian. This application is

common practice with durian merchants. The fruits were kept for ripening for 3 days at room temperature ($30 \pm 1^\circ\text{C}$). Then, the largest lobe containing the pulp-covered seeds from each fruit was taken for analysis (this is referred to as durian pulp throughout this paper). In addition, on 7 and 19 May 2015, 20 fruit were harvested from the same orchard as in 2013, for use as true validation samples. Their pulp was then subjected to NIR scanning and reference laboratory analysis for dry matter and soluble solids.

NIR scanning

The durian pulp sample was measured for spectral data at the middle of the lobe using an FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Ettlingen, Germany) in reflection mode at $12,500\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ (800–2500 nm) with a resolution of 16 cm^{-1} , accumulating 32 scans per spectrum and using gold as a background. The scanning was performed twice per sample, and all experiments were performed at air-conditioned room temperature ($27 \pm 1^\circ\text{C}$).

Reference test

Dry-matter measurement

After scanning, the 80 g of durian pulp without seed from the scanned position of each lobe was cut and blended (Oku San No, Malaysia) for 1 min for soft pulp and 2 min for hard pulp. The moisture content of a 5 g durian mash sample was analysed in duplicate using a hot air oven (ULM 500, Memmert, Schwabach, Germany) at a temperature of $60 \pm 2^\circ\text{C}$ until a constant weight was reached. The moisture content (MC) was calculated from Equation (1):

$$\text{MC (\%)} = \frac{(W1 - W2) \times 100}{W1} \quad (1)$$

where W1 is the original weight (g), and W2 is the oven-dried weight (g).

The dry matter (DM) was calculated from MC using Equation (2):

$$\text{DM (\%)} = 100 - (\text{MC}) \quad (2)$$

Soluble solids measurement

The 1:3 mixture of blended durian pulp sample:distilled water was thoroughly mixed and then centrifuged (Spectrafuge 7M, Labnet, Edison, NJ) at 6000 rpm for 10 min. Then, the supernatant was dropped into the sample hole of a digital refractometer (Pal-1, Atago, Saitama, Japan) to measure the soluble solids (SS) content of the blended sample. The pulp SS content was calculated by multiplying the obtained reading by 4.

Relationship between maturity and DM and SS content

The regression analysis for estimating the relationship between maturity (dependent variable) and DM and/or SS (independent variables) was performed using The Unscrambler 9.8 (Camo Software AS, Oslo, Norway). The regression coefficients and constant of the regression models and the corresponding

coefficient of determination (R^2) were calculated. The correlation between the DM and SS content was also determined.

Repeatability and maximum coefficient of determination

The precision of the reference test of DM and SS of durian pulp was determined using the repeatability value, which was calculated from the standard deviation of the different between duplicates. Then, the maximum coefficient of determination (R_{max}^2) was calculated followed Dardenne²⁷ using Equation (3):

$$R_{\text{max}}^2 = \frac{SD_y^2 - \text{Rep}^2}{SD_y^2} \quad (3)$$

where SD_y is the standard deviation of DM or SS of samples in the calibration set. According to Dardenne,²⁷ the maximum R^2 is possible only when there are no errors in the spectra or the model, and the SD_y and Rep can indicate that the range in values for the samples is too narrow, and/or a reference method is not sufficiently precise.

Chemometric

The OPUS, v. 7.0.129 (Bruker, Bremen, Germany) was used in both spectrum pretreatment and model development. The model development was divided into two parts. In the first part, models were developed using the calibration set samples and validated by samples in the prediction set where a total of 149 spectral data were separated randomly into calibration and prediction sets at a ratio of 1:1. In the second part, the calibration set consisted of a total of 149 fruit samples and was validated by full cross-validation.

The calibration set, both with and without spectral pretreatment, was used to develop PLS models. The NIR spectra were pretreated in the following way: constant offset elimination, straight-line subtraction and first derivatives + multiplicative scatter correction (MSC). After model development, outlier samples were identified by the software. The model was validated using the prediction set validation (Part 1) or cross-validation (Part 2). The optimum model was selected based on the highest performance where the lowest root mean squared error of estimation (RMSEE) or lowest RMSECV were obtained where the number of factors, effective wavenumber ranges and best pretreatment method were identified. The combination of the following wavenumber ranges including approximately $9000\text{--}7500\text{ cm}^{-1}$ (Region A), $7500\text{--}6100\text{ cm}^{-1}$ (Region B), $6100\text{--}5450\text{ cm}^{-1}$ (Region C), $5450\text{--}4600\text{ cm}^{-1}$ (Region D) and $4600\text{--}4250\text{ cm}^{-1}$ (Region E), number of factors and pretreatment method was optimised for model development. The coefficient of determination of calibration and prediction (R^2 and r^2 , respectively), RMSEP, bias and the ratio of standard error of validation to the standard deviation (RPD) of the optimum model were also calculated.

The spectra of the true validation set samples of 20 fruit (one pulp sample per fruit) were subjected to the optimal models, and the r^2 , RMSEP, bias and RPD were calculated.

Results and discussion

From the reference test data, the repeatability of DM and SS measurement were 2.71% and 0.48 °Bx, respectively. The R^2_{max} values were 0.99 and 0.94, respectively, which indicated that the reference test was accurate, and the NIR models were reasonable for development.

The average raw NIR spectra of durian pulp covering six levels of maturity (80 days, 90 days, 100 days, 110 days, 120 days and 127 days) obtained over a wavenumber range 12,500–3500 cm^{-1} are shown in Figure 1. This figure displays peaks at 10,245–10,221 cm^{-1} , 8362–8346 cm^{-1} , 6888 cm^{-1} , 5569 cm^{-1} and 5160 cm^{-1} (1976–1978 nm, 1196–1198 nm, 1452 nm, 1796 nm and 1938 nm). The peak at 10,245–10,221 cm^{-1} (around 970 nm) is due to the absorption band of the second overtone associated with O–H stretching of H_2O ,²⁸ at 8362–8346 cm^{-1} (1198–1196 nm) corresponding to the vibration band of heavy water, formally called deuterium oxide [$^2\text{H}_2\text{O}$ or D_2O] (typically found at 1190 nm),²⁹ at 6888 cm^{-1} (1452 nm) owing to the absorption band associated with the first overtone of O–H stretching (1450 nm) of starch or H_2O ,²⁸ at 5569 cm^{-1} (1796 nm) corresponding to the

first overtone of C–H stretching of cellulose²⁸ (typically found at 1780 nm) and at 5160 cm^{-1} (1938 nm) owing to a combination of vibration owing to the O–H stretching + O–H deformation of H_2O ²⁸ (typically found at 1940 nm).

Figure 2 shows the second derivative spectra between 12,500 cm^{-1} and 3500 cm^{-1} where the peaks at 10,429 cm^{-1} , 8678 cm^{-1} , 7112 cm^{-1} , 5670 cm^{-1} , 5276 cm^{-1} , 4397 cm^{-1} , 3834 cm^{-1} and 3741 cm^{-1} (1959 nm, 1152 nm, 1406 nm, 1764 nm, 1895 nm, 2274 nm, 2608 nm and 2673 nm) are illustrated. The peaks at 10,429 cm^{-1} , 8678 cm^{-1} , 7112 cm^{-1} and 5276 cm^{-1} (1959 nm, 1152 nm, 1406 nm and 1895 nm) might be the shifted vibration bands of H_2O at 970 nm, 1190 nm, 1450 nm and 1940 nm.³⁰ The peaks at 5670 cm^{-1} and 4397 cm^{-1} (1764 nm and 2274 nm) appear to be due to the first overtone C–H stretching of the CH_2 of fatty acid in fat²⁸ and O–H stretching + C–C stretching of starch (typically found at 2276 nm).²⁸ The peaks at 3834 cm^{-1} (2608 nm) and 3741 cm^{-1} (2673 nm) appear to be due to the C–H aromatic.²⁹

Figure 3(a) and (b) show the distribution of DM in durian pulp samples in calibration set and prediction set, respectively. It can be seen that there were more samples at a low

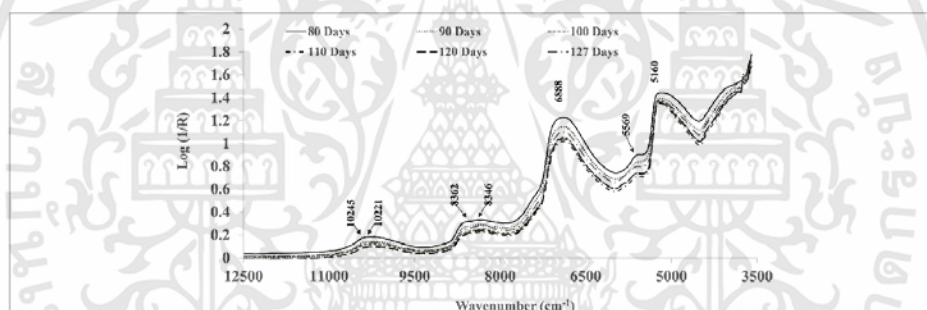


Figure 1. Average NIR spectra of durian pulp from samples covering six different levels of maturity (80 days, 90 days, 100 days, 110 days, 120 days and 127 days after fruit onset).

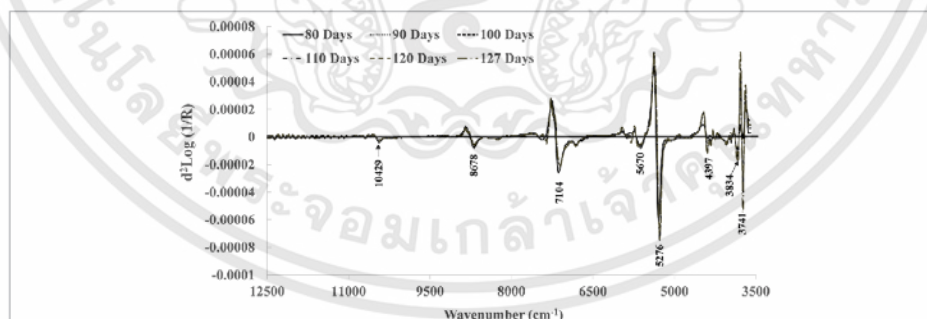


Figure 2. Average second-derivative spectra of durian pulp covering six levels of maturity (80 days, 90 days, 100 days, 110 days, 120 days and 127 days after fruit onset).

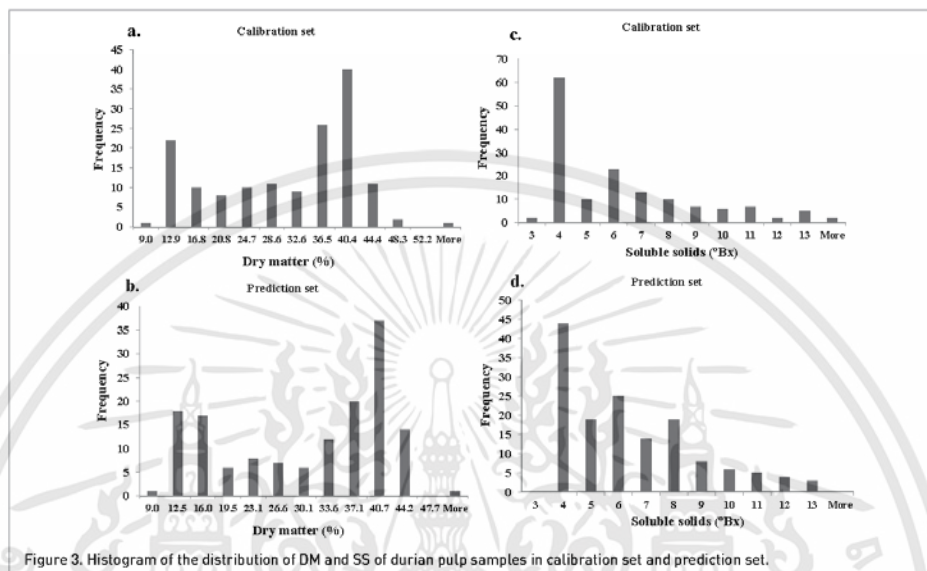


Figure 3. Histogram of the distribution of DM and SS of durian pulp samples in calibration set and prediction set.

DM [12–16%] and high DM [36–40%] than other values. As described in the Introduction, the Monthong durian pulp at the maturity stage contains 32% DM, which is higher than in the cultivars, Kradum and Chanee, where an acceptable DM for consumption is between 23.5% and 33.5% with an average of 28.6%.⁶ According to McGlone *et al.*,³¹ the DM correlates strongly with the total carbohydrate level in fruit, and it would be closely correlated with either the actual SS content, if no starch were present, or the potential poststorage SS content to be achieved once any existing starch had been converted to sugar. This indicated that Monthong cultivar had a higher tendency to change starch to sugar than Kradum and Chanee, hence leading to a better taste. The minimum, maximum, mean and standard deviation of DM of the durian pulp sample sets are shown in Table 1.

Figure 3(c) and (d) show the distribution of SS in durian pulp samples in the calibration set and the prediction set,

respectively. The minimum, maximum, mean and standard deviation of SS are also shown in Table 1.

Table 2 shows the statistics of the prediction of DM and SS of durian pulp by optimum PLS models using prediction set validation and cross-validation. The optimum model was selected if the model provided the best prediction performance, which was a minimum *RMSEE*.

The model for DM was developed using eight PLS factors in the long wavelength range of 8454.9–7498.3 cm^{-1} , 6102–5446.3 cm^{-1} and 4605.4–4242.9 cm^{-1} , which contained a vibration band of sugar (sucrose and glucose), starch, cellulose and hemicellulose²⁸ that was pretreated by the first derivatives + *MSC* methods. This model showed the r^2 , *RMSEP*, *RPD* and bias of 0.89, 3.60%, 3.27 and –0.98%, respectively. The R^2_{max} was 0.99, while r^2 was 0.89 for the DM model. This indicated that the error from the reference laboratory was 1%, the information on the NIR spectrum explained the variation of DM for

Table 1. Minimum (Min), maximum (Max), mean, and standard deviation (SD) of dry matter and soluble solids of Durian pulp samples of calibration set, prediction set and true validation set

Properties	Calibration set					Prediction set					True validation set				
	No.	Max	Min	Mean	SD	No.	Max	Min	Mean	SD	No.	Max	Min	Mean	SD
Dry matter (%)	76	56.18	8.96	29.10	11.10	73	51.22	8.98	28.82	11.35	20	24.96	8.98	15.22	3.64
Soluble solids °Bx	75	13.10	3.00	5.73	2.74	74	12.90	3.00	5.95	2.44	20	5.70	3.60	4.72	0.48

No. is number of samples. Min is the minimum. Max is the maximum. SD is standard deviation.

Table 2. Statistics of prediction of dry matter (%) and soluble solids (°Bx) of Durian pulp by PLS model validated by prediction set and by cross-validation

Model type	Properties	Preprocessing	Wavenumber range (cm ⁻¹)	PLS Factor	Calibration		Prediction		
					R ²	RMSEE	RMSEP/RMSECV	RPD	Bias
50% of sample model (prediction set)	Dry matter	First derivatives + MSC	8454.9-7498.3	8	0.90	3.62	3.60	3.27	-0.98
			6102-5446.3 4605.4-4242.9						
All sample model (full cross-validation)	Soluble solids	First derivatives + SNV	6102-5770.3	3	0.43	2.08	1.63	1.51	-0.22
			8454.9-7498.3 6102-5446.3 4605.4-4242.9						
All sample model (full cross-validation)	Dry matter	First derivatives + MSC	8454.9-7498.3	7	0.91	3.44	3.58	3.14	-0.03
			6102-5446.3 4605.4-4242.9						
All sample model (full cross-validation)	Soluble solids	First derivatives + SNV	6102-5770.3	3	0.51	1.84	1.81	1.43	-0.004
			8454.9-7498.3 6102-5446.3 4605.4-4242.9						

MSC is multiplicative scatter correction, R² is coefficient of determination of calibration, RMSEE is root mean square error of estimation, R² is coefficient of determination of prediction, RMSEP is root mean square error of prediction, RMSECV is root mean square error of cross-validation, RPD is ratio of standard error of validation to the standard deviation and Bias is average error of prediction.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3. Statistics of prediction of dry matter (%) and soluble solids (°Bx) of Durian pulp by PLS model validated in samples collected in the 2015 season.

Model type	Properties	r^2	RMSEP	RPD	Bias
50% of sample model (prediction set)	Dry matter	0.26	6.10	0.67	-2.16
	Soluble solids	0.27	1.25	0.81	1.09
All sample model (full cross-validation)	Dry matter	0.15	5.17	0.73	-1.49
	Soluble solids	0.37	1.32	1.02	1.23

r^2 is determination coefficient of prediction, RMSEP is root mean square error of prediction, RPD is ratio of standard error of validation to the standard deviation and Bias is average error of prediction.

89%, and the other 10% error was from unexplained sources. It is worth noting that Williams³² had indicated that an r^2 of 0.83–0.90 implies that a model was usable with caution for most applications, including research, and the RPD of 3.1–4.9 implies that a model is fair and usable for screening. This indicated that the model developed in this study is usable for screening the maturity of the durian pulp by determining whether its DM is below or above or approximately 32%. In the case of avocado³³ and mango,¹¹ which had fairly a similar flesh texture to that of durian pulp, NIR models developed from vis/NIR spectra (300–1140 nm) and shortwave NIR spectra (700–1100 nm) provided r^2 values of 0.88 and 1.80%, and RMSEP values of 0.96 and 0.41%, respectively.

The statistics of prediction of SS of durian pulp showed that the model was developed using three PLS factors in the long-wavelength range of 6102–5770.3 cm^{-1} , which included the vibration bands of sugar [sucrose and glucose],²⁶ which was pretreated by the first derivatives + SNV method. This model showed an r^2 , RMSEP, RPD and bias of 0.55, 1.63 °Bx, 1.51 and -0.22 °Bx, respectively. When compared with the R^2_{max} which was 0.94, the r^2 was only 0.55. This indicated that the error from the reference laboratory for SS was 6%, but the unexplained source error was 39%. The unexplained source of error might be from the effects of constituents in pulp that interfered with the absorption bands related to SS content such as water. Williams³² had indicated that an r^2 of 0.50–0.64 implies that a model usable for rough screening, as well as the research and the RPD of 0.0–2.3, implies that a model is very poor and not recommended. In the case of sugar beet slices,²³ which contained more sugar and less fat, an NIR model developed from the shortwave NIR (vis/SWNIR; 300–1140 nm) and a longer-wavelength region (900–1600 nm) provided an r^2 of 0.89 and 0.95, and an RMSEP of 0.60 °Bx and 0.85 °Bx, respectively.

The cross-validated model for DM was developed using the same spectral pretreatment as that used for the prediction

set validated model (first derivatives + MSC). It was slightly different by using seven PLS factors (one factor less) and from same three wavenumber ranges where only one range was different (9403.8–7498.3 cm^{-1}).

The cross-validated model for SS was developed with only three PLS factors and used the first derivatives + SNV method. The different long-wavelength ranges of 6102–5446 cm^{-1} and 4605–4420 cm^{-1} were used instead of one range of 6102–5770.3 cm^{-1} , where the vibrations of protein and amino acid was included.²⁶

For both properties, the cross-validation provided slightly better results for DM but did not provide better results for SS than the prediction set validation, though the biases were lower. The models for DM showed an r^2 , RMSEP, RPD and bias of 0.91, 3.58%, 3.14 and -0.03%, respectively, and for SS 0.51, 1.81 °Bx, 1.43 and -0.004 °Bx, respectively.

Table 3 shows the statistics of prediction of DM and SS of durian pulp for the PLS model validated by the true validation set. With the half-samples model, the true set validation for DM of durian pulp showed an r^2 , RMSEP, RPD and bias of 0.26, 6.10%, 0.67 and -2.16%, respectively, and for SS, 0.27, 1.25 °Bx, 0.81 and 1.09 °Bx, respectively.

The true set validation of the cross-validation model for DM of durian pulp showed an r^2 , RMSEP, RPD and bias of 0.15, 5.17%, 0.73 and -1.49%, respectively, and for SS, 0.37, 1.32 °Bx, 1.02 and 1.23 °Bx, respectively.

It was also interesting to determine the relationship between the maturity of the pulp and its DM and SS. Table 4 shows the linear relationship between the maturity of durian pulp and its DM and SS. The DM showed a better relationship with maturity than SS (R^2 of 0.77 compared with 0.40). Both DM and SS had a positive correlation with maturity, i.e. when the maturity increased, the content increased. When both of the properties were the independent variables, the correlation was very slightly improved (R^2 was 0.78). The R^2 between the DM

Table 4. Linear relationship between maturity of durian pulp and its dry matter and soluble solids

Equations	m1	m2	C	R^2
Maturity [Days after fruit onset] = m1 × [DM, %] + C	1.28	-	67.42	0.77
Maturity [Days after fruit onset] = m1 × [SS, °Bx] + C	3.97	-	81.25	0.40
Maturity [Days after fruit onset] = m1 × [DM, %] + m2 × [SS, °Bx] + C	1.17	0.74	66.30	0.78

m1 and m2 are regression coefficient for DM (dry matter) variable and SS (soluble solids), respectively. C is regression constant.

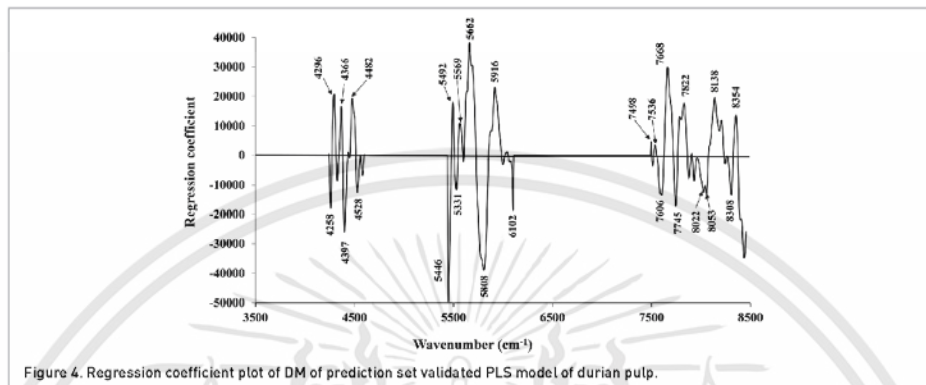


Figure 4. Regression coefficient plot of DM of prediction set validated PLS model of durian pulp.

content and SS content was only 0.41. The correlation among these properties of durian pulp was not so high. This may be due to the properties measured here after the durian fruits were forced to ripen in 3 days using ethephon applied at the time of harvesting. This ripening had to be carried out because this NIR application was expected to measure the properties of the durian pulp sold in department stores before customer consumption or before export.

Figure 4 shows the regression coefficient plots for durian pulp DM for the prediction set validated model. Figure 5 shows the X-loading weight of the PLS factor plots of the prediction set validated model. The strong effect of the bond vibration on the prediction of DM of durian pulp was illustrated by the high peaks shown in the plots. The obvious peaks and their bond vibration in the regression coefficient plot and X-loading weight plot are shown in Tables 5 and 6, respectively, which illustrate the heights of the peaks in descending order. It was observed

that the vibration for cellulose appeared as the highest peak, and other peaks in both plots implied the highest influence of the vibration of cellulose compared to other bond vibration on the prediction of the DM of durian pulp. There were also high absorption peaks owing to the long chain of the fatty acid moiety, which can be attributed to CH_2 , the second overtone at 1200 nm (8333 cm^{-1}) and the first overtone at 1725 nm and 1765 nm (5797 cm^{-1}) and 5665 cm^{-1} .

Figure 6 shows the regression coefficient plot of the durian pulp SS for prediction set validated model. Figure 7 shows the corresponding X-loading weight plots. The obvious peaks and their bond vibration in the regression coefficient plot and X-loading weight plot are shown in Tables 7 and 8, respectively, which illustrates the intensity of the peaks in descending order. It was observed that the vibration of aromatic and CH_2 appeared as the highest peaks, indicating an implied high influence on the prediction of the SS of durian pulp. There

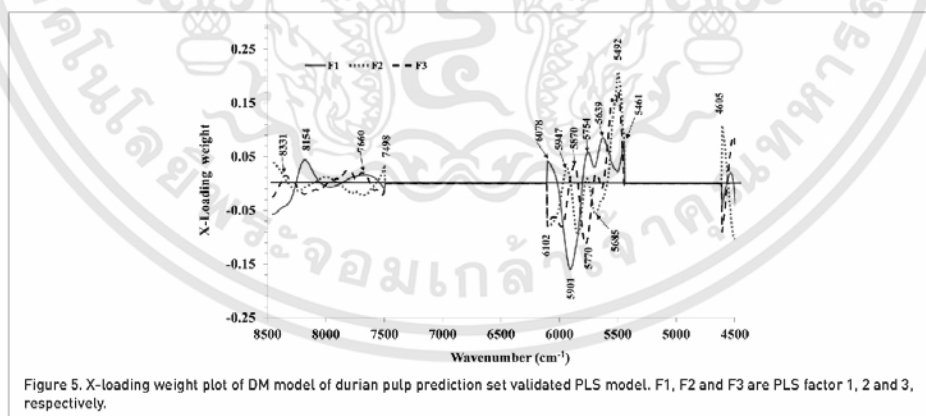


Figure 5. X-loading weight plot of DM model of durian pulp prediction set validated PLS model. F1, F2 and F3 are PLS factor 1, 2 and 3, respectively.

Table 5. The absorption bands with high regression coefficient of model for dry matter of Durian pulp.

Wavenumber [cm ⁻¹]	Wavelength [nm]	Wavelength (nm) referred from reference ²⁸	Bond vibration/structure ²⁸
5446 ¹	1836	1820	O-H stretching + 2 × C-O stretching/cellulose
5808	1722	1725	C-H stretching first overtone/CH ₂
5650	1766	1765	C-H stretching first overtone/CH ₂
7668	1304	1225	C-H stretching second overtone/CH
4397	2274	2273 ²⁹	O-H/C-O/glucose ²⁹
5916	1690	1685	C-H stretching first overtone/aromatic
4296	2328	2336	C-H stretching + C-H deformation/cellulose
4486	2231	2242	N-H stretching + NH ₂ deformation/amino acid
8138	1229	1225	C-H stretching second overtone/CH
5492	1821	1820	O-H stretching + 2 × C-O stretching/cellulose
4366	2290	2294	N-H stretching + C=O stretching /amino acid
7822	1278	1225	C-H stretching second overtone/CH
6102	1639	1645	C-H stretching first overtone/R-CH-CH
4258	2349	2352	C-H deformation second overtone/cellulose
7745	1291	1225	C-H stretching second overtone/CH
8354	1197	1195	C-H stretching second overtone/CH ₃
5569	1796	1780	C-H stretching first overtone/cellulose
8308	1204	1215	C-H stretching second overtone/CH ₂
8022	1247	1360	2 × C-H stretching + C-H deformation/CH ₃
4528	2208	2200	cellulose
5331	1876	1900	O-H stretching + 2 × C-O stretching/starch
7536	1327	1360	2 × C-H stretching + C-H deformation/CH ₃

Table 6. The absorption bands with high X-loading of model for dry matter of Durian pulp.

Wavenumber [cm ⁻¹]	Wavelength [nm]	PLS factor	Wavelength (nm) referred from reference ²⁸	Bond vibration/structure ²⁸
5492	1821, 1818	F2, F3	1820	O-H stretching + 2 × C-O stretching/cellulose
5901	1695	F1	1695	C-H stretching first overtone/ CH ₃
5770	1733	F3	1725	C-H stretching first overtone/CH ₂
4605	2172	F1, F2, F3	2180	2 × amide I + amide III/protein
6102	1639	F1	1645	C-H stretching first overtone/R-CH-CH
5639	1773	F1	1780	C-H stretching first overtone/cellulose
5461	1831	F1	1820	O-H stretching + 2 × C-O stretching/cellulose
5754	1738	F2	1740	S-H stretching first overtone/-SH
5685	1759	F2, F3	1765	C-H stretching first overtone/CH ₂
8154	1226	F1	1225	C-H stretching second overtone/CH
6078	1645	F1	1645	C-H stretching first overtone/R-CH-CH
7498	1334	F2	1225	C-H stretching second overtone/CH
5947	1682	F2	1685	C-H stretching first overtone/aromatic
5870	1704	F3	1705	C-H stretching first overtone/CH ₃
8331	1200	F3	1200	C-H stretching second overtone/CH ₂
7660	1305	F3	1360	2 × C-H stretching + C-H deformation/CH ₃

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

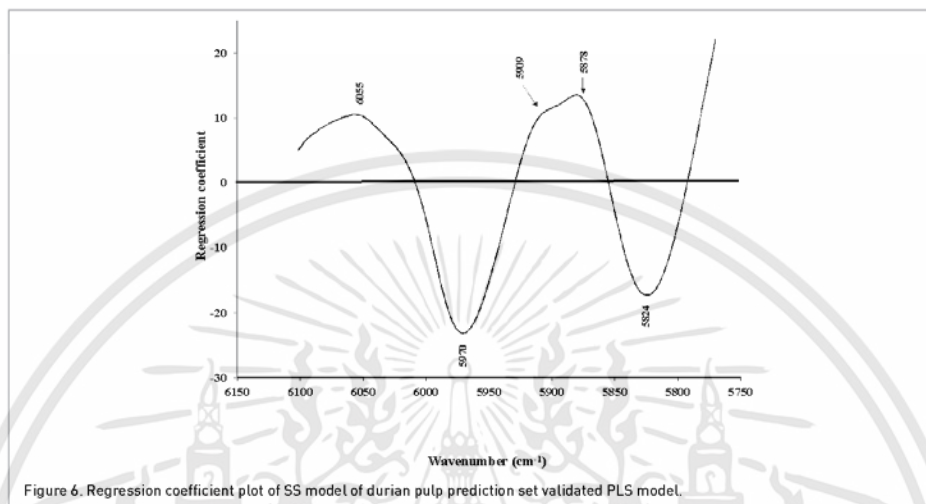


Figure 6. Regression coefficient plot of SS model of durian pulp prediction set validated PLS model.

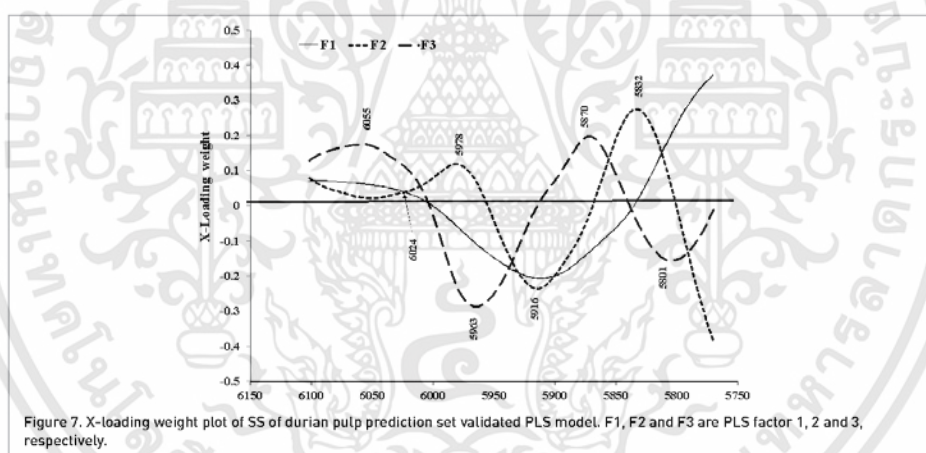


Figure 7. X-loading weight plot of SS of durian pulp prediction set validated PLS model. F1, F2 and F3 are PLS factor 1, 2 and 3, respectively.

is also a high peak in the absorption band for sucrose at 1692nm^{-1} (5910cm^{-1}).

Conclusions

From the results presented in this study, NIR spectroscopy could be used as an alternative technique to estimate the DM of durian pulp, since the model showed an acceptable prediction accuracy. The cross-validation and half sample set

calibration model tested on the remaining half of the samples both gave promising results for DM. These models were unable to predict DM in samples collected in a later season. The predictive statistics suggested that this model may be usable, with the addition of samples from several seasons, for most applications. Further development of the calibrations is expected to overcome this weakness. This would be useful for customers, supermarkets, exporters, importers, post-harvest technologists and related organisations to indicate the maturity of the pulp. In addition, it was found that the vibration

Table 7. The absorption bands with high regression coefficient of models for soluble solids of Durian pulp.

Wavenumber (cm ⁻¹)	Wavelength (nm)	Wavelength (nm) referred from reference ²⁸	Bond vibration/structure ²⁸
5970	1675	1685	C–H stretching first overtone/aromatic
5824	1717	1725	C–H stretching first overtone/CH ₂
5878	1701	1702	starch
5909	1692	1688	sucrose
6055	1652	1645	C–H stretching first overtone/R-CH-CH

Table 8. The absorption bands with high X-loading of model for soluble solids of Durian pulp.

Wavenumber (cm ⁻¹)	Wavelength (nm)	PLS factor	Wavelength (nm) referred from reference ²⁸	Bond vibration/structure ²⁸
5832	1715	F2	1725	C–H stretching first overtone/CH ₂
5963	1677	F3	1685	C–H stretching first overtone/aromatic
5916	1690	F1,F3	1695	C–H stretching first overtone/CH ₃
5870	1704	F3	1705	C–H stretching first overtone/CH ₃
6055	1652	F3	1645	C–H stretching first overtone/ R-CH-CH
5801	1724	F3	1725	C–H stretching first overtone/CH ₂
5978	1673	F2	1685	C–H stretching first overtone/aromatic
6024	1660	F1	1660	C–H stretching first overtone/ cis-RCH=CHR ¹

bands of cellulose and fat greatly affected the prediction of DM of durian pulp. However, prediction accuracy was not demonstrated in the model for durian pulp SS. This might be due to the effect of ethephon applied after harvesting for inducing ripening within 3 days for customer consumption.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Government of Thailand, National Research Council of Thailand and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang in the fiscal year 2015 for the grant to conduct this research and to the anonymous reviewers and Editor-in-Chief for their input leading to an improved manuscript.

References

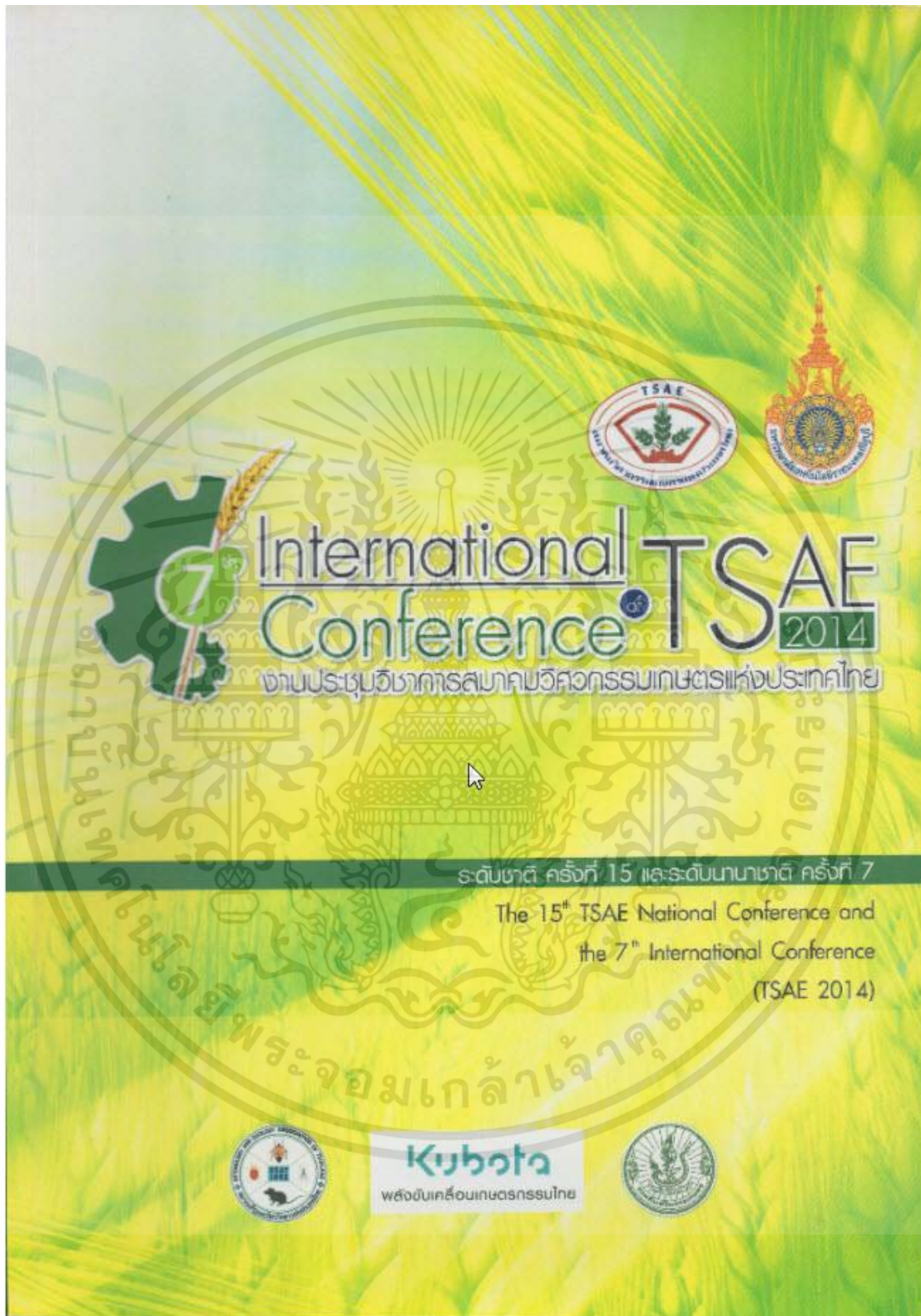
1. S.C. Tongdee, A. Suwanagul, S. Neamprem and U. Bunruengsri, "Effect of surface coatings on weight loss and internal atmosphere of durian (*Durio zibethinus* Murray) fruit", *J. ASEAN Food* **5**, 103 (1990). <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=MY9005314> [Accessed 19 May 2015].
2. P. Booncherm and J. Siriphanich, "Postharvest physiology of durian pulp and husk", *Kasetsart. J.* **25**, 11 (1991). <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=TH9620570> [Accessed 19 May 2015].
3. S. Nanthachai, J. Siriphanich, A.R. Wahab and S. Kosiyachinda, "Harvesting indices and harvesting", in *Durian: Fruit Development, Postharvest Physiology, Handling and Marketing in ASEAN*, Ed by S. Nanthachai. ASEAN Food Handling Bureau, Kuala Lumpur, pp. 77–88 (1994).
4. T.K. Lim and L. Luders, *Boosting Durian Productivity: RIRDC Project DNT-134*. Rural Industries Research Development Corporation, Darwin (2009). <http://www.nt.gov.au/d/Content/File/pl/Fruit/Durian.pdf> [Accessed 19 May 2015].
5. P. Sangwanangkul and J. Siriphanich, "Growth and maturation of durian fruit cv. Monthong", *Thai J. Agric. Sci.* **33**, 75 (2000). ISSN 0049-03589 <http://www.cabdirect.org/abstracts/20013079410.html#sessionid=05242FCBAD3E695E5C20E6377BAE6EAF> [Accessed 19 May 2015].
6. J. Siriphanich and S. Jerapat, "Use of dry matter as maturity index in Kradum durians (*Durio Zibethinus* Murri)", Information and Technology for Sustainable Fruit and Vegetable Production, FRUTIC 05, 12-16 September 2005, Montpellier, France (2005). <http://www.symposcience.org/exl-php/articles/328-use-dry-matter-maturity-index-kradum-durians-durio.htm>
7. R.E. Paul and S. Ketsa, *Durian: Postharvest Quality-Maintenance Guidelines*. The University of Hawaii at Manoa (2014). <http://www.ctahr.hawaii.edu/site/PublList.aspx?key=Fruit,%20Nut,%20and%20Beverage%20Crops> [Accessed on May 19, 2015].
8. K.H.S. Peiris, G.G. Dull, R.G. Leffler and S.J. Kays, "Spatial variability of soluble solids or dry-matter content within individual fruits, bulbs, or tubers: implications for the development and use of NIR spectrometric techniques", *Postharv. Biol. Technol.* **34**, 114 (1999). ISSN:

- 0018-5345 [print], ISSN: 2327-9834 [online] <http://hortsci.ashspubs.org/content/34/1/114.short> [Accessed 19 May 2015].
9. L.S. Magwaza, U.L. Opara, L.A. Terry, S. Landahl, P.J. Cronje, H.H. Nieuwoudt, A. Hanssens, W. Saeys and B.M. Nicolai, "Evaluation of Fourier transform-NIR spectroscopy for integrated external and internal quality assessment of Valencia oranges", *J. Food Comp. Anal.* **1**, 144 [2013]. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfca.2013.05.007>
 10. S. Xudong, Z. Hailiang and L. Yande, "Nondestructive assessment of quality of Nanfeng mandarin fruit by a portable near infrared spectroscopy", *J. Agric. Biol. Eng.* **2**, 65 [2009]. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2009.09.005>
 11. S. Saranwong, J. Sornsrivichai and S. Kawano, "Prediction of ripe-stage eating quality of mango fruit from its harvest quality measured nondestructively by near infrared spectroscopy", *Postharv. Biol. Technol.* **31**, 137 [2004]. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2003.08.007>
 12. H. Azizian, J.K.G. Kramer, S. Ehler and J.M. Curtis, "Rapid quantitation of fish oil fatty acids and their ethyl esters by FT-NIR models", *Eur. J. Lipid Sci.* **112**, 452 [2010]. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/ejlt.200900186>
 13. M.J. Lerma-García, G. Ramis-Ramos, J.M. Herrero-Martínez and E.F. Simo-Alfonso, "Authentication of extra virgin olive oils by Fourier-transform infrared spectroscopy", *Food Chem.* **118**, 78 [2010]. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.04.092>
 14. C. Shiroma and L. Rodriguez-Saona, "Application of NIR and MIR spectroscopy in quality control of potato chips", *J. Food Comp. Anal.* **22**, 596 [2009]. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfca.2008.09.003>
 15. Anonymous, *Advantages of Fourier-Transform Near-Infrared Spectroscopy*. Thermo Electron Scientific Instruments LLC, Madison, WI. Application Note: 50771 [2006]. https://www.thermoscientific.com/content/dam/dfs/ATG/CAD/CAD%20Documents/Application%20%26%20Technical%20Notes/Bulk%20Weighing%20Monitoring%20and%20Sampling/Process%20Analysis%20and%20Control/AN50771_E%20FourierTransformNIR1206M_L.pdf [Accessed 19 May 2015].
 16. A. Giunchi, A. Berardinelli, L. Ragni, A. Fabbri and F.A. Silaghi, "Non-destructive freshness assessment of shell eggs using FT-NIR spectroscopy", *J. Food Eng.* **89**, 142 [2008]. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.04.013>
 17. A. Peirs, N. Scheerlinck, K. Touchant and B.M. Nicolai, "Comparison of Fourier transform and dispersive near-infrared reflectance spectroscopy for apple quality measurements", *Biosyst. Eng.* **81**, 305 [2002]. doi: <http://dx.doi.org/10.1006/bioe.2001.0040>
 18. B.B. Wedding, C. Wright, S. Grauf, R.D. White, B. Tils and P. Gadek, "Effects of seasonal variability on FT-NIR prediction of dry matter content for whole Hass avocado fruit", *Postharv. Biol. Technol.* **55**, 133 [2013]. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.04.016>
 19. S. Bureau, D. Ruiz, M. Reich, B. Gouble, D. Bertrand, J.M. Audergon and C.M.G.C. Renard, "Rapid and non-destructive analysis of apricot fruit quality using FT-near-infrared spectroscopy", *J. Food Chem.* **113**, 1323 [2009]. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.066>
 20. S.K. Bag, P.P. Srivastav and H.N. Mishra, "FT-NIR spectroscopy: a rapid method for estimation of moisture content in bael pulp", *J. Br. Food.* **113**, 494 [2011]. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/0007070111123970>
 21. S. Travers, M.G. Bertelsen, K.K. Petersen and S.V. Kucheryavskiy, "Predicting pear (cv. Clara Frijis) dry matter and soluble solids content with near infrared spectroscopy", *J. Food Sci.* **75**, 9 [2014]. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.twt.2014.04.048>
 22. B. Fernandez, S. Andres, N. Prieto, A.R. Mantecon and F.J. Giraldez, "Prediction of chemical composition of sugar beet pulp by near infrared reflectance spectroscopy", *J. Near Infrared Spectrosc.* **16**, 105 [2008]. doi: <http://dx.doi.org/10.1255/jnirs.768>
 23. V.A. McGlone and S. Kawano, "Firmness, dry-matter and soluble-solids assessment of postharvest kiwifruit by NIR spectroscopy", *Postharv. Biol. Technol.* **13**, 131 [1998]. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00007-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00007-6)
 24. A. Wang and L. Xie, "Technology using near infrared spectroscopic and multivariate analysis to determine the soluble solids content of citrus fruit", *J. Food Eng.* **143**, 17 [2014]. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.06.023>
 25. L. Pan, R. Lu, Q. Zhu, J.M. McGrath and K. Tu, "Measurement of moisture, soluble solids, sucrose content and mechanical properties in sugar beet using portable visible and near-infrared spectroscopy", *Postharv. Biol. Technol.* **102**, 42 [2015]. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.02.005>
 26. C. Watanawan, T. Wasusri, V. Srilaong, C. Wongs-Aree and S. Kantayanarat, "Near infrared spectroscopic evaluation of fruit maturity and quality of export Thai mango (*Mangifera indica* L. var. Namdokmai)", *Int. Food Res.* **21**, 1073 [2014]. <http://www.ifri.upm.edu.my> [Accessed 19 May 2015].
 27. P. Dardenne, "Some considerations about NIR spectroscopy: Closing speech at NIR-2009" [2009]. doi: <https://www.implications.com/content/some-considerations-about-nir-spectroscopy> [Accessed 19 May 2015].
 28. B.G. Osborne and T. Fearn, *Near Infrared Spectroscopy in Food Analysis*. Longman Science & Technical, London [1986].
 29. J. Workman and J.R.L. Weyer. *Practical Guide to Interpretive Near-Infrared Spectroscopy*. Taylor & Francis, Boca Raton, FL, pp. 240-262 [2007].
 30. P. Williams, "Influence of water on prediction of composition and quality factors: the aquaphotomics of

- low moisture agricultural materials”, *J. Near Infrared Spectrosc.* **17**, 315 [2009]. doi: <http://dx.doi.org/10.1255/jnirs.862>
31. V.A. McGlone, R.B. Jordan, R. Seelye and C.J. Clark, “Dry-matter—a better predictor of the post-storage soluble solids in apples?”, *Postharv. Biol. Technol.* **28**, 3431 [2003]. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00207-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00207-7)
32. P. Williams, *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].
33. C.J. Clark, V.A. McGlone, C. Requejo, A. White and A.B. Woolf, “Dry matter determination in ‘Hass’ avocado by NIR spectroscopy”, *Postharv. Biol. Technol.* **29**, 301 [2003]. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5214\(03\)00046-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5214(03)00046-2)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abstract International Conference on Agricultural Engineering
 "Innovative Sustainable Agriculture to Revive Thai Economy"

FPT-18	Thermal Stability of Bamboo Fibres Jedsada CHAISHOME and Samak RAKMAE	32
FPT-19	Evaluation of Para Rubber Latex Viscosity Using Shortwave Near Infrared Spectroscopy Aphichat SOMPIW and Panmanas SIRISOMBOON	33
FPT-20	Color and Soluble Solids Content of Durian Pulp at Different Maturity Stages Phalanon ONSAWAI and Panmanas SIRISOMBOON	34
FPT-21	The Effect of Temperature on The Development of Browning of Amorphous And Crystalline Lactose Helene RANGER, Anthony H.J. PATERSON and Jeremy MCLEOD	35
FPT-23	Feasibility Study on Evaluation of Total Solids of Massaman Curry Soup Using Near Infrared Spectroscopy Jutharat NAWAYON and Panmanas SIRISOMBOON	36
SW-01	APPLICATION OF THE UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION-MODIFICATION IN SOIL EROSION RISK MAPPING Nicasio C. SALVADOR, Vitaliana U. MALAMUG, Melissa E. AGULTO and Armando N. ESPINO, Jr.	37
SW-02	A GIS-AIDED DECISION SUPPORT SYSTEM FOR SMALL FARM RESERVOIRS Ermalyn DE GUZMAN, Armando ESPINO, Jr., Melissa AGULTO and Vitaliana MALAMUG	38
SW-04	HOW ASIA CAN BE UNITED FOR ASIAN ECONOMIC COMMUNITY Nobutaka ITO	39
Poster		
ERE-01	An Energy Saving in Split Type Air Conditioner with Solarenergy Chanida POMSEN, Taveewat SUPAROS, Thanate NAKPONCUM, Sompob PUNYASOMPUN and Manon SOOKLAMAIS	40
ERE-02	An Energy Saving in Split type Air Conditioner with ADP Temperature Jatupoom POUNGCHO, Taveewat SUPAROS, Sompob PUNYASOMPUM, Manon SOKLAMAIS and AekchaiRATTANBANLEU	41
FPT-06	Wooden Chopsticks Dryer Naruebodee SRISANG, Teerawut KATKLEANG, Narakron NOOPIK and Sittisak CHADARAK	42
FPT-09	Mechanical Behavior of Fibers Reinforcing in Natural Rubber Str 5l Siriwan PANNARAY, Benchawan BOONPAI, Kritsakorn THONGSIRI, Kittipat DAUNGSUWAN and Patcharaporn PANDEE	43
FPT-22	Modified Atmosphere Packaging on Quality of Cut Orchid Warinthon YIMYONG	44
SW-03	PASSIVE SUBSURFACE IRRIGATION SYSTEM FOR POTTED PLANT PRODUCTION Ankana THANAKANYA, Ratana KAIFA, Jiraporn ARDAM, Preeyanuch CHAROENPHOL, Sitanan CHUAYWANG, Narissara PROMSUTTHIKUL and and Sophaphan UNKAE0	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COLOR AND SOLUBLE SOLIDS CONTENT OF DURIAN PULP AT DIFFERENT MATURITY STAGES

Phalanon ONSAWAI¹ and Panmanas SIRISOMBOON¹

¹Curriculum of Agricultural Engineering, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

Corresponding author: Phalanon ONSAWAI. E-mail: phalanon.onsawai@hotmail.com

ABSTRACT

Thailand is one of the leaders in durian production and the largest supplier and exporter of top quality durian. The objective of this work was to study the correlation between color and soluble solids content (SSC) of durian pulp at different maturity stages. A set of 25 fruit was randomly harvested at every 10 days starting from 80 days until 127 day after onset of fruit development covering six levels of maturity (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days). The fruits were kept for 3 days at room temperature. Then the pulp was measured for color (CIE L*a*b*) with 3 replicates per sample using spectrophotometer. The C*ab, h° and a*/b* were calculated. After that the sweetness indicator (soluble solids content, SSC, % Brix) was measured with duplicate per sample using digital refractometer. The correlation between SSC and color properties and the linear relationship between SSC and color properties with maturity stages were analysed. The linear relationship between SSC and color properties with maturity stages showed the coefficient of determination (R²) of 0.77, 0.71, 0.80, 0.97, 0.97, 0.84 and 0.84 for L*, a*, b*, C*ab, h° and a*/b*, respectively. The linear equations of the relationship were also calculated. The relationship between the SSC and color showed the R² of 0.20, 0.32, 0.40, 0.40, 0.23 and 0.30 for L*, a*, b*, C*ab, h° and a*/b*, respectively.

Keywords: Durian; Color; Soluble Solids Content; Maturity

7th TSAE International Conference (TSAE2014)
April 2-4, 2014; Pranakorn Sri Ayutthaya, Thailand

COLOR AND SOLUBLE SOLIDS CONTENT OF DURIAN PULP AT DIFFERENT MATURITY STAGES

Phalanon ONSAWAI¹ and Parmanas SIRISOMBOON¹

¹Curriculum of Agricultural Engineering, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

Corresponding author: Phalanon ONSAWAI. E-mail: phalanon.onsawai@hotmail.com

Keywords: Durian; Color; Soluble Solids Content; Maturity

ABSTRACT

Thailand is one of the leaders in durian production and the largest supplier and exporter of top quality durian. The objective of this work was to study the correlation between color and soluble solids content (SSC) of durian pulp at different maturity stages. A set of 25 fruit was randomly harvested at every 10 days starting from 80 days until 127 day after onset of fruit development covering six levels of maturity (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days). The fruits were kept for 3 days at room temperature. Then the pulp was measured for color (CIE L*a*b*) with 3 replicates per sample using spectrophotometer. The C*ab, h° and a*/b* were calculated. After that the sweetness indicator (soluble solids content, SSC, % Brix) was measured with duplicate per sample using digital refractometer. The correlation between SSC and color properties and the linear relationship between SSC and color properties with maturity stages were analysed. The linear relationship between SSC and color properties with maturity stages showed the coefficient of determination (R²) of 0.77, 0.71, 0.80, 0.97, 0.97, 0.84 and 0.84 for L*, a*, b*, C*ab, h° and a*/b*, respectively. The linear equations of the relationship were also calculated. The relationship between the SSC and color showed the R² of 0.20, 0.32, 0.40 0.40 0.23 and 0.30 for L*, a*, b*, C*ab, h° and a*/b*, respectively.

INTRODUCTION

Durian is regarded as one of the more favored tropical fruits. [1] Export of durian from Thailand is the largest proportion of production. [2] Durian is a large heavy fruit, covered with a thick husk with sharp hexagonal thorns, which makes peeling a difficult task for untrained people. The fruit can be opened easily by cutting at abscission zones, which develop along the suture at the middle of each locule as the fruit ripen. [3] The fruit normally contains five locular units with between 1 and 5 pulps per unit. The pulp unit consists of seed which is completely covered by a creamy, white, yellow or golden yellow aril, the edible portion of the fruit. [4]

At maturity, the fruit naturally falls (abscises) from the tree at the articulation of the fruit stem with the fruit, then ripens in 2 to 4 days with the fruit normally splitting into

segments of irregular width at the styler end. Ripening results in an increase in soluble sugars, a decrease in starch and pulp firmness which have occurred before natural fruit splitting (dehiscence) starts. To prevent natural fruit fall (abscising), fruit may be tied to the limb or harvested at maturity. Maturity is judged by appearance (fruit stalk thickness and flexibility, abscission zone, or carpel sutures), number of days from flowering and a hollow sound when tapped with the wood or rattan stick or knife. [5] Days from flowering and tapping are the most reliable criteria. [6] Ripening is characterized by an increase in respiration, ethylene production, soluble solids content, sugars, β-carotene and production of aroma, and a decrease in starch and firmness and eventual senescence. [7] The peel color of fruit was changed because of the changing of pigment such as a loss of chlorophyll which made the green color of the peel to be yellow and the development of carotenoid (yellow and orange), lycopene (red) and anthocyanin (red and blue). [8]

Therefore the objective of this work was to study the correlation between color and soluble solids content (SSC) of durian pulp at different maturity stages. This information will be useful for non-destructive test of sweetness and maturity of the durian pulp using color properties.

MATERIALS AND METHODS

Durian trees of the 'Monthong' cultivar were randomly selected in orchards in eastern Thailand. Fruit growth was followed by tagging flowers from the selected trees when onset of fruit development was observed. A set of 25 fruit was randomly harvested each 10 days starting from 80 days until 127 day after onset of fruit development covering six levels of maturity (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days). The harvested samples from the six intervals provided a variation in maturity from the immature to the over-mature stages and brought to Near Infrared Spectroscopy Research Center for Agricultural Product and Food in King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. The fruits were kept for 3 days at room temperature. Then the pulp was measured for color (CIE L*a*b*) with 3 replicates per sample with spectrophotometer (MiniScan XE Plus, Hunter Lab, USA). Durian pulp colour was measured based on the CIE L* a* b* tri-stimulus colour space, which is an international standard for colour measurement. The CIE L*a*b* colour space is comprised of a luminance component L* (from black to white), and two chromatic components of a* (from green to

red) and b^* (from blue to yellow). [9] Then the Chroma (C^*ab), hue-angle (h°) and a^*/b^* were calculated using the following formula.

$$C^*ab = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (1)$$

$$h^\circ = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (2)$$

After that the SSC (soluble solids content, % Brix) was measured with duplicate per sample with digital refractometer (Pal-1, Atago, Japan). The linear relationship between SSC and color properties with maturity stages and the correlation between SSC and color properties were analysed.

RESULTS AND DISCUSSION

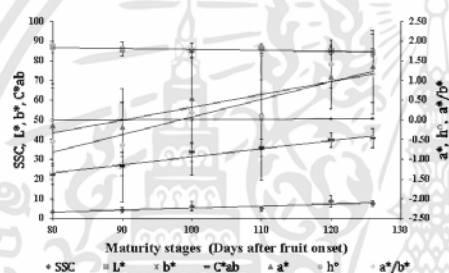


Figure1. The relationship between soluble solids content (SSC) and color properties with maturity stages

Figure 1 shows the relationship between SSC and color properties with maturity stages where the coefficient of determination R^2 were 0.77, 0.71, 0.80, 0.97, 0.97, 0.84 and 0.84 for L^* , a^* , b^* , C^*ab , h° and a^*/b^* , respectively. The linear equations of the relationship were also calculated and showed in Table 1. Figure 1 shows that the yellowness (b^*) and chroma (C^*ab) had the highest value of R^2 (0.97) with the maturity stages.

Table1. The linear relationship between y variable (soluble solids content (SSC) and color properties) with x variable (maturity stages.)

y variable	Slope	Intercept	R^2
SSC	0.103	-4.861	0.77
L^*	-0.048	90.602	0.71
a^*	0.033	-2.947	0.80
b^*	0.410	-9.677	0.97
C^*ab	0.410	-9.688	0.97
h°	0.045	-4.384	0.84
a^*/b^*	0.001	-0.089	0.84

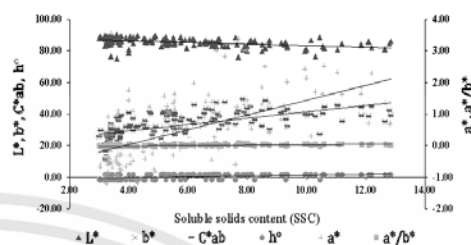


Figure2. The relationship between the soluble solids content and color properties.

Table 1 shows the linear relationship between y variable (soluble solids content (SSC) and color properties) with x variable (maturity stages.). It shows the slope and intercept of linear equation. It could be seen that only L^* had the inverse correlation with maturity stage. This meant that the lightness of pulp was decreased when the maturity increased. The other color properties increased with the increasing of maturity.

Figure 2 shows the relationship between the SSC and color. The coefficient of determination (R^2) of 0.20, 0.32, 0.40, 0.40, 0.23 and 0.30 for L^* , a^* , b^* , C^*ab , h° and a^*/b^* , respectively, were obtained. This indicated there was no linear relationship between the color properties with soluble solids content of the pulp which was the indicator for sweetness.

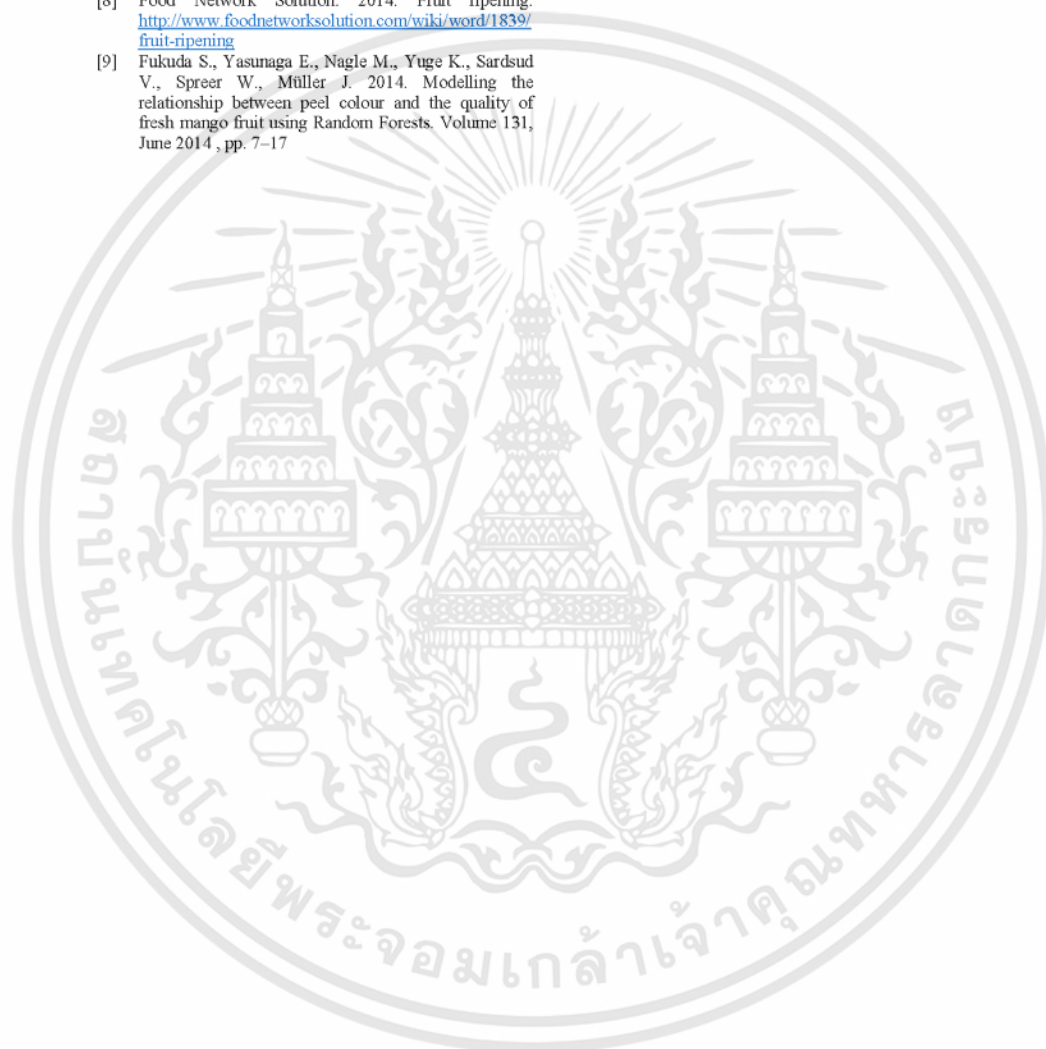
CONCLUSIONS

It can be concluded that the sweetness indicator (SSC) of the durian pulp could not indicate by color properties of the pulp. However, the maturity stage of the pulp can be accurately indicated by the yellowness (b^*) and chroma (C^*ab). This information is very useful to customers, exporters, importers, post-harvest technologists, breeders and so on.

REFERENCES

- [1] Siriphanich, J., Durian (*Durio zibethinus* Merr.) E.M. Yahia (Ed.), 2011. Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits. Volume 3: Cocona to Mango, Woodhead Publishing, UK.
- [2] Cunningham, T., 2000. Durian market report. Project ALA-97/68, Upland Development Programme in Southern Mindanao, Philippines (UDP).
- [3] Siriphanich, J., 1994. Minimal processing of tropical fruits. In: Postharvest Handling of Tropical Fruits: Proceeding of an International Conference. Chiangmai, July 19–23, 1993, pp. 127–137.
- [4] Nanthachai, S., 1994. Durian: fruit development, postharvest physiology, handling and marketing in ASEAN. ASEAN Food Handling Bureau, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [5] Paull R.E., Ketsa S., 2014. Durian. <http://www.ba.ars.usda.gov/hb66/061durian.pdf>

- [6] Sirphanich, J. 1996. Storage and transportation of tropical fruits: A case study on durian. Proc. Intl. Conf. Trop. Fruits, Kuala Lumpur, Malaysia, 1:439-451
- [7] Ketsa S., Pangkool S. 1995. The effect of temperature and humidity on the ripening of durian fruits J. Hort. Sci., 70 pp. 827-831
- [8] Food Network Solution. 2014. Fruit ripening. <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1839/fruit-ripening>
- [9] Fukuda S., Yasunaga E., Nagle M., Yuge K., Sardud V., Spreer W., Müller J. 2014. Modelling the relationship between peel colour and the quality of fresh mango fruit using Random Forests. Volume 131, June 2014, pp. 7-17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TSAE
2016

การประชุมวิชาการ
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ประจำปี 2559
ระดับชาติ ครั้งที่ 17 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 9
The 17th TSAE National Conference and
The 9th TSAE International Conference
(TSAE 2016)

ณ อิมแพค เมืองทองธานี
กรุงเทพมหานคร
8-10 กันยายน 2559

จัดโดย สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

Logos: TSAE, COMEXPOSIUM, AXEMA (Union des Industries de l'Agro-Equipement), IMPACT MUANG THONG THANI, and six university logos.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



The 17th TSAE National Conference and The 9th TSAE International Conference : TSAE 2016
 การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17 ประจำปี 2559 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 9

PHF-07	Feasibility study of evaluation of ammonium laurate soap content in natural rubber latex by near infrared spectroscopy.....	81
PHF-08	Near Infrared Spectral and Physicochemical Characteristic of Durian Pulp at Different Maturities.....	85
PHF-09	The Preliminary Study of Using Near-Infrared Hyperspectral Imaging Technique for Predicting Moisture Content of Para Rubber Cup Lump.....	91
PHF-10	Performance evaluation and economic analysis of fruit peeler.....	97
PHF-12	Extraction of glucosinolates and their conversion into sulforaphane via the addition of exogenous myrosinase.....	102
PHF-13	Reduction of Phosphate Soaking Time for Shrimp Product using Pulsed Vacuum Condition.....	108
PHF-14	Effect of Drying Temperature and Feed Rate on Drying Characteristics on Quality of Parboiled Rice Using Coaxial Impinging Stream Dryer.....	116
PHF-15	Effect of a Combined Microwave and Fluidized Bed Drying on Drying Kinetics and Qualities of the Parboiled Rice.....	120
PHF-16	Effect of Parboiling Conditions on Quality of RD31 Parboiled Rice.....	127
PHF-17	Influence of Microwave Applicator Position of Fluidized Bed Drying on Quality of Partially Parboiled Rice.....	132
PHF-18	Study of Influence of Soaking Conditions for Microwave Treatment on Parboiled Rice Qualities.....	137
PHF-19	Grain separation in an axial flow corn shelling unit.....	141
PHF-20	Effect of Heat Treatment on Increases GABA (γ -aminobutyric acid) Content in Germinated Paddy.....	142
PHF-21	Combined Use of Plasticizer, Charge Modifying Agent and Homogenization to Improve Mechanical Properties of Chitosan Films.....	148
PHF-22	CFD simulation of multi-stage drying of parboiled paddy kernels in an impinging stream dryer.....	154
PHF-23	The Study machine separate of nut and kernel palm by Hydro-cyclone.....	160
PHF-24	Study of Oxygen Transport through a PET Bottle Containing Model Beverage.....	165
PHF-25	Use of Non-Static Drying Procedures to Reduce Non-Uniform Deformation of a Solid Food and Its Monitoring via Image-Based Parameters.....	173
PHF-26	Development of composite fruit and vegetable-based wafer as a novel healthy snack.....	180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Near Infrared Spectral and Physicochemical Characteristic of Durian Pulp at Different Maturities

Phalanon Onsawai^{1*} and Panmanas Sirisomboon¹

¹Curriculum of Agricultural Engineering, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

Corresponding author: Phalanon Onsawai. E-mail: phalanon.onsawai@hotmail.com

Abstract

The near infrared spectral and physicochemical (color (L^* , a^* , b^*), soluble solids content (SSC), moisture content (MC), dry matter (DM) and texture (average force (AF), toughness (T), penetrating force (PF) and penetrating energy (PE)) properties of Durian pulp at different maturities were investigated. The 25 fruits were randomly harvested at each 10 days, starting from 80 days until 127 days after onset of fruit development covering six levels of maturity (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days). The fruits were kept for 3 days at room temperature for their ripeness and the pulps were evaluated for the properties. The spectra obtained by FT-NIR spectrometer showed the dominant peaks at 10245-10221, 8362-8346, 6888, 5569 and 5160 cm^{-1} (976-978, 1196-1198, 1452, 1796 and 1938 nm), by the shortwave diode array spectrometer at 746 and 975 nm and by longwave diode array spectrometer at 1432, 1727 and 1875 nm. The peaks at 746, 976-978, 1196-1198, 1432 and 1452, and 1938 was the vibration bands of H_2O at 760, 970, 1190, 1450 and 1940 nm which were shifted. The peaks at 1796 nm were the vibration of cellulose and at 1727 and 1875 nm was the absorption bands of starch. The result showed that the a^* , b^* , SSC and DM increased and L^* and MC decreased when the harvesting dates increased. The AF and PE during 80-110 days did not change significantly. The T and PF decreased significantly during 80-120 days. However, the values during 120-127 days were not significantly different.

Keywords: Durian pulp, Near infrared, Physicochemical

1 Introduction

Durian, regarded as the King of fruits in South East Asia, is a tropical fruit with a characteristic thorn-covered husk, large size and strong odour (Paengkanya and Soponronnarit, 2015). Export of durian from Thailand is the largest proportion of production (Cunningham, 2000). Fruit firmness and texture are important attributes that define eating quality of durian fruit (Nanthachai, 1994). Electrical impedance spectroscopy (EIS) has been of interest as a technique for assessment of durian. EIS is considered to be a rapid and easy technique for measurement. (Kuson and Terdwongworakul, 2013). Visible spectroscopy range was reported as a potential non-destructive method for classification of durian maturity (Timkhun and Terdwongworakul, 2012). Measurements of frequency response to force vibration and an ultrasonic response were carried out in the region between the spines in the middle part of durian with an

accuracy of 90% in maturity determination (Kongrattanaprasert et al, 2001). The changes in physicochemical properties of longan fruits ('cv. Shixia') after post-anthesis were investigated over two different year seasons, with the aim to identify a reliable maturity index for harvest (Shia et al, 2016). The NIR spectrometer was used as a non-invasive technique for estimating maturity of mango. (Jha et al, 2014) The regression model for predicting maturity of mango provided r^2 of 0.74 and Root mean squared error of prediction (RMSEP) of 0.305%. NIR spectroscopy evaluates the interactions between the electromagnetic radiation in the NIR region (780-2500 nm) and the materials under investigation, especially agricultural produces and food. The NIR spectroscopic technique can provide rapid but its accurate and reproducibility equivalent to much more time consuming reference methods. In addition, NIR spectrometer provides low cost per test, low labour





costs and no chemicals (Onsawai and Sirisomboon 2014). Therefore, the objective of this work was to study the near Infrared spectral and physicochemical characteristic of Durian pulp at different maturities. This information will be useful for researchers, farmers and international trade.

2 Materials and Methods

2.1 Samples

Durian trees of the 'Monthong' cultivar were randomly selected in orchards in eastern Thailand. Fruit growth was followed by tagging flowers from the selected trees when onset of fruit development was observed. A set of 25 fruit was randomly harvested each 10 days starting from 80 days until 127 days after onset of fruit development covering six levels of maturity (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days). The harvested samples from the six intervals provided a variation in maturity from the immature to the over-mature stages and brought to Near Infrared Spectroscopy Research Center for Agricultural Product and Food in King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. The fruits were kept for 3 days at room temperature before experiment.

2.2 Near-infrared spectroscopy experiment

The Durian pulp sample was measured for spectral data with FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) in reflection mode on $12,500-4,000\text{ cm}^{-1}$ (800-2500 nm) with resolution was 16 cm^{-1} , accumulating 32 scans per spectrum using gold as a background. The scanning was done twice per sample. All experiments were performed at room temperature ($27\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Shortwave VIS-NIR diode-array spectrometer (FQA-NIR Gun, Fantec, Japan) in interaction mode at 600-1100 nm with a resolution of 2 nm and longwave NIR diode-array spectrometer (MicroNIR, JDSU, USA) in reflection mode at 1150-2150 nm (Integration time of 1000 ms and number of scans 5000 with a resolution of 7 nm) The scanning was done twice per sample There were 149 samples (298 spectra) in total. All experiments were performed at room temperature ($27\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

2.3 Physicochemical of Durian Pulp

2.3.1 Color measurement

Then the pulp was measured for colour (CIE $L^*a^*b^*$) with 3 replicates per sample with spectrophotometer (MiniScan XE Plus, Hunter Lab, USA) using observer angle of 10° and illuminant of D65. Durian pulp colour was measured based on the CIE $L^* a^* b^*$ tri-stimulus colour space, which is an international standard for colour measurement. The CIE $L^*a^*b^*$ colour space is comprised of a luminance component L^* (from black to white), and two chromatic components of a^* (from green to red) and b^* (from blue to yellow).

2.3.2 soluble solids measurement

The 1:3 mixture of blended Durian pulp sample: distilled water was thoroughly mixed and then centrifuged (Spectrafuge 7M, Labnet, Edison, NJ) at 6000 rpm for 10 min. Then, the supernatant was dropped into the sample hole of a digital refractometer (Pal-1, Atago, Saitama, Japan) to measure the soluble solids (SS) content of the blended sample. The pulp SS content was calculated by multiplying the obtained reading by 4.

2.3.3 Dry matter measurement

After scanning, the eighty gram of Durian pulp was blended (Oku San No, Malaysia) for 1 minutes for soft pulp and 2 minutes for hard pulp. The moisture content of a 5 g durian mash sample was analyzed by hot air oven (ULM 500, Memmert, USA) at the temperature of $60\pm 2^{\circ}\text{C}$ till constant weight was reached. The moisture content (MC) was calculated from equation.

$$\text{MC (\%)} = \frac{(W1 - W2) \times 100}{W1} \quad (1)$$

where $W1$ is original weight (g) and $W2$ is oven dry weight (g).

The dry matter (DM) was calculated from moisture content using the equation.

$$\text{DM (\%)} = 100 - (\text{MC}) \quad (2)$$

2.3.4 texture measurement

Puncture tests were carried out on samples using Texture Analyzer, (TA HD Plus, Texture Analyzer, Stable Micro System, London, UK). A stainless steel plunger with flat end (5 mm diameter) attached to the load cell was





used to penetrate the pulp sample with a deformation speed of 1 mm/s and 10 mm depth.

3 Results and Discussion

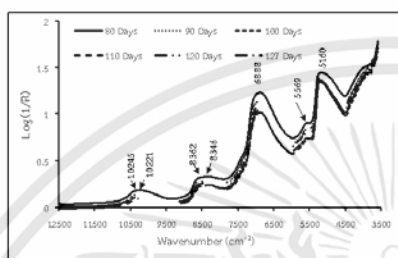


Figure 1 Average NIR spectra of Durian pulp from different maturity samples (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days after fruit onset) obtained from FT-NIR spectrometer.

The average raw NIR spectra of Durian pulp covering six levels of maturity (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days) obtained over a wavenumber range between 12500-3500 cm^{-1} by shortwave FT-NIR spectrometer is shown in Figure 1. This figure displays peaks at 10245-10221, 8362-8346, 6888, 5569 and 5160 cm^{-1} (976-978, 1196-1198, 1452, 1796 and 1938 nm). The peak at 10245-10221 cm^{-1} (around 970 nm) related to O-H stretching of H_2O (Osborne and Fearn, 1986), at 8362-8346 cm^{-1} (1198-1196 nm related to Heavy water, formally called deuterium oxide ($^2\text{H}_2\text{O}$ or D_2O) (typically found at 1190 nm) (Workman and weyer 2007), at 6888 cm^{-1} (1452 nm) related to O-H stretching (1450 nm) of starch or H_2O (Osborne and Fearn, 1986), at 5569 cm^{-1} (1796 nm) related to C-H

stretching of cellulose (Osborne and Fearn, 1986), (typically found at 1780 nm), and at 5160 cm^{-1} (1938 nm) related to O-H stretching + O-H deformation of H_2O (Osborne and Fearn, 1986), (typically found at 1940 nm).

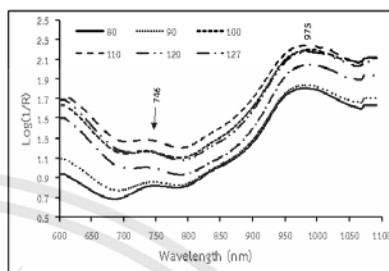


Figure 2 Average NIR spectra of Durian pulp from different maturity samples (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days after fruit onset) obtained from shortwave VIS-NIR diode array spectrometer.

The average raw NIR spectra of Durian pulp covering six levels of maturity (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days) obtained over a wavelength range between 600-1100 nm by shortwave VIS-NIR diode array spectrometer is shown in Figure 2. This figure displays peaks at 746 and 975 nm which was due to the absorption band associated with the third overtone of O-H stretching of H_2O (Osborne and Fearn, 1986), (760 nm) and the absorption band of second overtone associated with O-H stretching of H_2O (Osborne and Fearn, 1986), (typically found at 970 nm).

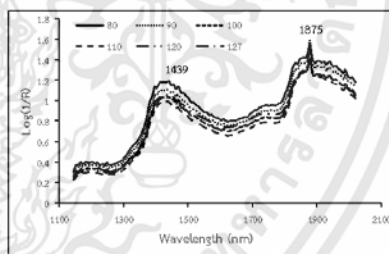
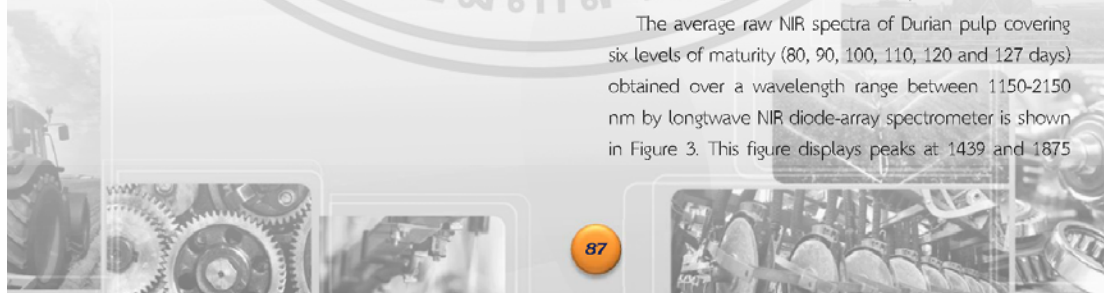


Figure 3 Average NIR spectra of Durian pulp from different maturity samples (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days after fruit onset) obtained from longwave NIR diode-array spectrometer.

The average raw NIR spectra of Durian pulp covering six levels of maturity (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days) obtained over a wavelength range between 1150-2150 nm by longwave NIR diode-array spectrometer is shown in Figure 3. This figure displays peaks at 1439 and 1875





The 17th TSAE National Conference and The 9th TSAE International Conference : TSAE 2016
การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17 ประจำปี 2559 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 9

nm. The peak at 1439 nm (shifted from 1450 nm) due to the absorption band associated with the third overtone of O-H stretching of H₂O (Osborne and Fearn, 1986), and at 1875 nm is due to the absorption band of second overtone associated with O-H stretching + 2 × C-O stretching of starch (Osborne and Fearn, 1986), (typically found at 1900 nm).

Table1. Statistics of average spectrum of Durian pulp samples from different maturity (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days after fruit onset).

maturity	FT-NIR	shortwave VIS-	
		NIR	longwave NIR
	6888 cm ⁻¹ (1451 nm)	975 nm	1439 nm
80	1.225a	1.811c	1.203a
90	1.140b	1.839c	1.126b
100	1.063cd	2.188ab	1.051c
110	1.040d	2.241a	1.002d
120	1.020d	2.172ab	1.038c
127	1.099bc	2.036b	1.065c

From Table 1, absorption value of peaks at 1451 nm (FT-NIR) and 1439 nm (long wave) which are water band (Osborne and Fearn, 1986), decreased with increasing harvesting dates. These results were similar to MC. It can be seen that absorption value of water band increased with increasing MC. For absorption value of shortwave VIS NIR at peaks of 975 nm did not relate on harvesting dates. This might be because in long wavelength, the

Table2. Statistics of color, soluble solids, moisture and dry matter content of Durian pulp samples from different maturity (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days after fruit onset).

maturity	color			soluble solids	moisture	dry matter
	L*	a*	b*	SSC	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	82.3230 ±4.95b	17.6770 ±4.95d
100	85.36 ±3.60bc	0.55 ±1.16b	33.72 ±4.96b	24.9 ±9.27c	68.8831 ±7.04c	31.1169 ±7.04c
110	86.27 ±2.25ab	0.14 ±0.87bc	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

lower order of overtone and combination of NIR vibration, the NIR absorptibility was higher than in shortwave region, the higher order of overtone. This led to the broad and high band of water in longwave region in the spectra of Durian pulp.

Table 2 shows that the a*, b*, and DM increased and L* and MC decreased when the harvesting dates was increased. The yellowness (b*) had the highest value at 40.67 with the maturity stage of 127 days. Fruit pulp colour depends on the durian cultivar, varying between pale to deep yellow. Yellow pulp colour is often due to carotenoids. (Wei et al, 2014) It could be seen that at the maturity stages of 80, 90 and 100 days the Durian fruit were not ripe. However, the stage of 110 days should be the proper ripen stage for harvesting where the dry matter reached 33%. The Monthong Durian pulp at proper maturity stage for harvesting contains 32% dry matter (Siriphanich and Jerapat, 2005).

Table 3 shows that the AF and PE during 80-110 days did not change significantly. The T and PF decreased significantly during 80-120 days. All texture properties during 120-127 days were not significantly different. The results of texture properties were related with the results of MC and DM from table 2 for the values of MC and DM were not significantly different after 120-127 days.

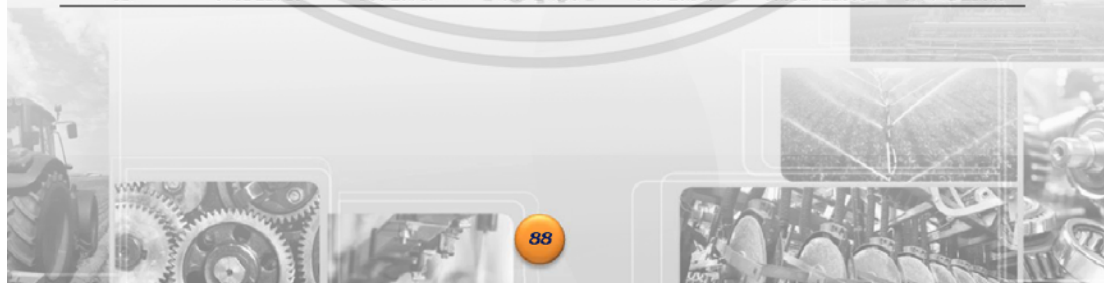




Table 3. Statistics of texture properties of Durian pulp from different maturity (80, 90, 100, 110, 120 and 127 days after fruit onset)

Maturity	texture						
	IF	RF	AF	RD	T	PF	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

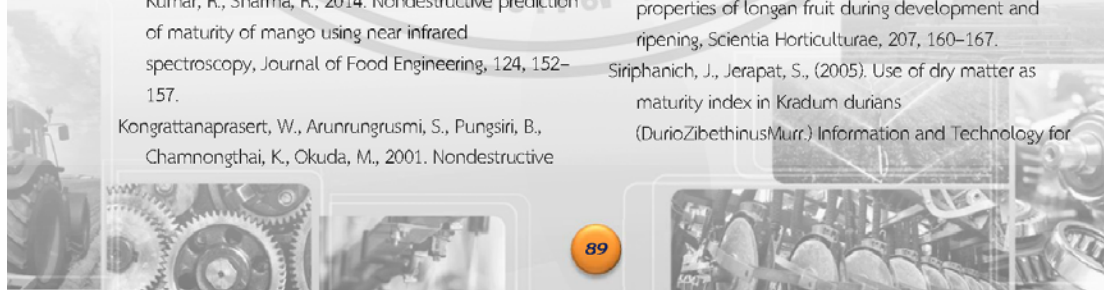
*AF = Average force, IF = Initial firmness, RF = Rupture force, RD = Rupture distance, T = Toughness, APF = Average penetrating force and PE = Penetrating energy

4 Conclusions

The raw NIR spectra from longwave FT-NIR and longwave NIR diode-array spectrometer at wavenumber of 6888 cm⁻¹ and at wavelength of 1439 nm, respectively, related to H₂O. Meanwhile, shortwave VIS-NIR did not related on H₂O band. The moisture content (MC) can be used to classify the durian maturity. MC decreased with increasing harvesting dates. Therefore, the absorption band at 6888 cm⁻¹ and at 1439 nm of FT-NIR and longwave NIR diode-array spectrometers, respectively, could be applied for pulp maturity. In addition, properties of Durian pulp including dry matter (DM) and yellowness value related to with the maturity of Durian pulp. For DM and yellowness values increased with increasing harvesting dates. Texture properties can also classify the maturity of Durian pulp from 80-110 days. This information is very useful to researchers, farmers, exporters, importers, international trade, and so on.

5 References

- Cunningham, T., 2000. Durian market report. Project ALA-97/68, Upland Development Programme in Southern Mindanao, Philippines (UDP).
- Jha, S.N., Narsaiah, K., Jaiswal, P., Bhardwaj, R., Gupta, M., Kumar, R., Sharma, R., 2014. Nondestructive prediction of maturity of mango using near infrared spectroscopy, *Journal of Food Engineering*, 124, 152–157.
- Kongrattanaprasert, W., Arunrungrusmi, S., Pungsiri, B., Chamnongthai, K., Okuda, M., 2001. Nondestructive maturity determination of durian by force vibration and ultrasonic, *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 9 (6), 703–719.
- Kuson, P., Terdwongworakul, A., 2013. Minimally-destructive evaluation of durian maturity based on electrical impedance measurement, *Journal of Food Engineering*, 116, 50–56.
- Nanthachai, S., 1994. Durian: fruit development, postharvest physiology, handling and marketing in ASEAN. ASEAN Food Handling Bureau, Kuala Lumpur, p. 150
- Onsawai, P., Sirisomboon, P., 2015. Determination of dry matter and soluble solids of Durian pulp using diffuse reflectance near infrared spectroscopy, *J. Near Infrared Spectrosc*, 23, 167–179.
- Osborne, B. G., and Fearn, T., 1986. "Near infrared spectroscopy in food analysis (1st published, pp. 117)", Longman Science & Technical, UK.
- Paengkanya, S., Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., 2015. Application of microwaves for drying of durianchips food and bioproducts processing, 96, 1–11.
- Shia, S., Wanga, W., Liua, L., Shua, B., Weia, Y., Juea, D., Fua, J., Xiea, J., Liuc, C., 2016. Physico-chemical properties of longan fruit during development and ripening, *Scientia Horticulturae*, 207, 160–167.
- Siriphanich, J., Jerapat, S., (2005). Use of dry matter as maturity index in Kradum durians (*DurioZibethinusMurr.*) *Information and Technology for*





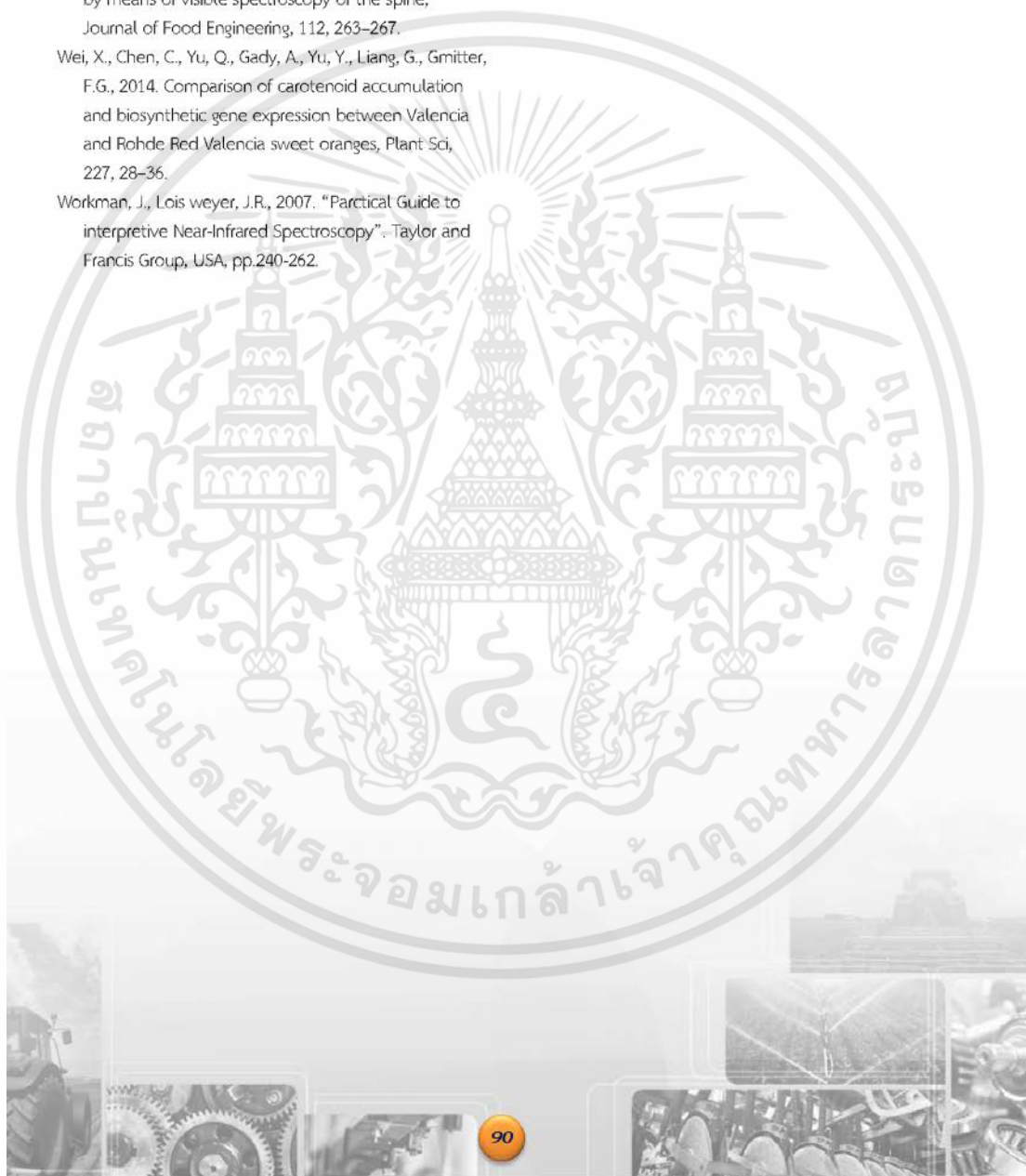
The 17th TSAE National Conference and The 9th TSAE International Conference : TSAE 2016
 การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17 ประจำปี 2559 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 9

Sustainable Fruit and Vegetable Production FRUTIC
 05, 12, 16 September 2005, Montpellier France.

Timkhun, P., Terdwongworakul, A., 2012. Non-destructive classification of durian maturity of 'Monthong' cultivar by means of visible spectroscopy of the spine, *Journal of Food Engineering*, 112, 263–267.

Wei, X., Chen, C., Yu, Q., Gady, A., Yu, Y., Liang, G., Gmitter, F.G., 2014. Comparison of carotenoid accumulation and biosynthetic gene expression between Valencia and Rohde Red Valencia sweet oranges, *Plant Sci*, 227, 28–36.

Workman, J., Lois weyer, J.R., 2007. "Practical Guide to interpretive Near-Infrared Spectroscopy". Taylor and Francis Group, USA, pp.240-262.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นายพลน อ่อนไสว
- วัน เดือน ปีเกิด 29 มกราคม 2528
- ที่อยู่ปัจจุบัน 272/8 ซอยลาดกระบัง13/8 ถ. ลาดกระบัง
แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
- โทรศัพท์ 090-9459396
- E-mail Phalanon.onsawai@hotmail.com
- ประวัติการศึกษา 2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรม
เกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2554 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรม
เกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ความชำนาญเฉพาะด้าน
- 1.) เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
 - 2.) หลังการเก็บเกี่ยว
- ประสบการณ์และผลงานวิจัย
1. ประสงค์ ชุ่มใจหาญ และพลน อ่อนไสว การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการเก็บรักษาและรูปแบบในการตัดข้าวที่มีผลต่อคุณภาพข้าวสาร การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 ประจำปี 2554
 2. ประสงค์ ชุ่มใจหาญ พลน อ่อนไสว และกฤษณ์ ผลโพธิ์ การทำนายศักยภาพของเครื่องตัดข้าว: ส่วนที่ 2 การขยายตัวของข้าวที่ผ่านการหุงต้ม วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 42 (3 พิเศษ): 442-445. 2554.
 3. Bandit Thongsroy, Phalanon Onsawai and Panmanas Sirisomboon. Classification of drinking water in Thailand by near infrared spectroscopy, The 6th TSAE International conference. Huahin Grand Hotel & Plaza, Hua Hin, Thailand during April 1-4, 2013.
 4. Phalanon Onsawai and Panmanas Sirisomboon. Color and soluble solids content of durian pulp at different maturity stages. 7th TSAE International Conference April 2-4, 2014.

5. Phalanon Onsawai and Panmanas Sirisomboon. Determination of dry matter and soluble solids of durian pulp using diffuse reflectance near infrared spectroscopy. *J. Near Infrared Spectrosc.* 23, 167–179 2015.
6. Phalanon Onsawai and Panmanas Sirisomboon. Near Infrared Spectral and Physicochemical Characteristic of Durian Pulp at Different Maturities, The 9th Thai Society of Agricultural Engineering International Conference, 8-10 September 2016.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายพลน อ่อนไสว
วัน เดือน ปีเกิด 29 มกราคม 2528
ที่อยู่ปัจจุบัน 272/8 ซอยลาดกระบัง13/8 ถ. ลาดกระบัง
แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ 090-9459396
E-mail Phalanon.onsawai@hotmail.com
ประวัติการศึกษา 2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรม
เกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2554 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตร
วิศวกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน
1.) เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
2.) หลังการเก็บเกี่ยว
ประสบการณ์และผลงานวิจัย
1. ประสงค์ ชุ่มใจหาญ และพลน อ่อนไสว การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการเก็บรักษาและ
รูปแบบในการตัดข้าวที่มีผลต่อคุณภาพข้าวสาร การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่ง
ประเทศไทย ครั้งที่ 12 ประจำปี 2554
2. ประสงค์ ชุ่มใจหาญ พลน อ่อนไสว และกฤษณ์ ผลโพธิ์ การทำนายศักยภาพของเครื่องตัดข้าว:
ส่วนที่ 2 การขยายตัวของข้าวที่ผ่านการหุงต้ม วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 42 (3 พิเศษ): 442-
445. 2554.
3. Bandit Thongsroy, Phalanon Onsawai and Panmanas Sirisomboon. Classification of
drinking water in Thailand by near infrared spectroscopy, The 6th TSAE
International conference. Huahin Grand Hotel & Plaza, Hua Hin, Thailand
during April 1-4, 2013.
4. Phalanon Onsawai and Panmanas Sirisomboon. Color and soluble solids content
of durian pulp at different maturity stages. 7th TSAE International Conference April
2-4, 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Phalanon Onsawai and Panmanas Sirisomboon. Determination of dry matter and soluble solids of durian pulp using diffuse reflectance near infrared spectroscopy. *J. Near Infrared Spectrosc.* 23, 167–179 2015.
6. Phalanon Onsawai and Panmanas Sirisomboon. Near Infrared Spectral and Physicochemical Characteristic of Durian Pulp at Different Maturities, The 9th Thai Society of Agricultural Engineering International Conference, 8-10 September 2016.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้