

การวิเคราะห์คุณภาพของลิ้นจี่แบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิค hyperspectral
imaging

NON-DESTRUCTIVE QUALITIES DETERMINATION OF LYCHEE BY A
HYPER SPECTRAL IMAGING TECHNIQUE



ปัญหาพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร

คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ใบรับรองปัญหาพิเศษ

การวิเคราะห์คุณภาพของลิ้นจี่แบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิค hyperspectral imaging
NON-DESTRUCTIVE QUALITIES DETERMINATION OF LYCHEE BY A
HYPERSPETRAL IMAGING TECHNIQUE

จัดทำโดย

ธณพล คงปลื้มจิตต์ รหัสนักศึกษา 58080171

พฤกษ์สุดา สกกุลแก้ว รหัสนักศึกษา 58080185

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบจาก

(รศ.ดร. สนธิสุข ชีระชัยชยติ)

อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษ

14/ พ.ค. / 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปัญหาพิเศษ	การวิเคราะห์คุณภาพของลันจีแบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิค hyperspectral imaging		
ชื่อนักศึกษา	ธนพล คงปลื้มจิตต์	รหัสนักศึกษา	58080171
	พฤกษ์สุตา สกุศลแก้ว	รหัสนักศึกษา	58080185
หลักสูตร	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร		
พ.ศ.	2562		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. สนธิสุข ธีระชัยขยติ		

บทคัดย่อ

ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้, ปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ และความชื้นทั้งหมดเป็นคุณลักษณะสำคัญ 3 อย่าง ของผลไม้ ที่มีผลต่อการตัดสินใจของผู้บริโภค อย่างไรก็ตาม การวัดคุณลักษณะเหล่านี้ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับวิธีการประเมินผลด้วยการทำลายซึ่งใช้เวลามากและสามารถใช้ได้กับของจำนวนน้อยเท่านั้น ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายคุณภาพของผลลันจีโดยใช้เทคนิคแสงย่านใกล้อินฟราเรด ซึ่งเป็นการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย โดยผลลันจีที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นสายพันธุ์จักรพรรดิ และ เครื่องวัดแสงย่านใกล้อินฟราเรดที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเครื่อง NIR hyperspectral imaging โหมด reflectance ที่ความยาวคลื่น 935 – 1720 นาโนเมตร สำหรับงานวิจัยนี้จะตรวจคุณภาพของลันจีในเชิงปริมาณ ซึ่งคือ ตรวจสอบคุณลักษณะสำคัญ แล้วจึงนำไปสร้างสมการโดยวิธี partial least squares regression (PLSR) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ทางเชิงปริมาณด้วยโปรแกรม Unscambler โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนคือ กลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ (calibration set) และ กลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ (prediction set) หลังจากการวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่า การทำนายคุณภาพของลันจีสายพันธุ์จักรพรรดิโดย NIRs hyperspectral imaging นั้นสามารถใช้ในการทำนายเพื่อคัดแยกคุณภาพโดยไม่ทำลายกับปริมาณความชื้นทั้งหมดของผลลันจีได้แม่นยำที่สุด ซึ่งความแม่นยำในการทำนาย (ได้ค่า $R = 0.8$, $RMSEP = 0.737\%$) ตามด้วย ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ ซึ่งความแม่นยำในการทำนาย (ได้ค่า $R = 0.64$, $RMSEP = 0.77\%$ และ ได้ค่า $R = 0.13$, $RMSEP = 0.275\%$ ตามลำดับ) จึงเห็นได้ว่าเทคนิคนี้สามารถทำนายคุณภาพในด้านปริมาณความชื้น และ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ได้ดี

คำสำคัญ : ลันจี แบบไม่ทำลาย ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณกรดที่ไทเตรทได้ ปริมาณความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special problem title	Non-destructive qualities determination of lychee by a hyperspectral imaging technique
Student name	Tanapol Kongplumchit Student ID 58080171 Prueksuda Sakoolkaew Student ID 58080185
Program	Bachelor of Science in Food Process Engineering
Year	2019
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Sontisuk Teerachaichayut

ABSTRACT

Total soluble solid (TSS), titratable acidity (TA) and moisture content are three important quality attributes of the fruit that affect consumer's acceptance. However, most of these attributes are based on evaluation that have to be destructive which takes a lot of time and can only be used with a small number of items. This research aims to predict the quality of lychee fruit by using a near infrared hyperspectral imaging technique which is non-destructive. The objective of this research is to predict the quality of lychee (cv. "jakkapat") by using a near infrared hyperspectral imaging technique in reflectance mode in the wavelength range of 935 -1720 nm. Checked the qualities of lychee by quantitative methods, total soluble solid (TSS), titratable acidity (TA) and moisture content monitoring had been determined for the qualities of the Lychee (cv. "jakkapat"). And then used the least squares regression method (PLSR) to create the equation which is a quantitative analysis with the Unscambler program by dividing the data into 2 parts: the group used for generating the equation (Calibration set) and the group used for testing (Prediction set). After analyzing the results of all experiments it can be concluded that This research showed that the use of NIR hyperspectral imaging is feasible to non-destructively predict the total moisture content of the lychee fruit is the most accurately which the accuracy of prediction ($R = 0.8$, $RMSEP = 0.737\%$) followed by total soluble solids And titratable acidity Which the accuracy of prediction ($R = 0.64$, $RMSEP = 0.77\%$ and $R = 0.13$, $RMSEP = 0.275\%$ respectively) can be seen that this technique can predict the quality of moisture content and total soluble solids.

Keywords: lychee, nondestructive, total soluble solids, moisture content, acid

กิตติกรรมประกาศ

งานปัญหาพิเศษเรื่อง การวิเคราะห์ความเป็นกรด, ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และ ปริมาณน้ำคั้นของลีนจีแบบไม่ทำลายโดยใช้เครื่อง hyperspectral imaging ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา และการค้นคว้าเพิ่มเติมในการทำงานวิจัยนี้ จาก การสนับสนุนจากบุคคลหลายท่าน อาทิ อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สนธิสุข ธีระชัยขยุดิ ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำและคอยตรวจทาน อีกทั้งยังคอยดูแล ติดตามความก้าวหน้าในการดำเนินการวิจัย และช่วยเหลือในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องของงานอย่างละเอียด อาจารย์ผู้เป็นคณะกรรมการในการ ประเมินผลการทำงานปัญหาพิเศษ ผศ.ดร.ประมวล ศรีกาหลง และคณาจารย์ทุกท่านที่คอยให้ความรู้และ คำแนะนำเพื่อนำมาปรับปรุงแก้ไขรูปแบบปัญหาพิเศษนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเพื่อนๆที่คอยให้ความช่วยเหลือในงานปัญหาพิเศษครั้งนี้

ในโอกาสนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณทุกๆท่าน ที่มีส่วนช่วยให้งานปัญหาพิเศษนี้ผ่านไปด้วยดี หากมีข้อบกพร่องประการใดที่เกิดขึ้นในงานปัญหาพิเศษเล่มนี้ ข้าพเจ้าขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

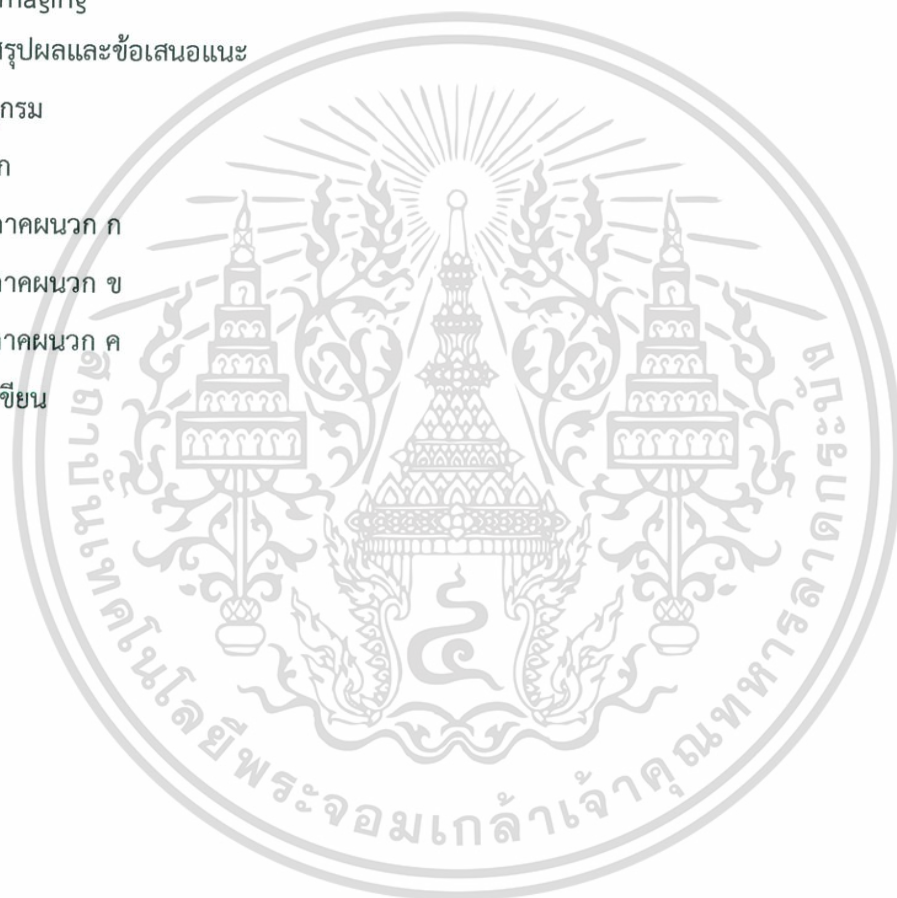
ธณพล คงปลื้มจิตต์
พฤกษ์สุดา สกุลแก้ว
9 เมษายน 2562

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	4
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ลิ่นจี่	5
2.2 ข้อมูลทางเคมี	6
2.3 การทดสอบคุณภาพด้วยวิธีการไม่ทำลาย	9
2.4 การปรับแต่งข้อมูลก่อนการวิเคราะห์	14
2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล	15
2.6 ค่าสถิติสำหรับพิจารณาความแม่นยำของแบบจำลอง	19
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	24
3.1 วัสดุดิบและสารเคมี	24
3.2 อุปกรณ์	24
3.3 โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ	24
3.4 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของลignite จีพีพี จักรพรรดิ	27
4.2 ลักษณะสเปกตรัมของลignite จีพีพี จักรพรรดิ	34
4.3 การเปรียบเทียบค่าทางกายภาพและเคมีในตัวอย่างลignite จีพีพี จักรพรรดิ ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค hyperspectral imaging	43
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	46
บรรณานุกรม	47
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก	51
ภาคผนวก ข	52
ภาคผนวก ค	55
ประวัติผู้เขียน	57



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ตารางแสดงถึงปริมาณการส่งออกลิ้นจี่สดปี 2559	1
1.2	ตารางแสดงถึงสถิติมูลค่าการส่งออกลิ้นจี่ของไทยไปยังออสเตรเลีย ระหว่างปี 2556-2560.	2
1.3	ตารางแสดงถึงสถิติมูลค่าการส่งออกลิ้นจี่ของไทยไปยังนิวซีแลนด์ ระหว่างปี 2556-2560	2
2.1	ตารางแสดงถึง milliequivalent factor ของกรดแต่ละชนิด	9
2.2	ตารางแสดงถึงการแบ่งช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด	13
2.3	ตารางแสดงแนวทางการอธิบายความสัมพันธ์ของแบบจำลองด้วยค่า R และ R^2	19
2.4	ตารางแสดงแนวทางการอธิบายความสัมพันธ์ของแบบจำลองด้วยค่า RPD	21
3.1	ตารางแสดงถึง milliequivalent factor ของกรดแต่ละชนิด	25
4.1	ตารางที่แสดงข้อมูลของกลุ่ม calibration set	27
4.2	ตารางที่แสดงข้อมูลของกลุ่ม prediction set	30
4.3	ตารางแสดงค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในตัวอย่างลิ้นจี่พันธุ์จักรพรรดิของตัวอย่างกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ (calibration set) และกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ (prediction set)	36
4.4	ตารางแสดงผลการทดสอบการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในกลุ่มที่ใช้สำหรับการสร้างสมการโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ช่วยในการปรับแต่ง	36
4.5	ตารางแสดงช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่เหมาะสมในการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้	37

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.6	ตารางผลของการวิเคราะห์ PLS regression สำหรับการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้	38
4.7	ตารางแสดงค่าปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ในตัวอย่างลีนจีพันธุ์จักรพรรดีของตัวอย่างกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ (Calibration set) และ กลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ (Prediction set)	39
4.8	ตารางแสดงผลการทดสอบการทำนายปริมาณของกรดที่ไตเตรทได้ในกลุ่มที่ใช้สำหรับการสร้างสมการโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ช่วยในการปรับแต่ง	39
4.9	ตารางแสดงช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่เหมาะสมในการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้	40
4.10	ตารางผลของการวิเคราะห์ PLS regression สำหรับการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ทั้งหมด	40
4.11	ตารางแสดงค่าปริมาณความชื้นในตัวอย่างลีนจีพันธุ์จักรพรรดีของตัวอย่างกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ (Calibration set) และ กลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ (Prediction set)	41
4.12	ตารางแสดงผลการทดสอบการทำนายปริมาณความชื้นของลีนจีในกลุ่มที่ใช้สำหรับการสร้างสมการโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ช่วยในการปรับแต่ง	41
4.13	ตารางแสดงช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่เหมาะสมในการทำนายปริมาณความชื้นทั้งหมด	42
4.14	ตารางผลของการวิเคราะห์ PLS regression สำหรับการทำนายปริมาณความชื้นในลีนจี	43
ก.1	ตารางที่แสดงข้อมูลเฉลี่ยตัวอย่างของค่า acidity, brix และ moisture content	51

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ข้อมูลภาพถ่าย 3 มิติ หรือ hypercube (A) และสเปกตรัมที่ได้ในแต่ละพิกเซล (B) ของการถ่ายภาพด้วยเทคนิค HSI	10
2.2	ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่อง HSI	11
2.3	ระบบการถ่ายภาพ HSI (ลูกศรและพื้นที่สีเทาบอกถึงข้อมูลที่ได้มาในแต่ละครั้ง) และ ระบบการตรวจจับภาพ	12
2.4	ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม NIRS	18
4.1	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของลินจี้ที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้สูง และค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของลินจี้ที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ต่ำ	32
4.2	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของลินจี้ที่มีปริมาณกรดที่ไคเตรทได้สูง และค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของลินจี้ที่มีปริมาณกรดที่ไคเตรทได้ต่ำ	33
4.3	กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของลินจี้ที่มีปริมาณความชื้นสูงและค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของลินจี้ที่มีปริมาณความชื้นต่ำ	34
4.4	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงทั้งหมดของลินจี้	35
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดได้จริงและค่าที่ได้จากการทำนาย PLS regression models	44
ข.1	ลินจี้สายพันธุ์จักรพรรดิ	52
ข.2	NIR hyperspectral imaging	52
ข.3	aluminium can	53
ข.4	Refractometer	53
ข.5	hot air oven	53
ข.6	อุปกรณ์ในการไคเตรท	54
ค.1	คั้นน้ำลินจี้	55
ค.2	วัด brix โดยใช้ refractometer	55

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
ค.3	ไตเตรทโดยใช้ NaOH	56
ค.4	อบไล์ความชื้น	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาพิเศษ

ลิ้นจี่นั้นเป็นผลไม้ที่มีรสชาติอร่อยให้ผลผลิตคุ้มค่ากับการลงทุนจึงถือว่าเป็นผลไม้ทางเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยที่สามารถนำผลผลิตที่ได้มาจำหน่ายในรูปของผลไม้สดและผลไม้แปรรูป

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงถึงปริมาณการส่งออกลิ้นจี่สดปี 2559

อันดับที่	ชนิดผลไม้	ประเทศ	ปริมาณ (กิโลกรัม)	มูลค่า (บาท)
		CHINA	3,908,505	71,658,271
		INDONESIA	429,724	22,664,658
		UNITED ARAB EMIRATES	52,639	2,071,678
		VIETNAM	33,493	200,289
		AUSTRALIA	8,880	888,000
		QATAR	4,669	239,795
		BRUNEI DARUSSALAM	4,542	237,652
		THE NETHERLANDS	3,634	234,280
		BAHRAIN	3,131	190,210
		SAUDI ARABIA	2,897	113,247
12	Lychee ลิ้นจี่	RUSSIA	2,468	110,333
		GERMANY	2,320	69,760
		OMAN	2,154	98,158
		UNITED KINGDOM	1,873	219,620
		KUWAIT	1,824	97,689
		MALDIVES	1,265	88,774
		CANADA	930	68,420
		SWITZERLAND	778	23,257
		FRANCE	668	23,720
		SWEDEN	438	16,163
		DENMARK	393	11,320

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงถึงปริมาณการส่งออกลิ้นจี่สดปี 2559 (ต่อ)

อันดับที่	ชนิดผลไม้	ประเทศ	ปริมาณ (กิโลกรัม)	มูลค่า (บาท)
		LAOS	300	4,500
		NORWAY	289	8,765
		LEBANON	282	25,380
12	Lychee ลิ้นจี่	SPAIN	240	8,400
		EGYPT	120	5,200
		INDIA	100	3,000
	Lychee ลิ้นจี่ ผลรวม		4,468,555	99,380,536

ที่มา: กลุ่มบริการส่งออกสินค้าเกษตร (2559)

ตารางที่ 1.2 ตารางแสดงถึงสถิติมูลค่าการส่งออกลิ้นจี่ของไทยไปยังออสเตรเลีย ระหว่างปี 2556-2560

ลำดับที่	รายการ	2556	2557	2558	2559	2560	อัตราการขยายตัว
21	ลิ้นจี่สด	0.00	3.23	0.00	0.88	0.00	0.00

ที่มา: กรมศุลกากร http://www.customs.go.th/statistic_report (2560)

ตารางที่ 1.3 ตารางแสดงถึงสถิติมูลค่าการส่งออกลิ้นจี่ของไทยไปยังนิวซีแลนด์ ระหว่างปี 2556-2560

ลำดับที่	รายการ	2556	2557	2558	2559	2560	อัตราการขยายตัว
18	ลิ้นจี่สด	0.00	1.42	1.91	0.00	0.00	0.00

ที่มา: กรมศุลกากร (2560)

ลิ้นจี่เป็นต้นไม้เขตร้อนที่มีถิ่นกำเนิดในมณฑลกว่างตุง และ ผู้เจียนของประเทศจีนซึ่งเป็นผู้ผลิตหลักของลิ้นจี่ตามด้วยอินเดียและประเทศอื่น ๆ ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมถึงอนุทวีปอินเดียและแอฟริกาใต้และคาดว่าคู่แข่งทางการตลาดของไทยในการส่งออกลิ้นจี่คือประเทศเวียดนาม ซึ่งจากข้อมูลปี 2559 จังหวัด Bac Giang มีการส่งออกลิ้นจี่ผ่านด่านการค้าในเมืองผิงเสียงราว 3.2 หมื่นตัน คิดเป็นสัดส่วน 56%ของปริมาณการส่งออกลิ้นจี่มายังจีน สะท้อนให้เห็นปริมาณผลผลิตภายในประเทศของจีนไม่สามารถตอบสนองความต้องการในประเทศและยังมีช่องว่างทางการตลาดพอสมควรสำหรับลิ้นจี่ต่างประเทศ (กฤษณะ, 2560)

พันธุ์ลิ้นจี่ที่ปลูกในประเทศไทยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามแหล่งปลูกดังนี้

1.1.1 กลุ่มพันธุ์ที่ปลูกทางภาคเหนือ เป็นพันธุ์ที่ต้องการความหนาวเย็นมากและยาวนาน ก่อนการออกดอกมากกว่าพันธุ์ที่ปลูกทางภาคกลาง ได้แก่ ฮงฮวย จักรพรรดิ กิมเจง โอวเฮียะ กวางเจา บิวสเตอร์ และกิมจี เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.2 กลุ่มพันธุ์ที่ปลูกในภาคกลาง ภาคตะวันออกและภาคตะวันตก ส่วนใหญ่ต้องการความหนาวเย็นไม่มากและหนาวเย็นไม่นานก็สามารถชักนำให้ออกดอกได้ ปลูกในที่ราบต่ำแถวอำเภออัมพวา และอำเภอบางคนที จังหวัดสมุทรสงคราม ได้แก่ พันธุ์ค่อม (ค่อมลำเจียก) กะโหลกใบยาว สำเนาแก้ว กระโดนทองพระโรง เขียวหวาน สาแทรกทอง จีน ไทยธรรมดา ไทยใหญ่ กะโหลกใบใหม่ กะโหลกใบเตา ช่อระกำ และพันธุ์ทิพย์ เป็นต้น

ซึ่งจากสายที่กล่าวมาทั้งหมด สายพันธุ์จักรพรรดิมีผลขนาดโตมากที่สุด ออกดอกประมาณเดือนมกราคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ ผลแก่ปลายเดือนมิถุนายนถึงกรกฎาคม ขนาดผลกว้าง 4.4 เซนติเมตร ยาว 4.2 เซนติเมตร ผลหนัก 40-50 กรัม หนามไม่แหลม เปลือกหนา เมื่อแก่จัดสีชมพูแดง เนื้อผลหนา 1.1 เซนติเมตร เนื้อมีน้ำค่อนข้างมาก รสดีพอใช้ ความหวานประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์

เนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสม ประเทศไทยจึงเป็นแหล่งผลิตผลไม้ทั้งเขตร้อนและกึ่งร้อนหลากหลายชนิด เพื่อบริโภคทั้งภายในประเทศและส่งออก ปัญหาของเกษตรกร พ่อค้า และ ผู้บริโภคในการตรวจสอบคุณภาพผลไม้เพื่อซื้อขายมีมากมาย โดยเฉพาะ การส่งออกไปยังประเทศที่เข้มงวดเรื่องการกักด่านพืชและคุณภาพ ซึ่งบาง คุณภาพก็สามารถตรวจสอบภายนอกโดยการดูด้วยตาหรือการสัมผัสได้ โดยอาศัยประสบการณ์และความชำนาญ แต่บางคุณภาพก็ไม่สามารถมอง จากภายนอกได้ จึงต้องชิม เช่น ลิ้นจี่ ลำไย ฝัหรือเงาะ เช่น แดงโม ทูเรียน แต่ก็เป็นข้อถกเถียงเนื่องจากประสาทสัมผัสของแต่ละคนไม่เหมือนกัน การใช้วิธีทางฟิสิกส์โดยไม่ทำลาย ได้แก่ การเคาะภายนอกซึ่งมีความสัมพันธ์กับความแน่นของเนื้อผลไม้ การแช่น้ำเพื่อหาความถ่วงจำเพาะของผลไม้ การหาค่าสมบัติทางไฟฟ้า การส่องผ่านของแสงโดยใช้วัสดุสะท้อนแสงเพื่อเพิ่มแสงสว่าง ก็มีความแม่นยำและประสิทธิภาพต่ำ จึงควรมีเทคนิคหรือเครื่องมือที่เป็นกลางในการตรวจสอบ เพื่อลดการลำเอียง และไม่ต้องปอก ฝัหรือเงาะทำลายผลไม้ เทคนิคนั้นคือเทคนิคทางรังสี เช่น เทคนิคการประมวลผลภาพด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (x-ray computerized tomography) / ซีทีสแกน (CT-scan) เทคนิคการสร้างภาพด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (magnetic resonance imaging หรือ MR) และ เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ในระดับอุตสาหกรรมลิ้นจี่ที่ดั้นจะวัดได้จากระดับความหวาน ความเป็นกรด รวมถึงความชื้น เพราะฉะนั้น ลิ้นจี่จะถูกสุ่มตรวจวัดค่า total soluble solid, titratable acidity และ moisture content ในห้องปฏิบัติการ กระบวนการตรวจสอบจะทำลายตัวอย่าง ตัวอย่างเช่นสำหรับการหาค่า acid หรือ TSS นั้นต้องคั้นน้ำลิ้นจี่มาเพื่อวัด โดยการวัดค่าความเป็นกรดจะใช้เครื่อง auto titration การวัดค่าความหวานโดยการหดรัดน้ำลิ้นจี่ลงบนเครื่อง refractometer เพื่ออ่านค่า brix และ การวัดหาปริมาณความชื้นในทางอุตสาหกรรมจะใช้วิธีนำตัวอย่างมาหามวลของแข็งโดยอบการลมร้อนในเตาอบลมร้อนเป็นเวลา 48-72 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเพื่อหักลบกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเข้าเตาอบเพื่อหาปริมาณน้ำที่ระเหยออกไปซึ่งเป็นวิธีที่ใช้เวลามา

ในการวิจัยนี้จึงต้องทำการศึกษาในด้านองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของลิ้นจี่ วิธีการหาค่าทางเคมี total soluble solid, titratable acidity และ moisture content เพื่อนำมาวิเคราะห์ผล และใช้ในการทำนายสมการ เพื่อยืนยันความถูกต้องของการทำนายข้อมูลที่ได้จากการหาโดยเครื่อง NIR เพราะฉะนั้นจึงต้องเรียนรู้ในการใช้งานเครื่อง NIR รวมถึงวิธีการใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ สร้างสมการขึ้นมาจากค่าทางเคมีและ spectra แล้วจึงจะได้สมการที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีแบบดั้งเดิมนั้นทำลายผลิตภัณฑ์ นักวิจัยหลายคนจึงพัฒนาเทคนิคที่ไม่ต้องทำลายผลิตภัณฑ์ของผักและผลไม้ เทคนิค near-infrared (874–1734 nm) hyperspectral imaging (NIR-HSI) เป็นการวัดโดยไม่ต้องทำลายผลิตภัณฑ์ โดยเครื่อง NIR คือเครื่องที่ใช้แสงที่มีความยาวคลื่นย่านใกล้อินฟราเรด ส่องไปยังสิ่งที่เราต้องการวิเคราะห์ เพื่อให้เกิดการดูดกลืนแสง แล้วทำการตรวจวัดคลื่นแสงที่ไม่ถูกดูดกลืน ซึ่งสะท้อนหรือส่องผ่านออกมา โดยสามารถตรวจวัดด้วย Detector แล้วประมวลผลเป็นค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ เกิดเป็นสเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะตัวในตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ทดแทนการวิเคราะห์ทางเคมีที่ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่นาน มีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่ามาก แล้วยังลดความสูญเสียจากการที่ต้องทำลายตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองทางเคมีไปอีกมากเช่นกัน

ในปัจจุบันมีเทคนิคการตรวจสอบผลผลิตทางการเกษตรแบบ ไม่ทำลายตัวอย่างด้วยวิธีสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (near infrared spectroscopy; NIRs) ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย NIRs เป็นวิธีที่รวดเร็ว มีความแม่นยำในการวัด องค์ประกอบภายในของผลผลิตเกษตรและอาหารโดยไม่ทำลาย ตัวอย่าง (Fu และคณะ, 2007; อนุพันธ์ และคณะ, 2012) การวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ (near infrared hyperspectral imaging: NIR-HSI) เป็นเทคโนโลยี การวิเคราะห์ที่มีความน่าสนใจมากสำหรับการกำหนดคุณภาพ ของผลิตภัณฑ์อาหารได้อย่างรวดเร็วและไม่ทำลาย โดยเป็นเทคนิคที่ให้ข้อมูลเพิ่มเติมด้านการกระจายตัวขององค์ประกอบบนผิวหน้าของตัวอย่างซึ่งแสดงออกมาเป็นภาพ HSI เป็นการรวมสเปกโทรสโกปีแบบปกติและระบบการถ่ายภาพดิจิทัลที่ทำให้ได้สเปกตรัมและข้อมูลเฉพาะของวัตถุพร้อมกัน (Du และ Sun, 2005)

เพราะฉะนั้นในการใช้เทคนิค NIR hyperspectral imaging นั้นไม่เพียงใช้ในทางอุตสาหกรรมการแปรรูปเท่านั้น แต่ยังสามารถบ่งบอกถึงคุณภาพของผลผลิตของผลไม้ตั้งแต่ก่อนการเก็บเกี่ยว เพื่อใช้ในการตลาด โดยสามารถแยกคุณภาพของผลผลิตได้ตั้งแต่ต้น ทำให้ได้คุณภาพตามต้องการ แล้วสามารถตั้งมูลค่าของสินค้าตามความเหมาะสมได้

1.2. วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางสถิติเพื่อใช้ทำนายค่าทางเคมีของลิ้นจี่อย่างรวดเร็วโดยไม่ทำลายด้วยเทคนิค hyperspectral imaging

1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิค hyperspectral imaging ในการตรวจวัดค่า total soluble solid, titratable acidity และ moisture content ในลิ้นจี่

1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 สามารถทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ความเป็นกรด และความชื้นในลิ้นจี่โดยใช้เทคนิค NIR hyperspectral imaging ได้

1.3.2 ลดการสูญเสียที่ไม่จำเป็นในการทำลายผลิตภัณฑ์เพื่อตรวจวัดค่าทางเคมีต่างๆ

1.3.3 ประหยัดเวลาในการตรวจสอบคุณภาพผลผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลิ้นจี่

ลิ้นจี่ เป็นชื่อของผลไม้ประเภทผลเดี่ยวซึ่งมีลักษณะเปลือกสีแดงชนิดหนึ่งที่อยู่ในวงศ์เดียวกับเงาะและลำไย Wang และคณะ (2015) ได้ศึกษาว่าลิ้นจี่นั้นเป็นผลไม้ที่มีกรดอินทรีย์ที่สำคัญเป็นกรด malic; อื่น ๆ ได้แก่ กรด tartaric, citric, ascorbic ก็ยังมีกรดไขมันที่สำคัญต่อร่างกายอีกด้วย เช่น กรดปาล์มิติก (plamitic acid) 12%, กรดไลโนเลอิก (linoleic acid) 11%, กรดโอเลอิก (oleic acid) 27% ซึ่งมีฤทธิ์ในการต่อต้านอนุมูลอิสระ และมีส่วนประกอบของน้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรุกโตสและน้ำตาลซูโครสเป็นหลัก โดยเป็นผลไม้ที่มีความชื้นค่อนข้างมากลิ้นจี่ที่คนส่วนมากรู้จัก (นิพนธ์, 2558; รวี, 2540) ได้แก่

2.1.1 พันธุ์ฮงฮวย เป็นพันธุ์ที่เจริญเติบโตเร็ว ออกดอกออกผลง่าย ลำต้นสีน้ำตาลอมเทาและบิดเวียนซ้ายเป็นคลื่นยาวๆ ซึ่งเป็นลักษณะประจำพันธุ์นี้ ช่วงข้อบนกิ่งห่าง ยอดอ่อนมีสีเขียวอมแดงจางๆ ทรงพุ่มรูปไข่และลำต้นค่อนข้างสูง ใบยาวรี โคนใบกว้าง ริมใบบิดเป็นคลื่น ปลายใบไม่ค่อยแหลม ใบมี 3 – 4 คู่ ผลออกเป็นช่อยาว ลักษณะผลทรงยาวรีคล้ายรูปไข่ เปลือกสีแดงอมชมพู รสหวานอมเปรี้ยวเล็กน้อย การให้ผลดกและค่อนข้างสม่ำเสมอไม่ค่อยเว้นปี แต่ข้อเสียของลิ้นจี่พันธุ์ฮงฮวยคือ เมล็ดมีขนาดค่อนข้างใหญ่เปลือกบางข้าง่าย และช้ำผลบางทำให้ผลร่วงง่าย

2.1.2 พันธุ์จักรพรรดิ ลักษณะประจำพันธุ์ ต้นมีทรงพุ่มใหญ่ ใบมีขนาดใหญ่ โคนใบกว้าง ค่อยๆ เรียวไปด้านปลายใบ มีสีเขียวเข้มเป็นมัน ผลทรงหัวใจกลม ขนาดใหญ่เปลือกหนามีสีแดงเข้ม ผิวหยาบหนามเรียบ มีขนาดใหญ่ห่าง เนื้อหนา มีสีขาวขุ่น ฉ่ำพน้ำ รสหวานเมล็ดมีขนาดโต สีน้ำเข้มพันธุ์นี้ต้องการอากาศเย็นจัด ฤดูกาลเก็บเกี่ยว เดือนพฤษภาคม – มิถุนายน

2.1.3 พันธุ์กิมเจง เป็นพันธุ์ที่ชอบอากาศเย็นจัด การเจริญเติบโตช้า ทรงพุ่มเตี้ยจนเกือบแบนมีส่วนกว้างมากกว่าส่วนสูง มีระยะของลำต้นจากพื้นดินถึงพุ่มสั้นมาก ลำต้นไม่บิด ข้อของกิ่งก้านสั้นมาก มีกิ่งเล็กๆ มาก ใบมีลักษณะเป็นรูปไข่ มีขนาดสั้นและแคบ มีใบ 1 – 3 คู่ ยอดอ่อนมีสีใกล้เคียงกับพันธุ์โอวเฮียะ แต่ออกเป็นสีแดงซีดหรือสีชมพู ข้อไม่ใหญ่แต่สั้น ลักษณะผลค่อนข้างกลม การติดผลค่อนข้างยาก

2.1.4 พันธุ์โอวเฮียะ เป็นพันธุ์ที่ชอบอากาศหนาวและความชื้นในดินสูง ลำต้นมีสีน้ำตาลแดงมักเป็นตะปุ่มตะป่ำ กิ่งเป็นมุมแคบกว่าพันธุ์ฮงฮวย ยอดอ่อนมีสีแดงเข้ม ทรงพุ่มเกือบจะกลม ใบสีเขียวเข้มเป็นมันเกือบดำ มีใบ 2 – 3 คู่ โคนใบและปลายใบเรียวแหลม หากพับครึ่งจะทับกันพอดี ลักษณะของผลคล้ายรูปหัวใจ เปลือกสีแดงคล้ำ เปลือกเปราะ รสหวาน เนื้อหนา เมล็ดมีขนาดเล็ก ข้อเสียของพันธุ์นี้คือ กิ่งเป็นมุมแคบ เพราะมุมยิ่งแคบกิ่งยิ่งฉีกง่าย

2.1.5 พันธุ์ค่อม หอมลำเจียก ค่อมพิเศษ ลำต้นและกิ่งมีลักษณะเรียบ สีผิวค่อนข้างไปทางสีน้ำตาลอ่อน ลำต้นสูงปานกลาง กิ่งแข็งแรง ทรงพุ่มค่อนข้างกลม ลักษณะใบแคบเรียว กลางใบพองออก ปลายใบเรียวแหลม ใบประกอบด้วยใบย่อยประมาณ 4 – 8 ใบ สีใบด้านบนเขียวเป็นมัน ด้านล่างมีสีนวลธรรมดา ก้านใบสีน้ำตาลอมแดง ขอบใบเป็นคลื่นเล็กน้อย แผ่นใบราบจนถึงห่อขึ้นข้างบนเล็กน้อย ปลายใบ

แหลม ผลมีขนาดใหญ่ กลม สีแดงเข้ม (แดงไม่สด) เปลือกกรอบบาง หนามห่างสั้นแหลม เนื้อหนา รสหวาน มีกลิ่นพิเศษ เนื้อแห้งสีขาวขุ่น เมล็ดเล็กเกือบแบน ปลายเมล็ดค่อนข้างใหญ่ เป็นพันธุ์ที่ติดผลง่าย

2.1.6 พันธุ์กะโหลกใบยาว ลิ้นจี่พันธุ์นี้ใบมีลักษณะยาวรี ใหญ่ ตรงกลางค่อนข้างพองออก ปลายแหลม แผ่นใบเรียบ ขอบใบเรียบ ใบย่อยจัดเรียงแบบตรงกันข้าม แต่อาจมีบางคู่เกิดไม่ตรงกัน ใบมีสีเขียวปนน้ำตาลเป็นมัน ท้องใบสีนวล ก้านใบสีน้ำตาล ลักษณะผลกลมขนาดใหญ่ หนามห่าง เปลือกสีน้ำตาลไหม้แห้ง เนื้อหนา รสหวานอมเปรี้ยว เมล็ดขนาดปานกลาง ออกผลง่าย ออกผลสม่ำเสมอ

2.1.7 พันธุ์สาแหรกทอง ลักษณะใบยาวรีและค่อนข้างเรียวยาว ปลายใบค่อนข้างแหลม แผ่นใบเรียบ ขอบใบบิดเป็นคลื่น ใบมีสีเขียวอ่อน ท้องใบสีเขียวฉ่ำวาวธรรมดา ก้านใบสีน้ำตาลปนแดง จำนวนใบย่อยในใบรวมมีตั้งแต่ 3 - 6 ใบ เส้นกลางใบมีสีเขียวเหลืองเห็นชัด ขนาดผลปานกลาง ใหลผลกว้างรูปหัวใจ หนามห่าง ปลายหนามแหลม เนื้อหนากรอบ รสหวาน ฝาดเล็กน้อย ไม่เปรี้ยว เปลือกผลมีสีชมพูเหลือง มีร่องระหว่างหนามเป็นทางยาวข้างผลคล้ายสาแหรก เมล็ดเล็กสั้น

2.2 ข้อมูลทางเคมี

2.2.1 ความชื้น (moisture content) (พิมพ์เพ็ญ และนิริยาม, 2562)

ความชื้น (moisture content) เป็นค่าที่บ่งชี้ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหาร เป็นสมบัติที่สำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งของอาหาร เนื่องจาก

ความชื้นมีผลต่อการเสื่อมเสียของอาหาร (food spoilage) โดยเฉพาะการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ (microbial spoilage) ซึ่งกระทบต่ออายุการวางจำหน่าย (shelf life) อาหารที่มีความชื้นหรือปริมาณน้ำสูงจะเป็นอาหารที่เสื่อมเสียง่าย (perishable food) เนื่องจากมีสภาวะเหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย เช่น แบคทีเรีย ยีสต์และรา

ความชื้นมีผลต่อความปลอดภัยทางอาหาร (food safety) อาหารที่มีน้ำสูงเหมาะกับการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen) และการสร้างสารพิษ (toxin) ที่ก่อให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ รวมถึงการสร้างสารพิษของรา (mycotoxin) เช่น aflatoxin และ patulin ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค

ความชื้นมีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงความร้อนของอาหารด้านต่างๆ เช่น จุดหลอมเหลว จุดเดือด การนำความร้อน (thermal conductivity) ความร้อนจำเพาะ (specific heat)

ความชื้นมีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส ซึ่งมีผลต่อการยอมรับของอาหาร ได้แก่ เนื้อสัมผัส (texture) เช่น ความกรอบความหนืด (viscosity) การเกาะติดกันเป็นก้อน (caking)

ความชื้นมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ที่มีผลกระทบทางลบต่ออาหารระหว่างการเก็บรักษา เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (lipid oxidation)

ความชื้นมีผลต่อการกำหนดราคาสินค้า เช่น ข้าว เมล็ดธัญพืช กำหนดราคาซื้อขายผันแปรตามปริมาณความชื้น

2.2.1.1 การแสดงค่าความชื้นของอาหาร
ปริมาณความชื้น นิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์มี 2 รูปแบบคือ

2.2.1.1.1 ความชื้นฐานเปียก (wet basis) เป็นค่าความชื้นที่มักใช้ในทางการค้า เป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ความชื้นโดยทั่วไปในชีวิตประจำวัน มักบอกเป็นเปอร์เซ็นต์

2.2.1.1.2. ความชื้นฐานแห้ง (dry basis) เป็นค่าที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง (dehydration) เพราะช่วยให้คำนวณได้สะดวก เนื่องจากน้ำหนักแห้งของอาหารจะคงที่ อาจบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ หรือ จำนวนกรัมของน้ำต่อจำนวนกรัมของของแข็ง (g H₂O/ g solid)

2.2.1.2 การวัดความชื้นของอาหาร

น้ำที่มีอยู่ในอาหารแต่ละชนิดมีการยึดติดอยู่ในโครงสร้าง หรือโมเลกุลของสารอื่นๆ ที่เป็นส่วนประกอบของอาหารในรูปแบบ และความแข็งแรงต่างกัน ทำให้เทคนิคที่ใช้สำหรับการหาความชื้นของอาหารแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ทั้งความยากง่าย ความซับซ้อนของอุปกรณ์ และความถูกต้องแม่นยำของค่าที่ได้ วัตถุประสงค์หลักของบทนี้จึงเป็นการแนะนำให้รู้จักวิธีการหาความชื้นในอาหารแบบต่างๆ ข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี เพื่อสามารถเลือกนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม

2.2.1.2.1 การวัดความชื้นโดยตรง (direct method) เป็นการวัดปริมาณที่มีอยู่ในอาหารโดยตรง สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การแยกเอาน้ำออกด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น การอบแห้งทำให้น้ำระเหยออกไป การกลั่นแยกเอาน้ำออกจากอาหาร หรือการใช้วิธีการทางเคมี โดยการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับน้ำ เป็นต้น วิธีการวัดโดยตรงเป็นการวัดที่ทำหลายตัวอย่าง แต่ละวิธีจะมีความถูกต้องแตกต่างกัน วิธีที่มีการยอมรับกันทั่วไปว่ามีความถูกต้องแม่นยำสูง จะนิยมใช้เป็นค่าความชื้นมาตรฐานเพื่อใช้ปรับเทียบค่าที่ได้จากการวัดด้วยวิธีการอื่นๆ ก่อนนำค่าที่ได้ไปใช้ประโยชน์

Karl fischer method การทำปฏิกิริยาเคมี (chemical reaction)

การวิเคราะห์ความชื้นด้วยการอบแห้ง

การวิเคราะห์ความชื้นด้วยการกลั่น (distillation) นำตัวอย่างเมล็ดพืชที่บดเป็นแป้งผสมกับตัวทำละลายโทลูอีน (toluene) แล้วนำไปต้ม น้ำจะระเหยออกมาและควบแน่นเป็นหยดน้ำ ซึ่งวัดเป็นปริมาตรและน้ำหนักได้

การใช้รังสีอินฟราเรดหรือคลื่นไมโครเวฟ (infrared and microwave radiation) เป็นการใช้รังสีอินฟราเรดหรือคลื่นไมโครเวฟ เพื่อระเหยน้ำในแบ่งที่ได้จากการบดตัวอย่างเมล็ดพืช

วิธีวัดความชื้นเหล่านี้มีจุดเด่นที่ให้ผลการวัดถูกต้อง แต่จุดด้อยสำคัญคือ อุปกรณ์และเครื่องมือมีราคาแพง การใช้งานต้องเตรียมอุปกรณ์หลายชิ้น และการวัดแต่ละครั้งใช้เวลานาน

2.2.1.2.2 การวัดโดยอ้อม (indirect methods) เป็นการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของ เมล็ดพืชด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น วัดค่าความจุไฟฟ้า การวัดความชื้นโดยทางอ้อมมีจุดเด่นตรงรู้ผลเร็ว สะดวก และทำได้บ่อย จุดด้อยคือ ค่าที่ได้จากการวัดเป็นค่าโดยประมาณการ การวัดโดยอ้อมวัดได้หลายวิธี เช่นกันคือ

2.2.1.2.2.1 การวัดความต้านทานไฟฟ้า (resistance) อุปกรณ์วัดความต้านทานไฟฟ้าของเมล็ดพืช ทำได้โดยบรรจุเมล็ดพืชตัวอย่างลงช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าในภาชนะปิดแน่น ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จะแปรเป็นค่าปริมาณความชื้น

2.2.1.2.2.2 ความจุไฟฟ้า (capacitance) ตัวอย่างจะถูกบรรจุในภาชนะปิด โดยผนังภาชนะทำหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าความถี่สูงออกมา การวัดวิธีนี้จำเป็นต้องใช้ตารางคาลิเบรชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(calibration) ประกอบด้วยค่าความชื้นที่ได้จากการวัดด้วยวิธีนี้จะมีค่าแม่นยำมากกว่าการวัดจากค่าความต้านทานไฟฟ้า

2.2.1.2.3 ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) เป็นวิธีหาค่าความชื้นในเมล็ดพืชจากการวัดความชื้นสัมพัทธ์ในช่องอากาศระหว่างเมล็ด เนื่องจากปริมาณความชื้นในเมล็ดจะทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในช่องอากาศระหว่างเมล็ดเปลี่ยนแปลง ซึ่งความถูกต้องของค่าความชื้นที่วัดได้จากวิธีนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการกระจายตัวของความชื้น ดังนั้นการวัดด้วยวิธีนี้ต้องรอเวลานานประมาณ 1-2 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นสัมพัทธ์ในช่องอากาศต่างๆ เกิดสมดุลก่อนวัดเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

2.2.1.2 วัดปริมาณความชื้นได้ (AOAC, 2000) โดยทำการอบภาชนะสำหรับหาความชื้นใน hot air oven ที่อุณหภูมิ 105 °C นาน 2 ชั่วโมง นำออกจาก hot air oven ใส่ไว้ใน desiccator ปลดปล่อยทิ้งไว้ จนกระทั่งภาชนะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จดบันทึกค่าที่ได้ชั่งตัวอย่างที่ต้องการหาความชื้นใส่ลงในภาชนะที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน แล้วจดบันทึกค่า นำไปอบใน hot air oven ที่อุณหภูมิ 105 °C นาน 60 ชั่วโมง นำออกจาก hot air oven ใส่ไว้ใน desiccator ปลดปล่อยทิ้งไว้ แล้วนำมาชั่งน้ำหนักภาชนะพร้อมตัวอย่าง บันทึกค่าที่ได้ คำนวณค่าความชื้นจากสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น} = \frac{\text{ผลต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบและหลังอบ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)}} \quad (2.1)$$

2.2.2 ของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (total soluble solid, TSS) (พิมพ์เพ็ญ และนิริยาม, 2562)

ของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (total soluble solid, TSS) หมายถึง ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดใช้บ่งชี้ความเข้มข้นของอาหารเหลว เช่น น้ำเชื่อม น้ำผลไม้เข้มข้น

ของแข็งที่ละลายได้ในน้ำคั้นจาก ผัก ผลไม้ เป็นผลรวมของของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ได้แก่ น้ำตาลชนิดต่างๆ เช่น น้ำตาลซูโครส น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรักโทส กรดอินทรีย์ เช่น กรดซิตริก กรดแล็กติก และแร่ธาตุต่างๆ สามารถใช้ เป็นดัชนีวัดความแก่อ่อน (maturity index) ของผักผลไม้

2.2.2.1 การวัดค่า TSS

ในน้ำผลไม้ หรือน้ำผลไม้เข้มข้น อนุโลมให้ใช้การวัดค่าด้วย refractometer มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร หากเป็นสารละลายน้ำตาลหรือน้ำเชื่อม มีหน่วยเป็นองศาบริกซ์ (°Brix) หรือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อน้ำหนัก

2.2.3 Titratable acidity (พิมพ์เพ็ญ และนิริยาม, 2562)

Titrate acidity คือการวัดปริมาณกรดทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหาร โดยการไทเทรต ด้วยสารละลายต่างมาตรฐาน (NaOH) เช่น น้ำผลไม้ น้่านม ไวน์ ซึ่งกรดในอาหารมีความสัมพันธ์กับรสเปรี้ยว (sour) ของอาหาร

กรดในอาหารอาจประกอบด้วยกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น กรดซิตริก (citric acid) กรดมาลิก (malic acid) กรดแล็กติก (lactic acid) กรดทาร์ทาริก (tartaric acid)

ผลการไทเทรตบ่งชี้ถึงปริมาณกรดอินทรีย์ทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่าง เช่น

ไวน์ มี tartaric acid เป็นองค์ประกอบหลักจะ แสดงค่าเป็นกรัมต่อลิตร (g/L) tartaric acid equivalent
นมเปรี้ยว มี lactic acid เป็นองค์ประกอบหลัก จะแสดงค่าเป็น g/L lactic acid equivalent
น้ำผลไม้ เช่น น้ำส้มคั้น มี citric acid เป็นองค์ประกอบหลัก จะแสดงค่าเป็น g/L citric acid equivalent

โดยนำตัวอย่างปริมาณ 5 มิลลิลิตร มาไตเตรทด้วยสารละลายต่างมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) ความเข้มข้น 0.1 N โดยการไตเตรทจนถึงจุดยุติหรือเกิดสีชมพู บันทึกปริมาตรของสารละลายต่างมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้มาคำนวณหาปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ตามสูตร

$$\%acid = \frac{[mls\ NaOH\ used] \times [0.1N\ NaOH] \times [milliequivalent\ factor] \times 100}{grams\ of\ sample} \quad (2.2)$$

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงถึง Milliequivalent factor ของกรดแต่ละชนิด

Commodity	Predominant Acid	Milliequivalent Factor
Stone fruit, apples, kiwifruit	Malic Acid	0.067
Citrus	Citric Acid	0.064
Grapes	Tartaric Acid	0.075

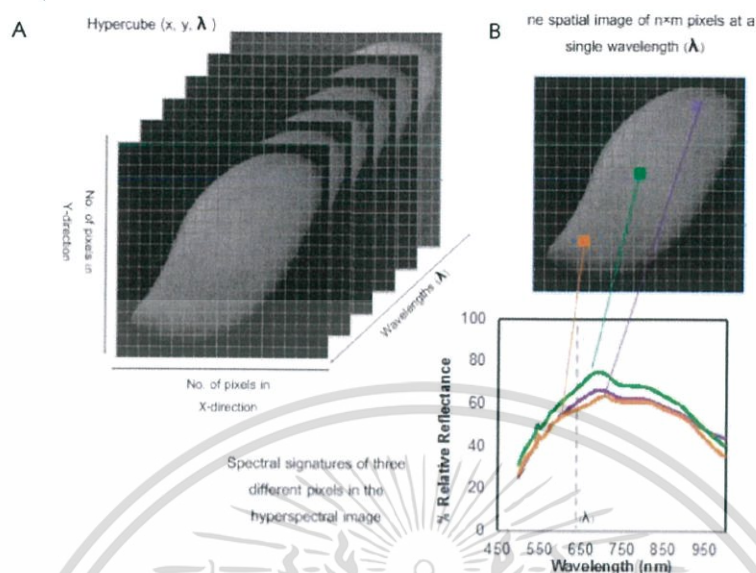
ที่มา: Garner และคณะ (2005)

กรดอินทรีย์ที่สำคัญในลิ้นจี่เป็นกรด malic โดยมีกรดอื่นๆ ได้แก่ กรด tartaric, citric และ ascorbic ซึ่งระดับกรด malic จะเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเริ่มแรกของการเจริญเติบโตแล้วตามมาด้วยการลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากผลไม้เริ่มโตเต็มที่ (Wang และคณะ, 2015)

2.3 การทดสอบคุณภาพด้วยวิธีการไม่ทำลาย

2.3.1 เทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัม HSI

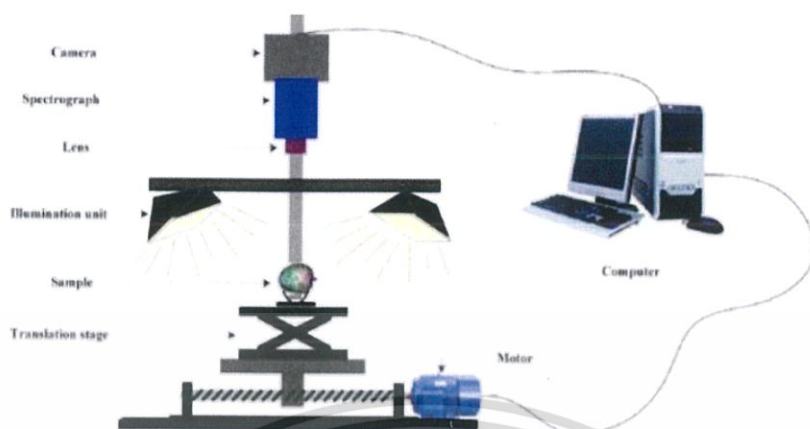
เป็นวิธีการถ่ายภาพร่วมกับเทคนิคสเปกโทรสโกปีซึ่งการถ่ายภาพด้วยเทคนิค HSI จะได้ข้อมูลภาพถ่ายและข้อมูลเชิงสเปกตรัมในเวลาเดียวกันโดยภาพถ่ายสเปกตรัมจะได้ข้อมูลเป็นภาพถ่าย 3 มิติเรียกว่า hypercube ประกอบไปด้วยข้อมูลเชิงพื้นที่ 2 มิติแสดงภาพถ่ายที่มีความกว้างและความยาวเท่ากับจำนวนพิกเซลในแนวแกน X และแกน Y ตามลำดับ และภาพถ่ายสเปกตรัมในแต่ละความยาวคลื่น (แกน λ) แสดงดังภาพที่ 2.1A ซึ่งในแต่ละ พิกเซลของภาพถ่ายเชิงสเปกตรัมจะมีข้อมูลสเปกตรัมที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของตัวอย่างที่ ต้องการศึกษา (ภาพที่ 2.1B) (Wu and Sun, 2013)



ภาพที่ 2.1 ข้อมูลภาพถ่าย 3 มิติ หรือ hypercube (A) และสเปกตรัมที่ได้ในแต่ละพิกเซล (B) ของการถ่ายภาพด้วยเทคนิค HSI
ที่มา: Wu and Sun (2013)

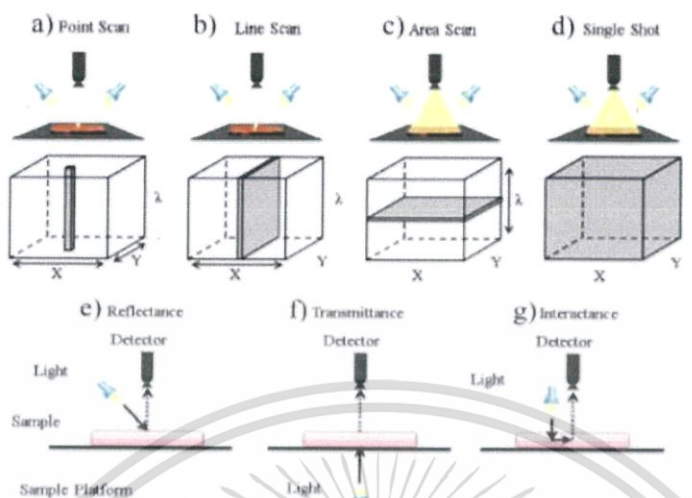
องค์ประกอบหลักของ HSI ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสงโดยทั่วไปนิยมใช้ halogen lamps, light emitting diodes และ lasers ในการเลือกใช้ชนิดของแหล่งกำเนิดแสงนั้นขึ้นอยู่กับช่วงของความยาวคลื่นของแสงจากแหล่งกำเนิดและช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการจะศึกษาโดยจะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าเลือกความยาวคลื่น เช่น filter wheels, imaging spectrographs, fourier transform imaging spectrometers และ single shot imagers เพื่อแยกแสงออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆกัน และบันทึกภาพถ่ายด้วยเครื่องตรวจจับสัญญาณภาพทำหน้าที่บันทึกความเข้มแสงที่ได้ โดยทั่วไปนิยมใช้ CCD detector และ CMOS detector โดยอุปกรณ์เหล่านี้ จะประกอบอยู่ภายในกล้อง HSI นอกจากนี้ ยังมีกระจกสำหรับกระจายแสงและคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการถ่ายภาพ และการวิเคราะห์ผล แสดงดังภาพที่ 2.2 (Yang และคณะ, 2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่อง HSI
ที่มา: Yang และคณะ. (2015)

การถ่ายภาพด้วยเทคนิค HSI แสงจากแหล่งกำเนิดแสง (ช่วงความยาวคลื่น 450 – 1000 nm) ตกกระทบสู่ตัวอย่าง แสงบางส่วนถูกตัวอย่างดูดกลืนแล้วเกิดการสะท้อนกลับเข้าสู่เลนส์ไปยัง spectrographs ที่ทำหน้าที่แยกแสงและเปลี่ยนเป็นสัญญาณความถี่ซึ่งสัญญาณจะถูกบันทึกด้วย CCD detector โดยระบบการถ่ายภาพ HSI แบ่งเป็น 4 แบบ แสดงดังภาพที่ 2.3 ได้แก่ การถ่ายภาพ แบบ single point วิธีนี้จะทำการถ่ายภาพที่ 1 พิกเซลและจะได้สเปกตรัมที่พิกเซลนี้เพียงอย่างเดียว ถ้าต้องการข้อมูลบริเวณอื่นให้เปลี่ยนตำแหน่งตัวตรวจรับข้อมูลหรือตำแหน่งตัวอย่างไปบริเวณที่ต้องการวัดตามแนวแกน X และ Y (ภาพที่ 2.3a) แบบที่ 2 คือ การถ่ายภาพแบบ line scanning จะ ได้ hypercube เป็นเส้นตามแนวแกน X วิธีนี้นิยมใช้กันในการวัดคุณภาพแบบต่อเนื่อง เนื่องจากตัวอย่างที่วัดจะเคลื่อนที่ไปตามสายพาน (ภาพที่ 2.3b) วิธีการข้างต้นจะได้ข้อมูลเชิงพื้นที่บางส่วนการถ่ายภาพแบบ area scanning หรือ plane scanning (ภาพที่ 2.3c) จะได้ข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ความยาว คลื่นเดียวในการถ่ายเพียงครั้งเดียว และวิธีการถ่ายภาพแบบ single shot (ภาพที่ 2.3d) จะให้ข้อมูลเชิงพื้นที่ทั้งหมดของในทุกๆความยาวคลื่นของการถ่ายภาพเพียงครั้งเดียว ซึ่งข้อมูลที่ได้จะมีปริมาณมากดังนั้นเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ที่ใช้จึงต้องมีสมรรถนะเพียงพอต่อการถ่ายภาพ นอกจากนี้ระบบที่ใช้ในการตรวจจับภาพมีทั้งหมด 3 แบบ คือ แบบสะท้อนกลับ (ภาพที่ 2.3e) แบบส่องทะลุผ่าน (ภาพที่ 2.3f) และแบบ interactance (รูปที่ 2.3g)



ภาพที่ 2.3 ระบบการถ่ายภาพ HSI (ลูกศรและพื้นที่สีเทาบอกถึงข้อมูลที่ได้มาในแต่ละครั้ง) และ ระบบการตรวจจับภาพ

ที่มา: Wu and Sun (2013)

เทคนิค HSI สามารถวิเคราะห์ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพได้โดยวิธีการสร้างสมการมีวิธีที่คล้ายกับเทคนิค NIRS แต่เทคนิค HSI จะต้องมีขั้นตอนในการสกัดเส้นสเปกตรัมจากภาพถ่ายเชิงสเปกตรัมด้วยซอฟต์แวร์ที่เหมาะสม โดยจะมีการสกัดข้อมูลสเปกตรัมจากตำแหน่งของภาพถ่ายใน ตำแหน่งที่สนใจหรือมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบที่ต้องการศึกษา (region of interest, ROI) จะได้ สเปกตรัมเฉลี่ยตลอดช่วงความยาวคลื่นของการถ่ายภาพ จากนั้นจึงนำข้อมูลสเปกตรัมที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากวิธีมาตรฐาน เนื่องจากปริมาณข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัมมี ขนาดใหญ่มากและข้อมูลภาพมีความสัมพันธ์ขององค์ประกอบที่ซับซ้อนจึงต้องอาศัย chemometric algorithms ในการปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการนำไปใช้สร้างสมการทำนาย (He and Sun, 2015; Wu and Sun, 2013)

2.3.2 near infrared spectroscopy (NIRs)

near infrared เกิดจากที่สารดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง near Infrared คือ 785-2650 นาโนเมตร ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นที่มีความถี่สูง โมเลกุลจะถูกกระตุ้นจาก ground vibration level ไปยัง excited vibration level ปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสง (absorbance) เป็นไปตามกฎของ เบียร์-แลมเบิร์ต พลังงานของคลื่นแสงเมื่อผ่านเข้าไปในตัวอย่างพลังงานจะถูกดูดกลืนไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง ความเข้มของแสงที่ผ่านออกมาโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีนั้น (Osborne และคณะ, 1993) สารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้จะมี H-atom เป็นองค์ประกอบ เช่น O-H พบในแป้ง น้ำ น้ำตาล

หลักการโดยพื้นฐานของเครื่องสเปกโตรสโคปี คือ เมื่อลำแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุจะมีแสงบางส่วนถูกดูดกลืน (absorbed) บางส่วนทะลุผ่านออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(transmitted) บางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ (reflected) บางส่วนเกิดการรบกวนแสงหรือเกิดการเรืองแสง และบางส่วนอาจเกิดการกระเจิงแสงในการดูดกลืนแสงย่านอินฟราเรดของโมเลกุลสารอินทรีย์ (นิพนธ์ , 2545) ช่วงคลื่นอินฟราเรดสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 3 ช่วง ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงถึงการแบ่งช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด

ช่วงคลื่น	Characteristic transition	ความยาวคลื่น (mm)	เลขคลื่น(cm^{-1})
อินฟราเรดย่านใกล้ (near IR, NIR)	Overtone combination	780-2500	12800-400
อินฟราเรดย่านกลาง (Mid IR, MIR or Fundamental IR)	Fundamental vibration	2500-5 $\times 10^4$	4000-200
อินฟราเรดย่านไกล (Far IR)	Rotation	5 $\times 10^4$ -10 6	200-100

ที่มา: Osborne และคณะ (1993)

หลักการวัดของเครื่อง NIRS มีด้วยกันหลายเทคนิคคือ

2.3.3.1. transmission เป็นการวัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมาในด้านตรงกันข้ามกับด้านที่แสงตกกระทบ

2.3.3.2. reflection แสงตกกระทบที่พื้นผิวของตัวอย่าง วัดปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาโดยรวม

ถึงแสงที่สะท้อนจากเนื้อตัวอย่างส่วนที่ใกล้ผิวตัวอย่างได้อีกด้วย

2.3.3.3. transfection แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบตัวอย่าง ผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบแผ่นเซรามิก ทอง หรืออะลูมิเนียมในชั้นใต้สุดแล้วสะท้อนกลับมายัง detector

2.3.3.4. Interaction ใช้ในกรณี fiber optics probe แสงจากแหล่งกำเนิดแสง ย่าน NIR ส่องผ่านลง มายังตัวอย่างในวงแหวนด้านนอก แล้วแสงที่สะท้อนออกมาจากเนื้อตัวอย่างถูกส่งไปยัง detector บริเวณส่วนกลาง

2.3.3 NIR hyperspectral imaging

เป็นการพัฒนาเทคนิคด้าน NIRs แบบใหม่โดยการนำเทคนิคการวิเคราะห์ภาพ (image analysis) มาร่วมใช้วิเคราะห์ควบคู่ไปกับการวิเคราะห์การดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรดของตัวอย่าง เป็นการวิเคราะห์สเปกตรากันจำนวนมากไปพร้อมๆกับตัวแปรอิสระจำนวนมากแทนการใช้สเปกตรัมเฉลี่ยในแต่ละตัวอย่าง โดยพิจารณาจากแต่ละจุดพิกเซลของภาพของตัวอย่างที่ทำการตรวจวัดเป็นการเชื่อมโยงข้อมูลภาพของตัวอย่าง ค่าทางฟิสิกส์ ค่าทางเคมี มาพิจารณากับสเปกตรากการดูดกลืนพลังงานแสงในย่านใกล้อินฟราเรด (Teerachaichayut และHo, 2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การปรับแต่งข้อมูลก่อนการวิเคราะห์

ปัจจัยที่มีผลต่อสเปกตรัมของตัวอย่างได้แก่ความชื้นและขนาดอนุภาค (Particle size) ซึ่งจะทำให้สเปกตรัมที่ได้มีความแตกต่างกันอันเนื่องมาจากสภาพกระเจิงแสงและความแตกต่างที่เป็นผลมา จากความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการวัด ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความแตกต่างในผลเชิงบวก (Additive scattering) สเปกตรัมเพิ่มขึ้นตามตลอดช่วงความยาวคลื่น หรือผลเชิงคูณ (Multiplicative scattering) สเปกตรัมเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสูงขึ้น นอกจากนี้สเปกตรัมที่ได้จากการดูดกลืนแสงใน ย่านใกล้อินฟราเรดเป็นสเปกตรัมที่มีการเหลื่อมซ้อนทับกันอยู่ (Overlapping band) ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงนำไปปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ก่อน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนให้น้อยลงมีวิธีคือ

2.4.1 วิธี Smoothing เป็นการหาค่าเฉลี่ยคลื่นโดยมีการแทนค่าการดูดกลืนแสง แต่ละความยาวคลื่น ด้วยค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีจุดศูนย์กลางของช่วง ความยาวคลื่นตรงกับจุดที่ถูกแทนที่ ต่อจากนั้นเลื่อนช่วงไปหนึ่งความยาวคลื่น แล้วคำนวณซ้ำจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ซึ่งสามารถลดปัญหาของสัญญาณรบกวนต่อค่าการดูดกลืนแสง โดยจะได้สเปกตรัมที่มีลักษณะเหมือนสเปกตรัมดั้งเดิมแต่จะเรียบสม่ำเสมอมากกว่า (Siesler และคณะ 2002)

2.4.2 การแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์ (derivative transformation) เป็นวิธีการแก้ปัญหา การซ้อนทับกันของจุดยอดในสเปกตรัมและการเลื่อนขึ้นของสเปกตรัมทั้งแบบเบสไลน์ออฟเซต (baseline offset) ซึ่งทำให้สเปกตรัมเลื่อนขึ้นตามแนวตั้ง และแบบเบสไลน์ชิฟต์เชิงเส้น (linear baseline shift) ซึ่งทำให้สเปกตรัมเอียงขึ้นไปทางขวาที่ความยาวคลื่นสูง โดยการคำนวณค่าอนุพันธ์ อันดับหนึ่ง (first derivative) หรือค่าความชัน (slope) ของสเปกตรัมที่แต่ละความยาวคลื่น เพื่อแยก จุดยอดที่เหลื่อมซ้อนกันของสเปกตรัมออกจากกัน และลดผลกระทบที่ ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้น ตลอดช่วงความยาวคลื่น และค่าอนุพันธ์อันดับสอง (second derivative) หรือการคำนวณหาการ เปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัม ทำโดยคำนวณผลลบของค่าที่ได้จากอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่ติดกัน ทำให้จุดยอดที่เหลื่อมซ้อนกันแยกตัวออกจากกัน เช่นเดียวกับการคำนวณอนุพันธ์อันดับหนึ่ง แต่จุดยอดจะกลับหัวและมีความชัดเจนมากกว่า การแปลงค่าอนุพันธ์อันดับสองได้รับความนิยมมากกว่า อนุพันธ์อันดับหนึ่ง เนื่องจากอนุพันธ์อันดับสองให้จุดยอดตรงกับจุดยอดของสเปกตรัมดั้งเดิม (อนุพันธ์, 2552)

2.4.3 Multiplicative scatter correction (MSC) สเปกตรัมที่ได้จากการวัดการ ดูดกลืนย่านแสง NIRs แบบ Diffuse reflectance และแบบTransmission มักจะเกิดการกระเจิงแสง (Scatter light) ดังนั้นได้มีการใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า MSC มาปรับแต่งสเปกตรัม เป็นการหา ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสเปกตรัมเพื่อลดอิทธิพลของการกระเจิงของแสง ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ใน การลดค่าผิดพลาด Barnes และคณะ (1989) ใช้NIRs แบบวัดการสะท้อนกลับของแสง เพื่อหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดพืช โดยแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี MSC พบว่ามีค่าผิดพลาด ของสมการต่ำกว่าสมการของสเปกตรัมดั้งเดิม (Original spectrum)

2.4.4 การปรับแก้ความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (vector normalization, SNV) เป็นวิธีการกำจัดอิทธิพลของการกระเจิงแสงออกจากสเปกตรัมโดยการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน เนื่องจาก

การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของอนุภาคตัวอย่างทำให้เกิดสเปกตรัมที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าเกิดการกระเจิงแสงที่สูงและเป็นสาเหตุให้เกิดความแปรปรวนส่วนใหญ่ในข้อมูลที่วัดได้ การปรับแก้แบบ SNV จะแตกต่างจากวิธี MSC โดยไม่จำเป็นต้องใช้สเปกตรัมอ้างอิงเหมือนในวิธี MSC ที่ใช้สเปกตรัมเฉลี่ยเป็นค่าอ้างอิง วิธี SNV สเปกตรัมแต่ละเส้นจะถูกปรับแก้โดยปรับค่าการ ดูดกลืนให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน (normalization) (อนุพันธ์, 2552)

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ยังไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายค่าองค์ประกอบของตัวอย่างที่ต้องการทราบได้ทันที จำเป็นต้องใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัมหรือค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากการวัด ตัวอย่างด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ และสร้างแบบจำลองหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดที่ได้กับค่าองค์ประกอบของตัวอย่างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (reference หรือ standard method) (ธงชัย และคณะ, 2552) ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี แสดงในภาพที่ 2.4

ในการสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายค่าองค์ประกอบของตัวอย่างโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีนั้น จะต้องใช้กลุ่มตัวอย่างที่ทราบปริมาณองค์ประกอบที่ต้องการทำนายและข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดของตัวอย่างเหล่านั้น การสร้างแบบจำลองจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ 1. ขั้นตอนการทำแคลิเบรชัน (calibration) หรือการสร้างแบบจำลองที่ใช้ทำนายเป็นการสร้างสมการมาตรฐานที่ใช้ในการทำนายค่าองค์ประกอบที่ต้องการทราบของตัวอย่าง แบบจำลองที่สร้างขึ้นได้เรียกว่า “แบบจำลองแคลิเบรชัน” (calibration model) และ 2. ขั้นตอนการทำแวลิดชัน (validation) เป็นขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของแบบจำลองแคลิเบรชันหรือสมการมาตรฐานที่สร้างขึ้นมา เมื่อได้ผลการตรวจสอบที่น่าเชื่อถือจึงนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ทำนายค่าองค์ประกอบของตัวอย่างที่ต้องการศึกษาจากสเปกตรัมที่วัดได้จาก เครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ต่อไป (ธงชัย และคณะ, 2552)

2.5.1 การทำแคลิเบรชัน (calibration)

ในการสร้างแบบจำลองแคลิเบรชัน ค่าที่อ่านได้จากสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดของตัวอย่าง (ค่า $\log(1/R)$) หรือข้อมูลเชิงแสง (NIR data) ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรอิสระ (independent variables) หรือตัวแปร X และค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (reference data) ถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรตาม (dependent variables) หรือตัวแปร Y จากนั้น สร้างแบบจำลองจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X และ Y โดยค่าของตัวแปร X อาจนำมาจากทุกๆ ค่าของความยาวคลื่นที่ทำการศึกษา (full spectrum) หรือค่าที่อ่านจากความยาวคลื่นใดคลื่นหนึ่ง (fixed wavelength) หรือค่าจากบางความยาวคลื่นที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์ (selected wavelength) ซึ่งค่าของตัวแปร X หรือค่าสเปกตรัมที่นำมาใช้อาจไม่ผ่านการปรับแต่ง (raw spectra data) หรือผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ (pretreated spectral data) เพื่อให้ข้อมูลของตัวแปร X มีความสัมพันธ์กับตัวแปร Y มากขึ้น โดยการสร้างแบบจำลองแคลิเบรชันสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ข้อมูลได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ วิธีการทางสถิติที่นิยมใช้สร้างแบบจำลอง ได้แก่ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal components

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

analysis, PCA) การถดถอยโดยใช้องค์ประกอบหลัก (principal components regression, PCR) และการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (partial least square regression, PLSR) (Sirisomboon และคณะ, 2012; รัชชัย และปิติพร, 2552)

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal components analysis, PCA) เป็นวิธีการหนึ่งทางสถิติในการวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัว (multivariate analysis) โดยใช้เทคนิคการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) ด้วยการแบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่ที่เรียกว่า ปัจจัย (factors) หรือองค์ประกอบ (principal components, PC) ซึ่งปัจจัย หรือองค์ประกอบหลักนั้นจะต้องมีจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนตัวแปรเดิม (รัชชัย และปิติพร, 2552)

การถดถอยโดยใช้องค์ประกอบหลัก (principal components regression, PCR) จะเริ่มจากการทำ PCA ของข้อมูลตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) ที่ได้จากข้อมูลของสเปกตรัมเพื่อลดจำนวนตัวแปรเดิมลงโดยการสร้างตัวแปรใหม่ (ปัจจัยหรือองค์ประกอบ) จากนั้นนำค่าของตัวแปรใหม่ที่สร้างขึ้นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) ที่ได้จากวิธีมาตรฐาน เพื่อสร้างแบบจำลองแคลิเบรชันโดยใช้หลักการของการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multivariate regression analysis) (รัชชัย และปิติพร, 2552)

การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (partial least square regression, PLSR) เป็นวิธีที่ใช้การวิเคราะห์หลายตัวแปร (multivariate analysis) โดยการลดจำนวนตัวแปร เช่นเดียวกับวิธี PCR แต่แตกต่างจาก PCR ในช่วงการจัดกลุ่มลดจำนวนตัวแปร โดยการสร้างตัวแปรใหม่ด้วยวิธี PLSR นั้นจะมีการนำข้อมูลตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) เข้ามาร่วมในการสร้างตัวแปรใหม่ที่ เรียกว่า ค่าคะแนนปัจจัย (factor loading) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม จะเห็นได้ว่า PLSR เป็น กระบวนการขั้นตอนเดียวไม่จำเป็นต้องทำขั้นตอน regression อีก ในขณะที่วิธีการ PCR นั้น ค่าคะแนนปัจจัยที่สร้างขึ้นมีความเกี่ยวข้องกับข้อมูลตัวแปรเดิมในสเปกตรัมเท่านั้นจำเป็นต้องนำค่าคะแนนปัจจัยที่ได้ไปหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตามโดยการทำ regression อีกครั้ง ก่อนนำไปใช้ในการทำนายค่าตัวแปรตาม การประยุกต์ใช้ PLSR เพื่อสร้างแบบจำลองแคลิเบรชันสามารถทำได้ 2 วิธี คือ PLS1 เป็นการสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายค่าตัวแปรตามเพียง 1 ตัว โดยใช้แบบจำลอง 1 แบบจำลอง และ PLS2 เป็นการสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายค่าตัวแปรตามหลายตัวแปรโดยใช้ สมการเดียวกัน ซึ่งการสร้างแบบจำลองด้วยวิธี PLS1 นั้นจะให้ค่าความถูกต้องของการทำนายดีกว่าวิธี PLS2 (รัชชัย และปิติพร, 2552)

การรู้จำแบบรูปภายใต้การควบคุมดูแล (supervised pattern recognition) เป็นวิธีทางสถิติหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ โดยการจำแบบรูป (pattern recognition) ที่ต้องทราบรายละเอียด เช่น กลุ่ม ชนิด หรือเกรด ของตัวอย่างก่อนนำมาสร้างแบบจำลองสำหรับแบ่งกลุ่ม (classification model) โดยวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดในการสร้างแบบจำลองสำหรับแบ่งกลุ่ม ได้แก่ partial least square-discriminant analysis (PLS-DA) และ soft independent modeling of class analogy (SIMCA) (รัชชัย และปิติพร, 2552)

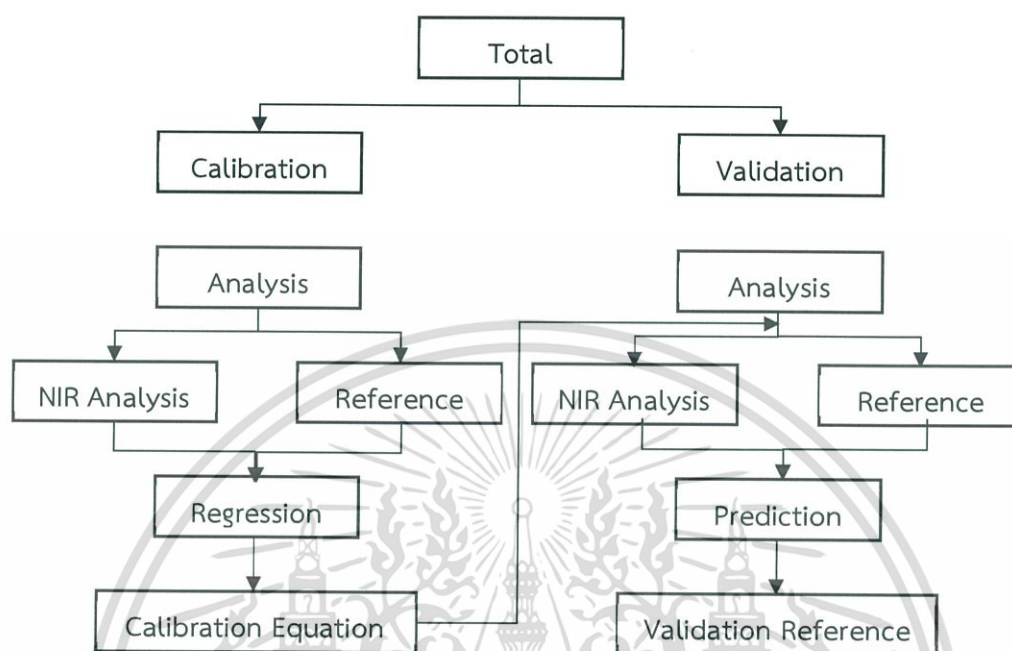
2.5.2 การทำแวลิดชัน (validation)

หลังจากได้แบบจำลองแคลิเบรชันที่เหมาะสมแล้ว ต้องทดสอบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้ทำนายข้อมูลชุดอื่นที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันได้หรือไม่ การทำแวลิดชันหรือการทดสอบที่นิยมใช้ คือ การทำ full cross validation และการทดสอบแบบชุดทดสอบ (test set validation) (Williams, 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำ full cross validation เป็นการทดสอบแบบจำลองภายใน (internal validation) เหมาะกับการใช้ทดสอบกลุ่มตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ที่มีจำนวนน้อย เช่น น้อยกว่า 100 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่นำมาทดสอบแบบจำลองเป็นตัวอย่างเดียวกับตัวอย่างชุดมาตรฐานทั้งหมดที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองแคลิเบรชัน การทดสอบเริ่มจากตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐานทั้งหมดที่ใช้สร้างแบบจำลอง แล้วนำตัวอย่างที่เหลือสร้างแบบจำลองแคลิเบรชัน นำแบบจำลองที่ได้มาประเมินค่าทางองค์ประกอบของตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ที่ตัดออก จากนั้นใส่ตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 กลับคืนแล้วตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 2 ออกจากชุดตัวอย่าง นำตัวอย่างที่เหลือสร้างแบบจำลองแคลิเบรชัน และนำแบบจำลองที่ได้มาประเมินค่าทางองค์ประกอบของตัวอย่าง มาตรฐานตัวที่ 2 ที่ตัดออก ทำขั้นตอนซ้ำเช่นเดียวกับตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 และ 2 จนครบทุก ตัวอย่างมาตรฐาน แล้วพิจารณาค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้ (root mean square error of cross validation, RMSECV) (Williams, 2007)

การทดสอบแบบชุดทดสอบ (test set validation) เป็นการทดสอบแบบจำลองภายนอก (external validation) ว่าแบบจำลองแคลิเบรชันที่สร้างขึ้นจากข้อมูลของตัวอย่างชุดมาตรฐานนั้นสามารถทำนายข้อมูลของตัวอย่างชุดอื่นที่เป็นประชากรกลุ่มเดียวกันได้หรือไม่ โดยใช้ตัวอย่างชุดใหม่ (testing set) ในการทดสอบ ซึ่งตัวอย่างดังกล่าวต้องมีการเตรียมตัวอย่าง การวัดสเปกตรัม สภาวะในการศึกษา รวมถึงการปรับแต่งสเปกตรัมเหมือนกับตัวอย่างชุดมาตรฐานที่ใช้สร้างแบบจำลองตัวอย่างชุดใหม่ที่นำมาทดสอบจะถูกสแกนด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อให้ได้ค่าสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด (NIR spectra) นำค่าที่ได้แทนลงในแบบจำลองแคลิเบรชันที่สร้างขึ้น เพื่อทำนายค่าองค์ประกอบที่ต้องการทราบได้ค่าทำนาย (predicted value) จากนั้นนำ ตัวอย่างที่ผ่านการสแกนแล้วไปวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบที่ต้องการทราบด้วยวิธีมาตรฐาน ได้ค่าจริง (actual value) เปรียบเทียบค่าจริงและค่าทำนายที่ได้ว่าการทำนายมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด โดยพิจารณาจากค่าสถิติ (Burns และCiurczak, 2007; ธงชัย และปิติพร, 2552)



ภาพที่ 2.4 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม NIRs
ที่มา: Kawano และคณะ (1995)

สเปกตรัม NIR ที่ได้ซึ่งก็คือ ปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นในย่าน near infrared จะมีจุดยอดไม่ชัดเจนเนื่องจากการซ้อนทับกันของจุดยอดหลายๆค่า วิธีการ calibrating statistics หลายวิธีสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ เช่น multiple linear regression (MLS), partial least squares regression (PLS) หรือ principal components regression (PCR) เป็นต้น โดยวิธีดังกล่าวจะวิเคราะห์หา

ความยาวคลื่นของสเปกตรัมที่มีปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสงสัมพันธ์กับปริมาณองค์ประกอบทางเคมี จำนวนตัวอย่างที่จะใช้ในการวัด NIRS จะต้องมีจำนวนมากพอที่จะเป็นตัวแทนตัวอย่างทั้งหมดได้ และมีการกระจายค่าขององค์ประกอบทางเคมีที่ต้องการวัดสม่ำเสมอและกลุ่มค่าที่จะวัดในอนาคตโดยตัวอย่างจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ calibration set กับ validation set หรือ test set จำนวนตัวอย่างของ calibration set มีมากกว่าตัวอย่างของ validation set เสมอ การทำ calibration ในปัจจุบันนี้ สามารถใช้เทคนิคทางสถิติช่วย เช่น MLR หรือ PLS ช่วยในการเลือกสมการที่เหมาะสมมากที่สุดโดยสมการที่ได้ต้องพิจารณาค่า standard error of calibration (SEC) และค่า R ประกอบด้วยจากนั้นมาทำ validation โดยใช้สถิติเช่นเดียวกันโดยพิจารณาค่า standard Error of prediction (SEP) และค่า Bias ประกอบ นอกจากนั้นดูค่า skewness ด้วยการเลือกสมการที่เหมาะสมเป็นหัวใจสำคัญของการใช้เทคนิค NIRS ซึ่งต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาศัยประสบการณ์และความชำนาญในการเลือก สมการที่ได้จะนำมาใช้ประโยชน์ โดยทดสอบการทำนายค่า จากตัวอย่างที่เป็นอิสระว่าสามารถทำนายค่าได้ถูกต้องหรือไม่ (Kawano และคณะ, 1995)

2.6 ค่าสถิติสำหรับพิจารณาความแม่นยำของแบบจำลอง

2.6.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (coefficient of correlation, R) แสดงถึง ความสัมพันธ์ระหว่าง ข้อมูลของตัวแปร X และตัวแปร Y ถ้าข้อมูลทั้งสองชุดมีความสอดคล้องกันมาก ผลของค่า R ที่ได้จะเข้าใกล้ 1.00 ในกรณีที่ค่า R เท่ากับ 1.00 แสดงว่าข้อมูลทั้งสองชุดมีความสอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์ ในขณะที่ถ้า ค่า R เข้าใกล้ 0 แสดงว่าข้อมูลทั้งสองชุดไม่มีความสัมพันธ์ หรือความสอดคล้องกัน ทั้งนี้ ตัวแปร X และตัวแปร Y อาจมีความสัมพันธ์กันในเชิงบวกหรือลบก็ได้ (Williams, 2007)

2.6.2 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) แสดงถึง สัดส่วนความแปรปรวนของตัวแปร X (ค่าจริง) ที่สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปร Y (ค่าทำนาย) ซึ่งจะมีค่าเป็น บวกเสมอ เช่น ถ้าค่า R^2 เท่ากับ 1.00 หมายความว่า ความแปรปรวนของตัวแปร X อธิบายความแปรปรวน ของตัวแปร Y ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ หรือในกรณีที่ค่า R^2 เท่ากับ 0.50 หมายความว่า ความแปรปรวนของตัวแปร X อธิบายความแปรปรวนของตัวแปร Y ได้ 50 เปอร์เซ็นต์ และอีก 50 เปอร์เซ็นต์ของความแปรปรวน ของตัวแปร X ที่เหลือมาจากปัจจัยอื่นๆ เช่น วิธีการเตรียม ตัวอย่าง หรือวิธีวิเคราะห์มาตรฐาน โดยที่ค่า R^2 นั้นจะมีค่าเป็นบวกเสมอ (Jerome, 2007; Williams, 2007)

ตารางที่ 2.3 แนวทางการอธิบายความสามารถของแบบจำลองด้วยค่า R และ R^2

ค่า R	R^2	ความหมาย
±0.50	0-0.25	ไม่สามารถนำไปใช้ได้
±0.51-0.70	0.26-0.49	ความสัมพันธ์ไม่ดีพอ
±0.71-0.80	0.50-0.64	ควรหาเหตุผลสามารถนำไปใช้ได้ในการแบ่งกลุ่มแบบหยาบ
±0.81-0.90	0.66-0.81	สามารถนำไปใช้ได้ในการแบ่งกลุ่มแบบหยาบและประมาณค่าเบื้องต้น
±0.91-0.95	0.83-0.90	ควรใช้งานอย่างระมัดระวังในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัย
±0.96-0.98	0.92-0.96	ใช้ได้ในงานประยุกต์ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
±0.99 ขึ้นไป	0.98 ขึ้นไป	ดีเยี่ยม สามารถนำไปใช้ได้กับทุกงาน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Williams (2007)

2.6.3 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการทำนาย (bias) คือ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างระหว่างค่าจริง (actual value) และค่าทำนาย (predicted value) เป็นค่าที่ใช้วัดความแม่นยำโดยรวมของแบบจำลองที่ สร้างได้ ค่าที่ได้ควรมีค่าน้อย (Williams, 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มสร้างแบบจำลอง (standard error of calibration, SEC) คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) ของความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าทำนายของกลุ่มตัวอย่างสำหรับสร้างแบบจำลองแคลิเบรชัน ค่าที่ได้ควรมีค่าต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามค่า SEC ที่มีค่าต่ำที่สุด อาจดีสำหรับกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองแคลิเบรชันเท่านั้น อาจไม่ดีสำหรับตัวอย่างอื่น (Williams, 2007)

2.6.5 ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มทดสอบแบบจำลอง (standard error of prediction, SEP) คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าทำนายในกลุ่มตัวอย่างสำหรับทดสอบแบบจำลอง โดยค่า SEP จะเป็นอิสระจากค่า bias ซึ่งต่างจากค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของกลุ่มทดสอบแบบจำลอง (RMSEP) ที่ มีการนำค่า bias มาใช้ในการคำนวณ ดังนั้น เมื่อรายงานผลโดยใช้ค่า SEP จำเป็นต้องรายงานผลคู่กับ ค่า bias เสมอ ซึ่งค่าที่ควรมีค่าน้อยเช่นเดียวกับค่า bias (Williams, 2007)

2.6.6 ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของกลุ่มสร้างแบบจำลอง (root mean square error of calibration, RMSEC) เป็นการหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าทำนายของกลุ่มตัวอย่างสำหรับสร้างแบบจำลองแคลิเบรชัน โดย ค่า RMSEC นั้นเป็นค่าที่นำค่า bias มาใช้คำนวณร่วมด้วย ดังนั้น เมื่อรายงานผลจึงไม่จำเป็นต้องเป็นการรายงานค่า bias และค่าที่ได้ควรมีค่าน้อยเช่นเดียวกัน (Williams, 2007)

2.6.7 ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของกลุ่มทดสอบแบบจำลอง (root mean square error of prediction, RMSEP) เป็นการหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าทำนายของกลุ่มตัวอย่างสำหรับทดสอบแบบจำลอง โดยค่า RMSEP นั้นเป็นค่าที่นำค่า bias มาใช้คำนวณร่วมด้วย ดังนั้น เมื่อรายงานผลจึงไม่จำเป็นต้องเป็นการรายงานค่า bias และค่าที่ได้ควรมีค่าน้อยเช่นเดียวกัน (Williams, 2007)

2.6.8 ค่า RPD หรืออัตราส่วนระหว่างค่า SEP ต่อค่า SD (ratio of standard error of prediction validation to standard deviation, RPD) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของ แบบจำลองที่ได้ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าจริงของข้อมูลกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบแบบจำลองและค่า SEP โดยค่าที่ได้ควรมีค่ามาก (Williams, 2007)

ตารางที่ 2.4 แนวทางการอธิบายความสามารถของแบบจำลองด้วยค่า RPD

ค่า RPD	การแบ่งกลุ่มตัวอย่าง	การนำไปประยุกต์ใช้
0.0-2.3	ไม่ดีมาก	ไม่แนะนำให้ใช้
2.4-3.0	ไม่ดีพอ	การแบ่งกลุ่มแบบหยาบ
3.1-4.9	พอใช้	การแบ่งกลุ่ม
5.0-6.4	ดี	การประกันคุณภาพ
6.5-8.0	ดีมาก	การควบคุมกระบวนการ
8.1 ขึ้นไป	ดีเยี่ยม	ใช้ได้กับทุกงาน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Williams (2007)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธีระชัยชยุติ และคณะ (2540) ได้ทดลองหาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ปริมาณกรดที่โตเตรทได้ และปริมาณน้ำคั้นของผลมะนาวเพื่อทำนายคุณภาพของผลมะนาวโดยใช้เพื่อ NIR spectrometer แบบพกพา โหมด interactance ที่ความยาวคลื่น 588-1089 นาโนเมตร, FT-NIR spectrometer โหมด reflectance ที่ความยาวคลื่น 1000-2500 นาโนเมตร, Vis-NIRs โหมด reflectance ที่ความยาวคลื่น 900-1700 นาโนเมตร และ NIR hyperspectral imaging โหมด reflectance ความยาวคลื่น 910-1700 นาโนเมตร จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 192 ตัวอย่างถูกใช้เพื่อสร้างแบบจำลองในการวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ปริมาณกรดที่โตเตรทได้และปริมาณน้ำคั้นของผลมะนาว เครื่อง FT-NIR spectrometer โหมด reflectance และ NIR spectrometer แบบพกพา โหมด interactance มีความสามารถในการคัดแยกพันธุ์มะนาวได้สูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และ Vis-NIRs โหมด reflectance มีความสามารถในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำและทำนายค่า pH ได้ดีที่สุด ($R = 0.81$, $RMSEP = 0.24$ °Bx และ $R = 0.95$, $RMSEP = 0.06\%$) ส่วนผลการใช้ NIR hyperspectral imaging ในการทำนายคุณภาพมะนาวนั้น จะแสดงผลออกมาเป็นภาพการทำนายเชิงปริมาณตามระดับสี ซึ่งผลการทดลองนี้พบว่าการใช้ NIR hyperspectral imaging สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำนายและคัดแยก คุณภาพมะนาวได้ดีเช่นกัน

Li (2018) ได้ศึกษาการตรวจวัดคุณภาพของลูกพลัมด้วยวิธีแบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิค VNIR และ SWIR hyperspectral imaging ซึ่งสร้างสมการในการทำในแบบ partial least square regression (PLSR) พบว่า SWIR hyperspectral imaging ทำนาย SSC ได้แม่นยำค่า R^2 ดีกว่า 0.8 ในขณะที่ V-NIR ได้ค่า R^2 ดีกว่า 0.7 ของ L^* และ a^* ในการศึกษาครั้งนี้ยังแสดงถึงวิธีการใช้ hyperspectral imaging ในการทำนายแบบไม่ทำลายของ SSC และ สีของลูกพลัมทั้ง 2 พันธุ์มีความแม่นยำสูง

ไชยรัตน์โชติ (2016) ได้ศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงต่อประสิทธิภาพการใช้ เทคนิคสเปกโทรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด (near-infrared spectroscopy, NIRS) และเทคนิคการถ่ายภาพเชิง สเปกตรัม (hyperspectral imaging, HSI) ในการตรวจสอบคุณภาพภายในและปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง การศึกษานี้ ใช้ตัวอย่างมะม่วงจำนวน 188 ผลมาวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS ที่ตำแหน่งบนผลมะม่วงที่แตกต่างกัน ได้แก่ ตำแหน่งไหล่ผล แก้ม ผล และปลายผล ในช่วงความยาวคลื่น 800 ถึง 2500 นาโนเมตร ระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ จากนั้นทำการ ถ่ายภาพเชิงสเปกตรัมด้วยเทคนิค HSI ในช่วงความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาวคลื่น 450 ถึง 1000 นาโนเมตร ด้วยการถ่ายภาพแบบทั้งผล ในระบบการวัดแบบสะท้อนกลับต่อ การทำนายคุณภาพ ได้แก่ ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (titratable acidity, TA) และความเป็นกรดต่าง (pH) ปริมาณ ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solids, TSS) และปริมาณเบต้าแคโรทีน (β -carotene) โดยสมการ ทำนายค่าในการตรวจสอบค่า TSS, TA และ pH ผลมีความแม่นยำมากที่สุดในการตรวจสอบค่า NIRS พบว่าสมการทำนายค่าที่ตำแหน่งไหล่ผล แก้มผล และปลายผล (R^2 อยู่ใน ช่วง 0.62 – 0.77) มีความแม่นยำน้อยกว่าสมการที่สร้างจากสเปกตรัมเฉลี่ยจากทุกตำแหน่งบนผล TSS และ TA โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9 และ 0.84 และมีค่า SEP เท่ากับ 1.1 องศาบริกซ์ และ 0.29 กรัมกรดซิทริกต่อหนึ่งร้อยกรัมตัวอย่างสด ตามลำดับ และด้วยเทคนิค HSI ในทุกตำแหน่งผลของการวัดสเปกตรัม มีค่า R^2 อยู่ใน ช่วง 0.5 – 0.6 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่มีความแม่นยำน้อย และในการตรวจสอบปริมาณเบต้าแคโรทีนด้วย เทคนิค HSI พบว่า สมการทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนมีความแม่นยำในทุกตำแหน่งผล

เจนจิรา (2553) ศึกษาการวิเคราะห์หาปริมาณเบต้าแคโรทีนด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy (NIRs) ทำการทดลองโดยสุ่มตัวอย่างฟักทองที่มีลักษณะของผล ขนาดผล และสีผิวที่แตกต่างกัน จำนวน 30 ผล วัดค่าสเปกตรัมของฟักทองแต่ละชิ้นด้วยเครื่อง FQA-NIRGUN และ FT-NIR spectrometer จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer และ นำมาสร้างสมการเทียบมาตรฐาน โดยนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเบต้าแคโรทีนที่มีอยู่จริงในผลฟักทองกับค่าการดูดกลืนพลังงานย่านใกล้อินฟราเรด (NIRs) ด้วยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นตรง พบว่า สามารถสร้างสมการทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนในเนื้อผลได้อย่างแม่นยำ คือ $\text{Betacarotene (mg/100g)} = 0.5478 - 7.6520A700 + 25.0893A716 - 78.2425A740 + 134.8727A756 - 70.7880A772$ โดยมีค่า multiple correlation coefficient (r) = 0.85, Standard Error of Prediction (SEP) = 0.15 mg/100g, standard error of calibration (SEC) = 0.20 mg/100g และค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias) = 0.05.3 mg/100g

สีเหนียง (2558) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการตรวจสอบปริมาณความชื้น การปนเปื้อนของราที่มีความสามารถผลิตอะฟลาทอกซินปี 1 และอะฟลาทอกซินปี 1 ในข้าวกล้อง แบบจำลองเพื่อทำนาย ปริมาณความชื้นและการปนเปื้อนของราสร้างโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลทางห้องปฏิบัติการของตัวอย่างข้าวกล้อง (ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าเปอร์เซ็นต์การติดเชื้อของราทั้งหมด และค่าเปอร์เซ็นต์การติดเชื้อของราสกุล *Aspergillus* โคลิโคนี สีเขียวอมเหลือง) และข้อมูลเชิงแสงที่ได้จากการสแกนตัวอย่างข้าวกล้องด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ โดยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression, PLSR) โดยแบบจำลองที่ดีที่สุดได้จากการใช้ตัวอย่าง เมล็ดข้าวกล้องทั้งเมล็ดและสร้างแบบจำลองโดยใช้เส้นสเปกตรัมที่มีการจัดการเบื้องต้นด้วยวิธีการแปลงค่าอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งทุกๆ 17 จุด ($R^2 = 0.94$, RMSEP = 0.921 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม, bias = -0.181 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) สำหรับแบบจำลองเพื่อการวิเคราะห์เชิงคุณภาพแบบจำลองเพื่อการแบ่งกลุ่มที่สร้างด้วยวิธี Partial Least Square Discriminant Analysis (PLS-DA) ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การแบ่งกลุ่มถูกต้องโดยรวมสูงกว่าวิธี Soft Independent Modeling of Class Analog (SIMCA) โดยผลการทำนายการแบ่งกลุ่มของค่าเปอร์เซ็นต์การติดเชื้อของราทั้งหมด การแบ่งกลุ่มตัวอย่างที่มีและไม่มี การปนเปื้อนของราสกุล *Aspergillus* โคลิโคนีสีเขียวอม และการแบ่งกลุ่มตามปริมาณการปนเปื้อนของอะฟลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทอกซินปี 1 ในตัวอย่างข้าวกล้อง ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การแบ่งกลุ่มถูกต้องโดยรวมที่สูงที่สุด เท่ากับ 78.98, 86.36 และ 85.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

3.1.1 วัสดุดิบ

ลีนจี สายพันธุ์ จักรพรรดิ จากจังหวัดเชียงใหม่

3.1.2 สารเคมี

Phenolphthalein

Sodium hydroxide (NaOH), MERCK, Germany

Potassium hydrogen phthalate (C₈H₅O₄K), Ajax Finechem, New Zealand

3.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์เครื่องแก้ว

เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง: BP31005, Sartorius, Germany

เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง: MS2045//01, METTLER TOLEDO, U.S.A.

เครื่อง digital refractometer: PR101, Palette Series, Atago Co., Ltd., Japan

เครื่อง hot air oven: ED/FD, BINDER, Germany

เครื่อง hyperspectral image: Specim FX17, Spectral imaging Ltd., Oulu, Finland

ความยาวคลื่น 750-2500 nm (near infrared)

3.3 โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ

โปรแกรม Lumo-Scanner

โปรแกรม Unscrambler

โปรแกรม Prediktera Evince 2.7.9

โปรแกรม OriginPro 8

3.4 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.4.1 ตัวอย่างลีนจี

ในการทดลองใช้ลีนจีพันธุ์ จักรพรรดิ จากจังหวัดเชียงใหม่ อย่างน้อยวิธีละ 200 ลูก เลือกลีนจีที่มีความสม่ำเสมอของขนาด ไม่มีรอยแตก ข้าวไม่หลุดออกก่อนทำการทดลอง ผลต้องอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ นำตัวอย่างทั้งหมดมาทำการปรับอุณหภูมิก่อนการวัดด้วยการเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องที่ระดับ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนทำการทดลอง

3.4.2 สิ่งที่มาจก hyperspectral imaging

จากรูปที่ 3.1 แสดงถึง hyperspectral image (Specim FX17, Spectral imaging Ltd., Oulu, Finland) ในโหมด reflectance โดยนำลึนจี้วางบนภาตทำการสแกนด้วยความเร็ว 5.5 มิลลิเมตรต่อวินาที และ positioning speed ที่ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยใช้ความยาวคลื่นในช่วง 935-1720 นาโนเมตร สำหรับตำแหน่งการวัดนั้นจะทำการวัดด้านข้างของลูกโดยการวัดแต่ละครั้งจะวัดเพียง 1 ลูก เพื่อให้ได้ข้อมูลสเปกตรัมในแต่ละตัวอย่าง จากนั้นนำภาพที่ถ่ายได้มาตัดรูปโดยตัดบริเวณตรงกลางลูกให้ได้ขนาด 40x40 พิกเซล

3.4.3 ตรวจสอบคุณภาพลึนจี้

3.4.3.1 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Total soluble solid, TSS) (AOAC, 2000)

วัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้จะใช้เครื่อง digital hand refractometer โดยหยดน้ำคั้นของลึนจี้ลงไป อ่านค่าที่ออกมาได้เป็นเปอร์เซ็นต์บริกซ์ โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง นำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละผล

3.4.3.2 การวัดปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (titratable acidity, TA) (AOAC, 2000)

โดยนำน้ำคั้นของลึนจี้ปริมาณ 5 มิลลิตร มาไตเตรทด้วยสารละลายต่างมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) ความเข้มข้น 0.1 N โดยการไตเตรทจนถึงจุดยุติหรือเกิดสีชมพู บันทึกปริมาตรของสารละลายต่างมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้มาคำนวณหาปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ตามสูตร

$$\%acid = \frac{[mls NaOH used] \times [0.1N NaOH] \times [milliequivalent factor] \times 100}{grams of sample} \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงถึง Milliequivalent factor ของกรดแต่ละชนิด

Commodity	Predominant Acid	Milliequivalent Factor
Stone fruit, apples, kiwifruit	Malic Acid	0.067
Citrus	Citric Acid	0.064
Grapes	Tartaric Acid	0.075

ที่มา: Garner และคณะ (2005)

จากงานวิจัยของ Wang และคณะ (2015) กรดอินทรีย์ที่สำคัญในลึนจี้เป็นกรด malic โดยมีกรดอื่นๆ ได้แก่ กรด tartaric, citric และ ascorbic ซึ่งระดับกรด malic จะเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเริ่มแรกของการเจริญเติบโตแล้วตามมาด้วยการลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากผลไม้เริ่มโตเต็มที่

3.4.3.3 การวัดปริมาณความชื้นทั้งหมดในลึนจี้ (AOAC, 2000)

โดยทำการอบภาชนะสำหรับหาความชื้นใน hot air oven ที่อุณหภูมิ 105 °C นาน 2 ชั่วโมง นำออกจาก hot air oven ใส่ไว้ใน desiccator ปล่อยให้เย็นจนกระทั่งภาชนะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จดบันทึกค่าที่ได้ซึ่งตัวอย่างที่ต้องการหาความชื้นใส่ลงในภาชนะที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน แล้วจดบันทึกค่า นำไปอบใน hot air oven ที่

อุณหภูมิ 105 °C นาน 60 ชั่วโมง นำออกจาก hot air oven ใส่ไว้ใน desiccator ปล่อยให้เย็น แล้วนำมาชั่งน้ำหนักภาชนะพร้อมตัวอย่าง บันทึกค่าที่ได้ คำนวณค่าความชื้นจากสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น} = \frac{\text{ผลต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบและหลังอบ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)}} \quad (3.2)$$

3.4.4 ทำการคัดเลือกข้อมูลในการวิเคราะห์

นำข้อมูลสเปกตรัมของตัวอย่างทั้งหมดมาคัดเลือกข้อมูลที่ใช้ได้โดยมาทำการตัดสัญญาณรบกวน (noise) จึงจะได้ข้อมูลที่นำไปวิเคราะห์ต่อ

3.4.5 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Unscrambler

3.4.5.1 กำหนดตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ โดยให้ตัวแปรตาม คือ คุณภาพของลินจี่ ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด(TSS), ปริมาณกรดที่ไทเตรตได้ และ ปริมาณน้ำคั้นทั้งหมดในลินจี่ ส่วนตัวแปรอิสระ คือ ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง hyperspectral imaging

3.4.5.2 นำข้อมูลค่าตัวแปรตามมาเรียงกัน โดยเรียงค่าตัวแปรตามทั้งหมดของลินจี่เรียงจากน้อยไปมากแล้วทำการแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็น กลุ่มสำหรับการสร้างสมการ (calibration set) และกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มสำหรับการทดสอบสมการ (prediction set) กลุ่ม calibration จะต้องมีจำนวนข้อมูลไม่เกิน 70 เปอร์เซ็นต์ และ กลุ่ม prediction จะต้องมีจำนวนข้อมูลไม่ต่ำกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ โดยแต่ละกลุ่มมีการกระจายตัวของข้อมูลเท่าๆกัน ค่าเคมีในกลุ่ม calibration จะต้องมีค่าเคมีที่ต่ำสุดและสูงอยู่ในกลุ่มนี้ด้วย

3.4.5.3 นำข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยในกลุ่ม calibration มาสร้าง สมการในการทำนาย โดยใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) นำข้อมูลไปปรับแต่งข้อมูล (pre-treatment) เพื่อลดความคลาดเคลื่อนให้น้อยลงมีวิธีคือ smoothing, first derivative, second derivative, MSC และ SNV โดยเลือกค่า R ให้มีค่าสูงสุด, RMSECV ต้องมีค่าต่ำที่สุด และ factor ต้องค่าต่ำสุดด้วย แล้วนำข้อมูลที่ผ่านการ pre-treatment แล้วมาทำการวิเคราะห์หาในแต่ละช่วงความยาวคลื่นโดยเลือกค่า R ให้มีค่าสูงสุด, RMSECV ต้องมีค่าต่ำที่สุด และ factor จะได้สมการที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด เมื่อได้สมการ calibration แล้วให้นำไปทำนาย ตัวอย่างในกลุ่ม prediction set เพื่อดูความแม่นยำของสมการ

3.4.5.4 ตรวจสอบความแม่นยำในการทำนาย โดยนำตัวอย่างจาก กลุ่ม prediction set ไปทดสอบความถูกต้องในการทำนายของสมการ

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของลีนจี่พันธุ์จักรพรรดิ

ค่าทางเคมีที่หาได้จากการทดลองนั้นมี ปริมาณของแข็งที่ละลายได้, ปริมาณกรดที่โดดเด่นได้ และ ปริมาณความชื้น ซึ่งหลังจากการทำกรทดลองได้ทำการคัดกรองข้อมูลจาก 200 ข้อมูลเป็น 130 โดยข้อมูลที่ตัดจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างจากข้อมูลส่วนใหญ่ (out liner) และข้อมูลที่ผลข้างในเน่า เพื่อนำไปใช้ในการทำการตัดสัญญาณที่รบกวนการวิเคราะห์ผล แล้วจึงแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนคือ ข้อมูลของกลุ่ม calibration set ดังตารางที่ 4.1 และข้อมูลกลุ่ม prediction set ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ตารางที่แสดงข้อมูลของกลุ่ม calibration set

sample	TA (%)	TSS ($^{\circ}$ Bx)	MC (%)
1	0.1194	11.37	84.48
2	0.1442	11.9	84.88
3	0.1531	12.2	85.24
4	0.1721	12.53	85.55
5	0.1749	12.67	85.75
6	0.1784	12.8	85.86
7	0.1831	12.9	85.94
8	0.1848	13	86.01
9	0.1849	13.13	86.02
10	0.1918	13.17	86.03
11	0.1982	13.2	86.06
12	0.2050	13.2	86.20
13	0.2161	13.2	86.24
14	0.2195	13.23	86.30
15	0.2206	13.27	86.31
16	0.2249	13.3	86.37
17	0.2252	13.33	86.42
18	0.2287	13.4	86.49

ตารางที่ 4.1 ตารางที่แสดงข้อมูลของกลุ่ม calibration set (ต่อ)

sample	TA (%)	TSS ($^{\circ}$ Bx)	MC (%)
19	0.2330	13.4	86.52
20	0.2339	13.43	86.57
21	0.2352	13.5	86.59
22	0.2403	13.5	86.64
23	0.2405	13.57	86.65
24	0.2473	13.57	86.69
25	0.2492	13.57	86.70
26	0.2507	13.6	86.74
27	0.2552	13.6	86.77
28	0.2556	13.7	86.85
29	0.2603	13.7	86.86
30	0.2653	13.77	86.92
31	0.2659	13.77	86.96
32	0.2706	13.8	87.01
33	0.2708	13.8	87.02
34	0.2764	13.83	87.09
35	0.2781	13.87	87.16
36	0.2847	13.9	87.23
37	0.2848	13.9	87.23
38	0.2886	13.97	87.25
39	0.2911	14	87.25
40	0.2933	14.03	87.27
41	0.2952	14.07	87.30
42	0.2965	14.1	87.34
43	0.2972	14.1	87.40
44	0.3011	14.13	87.40
45	0.3019	14.2	87.43
46	0.3074	14.2	87.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางที่แสดงข้อมูลของกลุ่ม calibration set (ต่อ)

sample	TA (%)	TSS ($^{\circ}$ Bx)	MC (%)
47	0.3077	14.2	87.46
48	0.3148	14.23	87.58
49	0.3185	14.23	87.59
50	0.3203	14.27	87.71
51	0.3211	14.28	87.74
52	0.3248	14.3	87.91
53	0.3248	14.3	87.93
54	0.3279	14.33	88.00
55	0.3280	14.37	88.01
56	0.3310	14.4	88.06
57	0.3377	14.47	88.07
58	0.3430	14.57	88.07
59	0.3437	14.6	88.11
60	0.3518	14.6	88.12
61	0.3553	14.6	88.16
62	0.3575	14.7	88.25
63	0.3597	14.73	88.26
64	0.3731	14.8	88.32
65	0.3745	14.8	88.32
66	0.3774	14.8	88.36
67	0.3789	14.8	88.39
68	0.3812	14.9	88.42
69	0.3819	14.9	88.43
70	0.4078	14.97	88.45
71	0.4092	15	88.48
72	0.4312	15.07	88.51
73	0.4371	15.2	88.52
74	0.4475	15.47	88.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางที่แสดงข้อมูลของกลุ่ม calibration set (ต่อ)

sample	TA (%)	TSS ($^{\circ}$ Bx)	MC (%)
76	0.4574	15.7	88.97
77	0.4591	15.77	89.00
78	0.4838	15.83	89.02
79	0.5112	15.87	89.03
80	0.5276	15.87	89.16
81	0.5287	15.9	89.34
82	0.5794	16.07	89.49
83	0.6084	16.2	89.82
84	0.6455	16.37	89.98
85	0.8305	16.8	90.17
86	0.8974	17	90.47
87	0.9162	17.07	91.42

ตารางที่ 4.2 ตารางที่แสดงข้อมูลของกลุ่ม prediction set

sample	TA (%)	TSS ($^{\circ}$ Bx)	MC (%)
1	0.1403	11.80	84.77
2	0.1640	12.37	85.48
3	0.1773	12.73	85.75
4	0.1847	13.00	85.99
5	0.1865	13.17	86.03
6	0.1991	13.20	86.10
7	0.2178	13.23	86.30
8	0.2221	13.30	86.34
9	0.2287	13.33	86.47
10	0.2338	13.40	86.53
11	0.2387	13.50	86.59
12	0.2421	13.57	86.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางที่แสดงข้อมูลของกลุ่ม prediction set (ต่อ)

sample	TA (%)	TSS ($^{\circ}$ Bx)	MC (%)
13	0.2502	13.60	86.74
14	0.2552	13.70	86.84
15	0.2612	13.73	86.90
16	0.2664	13.77	86.99
17	0.2744	13.83	87.04
18	0.2809	13.90	87.20
19	0.2848	13.90	87.24
20	0.2925	14.00	87.26
21	0.2961	14.10	87.33
22	0.2983	14.10	87.40
23	0.3032	14.20	87.44
24	0.3117	14.20	87.49
25	0.3191	14.23	87.59
26	0.3238	14.30	87.81
27	0.3273	14.33	87.97
28	0.3303	14.40	88.05
29	0.3403	14.50	88.07
30	0.3450	14.60	88.11
31	0.3572	14.70	88.17
32	0.3649	14.73	88.30
33	0.3770	14.80	88.35
34	0.3790	14.83	88.41
35	0.4036	14.90	88.45
36	0.4228	15.07	88.50
37	0.4410	15.30	88.56
38	0.4549	15.70	88.90
39	0.4682	15.80	89.01
40	0.5131	15.87	89.08

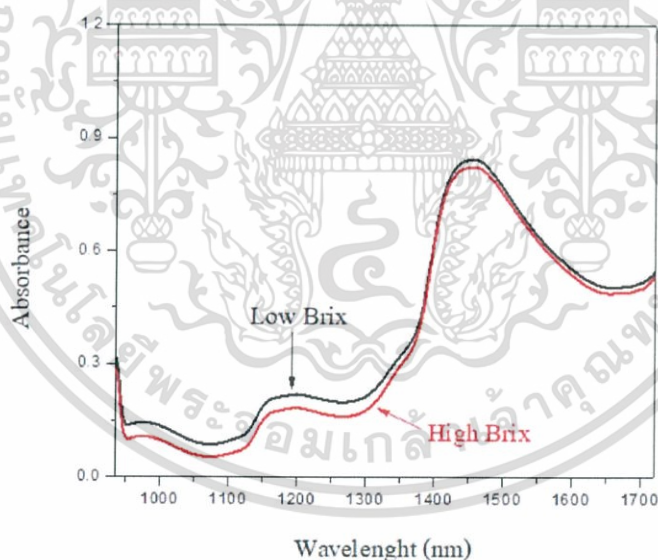
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางที่แสดงข้อมูลของกลุ่ม prediction set (ต่อ)

sample	TA (%)	TSS ($^{\circ}$ Bx)	MC (%)
41	0.5450	16.00	89.43
42	0.6310	16.33	89.85
43	0.8932	16.93	90.38

จากการทดลองพบว่า คุณสมบัติทางกายภาพกับคุณภาพของลิ้นจี่มีความสัมพันธ์กัน โดยสมบัติทางกายภาพจะถูกนำมาใช้เพื่อบ่งบอกถึงคุณภาพของลิ้นจี่ว่าลิ้นจี่ผลไหนมีคุณภาพที่ดีและลิ้นจี่ผลไหนไม่มีคุณภาพ โดยคุณสมบัติที่ใช้เพื่อบ่งบอกถึงคุณภาพของลิ้นจี่ ได้แก่ ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ($^{\circ}$ Bx) และปริมาณความชื้น (moisture content) ในผลลิ้นจี่ โดยปกติเมื่อมองจากลักษณะภายนอกของผลลิ้นจี่ จะไม่สามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติที่กล่าวมาได้ ดังนั้นจึงนำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้จากเครื่อง NIR hyperspectral imaging มาใช้หาความสัมพันธ์กับคุณภาพของผลลิ้นจี่ ซึ่งแสดงได้ความสัมพันธ์ได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยกับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของลิ้นจี่พันธุ์จักรพรรดิ

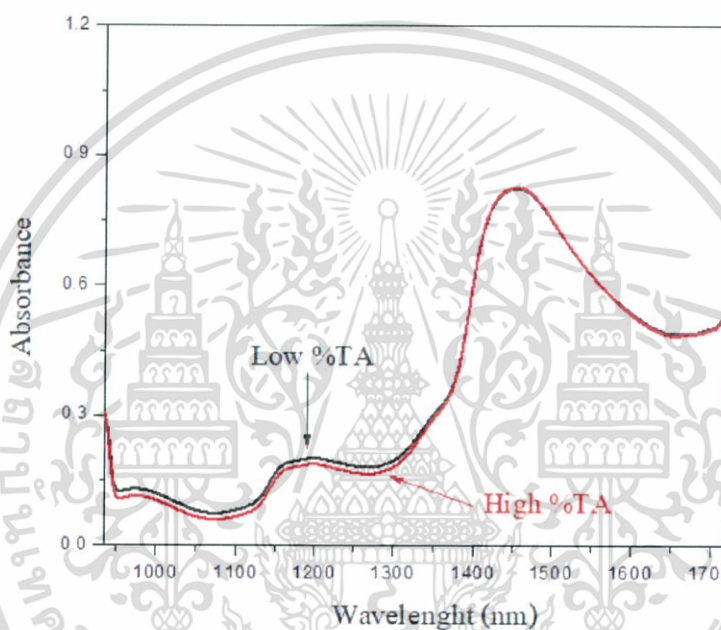


ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของลิ้นจี่ที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้สูงและค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของลิ้นจี่ที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ต่ำ

จากภาพที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของกลุ่มลิ้นจี่ที่มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้สูงและกลุ่มลิ้นจี่ที่มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ต่ำในช่วงความยาวคลื่น 935-1720 nm ปริมาณของแข็งที่ละลายได้จะบ่งบอกถึงคุณภาพของผลลิ้นจี่ โดยจะบอกว่าผลไหนมีระดับความหวาน

มากและผลโหนดมีระดับความหวานน้อย จากภาพจะเห็นได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของกลุ่มลีนจีที่มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้สูง (มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในช่วง 14.83%-17.067%) มีค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยต่ำกว่าค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของกลุ่มลีนจีที่มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ต่ำ (มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในช่วง 11.367%-13.43%) จากภาพจะเห็นว่า ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของลีนจีทั้ง 2 กลุ่ม มีลักษณะปรากฏเป็นพีคบริเวณเดียวกัน แต่เส้นการดูดกลืนพลังงานแสงแตกต่างกันอย่างชัดเจน

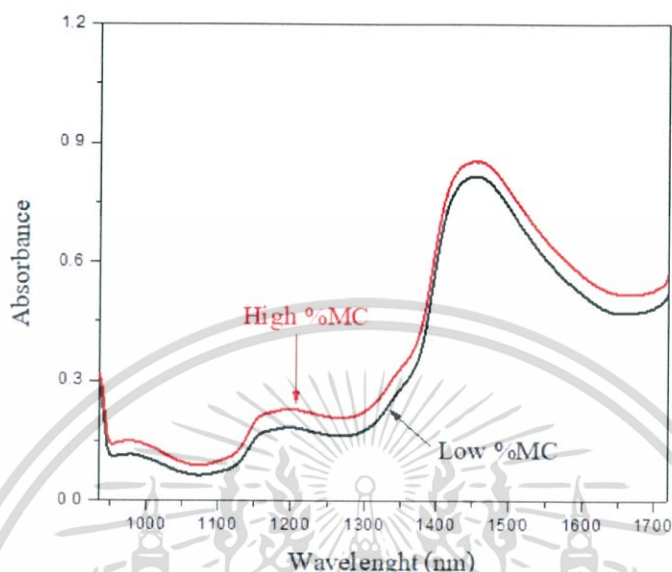
4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยกับปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ของลีนจีพันธุ์จักรพรรดิ



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของลีนจีที่มีปริมาณกรดที่ไตเตรทได้สูงและค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของลีนจีที่มีปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ต่ำ

จากภาพที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของกลุ่มลีนจีที่มีค่าปริมาณกรดที่ไตเตรทได้สูงและกลุ่มลีนจีที่มีค่าปริมาณกรดต่ำ ในช่วงความยาวคลื่น 935-1720 nm ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้จะบ่งบอกถึงคุณภาพของผลลีนจี โดยจะบอกว่าผลโหนดมีระดับความเปรี้ยวมากและผลโหนดมีระดับความเปรี้ยวน้อย จากภาพจะเห็นได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของกลุ่มลีนจีที่มีค่าปริมาณกรดสูง (มีปริมาณกรดในช่วง 37.8%-91.6%) มีค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยต่ำกว่าค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของกลุ่มลีนจีที่มีค่าปริมาณกรดต่ำ (มีปริมาณกรดในช่วง 11.9%-23.38%) จากภาพจะเห็นว่า ค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของลีนจีทั้ง 2 กลุ่ม มีลักษณะแยกกันแต่ไม่ชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มลีนจีของแข็งที่ละลายได้แตกต่างกัน ดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 4.1

4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยกับปริมาณความชื้นของลีนจีพันธุ์จักรพรรดิ



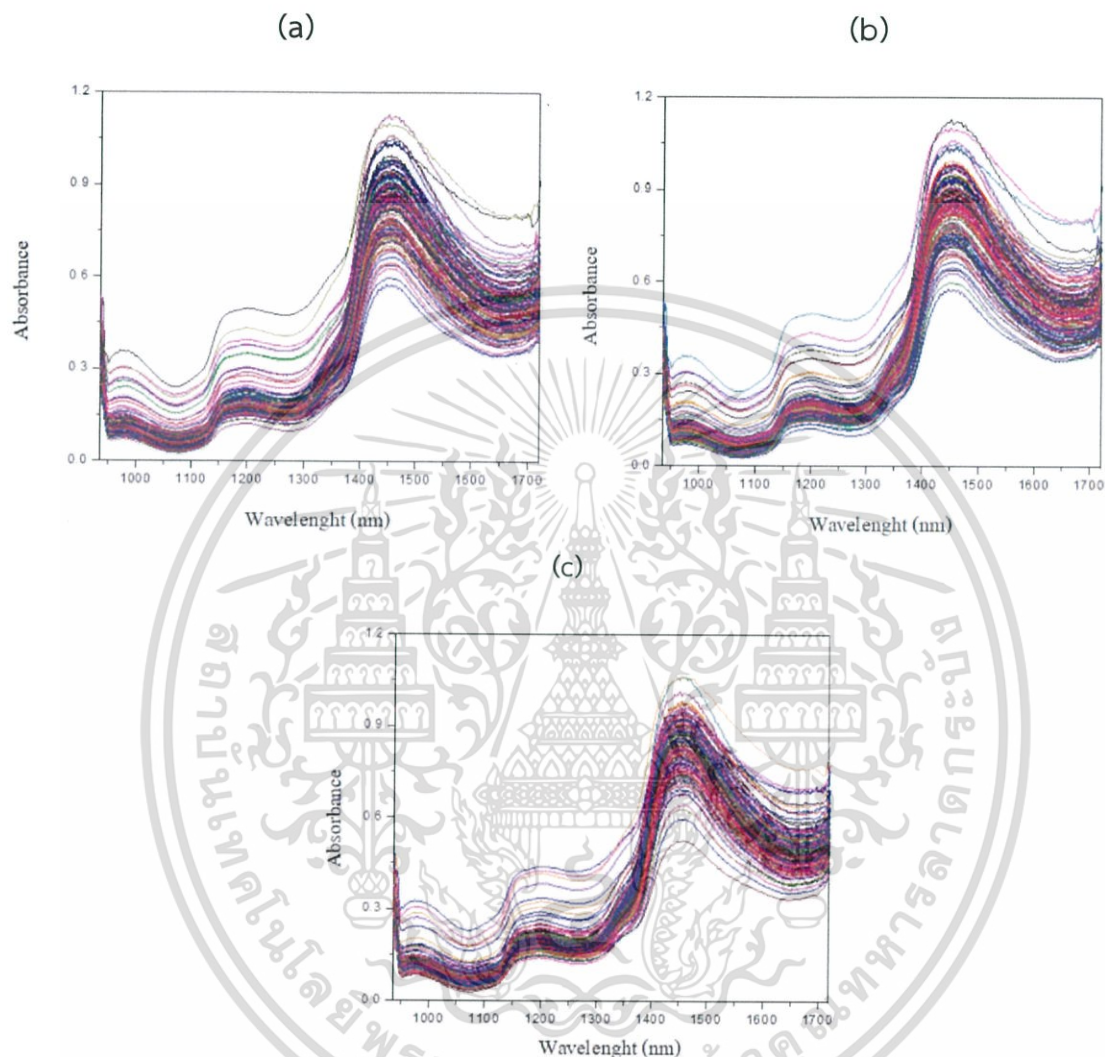
ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของลีนจีที่มีปริมาณความชื้นสูงและค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของลีนจีที่มีปริมาณความชื้นต่ำ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและปริมาณความชื้นในผลลีนจีจะแสดงได้ดังภาพที่ 4.3 โดยค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยที่มีค่าปริมาณความชื้นในผลสูงจะมีค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยสูงกว่าค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยที่มีค่าปริมาณความชื้นในผลต่ำ โดยค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยที่มีค่าปริมาณความชื้นสูงและต่ำจะมีค่าปริมาณความชื้นในผลอยู่ในช่วง 88.41-91.42 และ 84.48-86.57 ตามลำดับ จากภาพที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของทั้ง 2 กลุ่ม มีลักษณะปรากฏเป็นพีคบริเวณเดียวกัน แต่เส้นการดูดกลืนพลังงานแสงแตกต่างกัน

4.2 ลักษณะสเปกตรัมของลีนจีพันธุ์จักรพรรดิ

จากการทดลองนี้ ใช้เครื่อง NIRs hyperspectral imaging ซึ่งอยู่ในโหมด Interactance ในช่วงความยาวคลื่น 935-1720 นาโนเมตร มาตรวจสอบคุณภาพของลีนจี สำหรับการสแกนลีนจีด้วยเครื่อง NIR นั้น ตำแหน่งการวัดนั้นจะทำการวัดด้านข้างของลูกโดยการวัดแต่ละครั้งจะวัดเพียง 1 ลูก โดยตัวแปรด้าน

คุณภาพที่ใช้สำหรับตรวจสอบในผลลึ้นจี้ภายหลัง การสแกน คือ การหาปริมาณของแข็งที่ละลายได้, การหาปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้ และ การหาปริมาณความชื้น



ภาพที่ 4.4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงทั้งหมดของลึ้นจี้ (a) TSS, (b) TA and (c) MC

4.2.1 การสร้างสมการเพื่อทำนายคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของลึ้นจี้

4.2.1.1 การสร้างสมการเพื่อทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้

สำหรับการสร้างสมการและทดสอบสมการเพื่อทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในผลลึ้นจี้ ใช้จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 130 ตัวอย่าง จำนวนตัวอย่างในกลุ่มสร้างสมการมี 87 ตัวอย่าง และ จำนวนใน กลุ่มทดสอบสมการมี 43 ตัวอย่าง ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 กลุ่มสร้างสมการมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลาย น้ำได้ที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ในกลุ่มนี้ โดยมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้อยู่ที่ 11.36-17.07 °Bx ในขณะที่กลุ่มทดสอบสมการค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในช่วง 11.8-16.9 °Bx นอกจากนี้ ในตารางที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ยังแสดงค่าเฉลี่ยของกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการอยู่ ที่ 14.23 และ 14.208 °Bx ตามลำดับ ส่วนค่า SD ของกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการมีค่าอยู่ที่ 1.098 และ 1.059 °Bx ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในตัวอย่างลึนจ์ที่พันธุ์จักรพรรดิของตัวอย่างกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ (Calibration set) และ กลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ (Prediction set)

characteristic	item	calibration set	prediction set
TSS (°Bx)	number of samples	87	43
	range	11.36-17.07	11.8-16.9
	mean	14.23	14.21
	standard deviation	1.10	1.06

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลการทดสอบการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในกลุ่มที่ใช้สำหรับการสร้างสมการโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ช่วยในการปรับแต่ง

no.	pre-processing techniques	TSS		
		F (PC)	R	RMSECV (°Bx)
1	original	3	0.68	0.80
2	smoothing	3	0.67	0.81
3	1 st Derivative	3	0.48	0.96
4	2 nd Derivative	3	0.32	1.08
5	MSC	3	0.49	0.95
6	SNV	3	0.48	0.96

F = Factors, R = correlation coefficients, RMSECV = Root mean square error of cross-validation, Smoothing = Savitzky-Golay smoothing, 1st Derivative = Savitzky-Golay first derivative differentiation, 2nd Derivative = Savitzky-Golay second derivative differentiation, MSC = Multiplicative scatter correction, SNV = Standard Normal Variate transformation

หลังจากแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการได้แล้ว ทำการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 วิธีแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์มีหลายวิธี เช่น Smoothing, first derivative, second derivative, MSC และ SNV จากการพิจารณาจากข้อมูลในกลุ่มสร้างสมการ จากตารางที่ 4.4 พบว่า ข้อมูลแบบ Original ให้ผลดีที่สุดให้ค่า R สูงสุดเท่ากับ 0.68 °Bx ในขณะเดียวกันก็ให้ค่า RMSECV = 0.79 °Bx ซึ่งให้ค่า RMSECV ที่ดีที่สุดต้องมีค่าต่ำสุดด้วย ซึ่งค่า R เป็นค่าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X และตัวแปร Y นั่นก็คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมและค่าปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ถ้าค่า R มีค่าสูงนั้นหมายถึง 2 ตัวแปรมีความสัมพันธ์สูง ซึ่งบ่งบอกว่าการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี Original มาเป็นโมเดลที่ใช้สำหรับสร้างสมการและ ทดสอบความแม่นยำของปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ในครั้ง

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ของการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ข้อมูลสเปกตรัมทั้งหมดซึ่งเป็นข้อมูลในกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการ จะถูกนำมาผ่าน กระบวนการทำ Original แล้วสร้างสมการการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยวิธี partial least squares regression (PLSR) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ทางเชิงปริมาณ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLSR ด้วย โปรแกรม Unscambler พบว่า กลุ่มสร้างสมการได้ค่า $R = 0.73^{\circ}Bx$, $RMSEC = 0.74^{\circ}Bx$ ในขณะที่กลุ่มทดสอบสมการได้ค่า $R = 0.64^{\circ}Bx$, $RMSEP = 0.77^{\circ}Bx$

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่เหมาะสมในการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้

wavelength (nm)	TSS		
	F (PC)	R	RMSECV ($^{\circ}Bx$)
935-1000	1	0.23	1.0678
1001-1100	1	0.27	1.0536
1101-1200	3	0.33	1.0439
1201-1300	2	0.2420	1.0667
1301-1400	3	0.6251	0.8539
1401-1500	2	0.1684	1.0879
1501-1600	3	0.4320	0.9986
1601-1720	1	-0.1666	1.1114
935-1400	5	0.6584	0.8265
1401-1720	3	0.3337	1.0398

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่เหมาะสมในการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้(ต่อ)

wavelength (nm)	TSS		
	F (PC)	R	RMSECV ($^{\circ}$ Bx)
935-1720	3	0.6792	0.8067
(939-1420) กำจัด noise	4	0.6851	0.7961
935-1200	2	0.3197	1.0374
1201-1500	4	0.6255	0.8602
1501-1720	5	0.5610	0.9101

F = Factors, R = correlation coefficients, Smoothing = Savitzky-Golay smoothing, RMSECV = Root mean square error of cross-validation

ตารางที่ 4.6 ตารางผลของการวิเคราะห์ PLS regression สำหรับการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้

parameter	pre-treatment	calibration			prediction			
		F	N	R _c	RMSEC ($^{\circ}$ Bx)	N	R _p	RMSEP ($^{\circ}$ Bx)
TSS	Original	4	7	0.73	0.75	43	0.64	0.77

F = Factors, N = samples, R = correlation coefficients, RMSEC = Root mean square error of calibration, RMSEP = Root mean square error of prediction

4.2.1.2. การสร้างสมการเพื่อทำนายปริมาณกรดที่ไเตรทได้

การสร้างสมการและทดสอบสมการเพื่อทำนายปริมาณกรดที่ไเตรทได้ในผลลึ้นจี ซึ่งในการทดลองนี้จะแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสำหรับสร้างสมการ และกลุ่มสำหรับทดสอบสมการ จากข้อมูลเพื่อสร้างสมการเพื่อทำนายปริมาณกรดที่ไเตรทได้ใช้จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 130 ตัวอย่าง ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.7 โดยจำนวนตัวอย่างในกลุ่มสร้างสมการมี 87 ตัวอย่าง และจำนวนตัวอย่างในกลุ่มทดสอบสมการมี 43 ตัวอย่าง นอกจากนี้กลุ่มการสร้างสมการจะมีค่าปริมาณกรดที่ไเตรทได้ที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ในกลุ่มนี้ด้วย ซึ่งในกลุ่มสร้างสมการมีค่าปริมาณกรดที่ไเตรทได้ในช่วง 0.11%-0.92% และในกลุ่มทดสอบสมการค่าปริมาณกรดที่ไเตรทได้ในช่วง 0.14-0.9 นอกจากนี้การกระจายตัวของแต่ละกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน (SD= 0.148 และ 0.137%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้ในตัวอย่างลินจีพันธุ์จักรพรรดีของตัวอย่างกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ (Calibration set) และ กลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ (Prediction set)

characteristic	item	calibration	prediction
	number of samples	87	43
TA (%)	range	0.11-0.92	0.14-0.9
	mean	0.33	0.33
	standard deviation	0.15	0.14

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงผลการทดสอบการทำนายปริมาณของกรดที่ไตรเตรทได้ในกลุ่มที่ใช้สำหรับการสร้างสมการโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ช่วยในการปรับแต่ง

no.	pre-processing techniques	TA		
		F (PC)	R	RMSECV (%)
1	original	1	0.0066	0.1484
2	smoothing	1	0.0336	0.1492
3	1 st Derivative	3	0.0561	0.1471
4	2 nd Derivative	1	-0.0357	0.1536
5	MSC	1	-0.0098	0.1507
6	SNV	1	-0.0889	0.1495

F = Factors, R = correlation coefficients, Smoothing = Savitzky-Golay smoothing, RMSECV = Root mean square error of cross-validation, 1st Derivative = Savitzky-Golay first derivative differentiation, 2nd Derivative = Savitzky-Golay second derivative differentiation, MSC = Multiplicative scatter correction, SNV = Standard Normal Variate transformation

จากตารางที่ 4.8 แสดงความแม่นยำในสร้างสมการในการทำนายปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้ด้วยวิธีปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ซึ่งข้อมูลที่ใช้สำหรับปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ใช้การพิจารณาจากข้อมูลในกลุ่มสร้างสมการ จากตารางที่ 4.6 พบว่า ข้อมูลแบบ 1st Derivative ให้ผลดีที่สุดให้ค่า R สูงสุดเท่ากับ 0.056% ในขณะที่เดียวกันก็ให้ค่า RMSECV = 0.147% ซึ่งให้ค่า RMSECV ที่ดีที่สุดต้องมีค่าต่ำสุดด้วย เมื่อหาโมเดลที่ใช้สำหรับการทำนายปริมาณกรดที่ไตรเตรทได้แล้ว จะทำการทดสอบด้วยกลุ่มทดสอบสมการ ซึ่งจะแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.8 ถึงข้อมูลที่มีความสามารถในการสร้างสมการ โดยพบว่า กลุ่มสร้างสมการได้ค่า R = 0.37%, RMSEC = 0.136% ในขณะที่กลุ่มทดสอบ สมการได้ค่า R = 0.13%, RMSEP = 0.275%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่เหมาะสมในการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้

wavelength (nm)	TA		
	F (PC)	R	RMSECV (%)
935-1000	1	0.2628	0.1425
1001-1100	1	0.0272	0.1486
1101-1200	1	-0.1470	0.1499
1201-1300	1	-0.2324	0.1502
1301-1400	1	-0.3749	0.1504
1401-1500	1	-0.3415	0.1520
1501-1600	1	-0.1736	0.1494
1601-1720	1	0.0403	0.1499
935-1400	3	0.2239	0.1456
1401-1720	1	-0.1978	0.1535
935-1720	3	0.2083	0.1471
935-1200	2	0.2280	0.1448
1201-1500	1	-0.2985	0.1502
1501-1720	1	-0.0825	0.1515

F = Factors, R = correlation coefficients, Smoothing = Savitzky-Golay smoothing, RMSECV = Root mean square error of cross-validation

ตารางที่ 4.10 ตารางผลของการวิเคราะห์ PLS regression สำหรับการทำนายปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ทั้งหมด

Parameter	pre-treatment	calibration				prediction		
		F	N	R _c	RMSEC (%)	N	R _p	RMSEP (%)
TA	first Derivative	3	7	0.37	0.14	43	0.13	0.28

F = Factors, N = samples, R = correlation coefficients, RMSEC = Root mean square error of calibration, RMSEP = Root mean square error of prediction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1.3. การสร้างสมการเพื่อทำนายปริมาณความชื้นในลันจี้

การสร้างสมการและทดสอบสมการเพื่อทำนายปริมาณความชื้นในผลลันจี้ ซึ่งในการทดลองนี้จะแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสำหรับสร้างสมการ และกลุ่มสำหรับทดสอบสมการจากข้อมูลเพื่อสร้างสมการเพื่อทำนายปริมาณกรดที่ไต่เตรทได้ ใช้จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 130 ตัวอย่าง ซึ่งแสดง ได้ดังตารางที่ 4.11 โดยจำนวนตัวอย่างในกลุ่มสร้างสมการมี 87 ตัวอย่าง และจำนวนตัวอย่างในกลุ่มทดสอบสมการมี 43 ตัวอย่าง นอกจากนี้กลุ่มการสร้างสมการจะมีค่าปริมาณความชื้นที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ในกลุ่มนี้ด้วย ซึ่งในกลุ่มสร้างสมการมีค่าปริมาณความชื้นในช่วง 84.48%-91.42% และในกลุ่มทดสอบสมการค่าปริมาณความชื้นในช่วง 84.76%-90.38% นอกจากนี้การกระจายตัวของแต่ละกลุ่มมีค่า ใกล้เคียงกัน (SD=1.268 และ 1.203%)

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงค่าปริมาณความชื้นในตัวอย่างลันจี้พันธุ์จักรพรรดิของตัวอย่างกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ (Calibration set) และ กลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ (Prediction set)

characteristic	item	calibration	prediction
MC (%)	number of samples	87	43
	range	84.48-91.42	84.76-90.38
	mean	87.53	87.49
	standard deviation	1.27	1.20

ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงผลการทดสอบการทำนายปริมาณความชื้นของลันจี้ในกลุ่มที่ใช้สำหรับการสร้าง

no.	pre-processing techniques	MC		
		F (PC)	R	RMSECV (%)
1	original	10	0.80	0.78
2	smoothing	8	0.71	0.89
3	1 st Derivative	11	0.73	0.84
4	2 nd Derivative	5	0.47	1.18
5	MSC	8	0.74	0.87
6	SNV	7	0.74	0.87

สมการโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ช่วยในการปรับแต่ง

F = Factors, R = correlation coefficients, RMSECV = Root mean square error of cross-validation, Smoothing = Savitzky-Golay smoothing, 1st Derivative = Savitzky-Golay first

derivative differentiation, 2nd Derivative = Savitzky-Golay second derivative differentiation, MSC = Multiplicative scatter correction, SNV = Standard Normal Variate transformation

จากตารางที่ 4.12 แสดงความแม่นยำในสร้างสมการในการทำนายปริมาณความชื้นด้วยวิธีปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆซึ่งข้อมูลที่ใช้สำหรับปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ใช้การพิจารณาจากข้อมูลในกลุ่มสร้างสมการ จากตารางที่ 4.10 พบว่า ข้อมูลแบบ Original ให้ผลดีที่สุดให้ค่า R สูงสุด เท่ากับ 0.8 ในขณะที่เดียวกันก็ให้ค่า RMSECV = 0.778% ซึ่งให้ค่า RMSECV ที่ดีที่สุด ต้องมีค่าต่ำสุดด้วย เมื่อหาโมเดลที่ใช้สำหรับการทำนายปริมาณความชื้นแล้วจะทำการทดสอบด้วยกลุ่มทดสอบสมการ ซึ่งจะแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.12 ถึงข้อมูลที่มีความสามารถในการสร้างสมการ โดยพบว่า กลุ่มสร้างสมการได้ค่า R = 0.89%, RMSEC = 0.56% ในขณะที่กลุ่มทดสอบ สมการได้ค่า R = 0.8%, RMSEP = 0.737% ซึ่งผลการทำนายปริมาณความชื้น

ตารางที่ 4.13 ตารางแสดงช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่เหมาะสมในการทำนายปริมาณความชื้นทั้งหมด

wavelength (nm)	MC		
	F (PC)	R	RMSECV (%)
935-1000	1	0.2993	1.2062
1001-1100	2	0.3609	1.1792
1101-1200	3	0.3833	1.1713
1201-1300	1	0.3405	1.1877
1301-1400	7	0.4702	1.1490
1401-1500	1	0.2005	1.2403
1501-1600	1	0.2724	1.2152
1601-1720	6	0.4929	1.1191
935-1400	7	0.4900	1.1116
1401-1720	8	0.6581	0.9623
935-1720	10	0.7894	0.7783
935-1200	1	0.3234	1.1949
1201-1500	6	0.4957	1.1296
1501-1720	6	0.5591	1.0698

F = Factors, R = correlation coefficients, Smoothing = Savitzky-Golay smoothing, RMSECV = Root mean square error of cross-validation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ตารางผลของการวิเคราะห์ PLS regression สำหรับการทำนายปริมาณความชื้นในลีนจี้

parameters	pre-treatment	F	calibration			prediction		
			N	R _c	RMSEC (%)	N	R _p	RMSEP (%)
MC	original	10	87	0.90	0.56	43	0.80	0.74

F = Factors, N = samples, R = correlation coefficients, RMSEC = Root mean square error of calibration, RMSEP = Root mean square error of prediction

4.3 การเปรียบเทียบค่าทางกายภาพและเคมีในตัวอย่างลีนจี้พันธุ์จักรพรรดิระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค hyperspectral imaging

4.3.1 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค hyperspectral imaging ของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดได้จริงและค่าที่ได้จากการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ โดยใช้กลุ่ม prediction จากสเปกตรัมดั้งเดิมในช่วงความยาวคลื่น 935-1720 nm แสดงดังภาพที่ 4.5 (a) ซึ่งสามารถแสดงผลการทำนายได้เหมือนกับตารางที่ 4.4 แต่การแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยภาพนี้จะทำให้เห็นความแม่นยำในการทำนายได้ง่ายขึ้น เนื่องจากถ้าค่าเข้าใกล้เส้นตรง 45 องศา มากก็แสดงว่า ค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่ทำนายได้มีความแม่นยำในการทำนายสูง และจากในภาพ พบว่า มีการกระจายของข้อมูลออกจากเส้น 45 องศา ไม่มากแสดงว่า มีความแม่นยำในการทำนายสูง

4.3.2 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค hyperspectral imaging ของปริมาณกรดที่โตเตรทได้

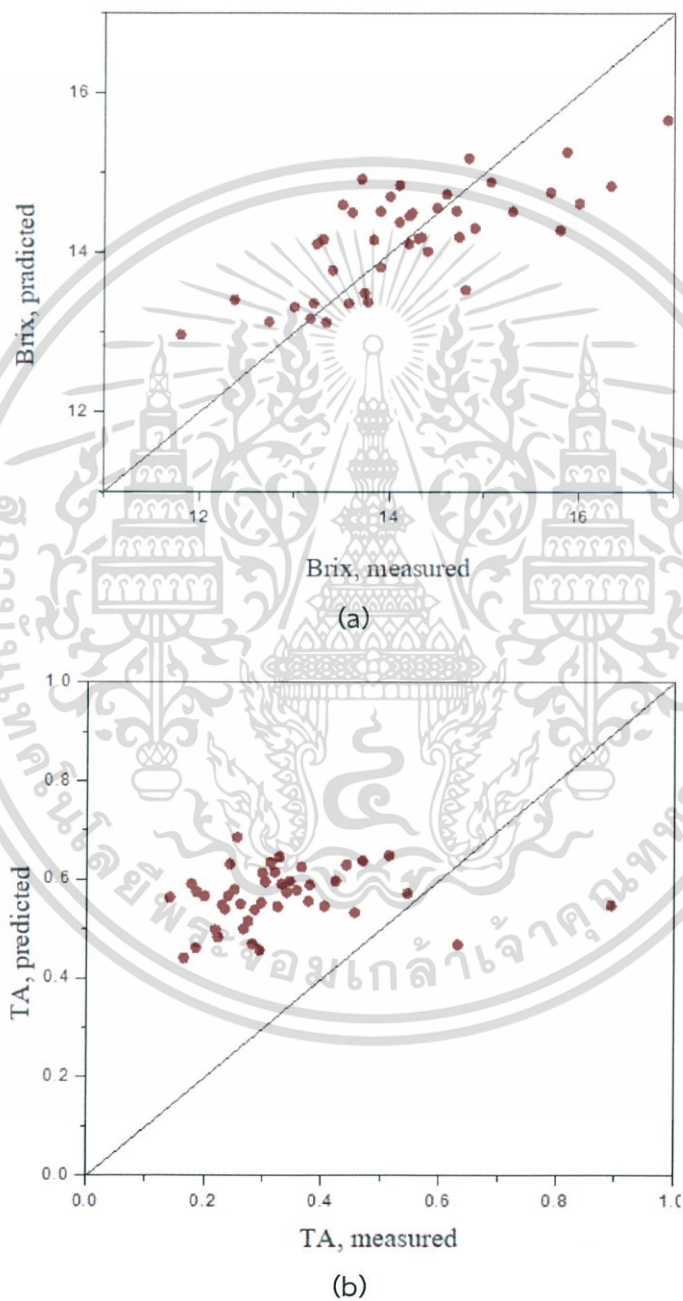
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดได้จริงและค่าที่ได้จากการทำนายปริมาณกรดที่โตเตรทได้ โดยใช้กลุ่ม Prediction จากสเปกตรัมดั้งเดิมในช่วงความยาวคลื่น 935-1720 nm แสดงดังภาพที่ 4.5 (b) ซึ่งสามารถแสดงผลการทำนายได้เหมือนกับตารางที่ 4.8 แต่การแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยภาพนี้จะทำให้เห็นความแม่นยำในการทำนายได้ง่ายขึ้น เนื่องจากถ้าค่าเข้าใกล้เส้นตรง 45 องศา มากก็แสดงว่า ค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่ทำนายได้มีความแม่นยำในการทำนายสูง และจากในภาพ พบว่า มีการกระจายของข้อมูลออกจากเส้น 45 องศา มากแสดงว่า มีความแม่นยำในการทำนายต่ำ แม้ว่าข้อมูลจะมีการเกาะกลุ่มกันที่ตีก็ตาม

4.3.3 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการวัดจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิค hyperspectral imaging ของปริมาณความชื้นในลีนจี้

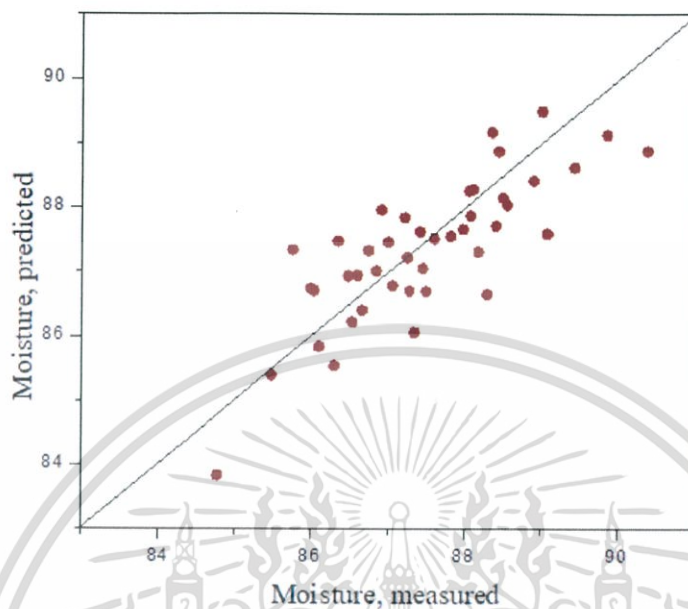
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดได้จริงและค่าที่ได้จากการทำนายปริมาณความชื้น โดยใช้กลุ่ม Prediction จากสเปกตรัมดั้งเดิมในช่วงความยาวคลื่น 935-1720 nm แสดงดังภาพที่ 4.5 (c) ซึ่งสามารถแสดงผลการทำนายได้เหมือนกับตารางที่ 4.12 แต่การแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยภาพนี้จะทำให้เห็นความแม่นยำในการทำนายได้ง่ายขึ้น เนื่องจากถ้าค่าเข้าใกล้เส้นตรง 45 องศา มาก ก็แสดงว่า ค่าที่วัดได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับค่าที่ทำนายได้มีความแม่นยำในการทำนายสูง และจากในภาพ พบว่า มีการกระจายของข้อมูลออกจากเส้น 45 องศา ไม่มาก แสดงว่า มีความแม่นยำในการทำนายสูงเช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดได้จริงและค่าที่ได้จากการทำนาย PLS regression models โดย (a) total soluble solids, (b) acidity and (c) moisture content in lychees

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผล

จากผลการทดลองการศึกษาพัฒนาแบบจำลองทางสถิติโดยใช้เครื่อง NIR ชนิด hyperspectral imaging เพื่อทำนายคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของลิ้นจี่สายพันธุ์จักรพรรดิ ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดสรุปออกมาได้ดังนี้ การใช้เทคนิค NIRs hyperspectral imaging ในโหมด reflectance ที่ความยาวคลื่น 935-1720 นาโนเมตร เพื่อทำนายปริมาณปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้, ทำนายปริมาณกรดที่ไต่เตรทได้ และทำนายปริมาณ moisture content โดยจะใช้กลุ่มตัวอย่างลิ้นจี่พันธุ์จักรพรรดิ ผลการทำนายจะแสดงออกมาเป็นกราฟ โดยภาพการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และ ทำนายปริมาณกรดที่ไต่เตรทได้นั้นพบว่า ถ้าตัวอย่างลิ้นจี่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และ ทำนายปริมาณกรดที่ไต่เตรทได้สูงนั้นจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำกว่า ตัวอย่างที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ซึ่งความแม่นยำในการทำนาย (ได้ค่า $R = 0.64$, $RMSEP = 0.77^{\circ}Bx$) และ ทำนายปริมาณกรดที่ไต่เตรทได้ต่ำ ซึ่งความแม่นยำในการทำนาย (ได้ค่า $R = 0.13$, $RMSEP = 0.275\%$) จะเห็นได้ว่าค่ากรดที่ไต่เตรทได้นั้นมีคุณภาพที่ไม่ดีนัก เนื่องจากขณะที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง hyperspectral image นั้นผิวของผลไม้เริ่มเกิดสีดำขึ้น เนื่องจากเก็บลิ้นจี่ที่มีในช่วงนั้นเป็นลิ้นจี่นอกฤดู และมีจำนวนจำกัดไม่สามารถหาใหม่ได้ จึงต้องจัดหาซากกักตุนไว้สำหรับการทดลองทั้งหมดในครั้งเดียวและขณะที่ทำก็ได้เก็บเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว และในส่วนของการทำนายปริมาณ moisture content นั้นพบว่าถ้าปริมาณ moisture content สูงค่าการดูดกลืนแสงก็จะสูงตามไปด้วย ซึ่งความแม่นยำในการทำนาย (ได้ค่า $R = 0.8$, $RMSEP = 0.737\%$) แต่ในด้านความแม่นยำนั้นพบว่าปริมาณ moisture content มีความแม่นยำมากที่สุด และ ในการวัดปริมาณกรดที่ไต่เตรทได้มีความแม่นยำต่ำที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า NIRs hyperspectral imaging มีความสามารถในการทำนายสามารถใช้ในการคัดแยกคุณภาพจากปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และปริมาณความชื้นของผลลิ้นจี่ได้

จะเห็นได้ว่าค่ากรดที่ไต่เตรทได้นั้นมีคุณภาพที่ไม่ดีนัก เนื่องจากขณะที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง hyperspectral image นั้นผิวของผลไม้เริ่มเกิดสีดำขึ้น เนื่องจากเก็บลิ้นจี่ที่มีในช่วงนั้นเป็นลิ้นจี่นอกฤดู และมีจำนวนจำกัดไม่สามารถหาใหม่ได้ จึงต้องจัดหาซากกักตุนไว้สำหรับการทดลองทั้งหมดในครั้งเดียวและขณะที่ทำก็ได้เก็บเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว

บรรณานุกรม

- กฤษณะ สุกันตพงศ์. 2560. คู่แข่งทางการตลาดของไทยในการส่งออกลิ้นจี่. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.gx.chinanews.com>. (10 ธันวาคม 2561).
- เจนจิรา หอมมะลิ. 2553. การสร้างสมการทำนายปริมาณเบต้าแคโรทีนในฟักทองด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIRs). งานวิจัย. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
- ธงชัย สุวรรณลิขิต และ ปิติพร ฤทธิเรืองเดช. 2552. การวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ. เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม: ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และมหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขต กาญจนบุรี.
- นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์. 2545. หลักพื้นฐานเทคนิค near infrared spectroscopy. การอบรมเชิงปฏิบัติการ การควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค near infrared spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ: 39-66
- นิพัฒน์ สุขวิบูลย์. 2558. พัฒนาพันธุ์ลิ้นจี่ (Varietal development of litchi). งานวิจัย. กรมวิชาการเกษตร
- นิมิตรา ไชยรัตน์โชติ. 2559. การใช้เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้และเทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัมในการติดตามคุณภาพภายในและปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง. งานวิจัย. คณะเทคโนโลยีอาหาร. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยาม รัตนานนท์. 2562. Food Network Solution. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.foodnetworksolution.com/>
- ชลธิชา สีเหนียง. 2558. การประยุกต์เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีเพื่อการตรวจวัดการปนเปื้อนของราและอะฟลาทอกซินปี 1 ในข้าวกล้อง. งานวิจัย. สาขาวิชาจุลชีววิทยาและเทคโนโลยีจุลินทรีย์ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รวี เศรษฐภักดี. 2540. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์และพันธุ์ของลิ้นจี่และลำไย. เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตรเทคโนโลยียุคใหม่ในการผลิตลิ้นจี่และลำไย. โรงแรมเชียงใหม่ฮอติล จังหวัดเชียงใหม่
- สนธิสุข ธีระชัยชยุติ. 2558. การคัดแยกพันธุ์และคุณภาพของผลมะนาวโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดความละเอียดสูง (Varieties and qualities classification of lime using near Infrared hyperspectral imaging). งานวิจัย. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. 2552. การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนวิเคราะห์. เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- AOAC International., 2000. Official Methods of Analysis of AOAC. International. 17th ed. AOAC. International, Arlington, USA.
- Barnes, R. J., Dhanoa, M. S. and Lister, S. J., 1989. Standard Normal Variate Transformation and De-Trending of Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectra. *Applied Spectroscopy*. (43): 772-777
- Burns, D. A. and Ciurczak, E. W., 2007. *Handbook of Near-Infrared Analysis, Third Edition*: CRC Press.
- Fu, X., Ying, Y. and Xu, H., 2007. Comparison of diffuse reflectance and transmission mode of visible-near infrared spectroscopy for detecting brown heart of pear. *Journal of Food Engineering*. (83): 317-323.
- He, H. J. and Sun, D. W., 2015. Hyperspectral imaging technology for rapid detection of various microbial contaminants in agricultural and food products. *Trends in Food Science & Technology*. (46): 99-109.
- Jerome, J. W., 2007. NIR Spectroscopy Calibration Basics. In *Handbook of Near Infrared Analysis, Third Edition* (pp. 123-150): CRC Press.
- Kawano, S., Abe H. and Iwamoto, M., 1995. Development of a Calibration Equation with Temperature Compensation for Determining the Brix Value in Intact Peaches. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. (3): 211-218.
- Li, B., 2018. Application of hyperspectral imaging for nondestructive measurement of plum quality attributes. *Postharvest Biology and Technology*. 141: 8-15.
- Osborne, B.G., Fearn, T. and Hindle P.H., 1993. *Partial NIR Spectroscopy with Application in Food and Beverage Analysis*. 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Siesler, H. w., Ozaki. Y., Kawata, S. and Heise, H. M., 2002. *Near-Infrared Spectroscopy: Principle Instrument, Application*. WILEY-VCH Verlag GmbH. Germany. 348pp.
- Sirisomboon, P., Tanaka, M., Kojima, T. and Williams, P., 2012. Nondestructive estimation of maturity and textural properties on tomato 'Momotaro' by near infrared spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 112(3): 218-226.
- Teerachaichayut, S. and Ho, H. T., 2017. Non-destructive prediction of total soluble solids, titratable acidity and maturity index of limes by near infrared hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology*. 133: 20-25.

- Wang, H.C., Huang, H.B., Huang, X.M. and Hu, Z.Q., 2015. Sugar and acid compositions in the arils of *Litchi chinensis* Sonn.: cultivar differences and evidence for the absence of succinic acid. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 81: 57-72.
- Williams, P., 2007. *Near-infrared Technology-Getting the Best Out of Light*. Canada: PDK project Inc.
- Wu, D. and Sun, D. W., 2013. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: Part I: Fundamentals. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. (19): 1-14.
- Yang, Y. C., Sun, D. W., Pu, H., Wang, N. N. and Zhu, Z., 2015. Rapid detection of anthocyanin content in lychee pericarp during storage using hyperspectral imaging coupled with model fusion. *Postharvest Biology and Technology*. (103): 55-65.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการวัดคุณลักษณะทางเคมีของผลลิ้นจี่พันธุ์จักรพรรดิ

ก.1 การวัดคุณลักษณะทางเคมีของผลลิ้นจี่

1. การวัดค่า acidity โดยใช้เครื่อง มาไตเตรทด้วยสารละลายต่างมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1N

2. การวัดค่า brix โดยใช้เครื่อง refractometer

3. การวัดค่า moisture content โดยใช้เครื่อง hot air oven

ตารางที่ ก.1 ตารางที่แสดงข้อมูลเฉลี่ยตัวอย่างของค่า acidity, brix และ moisture content

sample	TA(%)	TSS(°Bx)	MC(%)
1-10	0.16	12.33	85.37
11-20	0.20	13.15	86.10
21-30	0.23	13.34	86.43
31-40	0.24	13.56	86.68
41-50	0.26	13.76	86.94
51-60	0.29	13.93	87.22
61-70	0.30	14.14	87.39
71-80	0.32	14.27	87.73
81-90	0.34	14.48	88.07
91-100	0.37	14.75	88.29
101-110	0.41	15.01	88.47
111-120	0.48	15.75	88.96
121-130	0.71	16.47	90.04

ภาคผนวก ข

อุปกรณ์



ภาพที่ ข.1 สันจีสายพันธุ์จักรพรรดิ

ที่มา : <https://greenspace.market/shop/สันจีสายพันธุ์จักรพรรดิ>



ภาพที่ ข.2 NIR hyperspectral imaging

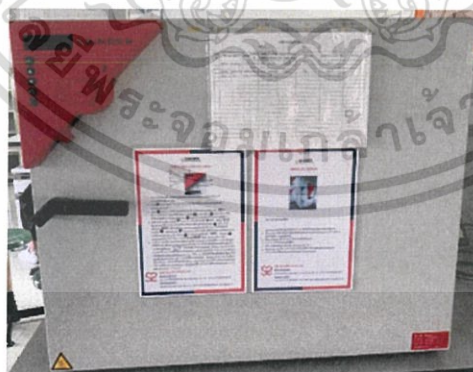
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ข.3 aluminium can



ภาพที่ ข.4 refractometer



ภาพที่ ข.5 hot air oven

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ข.6 อุปกรณ์ในการไตเตรท



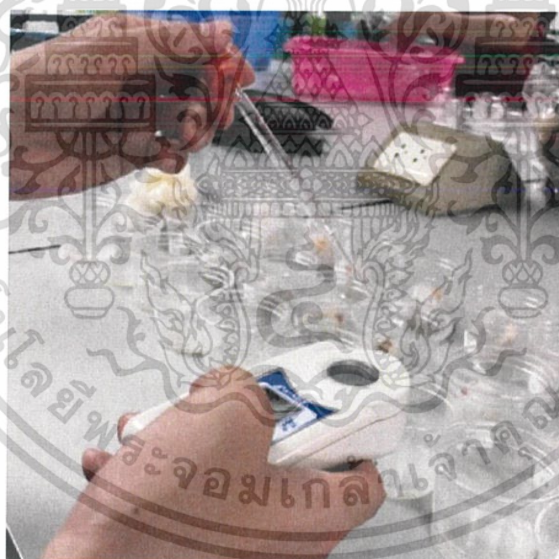
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การทดลอง



ภาพที่ ค.1 คั้นน้ำล้นจี



ภาพที่ ค.2 วัด brix โดยใช้ refractometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ค.3 ไตเตรทโดยใช้ NaOH



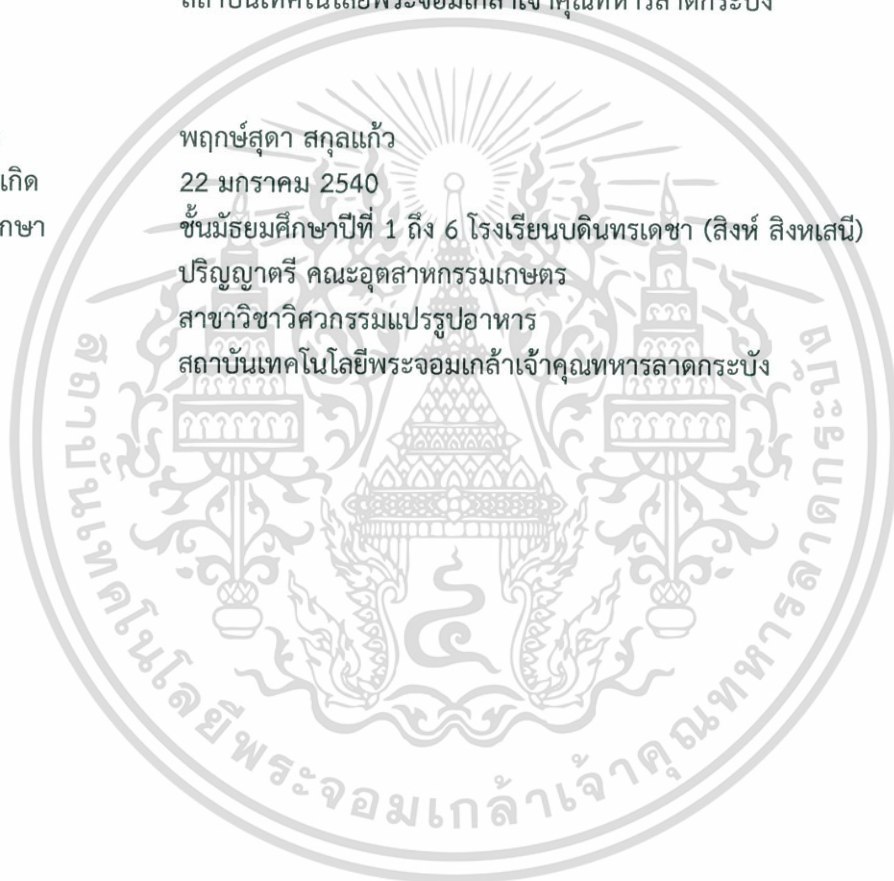
ภาพที่ ค.4 อบไล้ความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล ธนพล คงปลื้มจิตต์
 วัน เดือน ปี เกิด 4 พฤศจิกายน 2539
 ประวัติการศึกษา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 ถึง 6 โรงเรียนกรุงเทพคริสเตียนวิทยาลัย
 ปริญญาตรี คณะอุตสาหกรรมเกษตร
 สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล พฤกษ์สุดา สกุลแก้ว
 วัน เดือน ปี เกิด 22 มกราคม 2540
 ประวัติการศึกษา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 ถึง 6 โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี)
 ปริญญาตรี คณะอุตสาหกรรมเกษตร
 สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้