

การประดิษฐ์ Vis-NIR multispectrometer

แบบต้นทุนต่ำ: กรณีการวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตร

DEVELOPMENT OF A LOW-COST VIS-NIR MULTISPECTROMETER: IN CASE OF  
DETECTION OF ADULTERANTS MATERIALS IN AGRICULTURAL PRODUCTS.

รชานนท์ ลั่นวงษา

พันฉาย สันติสกุลวงศ์

วุฒิพงษ์ บุตรนนท์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประดิษฐ์ Vis-NIR multispectrometer

แบบต้นทุนต่ำ: กรณีการวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตร

DEVELOPMENT OF A LOW-COST VIS-NIR MULTISPECTROMETER: IN CASE OF  
DETECTION OF ADULTERANTS MATERIALS IN AGRICULTURAL PRODUCTS.

รชานนท์ ล้นวงษา

พันฉาย สันติสกุลวงศ์

วุฒิพงษ์ บุตรนนท์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF A LOW-COST VIS-NIR MULTISPECTROMETER: IN CASE OF  
DETECTION OF ADULTERANTS MATERIALS IN AGRICULTURAL PRODUCTS.

THAYANONT LUNVONGSA  
PHANCHAY SUNTISAKULWONG  
WUTTHIPHONG BOODNON

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANGACADEMIC

YEAR 2022

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2565  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การประดิษฐ์ Vis-NIR multispectrometer แบบต้นทุนต่ำ:

กรณีการวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตร

DEVELOPMENT OF A LOW-COST VIS-NIR  
MULTISPECTROMETER: IN CASE OF  
DETECTION OF ADULTERANTS MATERIALS IN  
AGRICULTURAL PRODUCTS.

นักศึกษาผู้จัดทำ

นายธยานนท์ ลั่นวงษา รหัสนักศึกษา 62010403

นายพันธาย สันติสกุลวงศ์ รหัสนักศึกษา 62010621

นายวุฒิพงษ์ บุตรนนท์ รหัสนักศึกษา 62010840

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

หลักสูตร


วิศวกรรมเกษตร

ภาควิชา

วิศวกรรมเกษตร

ปีการศึกษา

2565

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. รวิภัทร ลากเจริญสุข	

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การประดิษฐ์ Vis-NIR multispectrometer แบบต้นทุนต่ำ: กรณีการวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตร		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายธยานนท์	ลั่นวงษา	62010403
	นายพันฉาย	สันติสกุลวงศ์	62010621
	นายวุฒิพงษ์	บุตรนนท์	62010840
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. รวิภัทร ลากเจริญสุข		
ปีการศึกษา	2565		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ที่มีช่วงความยาวคลื่นทั้งหมด 6 จุดได้แก่ 610, 680, 730, 760, 810, และ 860 นาโนเมตร  $\pm$  10 นาโนเมตร ในความยาวคลื่นนั้นๆซึ่งมีราคาต้นทุนที่ต่ำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเครื่องมือในการตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรซึ่งในที่นี้ ได้แก่ เครื่องเทศ น้ำผึ้ง และกะทิ โดยทำการปลอมปนสิ่งปลอมปน ได้แก่ น้ำ แป้งข้าวโพด และน้ำตาล ด้วยอัตราส่วน 10% 20 % 30 % 40% 50% 60% 70% 80% และ 90% เพื่อวัดค่าการดูดซับของแสงด้วยเครื่องมือตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นและเครื่อง FT-NIR spectrometer เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำระหว่างเครื่องทั้งสองโดยการสร้างแบบจำลองสำหรับการตรวจสอบสารปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรด้วยเทคนิค Multiple Linear Regression (MLR) และ Partial Least Squares regression (PLSR) ของตัวอย่างวัสดุทางการเกษตรนั้นๆ ซึ่งสำหรับการทดลองในเครื่องเทศได้แก่ ผงหัวหอม ได้แบบจำลอง MLR ให้ผลที่ดีที่สุดโดยมีค่า  $R^2$  ที่ 0.9758 สำหรับการทดลองในน้ำผึ้งแบบจำลอง MLR ให้ผลที่ดีที่สุดโดยมีค่า  $R^2$  ที่ 0.4751 และในน้ำกะทิแบบจำลอง MLR ให้ผลที่ดีที่สุดโดยมีค่า  $R^2$  ที่ 0.6562 จึงแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการตรวจวัดได้ดี

<b>Thesis Title</b>	DEVELOPMENT OF A LOW-COST VIS-NIR MULTISPECTROMETER: IN CASE OF DETECTION OF ADULTERANTS MATERIALS IN AGRICULTURAL PRODUCTS.	
<b>Authors</b>	Thayanont Lunvongsa	62010403
	Phanchaay Suntisakulwong	62010621
	Wutthiphong Boodnon	62010840
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Ravipat Lapcharoensuk	
<b>Year</b>	2022	

### Abstract

The objective of this research is to study the feasibility of using a Vis-NIR multispectrometer sensor with a total wavelength range of 6 points, namely 610, 680, 730, 760, 810, and 860 nanometers  $\pm$  10 nanometers. These sensors have low-cost implications and are applied in the development of tools for detecting adulterants in agricultural materials, including spices, honey, and coconut milk. Adulterants such as water, cornstarch, and sugar were mixed at ratios of 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, and 90% to measure the light absorption values using the developed measurement tool and an FT-NIR spectrometer. The accuracy between the two instruments was compared by creating models for detecting adulterants in agricultural materials using the Multiple Linear Regression (MLR) and Partial Least Squares Regression (PLSR) techniques. For the spice samples, the MLR model provided the best results with an  $R^2$  value of 0.9758. For the honey samples, the MLR model yielded the best results with an  $R^2$  value of 0.4751, while for the coconut milk samples, the MLR model achieved the best results with an  $R^2$  value of 0.6562. These findings demonstrate that the developed measurement tool has the capability to perform accurate detection.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยคำปรึกษาและคำแนะนำจาก ผศ.ดร. รวิภัทร ลาภเจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา รวมถึงอาจารย์ท่านอื่นๆในภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำ รวมถึงข้อคิดเห็นและแนวทางต่างๆเพิ่มเติม

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกๆท่านที่ให้การสนับสนุนการทำงานและให้กำลังใจเสมอมากระทั่งโครงการสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีทางผู้จัดทำซาบซึ้งในความกรุณาอันดีอย่างยิ่งจากทุกท่านที่กล่าวมา และขอกราบขอบพระคุณ มา ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำ

นายธยานนท์	ล้นวงษา	รหัสนักศึกษา	62010403
นายพันฉาย	สันติสกุลวงศ์	รหัสนักศึกษา	62010621
นายวุฒิพงษ์	บุตรนนท์	รหัสนักศึกษา	62010840



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
Abstract .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง .....	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1. ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2. วัตถุประสงค์การทดลอง .....	2
1.3. ขอบเขตการทดลอง.....	2
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5. ขอบเขตการดำเนินงาน .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 วัสดุทางการเกษตร .....	5
2.2 สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy) .....	11
2.3 แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ .....	14
2.4 ค่าทางสถิติสำหรับการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง.....	16
2.5 เซนเซอร์และระบบประมวลผลภายใต้เครื่องมือสำหรับการตรวจสอบวัตถุสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตร ด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ในรูปแบบต้นทุนต่ำ .....	18
2.5.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 .....	18
2.5.2 เซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ยี่ห้อ Spark Fun รุ่น AS7263.....	20
2.5.3 หน้าจอแสดงผลแบบ OLED .....	20
2.5.4. ปุ่มกด (Push Button) .....	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	22

<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน</b> .....	25
<b>3.1 แนวคิดการออกแบบสร้างเครื่อง Vis-NIR multispectrometer แบบต้นทุนต่ำ: กรณีการตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตร</b> .....	25
3.1.1 ส่วนสำหรับใช้ในการตรวจวัด.....	25
3.1.2 ส่วนสำหรับการแสดงค่าและประมวลผลรวมถึงแหล่งจ่ายพลังงานให้กับตัวเครื่อง.....	27
<b>3.2 ต้นทุนของเครื่องเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ในรูปแบบต้นทุนต่ำ</b> .....	30
<b>3.3 การทดสอบความเป็นไปได้ของการใช้งานเซนเซอร์เบื้องต้น</b> .....	30
<b>3.4 การหาค่า Repeatability และ Reproducibility ของเครื่องมือที่ประดิษฐ์ขึ้น</b> .....	31
<b>3.5 การทดลองการใช้การเซนเซอร์ในการตรวจสอบการปลอมปนในวัสดุทางการเกษตร</b> .....	31
3.5.1 การทดสอบการปลอมปนแป้งข้าวโพดในผงหัวหอม .....	31
3.5.2 การทดสอบการปลอมปนน้ำเชื่อมในน้ำผึ้ง .....	34
3.5.3 การทดสอบการปลอมปนน้ำในน้ำกะทิ .....	37
<b>3.6 การสร้างแบบจำลองการทำงานนายผลทางคณิตศาสตร์และการทดสอบสมรรถนะ</b> .....	38
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b> .....	40
<b>4.1 ค่า Repeatability และ Reproducibility ของเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ในรูปแบบต้นทุนต่ำ</b> .....	40
<b>4.2 กราฟแสดงค่าการสะท้อนของวัสดุทางการเกษตรตัวอย่างจากเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ในรูปแบบต้นทุนต่ำ</b> .....	41
4.2.1 ผงหัวหอม .....	41
4.2.2 น้ำผึ้ง .....	43
4.2.3 กะทิ.....	44
<b>4.3 กราฟแสดงค่าการดูดซับวัสดุทางการเกษตรตัวอย่างจากเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany)</b> .....	45
<b>4.4 ผลทำนายผลการปลอมปนของวัสดุทางการเกษตรจากเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนที่สร้างขึ้นและจากเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany)</b> .....	48
<b>4.5 สมการการทำนายความบริสุทธิ์ของเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ในรูปแบบต้นทุนต่ำ</b> .....	51

4.5.1 ผงหัวหอม .....	51
4.5.2 น้ำผึ้ง .....	51
4.5.3 กะทิ.....	51
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองดำเนินการและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>52</b>
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน .....	52
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
บรรณานุกรม .....	53
ภาคผนวก .....	55
ภาคผนวก ก ตารางผลทำนายนายการปลอมปนของแต่วัสดุการเกษตรด้วยเครื่องมือต่างๆอย่างละเอียด.....	56
ภาคผนวก ข ตารางคาดการณ์สารที่ตรวจพบในคลื่นต่างๆของวัสดุการเกษตรที่ใช้ในการทดลอง.....	59



## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ระบบการทำงานของเครื่องตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุการเกษตร .....	3
รูปที่ 2.1 การคั่นกะทิ.....	6
รูปที่ 2.2 ส่วนต่างๆของพีชที่ใช้เป็นเครื่องเทศ.....	8
รูปที่ 2.3 ผงหอม.....	8
รูปที่ 2.4 น้ำผึ้ง.....	11
รูปที่ 2.5 ช่วงสเปกตรัมของคลื่นแสงอินฟราเรด.....	12
รูปที่ 2.6 การทำแบบจำลองแคลิเบรชันด้วยวิธี PLS.....	14
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่างๆบนบอร์ดARDUINO UNO R3.....	19
รูปที่ 2.8 ระบบของ เซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ยี่ห้อ Spark Fun รุ่น AS7263.....	20
รูปที่ 2.9 หน้าจอแสดงผลแบบ OLED.....	21
รูปที่ 2.10 สวิตช์กดติดปล่อยดับ.....	22
รูปที่ 3.1 ส่วนสำหรับใช้ในการตรวจวัดรูปแบบที่ 1.....	25
รูปที่ 3.2 ส่วนสำหรับใช้ในการตรวจวัดรูปแบบที่ 2.....	26
รูปที่ 3.3 ส่วนสำหรับใช้ในการตรวจวัดรูปแบบที่ 3.....	26
รูปที่ 3.4 ระบบการทำงานของเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุการเกษตร.....	26
รูปที่ 3.5 Flow chat การทำงานของเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุการเกษตร.....	27
รูปที่ 3.6-3.7 เคสเครื่องมือตรวจวัด.....	29
รูปที่ 3.8 เครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุการเกษตรที่เสร็จสมบูรณ์.....	30
รูปที่ 3.9 แบ็งข้าวโพด ยี่ห้อ ปลาแฟนซีคาร์ฟ.....	31
รูปที่ 3.10 ผงหัวหอมยี่ห้อ ยูพี สไปซ์.....	32
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างทดลองในงานเพาะเชื้อขนาด 60*15 mm.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.12 ตัวอย่างทดลองในงานเพาะเชื้อที่ปลอมปนในอัตราส่วนน้ำหนักต่อน้ำหนัก ( w/w ) ที่ 100% 90% 80% 70 % 60% 50% 40% 30% 20% 10% ตามลำดับ.....	32
รูปที่ 3.13 การตรวจวัดการปลอมปนแป้งข้าวโพดในผงหัวหอมด้วยรูปแบบการตรวจวัดที่ 1.....	33
รูปที่ 3.14 การตรวจวัดการปลอมปนแป้งข้าวโพดในผงหัวหอมด้วยรูปแบบการตรวจวัดที่ 2.....	33
รูปที่ 3.15 การตรวจวัดการปลอมปนแป้งข้าวโพดในผงหัวหอมด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer.....	33
รูปที่ 3.16 น้ำผึ้งตรา Glory.....	34
รูปที่ 3.17 น้ำเชื่อมยี่ห้อ มิตรผล.....	34
รูปที่ 3.18 การเตรียมตัวอย่างการทดลองน้ำผึ้ง.....	35
รูปที่ 3.19 ตัวอย่างทดลองที่ถูกแบ่งออกลงในหลอดทดลองสำหรับเครื่อง FT-NIR.....	35
รูปที่ 3.20 การตรวจวัดการปลอมปนน้ำเชื่อมในน้ำผึ้งด้วยส่วนสำหรับการตรวจวัดรูปแบบที่ 3.....	36
รูปที่ 3.21 การตรวจวัดการปลอมปนน้ำเชื่อมในน้ำผึ้งด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer.....	36
รูปที่ 3.22 การเตรียมตัวอย่างการทดลองกะทิ.....	37
รูปที่ 3.23 การตรวจวัดการปลอมปนน้ำในกะทิด้วยรูปแบบการตรวจวัดที่ 3.....	38
รูปที่ 3.24 การตรวจวัดการปลอมปนน้ำในกะทิด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer.....	38
รูปที่ 3.25 แผนภาพแสดงกระบวนการสร้างแบบจำลองการทำนายผลทางคณิตศาสตร์และการทดสอบสมรรถนะ.....	39
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าการดูดซับของตัวอย่างผงหัวหอมด้วยวิธีการตรวจสอบแบบที่ 1.....	41
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าการดูดซับของตัวอย่างผงหัวหอมด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 2.....	42
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าการดูดซับของตัวอย่างน้ำผึ้งด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 3.....	43
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าการดูดซับของตัวอย่างกะทิด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 3.....	44
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าการดูดซับของตัวอย่างผงหัวหอมด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer.....	45
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าการดูดซับของตัวอย่างน้ำผึ้งด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer.....	46
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าการดูดซับของตัวอย่างกะทิด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer.....	47

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	คุณค่าทางโภชนาการของกะทิ ( หน่วยบริโภค 100 กรัม ).....	7
ตารางที่ 2.2	คุณค่าทางโภชนาการของผงหัวหอม ( หน่วยบริโภค 100 กรัม ).....	9
ตารางที่ 2.3	ตำแหน่งพีคในแถบสเปกตรัม NIR ที่เด่นชัดขององค์ประกอบต่างๆในวัสดุทางการเกษตร.....	12
ตารางที่ 2.4	การแปลความหมายของค่า R และ R <sup>2</sup> .....	17
ตารางที่ 3.1	ต้นทุนของเครื่องเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรด้วยเซนเซอร์ VIS-NIR MULTISPECTROMETER ในรูปแบบต้นทุนต่ำ.....	30
ตารางที่ 4.1	ความสามารถในการทวนซ้ำและความสามารถในการทำซ้ำของอุปกรณ์.....	40
ตารางที่ 4.2	ตารางสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของวัสดุทางการเกษตรทดลอง (COEFFICIENT OF DETERMINATION, R <sup>2</sup> ).....	49
ตารางที่ 4.3	ตาราง ROOT MEAN SQUARE ERROR (RMSE) ของวัสดุทางการเกษตรทดลอง.....	50
ตารางที่ ก.1	ผลการทำนายการปลอมปนในหงหัวหอมด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 1.....	57
ตารางที่ ก.2	ผลการทำนายการปลอมปนในหงหัวหอมด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 2.....	57
ตารางที่ ก.3	ผลการทำนายการปลอมปนในหงหัวหอมด้วยเครื่อง FT-NIR SPECTROMETER.....	57
ตารางที่ ก.4	ผลการทำนายการปลอมปนในหงหัวหอมด้วยเครื่อง FT-NIR SPECTROMETER ในช่วงคลื่น 800-860 นาโนเมตร.....	57
ตารางที่ ก.5	ผลการทำนายการปลอมปนในน้ำผึ้งด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 3.....	57
ตารางที่ ก.6	ผลการทำนายการปลอมปนในน้ำผึ้งด้วยเครื่อง FT-NIR SPECTROMETER.....	58
ตารางที่ ก.7	ผลการทำนายการปลอมปนในน้ำผึ้งด้วยเครื่อง FT-NIR SPECTROMETER ในช่วงคลื่น 800-860 นาโนเมตร.....	58
ตารางที่ ก.8	ผลการทำนายการปลอมปนในกะทิด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 3.....	58
ตารางที่ ก.9	ผลการทำนายการปลอมปนในน้ำกะทิด้วยเครื่อง FT-NIR SPECTROMETER.....	58
ตารางที่ ก.10	ผลการทำนายการปลอมปนในน้ำกะทิด้วยเครื่อง FT-NIR SPECTROMETER ในช่วงคลื่น 800-860 นาโนเมตร.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 คาดการณ์สารที่ตรวจพบในช่วงคลื่นต่างๆของผงหัวหอม.....60

ตารางที่ ข.2 คาดการณ์สารที่ตรวจพบในช่วงคลื่นต่างๆของน้ำผึ้ง.....62

ตารางที่ ข.3 คาดการณ์สารที่ตรวจพบในช่วงคลื่นต่างๆของกะทิ.....64



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1. ที่มาและความสำคัญ

วัสดุทางการเกษตร เป็นผลิตภัณฑ์หรือผลิตภัณฑ์อันเกิดจากการกลั่นกรอง การประมง การปศุสัตว์ การป่าไม้ หรือ ผลพลอยได้ของผลิตผลหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร อาทิเช่น ผงเครื่องเทศรูปแบบต่างๆ น้ำผึ้ง กะทิ เป็นต้น โดยสิ่งเหล่านี้ถือเป็นสินค้าพื้นฐานของครัวเรือนในประเทศไทย ที่ต่างซื้อติดครัวเรือนไว้เพราะถือเป็นส่วนประกอบในการปรุงอาหารให้มีรสชาติความหลากหลาย หรือสีของอาหารให้มีรสชาติที่น่ารับประทาน เช่น การใช้ผงหัวหอม (Onion Powder) ซึ่งเครื่องเทศที่มีรสเผ็ดร้อน ทำให้สามารถใช้แต่งกลิ่นอาหารได้หลายชนิด เช่น ยำ สลัด หรืออาหารประเภทผัด เช่น ผัดเนื้อ และรวมถึงยังถูกนำมาเป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมอาหารสำเร็จรูปในรูปแบบส่วนผสมเครื่องปรุงรส เช่น ผงปรุงรสแบบหมี่กึ่งสำเร็จรูป สำหรับในส่วนภาคอุตสาหกรรมส่งออกของประเทศไทยนั้นวัสดุทางการเกษตรถือว่าเป็นสินค้าส่งออกสำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทยในปี 2564 มีมูลค่าการส่งออกสินค้าประเภทดังกล่าวอยู่ที่ 1,500,000 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2564) และมีโอกาสที่จะเพิ่มมากขึ้นในอนาคต แต่ในปัจจุบันได้มีพบเจอปัญหาในการปลอมปนวัสดุอื่นที่มีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงวัสดุการเกษตรนั้นๆแต่มีราคาที่ถูกลงกว่าลงไป เช่น การปลอมปนน้ำและน้ำผสมแป้งต่าง ๆ ลงไปในกะทิ การปลอมปนแป้งประเภทต่างๆลงไปในผงเครื่องเทศ ซึ่งการกระทำดังกล่าวได้จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพวัสดุทางการเกษตรให้ลดน้อยลง และทำให้กลุ่มผู้บริโภคขาดความเชื่อมั่นในคุณภาพของวัสดุทางการเกษตรของประเทศไทย รวมถึงประเทศคู่ค้าวัสดุการเกษตรของไทยได้แก่ สหรัฐอเมริกา จีน ญี่ปุ่น เวียดนาม (กระทรวง-พาณิชย์, 2564) ย่อมที่จะลดโอกาสในการเลือกนำเข้าสินค้าจากประเทศไทยหรือเลือกนำเข้าสินค้าจากประเทศคู่แข่งอื่นๆแทน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อภาครวมเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ ในปัจจุบันการตรวจสอบการปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรไม่สามารถตรวจสอบได้ตรวจตาเปล่า อาจจะต้องใช้วิธีการทางเคมีที่ค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อนรวมถึงใช้เวลาในการตรวจสอบเป็นเวลานาน ดังนั้นการนำกระบวนการในการตรวจสอบที่ไม่จำเป็นต้องผสมสารเคมีหรือทำลายตัวอย่างทดลอง เพื่อการตรวจสอบสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรน่าจะเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาที่ดีที่สุดและสามารถทำให้บุคคลธรรมดาทั่วไปสามารถเข้าถึงการตรวจสอบสารปลอมปนเองได้และเป็นตัวช่วยในการสร้างความเชื่อมั่นต่อผู้บริโภคในการเลือกซื้อวัสดุทางการเกษตรให้มากยิ่งขึ้นเพราะสามารถรู้และทราบผลการปลอมปนได้ด้วยตนเองในเวลาที่รวดเร็ว โดยไม่จำเป็นต้องนำตัวอย่างของวัสดุทางการเกษตรนั้นๆไปทดสอบด้วยสารเคมีในห้องทดลองเพียงเท่านั้น

สำหรับในปัจจุบันกระบวนการที่ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบหรือทดสอบพืชผลทางการเกษตรและที่วัสดุทางการเกษตร ที่นิยมอย่างแพร่หลายคือกระบวนการตรวจสอบแบบ NIR spectroscopy ซึ่งเป็นกระบวนการทางสเปกโตรสโกปี ที่นำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum) ในช่วงความยาวคลื่น 800 - 2,500 นาโนเมตร มาประยุกต์ใช้เพื่อการตรวจสอบโดยไม่ทำลายตัวอย่าง (nondestructive testing) โดยมีตัวอย่างงานวิจัย เช่น การตรวจจับการเจือปนน้ำผึ้งด้วย NIR เผยให้เห็นความแตกต่างในรูปแบบสเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของน้ำ (György et al., 2015) การใช้เทคนิค Near-Infrared Spectroscopy หางค์ประกอบทางเคมี หญ้าฝรั่น (Alonso et al., 2005), การทำนายคุณภาพของชาดำหมัก (Chen et al., 2017), ตรวจสอบความมีชีวิตของถั่วเหลือง (Masithoh & Pahlawan, 2022), การตรวจจับการปลอมปนของถั่วลิสงในวอลนัทบด (Menevseoglu, Güneş, Doğan & Ayvaz, 2022) และ การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อปลา (Benešová, Jakabová, Ondruš & Golian, 2022)

แต่สำหรับรูปแบบกระบวนการตรวจสอบดังกล่าวในปัจจุบันนั้นยังมีข้อจำกัดอยู่มาก เช่น มีราคาแพง และขนาดเครื่องมือที่มีขนาดใหญ่ไม่เหมาะสำหรับการเคลื่อนย้าย ซึ่งจากข้อจำกัดดังกล่าวจะทำให้ทำการตรวจสอบได้ในสถานที่จำกัด เช่น ในห้องทดลองเพียงเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาถึงการพัฒนาเครื่องมือสำหรับการตรวจวัดสารปลอมปนใน วัสดุทางการเกษตรด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ในงบที่จำกัดและมีขนาดที่พกพาได้สะดวกโดยจากจุดมุ่งหมายดังกล่าว หากการพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดสารเจือปนในวัสดุทางการเกษตรด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer สามารถตรวจวัดได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพน่าจะจะสามารถแก้ปัญหาในการขาดความเชื่อมั่นในการเลือกซื้อวัสดุทางการเกษตรได้เพราะสามารถรับรองถึงความบริสุทธิ์และคุณภาพของวัสดุทางการเกษตรโดยไม่ต้องนำวัสดุทางการเกษตรเข้ามาตรวจสอบในห้องปฏิบัติการเพียงเท่านั้น

## 1.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

1.2.1 เพื่อประดิษฐ์เครื่องมือสำหรับการตรวจสอบวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ในรูปแบบต้นทุนต่ำ

1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุการเกษตร

## 1.3 ขอบเขตการทดลอง

1.3.1 ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำกระบวนการตรวจสอบแบบ NIR spectroscopy ด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ยี่ห้อ Spark Fun รุ่น AS7263 ที่รับค่าความยาวคลื่นใกล้ทั้งหมด 6 ช่วงความยาวคลื่นได้แก่ 610, 680, 730, 760, 810 และ 860 นาโนเมตร แล้วนำมาแปลงค่าเป็นสัญญาณดิจิทัลภายหลังด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ยี่ห้อ Arduino Uno รุ่น R3 เพื่อตรวจสอบสิ่งปลอมปนและความถูกต้องในวัสดุทางการเกษตรที่จัดจำหน่ายในท้องตลาดของประเทศไทย ได้แก่ ผงหัวหอม กะทิ และน้ำผึ้ง ที่ไม่ได้มีการปลอมปนสิ่งใดและนำมาปลอมปนด้วยสิ่งเจือปนต่าง ๆ ได้แก่ น้ำ แป้งข้าวโพด และน้ำตาล ตามลำดับ ด้วยอัตราส่วน 0% 10% 20 % 30 % 40% 50% 60% 70% 80% 90% และ 100% เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการตรวจสอบสารปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรด้วยเทคนิค Multiple linear regression (MLR), Partial least square regression (PLSR)

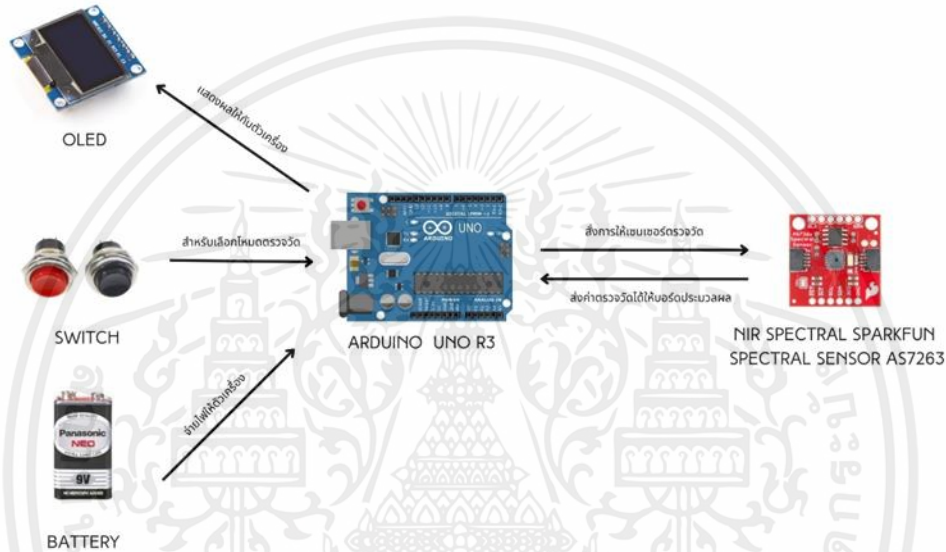
## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เครื่องมือสำหรับตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ต้นทุนต่ำที่สามารถตรวจสอบน้ำและแป้งชนิดต่าง ๆ รวมถึงสารละลายที่ปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรได้

## 1.5 ขอบเขตการดำเนินงาน

1.5.1 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น วัสดุทางการเกษตร การปลอมปนในวัสดุทางการเกษตร การตรวจสอบการปลอมปนด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เป็นต้น

1.5.2 ออกแบบส่วนประกอบ ต่อวงจร เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องมือสำหรับตรวจสอบวัสดุปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรให้สามารถพกพาและใช้งานได้ง่ายและสามารถแสดงผลการตรวจสอบสารการปลอมปนได้ดังแสดงในภาพที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ระบบการทำงานของเครื่องตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุการเกษตร

1.5.3 เตรียมตัวอย่างวัสดุทางการเกษตรที่จัดจำหน่ายในท้องตลาดของประเทศไทยได้แก่ ผงหัวหอม กะทิ และน้ำผึ้ง โดยแบ่งตัวอย่างการทดลองออกเป็น 10 ชุดการทดลองและทำการผสมวัสดุปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรต่างๆได้แก่ แป้งข้าวโพด น้ำ และน้ำเชื่อมเข้มข้นตามลำดับ ด้วยอัตราส่วนต่อน้ำหนัก (w/w%) ที่ 100% 90% 80% 70 % 60% 50% 40% 30% 20% 10% และ 0% ในตัวอย่างการปลอมปนผงหัวหอมและน้ำผึ้ง และอัตราส่วนต่อน้ำหนัก (w/w%) 100% 95% 90% 85% 80% 70% 60% 50% และ 0% ในตัวอย่างกะทิ

1.5.4 ทำการตรวจวัดวัสดุปลอมปนในวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ เครื่องเทศ กะทิ และน้ำผึ้ง ด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ยี่ห้อ SparkFun รุ่น AS7263 เปรียบเทียบกับเครื่องมือในการตรวจสอบแบบ NIR spectrometer อื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบการผลของการตรวจวัด

1.5.5 สร้างแบบจำลองในการตรวจสอบการปลอมปนด้วยเทคนิค Multiple linear regression (MLR), Partial least square regression (PLSR)

1.5.6 ทดสอบสมรรถนะของเครื่องมือวัดและสมรรถนะของแบบจำลองด้วยค่าทางสถิติคือ Coefficient of determination ( $R^2$ ) และ Root Mean Square Error (RMSE)

1.5.7 ปรับปรุงแบบจำลองและปรับปรุงเครื่องมือให้มีประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น

1.5.8 สรุปผลและเขียนเล่มปริญญานิพนธ์



## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วัสดุทางการเกษตร

#### 2.1.1 นิยามของวัสดุทางการเกษตร

วัสดุทางการเกษตร เป็นสิ่งพืงหรือผลผลิตได้ที่เกิดจากการกลีกรรรม การประมง การปศุสัตว์ หรือ การป่าไม้ และผลพลอยได้ของผลิตผลหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งถูกใช้บริโภคเพื่อเป็นอาหารหรือนำออกมาแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ โดยในการวิจัยนี้ได้มีการกำหนดนิยามของวัสดุทางการเกษตรนั้นออกเป็น 3 ชนิดประกอบไปด้วย

#### 1. น้ำกะทิ (Coconut milk)

เป็นของเหลวที่ไม่มีเส้นใยที่ได้จากผลมะพร้าว ด้วยวิธีการสกัดหรือการบีบอัดจากเนื้อมะพร้าว แต่อาจมีน้ำมะพร้าวปนอยู่ ซึ่งอาจมีการเติมน้ำหรือไม่ได้ น้ำกะทิทั่วไปที่คั้นได้จากเนื้อมะพร้าวสด กระบวนการคั้นกะทิประกอบด้วย

- 1) นำเนื้อมะพร้าวใส่ในชาม พร้อมเทน้ำอุ่นลงผสมในชาม หรือ หากเป็นน้ำร้อน หลังการเทลงชาม ต้องทิ้งไว้สักพักให้อุ่นก่อน ปริมาณน้ำอุ่นที่ใช้ ประมาณ 1 ถ้วย
- 2) ทำการคั้นด้วยมือ นาน 15-20 นาที
- 3) ทำการกรองแยกน้ำ และกาก
- 4) นำกากผสมกับน้ำอุ่น ประมาณครึ่งถ้วย แล้วคั้นด้วยมือ นาน 5-10 นาที ก่อนแยกน้ำกับกากออก
- 5) นำน้ำกะทิส่วนแรกผสมกับส่วนที่ 2 เป็นอันได้น้ำกะทิสด
- 6) หากต้องการความเข้มข้นของน้ำกะทิ ให้นำเข้าอุ่นไฟจนเหลือน้ำกะทิประมาณ 1 ถ้วย

ซึ่งกะทิที่ได้จากกระบวนการผลิต จะมีลักษณะทางที่มีสีขาวขุ่นทึบแสง คล้ายน้ำมัน และมีกลิ่นเฉพาะของกะทิ และมีไขมันไม่ต่ำกว่าร้อยละ 30 และโปรตีนไม่ต่ำกว่าร้อยละ 3 และมีน้ำไม่เกินร้อยละ 55 กะทิโดยเป็นสารละลายที่อยู่ในรูปอิมัลชันที่ยึดเกาะระหว่างโปรตีน น้ำมัน และน้ำ ซึ่งหยดน้ำมันที่อยู่ในกะทิจะถูกล้อมรอบด้วยเมมเบรนของสารต่างๆ ได้แก่ โกลบูลิน (globulins) และอัลบูมิน (albumins) รวมถึงสารประกอบฟอสโฟไลปิด (Phospholipid) ได้แก่ เลซิทีน (lecithin) เซฟาลิน (cephalin) ซึ่งสารเหล่านี้ มีหน้าที่ที่สำคัญสำหรับเป็นอิมัลซิไฟเออร์ทำให้น้ำในกะทิคงตัว ไม่มีการแยกชั้นของน้ำมัน โปรตีน และน้ำ เนื่องจากปริมาณโปรตีนที่อยู่ระหว่างเม็ดไขมัน และน้ำมีปริมาณที่มากพอ ซึ่งจะเริ่มแยกชั้นภายหลังทิ้งไว้ประมาณ 5-10 ชั่วโมง และจะแยกชั้นสมบูรณ์ไม่เกิน 24 ชั่วโมง แต่สามารถเขย่าให้เข้ากันได้ภายหลัง 1) หัวกะทิ หรือ ชั้นครีม เป็นส่วนที่ได้จากการแยกตัวของสารละลายน้ำกะทิหลังตั้งทิ้งไว้ ซึ่งหัวกะทิจะลอยตัวแยกชั้นในส่วนบนสุด มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น และชั้นหนืด ทั้งนี้ หัวกะทิที่ดีควรมีไขมันไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 และโปรตีนไม่ต่ำกว่าร้อยละ 5 2) หางกะทิ หรือ ชั้นน้ำ เป็นส่วนที่ได้จากการแยกชั้นของน้ำกะทิเช่นกัน แต่จะเป็นส่วนที่แยกชั้นอยู่ด้านล่างสุด เป็นส่วนที่มีมากที่สุดคือน้ำกะทิ มีลักษณะเป็นน้ำสีขาวขุ่น หางกะทินี้ ควรมีไขมันไม่ต่ำกว่าร้อยละ 30 และโปรตีนไม่ต่ำกว่าร้อยละ 3 และกะทินั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถือเป็นส่วนผสมสำคัญในการประกอบอาหารของไทย เนื่องจากกะทิให้รสหวานมัน และมีกลิ่นหอม นิยมใช้ประกอบทั้งอาหารคาว และของหวาน อาหารคาว ได้แก่ แกงเขียวหวาน ต้มยำน้ำข้น ท่อหมก และแกงมัสมั่น เป็นต้น ส่วนของหวาน ได้แก่ บวชแดงไทย ลอดช่อง เป็นต้น และให้ประโยชน์ต่างๆเนื่องจากมีค่าโภชนาการต่างๆดังตารางที่ 2.1 โดยที่มีค่าอยู่ที่พลังงาน 326 กิโลแคลอรี / 100 กรัม



รูปที่ 2.1 การคั้นกะทิ  
ที่มา: MEEKAO, 2563

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของกะทิ (หน่วยบริโภค 100 กรัม)

คุณค่าทางโภชนาการ	ปริมาณ
ไขมันอิ่มตัว	18.9 กรัม หรือ 95%
ไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน	0.2 กรัม
ไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว	0.9 กรัม
โซเดียม	13 มิลลิกรัม หรือ 1%
โพแทสเซียม	220 มิลลิกรัม หรือ 7%
คาร์โบไฮเดรต	2.8 กรัม หรือ 1%
โปรตีน	2 กรัม หรือ 4%
แคลเซียม	2%
ไทอามิน	1%
ไนอาซิน	3%
ฟอสฟอรัส	10%
วิตามินซี	2%
เหล็ก	18%
วิตามินบี 6	1%
แมกนีเซียม	12%
ซิงค์	4%

## 2. เครื่องเทศ (Spice)

สิ่งที่มีความหอมฉุนและเผ็ดร้อนที่ได้มาจากพืชที่ใช้เพื่อปรุงอาหาร ให้สี กลิ่น รส และบางชนิดมีสรรพคุณเป็นยา เรียกรวมว่า เครื่องเทศ มีสรรพคุณที่แตกต่างกันไป บางชนิดมีฤทธิ์เป็นสารต้านออกซิเดชัน บ้างมีฤทธิ์เป็นสารกันเสีย โดยที่เครื่องเทศที่ใช้ในอาหาร มาจากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ผล ราก ใบ เปลือก เมล็ด ดอก หัว โดยมักที่จะผ่านการทำให้แห้ง ซึ่งจะทำให้มีความชื้นภายในต่ำ เพื่อให้มีอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น อาจอยู่ในรูปของผงป่น หรือสกัดในรูปของ โอลีโอเรซิน เพื่อสะดวกในการใช้งานโดยที่เครื่องเทศนั้นจะสามารถแบ่งได้ตามเกณฑ์ต่างๆ ดังนี้

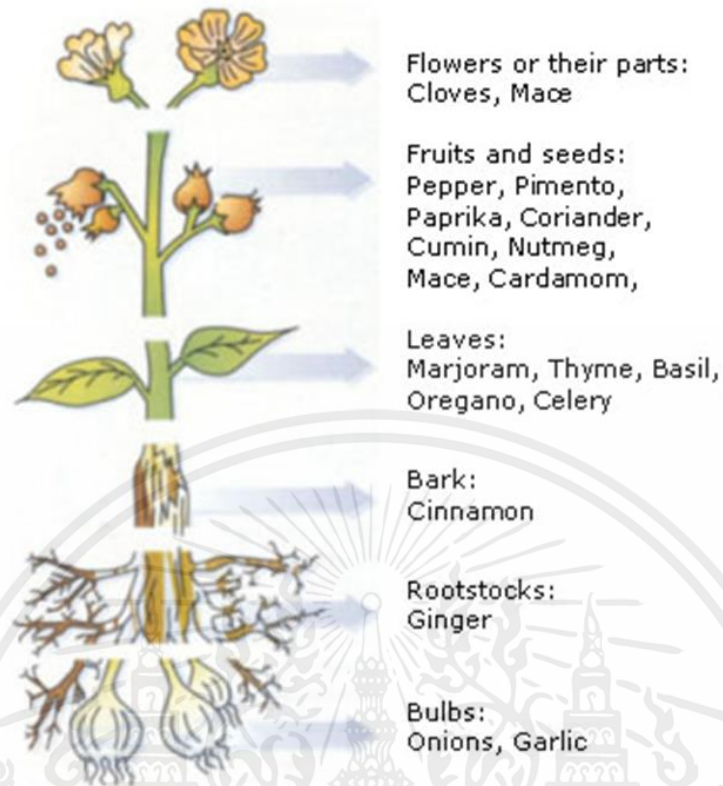
### 1) จำแนกเครื่องเทศตามแหล่งปลูก

1. เครื่องเทศในเขตอบอุ่น (Temperate spices) ได้แก่ ออริกาโน เบย์ กระเทียม
2. เครื่องเทศในเขตร้อน (Tropical spices) ได้แก่ อบเชย ลูกจันทร์ พริกไทย กระวาน ขิง

### 2.) จำแนกเครื่องเทศตามลักษณะการเจริญเติบโต

1. ไม้ยืนต้นไม่ผลัดใบ (Small evergreen) ได้แก่ กานพลู จันทร์เทศ อบเชย
2. ไม้เถาอายุยืน (Perennial herbaceous) ได้แก่ พริกไทย วานิลลา
3. ไม้หัวอายุยืน (Perennial herbs rhizomatous) ได้แก่ ข่า ขมิ้น กระวาน
4. ไม้ฤดูเดียว (Annual herbs) ได้แก่ พริก ผักชี ยี่ห่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ส่วนต่างๆ ของพืชที่ใช้เป็นเครื่องเทศ

ที่มา: ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และคณะ, 2566

โดยในการวิจัยนี้ได้มีการยกตัวอย่างเครื่องเทศที่ใช้ในการตรวจสอบการปลอมปน คือ ผงหัวหอม (Onion Powder) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มากจากหัวหอมใหญ่อบที่นำมาป่นละเอียด โดยมีลักษณะจะเป็นผงละเอียดสีครีมธรรมชาติ ให้กลิ่นหอม จึงนิยมนำมาเป็นส่วนประกอบในเครื่องปรุงรสต่างๆทั้งในเชิงพาณิชย์ เช่น ผงปรุงรสแบบหมีกิ้ง หรือใช้แต่งกลิ่นอาหารในครัวเรือนได้หลายชนิด เช่น ยำ สลัด หรือ อาหารประเภทผัด เช่น ผัดเนื้อ เป็นต้น โดยผงหัวหอมมีคุณค่าทางโภชนาการและองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.2 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.3 ผงหอม

ที่มา: John Phelan, 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2: คุณค่าทางโภชนาการของผงหัวหอม (หน่วยบริโภค 100 กรัม)

คุณค่าทางโภชนาการ	ปริมาณ
ไขมันอิ่มตัว	0.2 กรัม หรือ 2%
ไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน	0.3 กรัม
ไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว	0.2 กรัม
โซเดียม	73 มิลลิกรัม หรือ 4%
โพแทสเซียม	985 มิลลิกรัม หรือ 29%
คาร์โบไฮเดรต	79.1 กรัม หรือ 27%
ใยอาหาร	15.2 กรัม
น้ำตาล	6.6 กรัม
โปรตีน	10.4 กรัม หรือ 21%
แคลเซียม	38%
ไทอามิน	30%
ไนอาซิน	2%
วิตามินเค	5%
ฟอสฟอรัส	32%
วิตามินซี	39%
เหล็ก	22%
วิตามินบี 6	36%
แมกนีเซียม	28%
ไรโบฟลาวิน	5%
วิตามินอี	1%
ซิงค์	27%

### 3. น้ำผึ้ง (honey)

เป็นสารให้ความหวาน ที่เป็นผลผลิตจากธรรมชาติ ที่ผึ้งนั้นนำมาเก็บสะสมไว้เพื่อเป็นอาหารโดยที่มีสมบัติทางกายภาพดังต่อไปนี้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความถ่วงอยู่ที่จำเพาะ = 1.4225 น้ำผึ้ง 3,785 มิลลิลิตร (1 แกลลอน) น้ำหนัก 5,375 กรัม น้ำผึ้ง 0.453 กิโลกรัม (1 ปอนด์) มีปริมาตร 318.9 มิลลิลิตรและพลังงานคิดเป็นแคลอรีน้ำผึ้ง 0.453 กิโลกรัม (1 ปอนด์) ให้พลังงาน 1,380 แคลอรี น้ำผึ้ง 100 กรัม ให้พลังงาน 303 แคลอรี และคุณสมบัติอื่นๆดังนี้

- ปริมาณความชื้น น้ำผึ้งที่ดีควรมีปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 21 เพื่อที่รสชาติที่จะเข้มข้น สามารถเก็บไว้ได้นานโดยจะเปลี่ยนแปลงสภาพเพียงเล็กน้อย
- น้ำตาลของน้ำผึ้ง น้ำผึ้งเป็นแหล่งของสารอาหารคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญ เพราะถ้าหักปริมาณน้ำหรือความชื้นออกแล้ว จะมีน้ำตาลประมาณร้อยละ 95-99 น้ำตาลฟรุกโทส (fructose) และเดกซ์โทรส (glucose) ยังประกอบด้วย น้ำตาลซูโครส มอลโทส (maltose) แล็กโทส (lactose) และน้ำตาลอื่นๆ รวม 17 ชนิด
- กรดในน้ำผึ้ง เนื่องจากน้ำผึ้งมีรสหวานจัด รสเปรี้ยวของสภาพความเป็นกรดจึงถูกปิดบังเอาไว้ โดยที่กรดในน้ำผึ้งมีหลายชนิด เช่น กรดฟอร์มิก กรดแอซิติก (acetic acid) กรดซิตริก (citric acid) กรดมาลิก และกรดซัคซินิก

- แร่ธาตุที่พบในน้ำผึ้ง ได้แก่ แคลเซียม โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม โซเดียม สังกะสี เหล็ก แมงกานีส ทองแดง ปริมาณแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งมีไม่มากนัก แต่ก็อยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสม การเติมน้ำผึ้งลงไปในอาหารชนิดต่างๆ จะเป็นการเพิ่มปริมาณแร่ธาตุที่จำเป็นแก่ร่างกาย และยังเป็น การเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการอย่างอื่นอีกด้วย
- เอนไซม์ในน้ำผึ้ง เอนไซม์ คือสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งที่มีชีวิต มีหน้าที่เป็น ตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ ภายในเซลล์นั้นๆ เอนไซม์สำคัญที่สุดที่พบในน้ำผึ้ง คือ "อินเวอร์เทส" ซึ่งมี หน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลซูโครสในน้ำหวานของดอกไม้ให้เป็นน้ำตาลเดกซ์โทรสและลิวโลส ในน้ำผึ้งมีเอนไซม์ที่ สำคัญอีกชนิดหนึ่งคือ "ไดแอสเทส" (หรืออะไมเลส) เอนไซม์ชนิดอื่นๆ ในน้ำผึ้งมี เอนไซม์แคทาเลส และฟอสฟาเทส และในรายงานล่าสุดพบว่าในน้ำผึ้งมีเอนไซม์อีกชนิดหนึ่งคือ กลูโคออกซิเดส เป็นเอนไซม์ จากต่อมฟาริงเกลสของผึ้ง ทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นกรดกลูโคนิก และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ หรือ "อินฮิบิต" ที่ทำหน้าที่ยับยั้งและทำลายเชื้อโรคได้
- วิตามินในน้ำผึ้ง ในน้ำผึ้งมีวิตามินอยู่หลายชนิด ได้แก่ ไทแอมิน (วิตามินบีหนึ่ง) ไรโบฟลาวิน (วิตามินบี สอง) กรดแอสคอร์บิก (วิตามินซี) ไพริดอกซิน (วิตามินบีหก) กรดแพนโททินิก กรดนิโคตินิก หรือที่เรียกรวมกลุ่มว่า วิตามินบีคอมเพล็กซ์ ปริมาณวิตามินในน้ำผึ้งแต่ละชนิดแตกต่างกันตามแหล่งที่มาของน้ำผึ้ง เดกซ์ทรินในน้ำผึ้ง เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลของกลูโคสต่อกันเป็นโซ่ยาว เป็นส่วนที่ทำให้ น้ำผึ้งชุ่มคอ และเคลือบผิว
- สารแขวนลอยในน้ำผึ้ง สารแขวนลอย หมายถึง โมเลกุลขนาดใหญ่ที่เกิดจากการรวมกลุ่มกันของโมเลกุล ขนาดเล็ก และกระจายตัวอยู่ในของเหลวอื่นๆ โมเลกุลของสารแขวนลอยจะไม่ตกตะกอน สารแขวนลอย ส่วนใหญ่ในน้ำผึ้งจะเป็นเกสรดอกไม้ ทั้งที่ไม่ถูกย่อยด้วยน้ำย่อย และที่ถูกย่อยด้วยน้ำย่อยแล้วบางส่วน และพบว่ามีโปรตีน 4-7 ชนิด ในปริมาณที่แตกต่างกัน ปริมาณโปรตีนในน้ำผึ้งจะมีอยู่ประมาณ 0.1-0.6%
- อินฮิบิต ซึ่งมีคุณสมบัติในการต่อต้านเชื้อโรคของน้ำผึ้ง สารอินฮิบิตนั้นมีในผลต่อต้านเชื้อโรคเพราะมีการ ผลิตไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ในปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นกลูโคนิก โดยเอนไซม์กลูโคออกซิเดส จึงมีการนำน้ำผึ้งมาใช้ในการรักษาบาดแผลสด ไฟไหม้ น้ำร้อนลวก แผลติดเชื้อ สารกระตุ้นปฏิกิริยา ทางชีวภาพอื่นๆ ในน้ำผึ้ง วิตามินและแร่ธาตุต่างๆ



## รูปที่ 2.4 น้ำผึ้ง

ที่มา: หมอชาวบ้าน, 2552

โดยที่มีลักษณะของที่ติดต่อไปนี้

- 1) มีความข้น และความหนืดพอสมควร ซึ่งแสดงว่ามีน้ำน้อย น้ำผึ้งที่ดีไม่ควรมียาเกินร้อยละ 21 หากมีน้ำเจือ
- 2) ปนมากกว่านั้น จะทำให้จุลินทรีย์สามารถเจริญและทำลายคุณค่าของน้ำผึ้งได้
- 3) มีสีตามธรรมชาติ ตั้งแต่สีเหลืองอ่อนถึงสีน้ำตาล ไส้ ไม่ขุ่นทึบ
- 4) มีกลิ่นหอมของน้ำผึ้งและดอกไม้ตามแหล่งที่ได้มา ปกติพืชที่ใช้ผลิตน้ำผึ้งมีหลายชนิด ที่นิยมคือ ลำไย
- 5.) และสาบเสือ น้ำผึ้งลำไยนับเป็นน้ำผึ้งที่มีรสหอมหวานเป็นพิเศษเหนือกว่าน้ำผึ้งจากพรรณไม้อื่น
- ทั้งหมด
- 6) ปราศจากกาก ไขผึ้ง หรือเศษตัวผึ้งปะปน รวมทั้งวัสดุต่างๆ แขนงลอยอยู่
- 7) ปราศจากกลิ่นรส ที่น่ารังเกียจอื่นใด หรือกลิ่นบูดเปรี้ยว ไม่มีฟอง
- 8) ไม่มีการใส่สารปรุงแต่งสี กลิ่น รสใดๆ ลงในน้ำผึ้ง

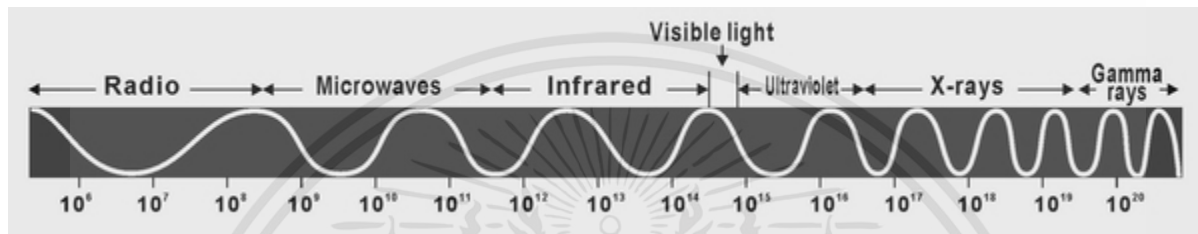
## 2.2 สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy)

### 2.2.1 หลักการของสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy)

เป็นการนำคลื่นแสงในช่วงวัดค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ ที่ช่วงความยาวคลื่น 700 -2500 นาโนเมตรซึ่งอยู่ระหว่างคลื่นไมโครเวฟ (microwave) และคลื่นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (visible light, VIS) ดังภาพที่ 2.5 โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือช่วงคลื่นสั้นที่มีความยาวคลื่น 800-1100 นาโนเมตร และช่วง คลื่นยาวที่มีความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร ส่งเข้าไปในตัวอย่างทดลอง ทำให้โมเลกุลของตัวอย่างทดลองดูดกลืน (absorb) พลังงาน แล้วเกิดการสั่นสะเทือน (vibration) การยืดหด (stretching) และ การเปลี่ยนมุม (bending) ในช่วงความถี่ overtones และ combination ของหมู่ฟังก์ชัน O-H, C-H, N-H และ O=H ซึ่งเป็นโมเลกุลหลักของสารอินทรีย์การตรวจวัดพลังงานทำได้หลายรูปแบบ เช่น แบบวัดการสะท้อน (reflectance) แบบวัดการส่องผ่าน (transmittance) เป็นต้น ซึ่งสเปกตรัมในช่วงคลื่นวัดค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกนำมาประมวลผล และหาความสัมพันธ์ทางสถิติกับข้อมูลของตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมี หรือวิธีอื่นๆ ที่ได้ค่ารับมาตรฐานการยอมรับ จะได้สมการสอบเทียบมาตรฐาน (calibration equation) เพื่อใช้ทำนายค่าปัจจัยคุณภาพของตัวอย่างทดลอง ได้ทั้งในเชิงปริมาณ (quantitative) และเชิงคุณภาพ (qualitative) โดยการใช้สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR Spectroscopy) โดยที่ในการทดสอบในเชิงปริมาณ สามารถทดสอบตัวอย่างได้ข้อมูลหลายค่าในเวลาเดียวกัน เช่น ความชื้น ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณ (proximate analysis) เช่น โปรตีน ไขมัน ค่าไอโอดีน (iodine value) ค่ากรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ค่าพีเอช (pH) ปริมาณอะไมโลส (amylose) เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ช่วงสเปกตรัมของคลื่นแสงอินฟราเรด  
ที่มา: ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และคณะ,2566

ตารางที่ 2.3 ตำแหน่งพิกในแถบสเปกตรัม NIR ที่เด่นชัดขององค์ประกอบต่างๆในวัสดุทางการเกษตร (Shenk et al.,2554)

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

### 2.2.2 ส่วนประกอบของสเปกสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

ส่วนประกอบหลักและการออกแบบเครื่องมือ Spectrometer แต่ละประเภทจะมีความคล้ายคลึงกัน โดยสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ นั้นจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก คือ แหล่งกำเนิดแสง ตัวเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ ตำแหน่งที่วางตัวอย่างทดลอง และเครื่องตรวจวัดและบันทึกผล ซึ่งแต่ละส่วนประกอบจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) แหล่งกำเนิดรังสีในช่วงสเปกสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ นั้นโดยส่วนใหญ่จะใช้ได้ตลอดทั้งสแตนด์บายเพราะด้วยราคาถูกและใช้งานได้โดยทันที แล้วใช้ตัวฟิลเตอร์ช่วยกรองแสงในช่วงความถี่ ที่ไม่ต้องการออกเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างร้อนจนเกินไป หรือใช้ LED เป็นแหล่งกำเนิดโดยค่าความยาวคลื่นที่ได้จะขึ้นกับสารที่ใช้ทำตัว LED อย่างไรก็ตาม LED ไม่สามารถให้ความยาวคลื่นในช่วง 1700-2500 นาโนเมตรได้ ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมนำไปใช้งาน แต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็เหมาะสำหรับเครื่องมือแบบพกพาเพราะต้องการกำลังไฟฟ้าน้อย มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและพลังงานของผลลัพธ์ที่ได้ก็ไม่เพิ่มสูงขึ้นแม้จะมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของแหล่งกำเนิด

2) โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) เป็นตัวช่วยในการกระจายแสงโดยอาศัยเกรตติง และควบคุมให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการด้วยช่องผ่านแสงเข้า (Entrance Slit) และช่องผ่านแสงออก (Exit Slit) ตัวอย่างจะมีการดูดกลืน หรือการยับยั้งให้รังสีทะลุผ่านหรือสะท้อนกลับนั้น ขึ้นกับรูปแบบและองค์ประกอบของตัวอย่าง เช่น ของแข็ง ของเหลว อิมัลชัน สารแขวนลอย เป็นต้น

3) ตำแหน่งที่วางตัวอย่าง จะต้องได้รับการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบของการวิเคราะห์และปริมาณของอนุภาคที่ใช้วิเคราะห์ เช่น ถ้วยสำหรับใส่ตัวอย่างจะเหมาะสำหรับตัวอย่างที่เป็นตะกอนแห้งหรือในกรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณมากถ้วยเหล่านี้จะมีการหมุน เป็นต้น เซลล์สำหรับใส่ตัวอย่างเหล่านี้จะต้องทำจากวัสดุที่ยอมให้แสงในช่วง NIR สามารถทะลุผ่านได้ เช่น ควอตซ์ หรือแก้ว และมีระยะทางเดินของแสงที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่าง

4) อุปกรณ์สำหรับตรวจวัด (Detector) ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการทาง Photoconductive Effect การเลือกเครื่องตรวจวัดนั้นขึ้นกับช่วงความยาวคลื่นและการออกแบบตัวแปรต่างๆ ของ Spectrometer ซึ่งซิลิกอนจะเหมาะสำหรับแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้และ NIR ช่วงความยาวคลื่นสั้น (400-1100 นาโนเมตร) ในขณะที่ลีดซัลไฟด์หรือเซเลเนียม

### 2.2.3 ข้อดีและข้อจำกัดของสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

1) ข้อดีของสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR Spectrometry) นั้นมีข้อดีที่เหนือกว่า MIR และ FIR คือ ต้องการการเตรียมตัวอย่างเพียงเล็กน้อยหรือไม่ต้องทำ และให้ข้อมูลตามเวลาจริง นอกจากนี้ NIR ยังแตกต่างจากวิธีการวิเคราะห์แบบอื่นๆ อีกคือ ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ไม่ทำลายตัวอย่างไม่ใช้สารเคมีหรือทิ้งสารตกค้างตรวจวัดองค์ประกอบหรือตัวแปรต่างๆ ได้พร้อมๆ กันและสามารถติดตั้งเครื่องมือได้ทุกสถานที่ใช้งานง่าย โดยไม่ต้องอาศัยนักเคมี ทำงานได้โดยไม่ต้องใช้ตู้ดูดควันระบบระบายน้ำ ความแม่นยำของ NIR นั้นขึ้นกับความแม่นยำของวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการควบคุม NIR มีข้อดีมากกว่า MIR และ FIR อีกข้อหนึ่งก็คือ เรื่องของความรบกวน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในทุกชิ้นจะเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนรบกวนต่อเครื่องตรวจวัดสัญญาณในช่วง MIR และ FIR แต่จะส่งผลต่อเครื่องตรวจวัด NIR เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีผลเลย

2) ข้อจำกัดของสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้สามารถตรวจวัดได้เฉพาะโมเลกุลของสารอินทรีย์เท่านั้น เพราะโลหะ เช่น เงินหรือตะกั่ว และสารอนินทรีย์ ส่วนใหญ่ไม่สามารถดูดกลืนรังสีในช่วง NIR และ การใช้งานเครื่อง NIR ต้องมีสมการที่เป็นสมการของตัวอย่างนั้นๆ โดยเฉพาะ เพราะองค์ประกอบของตัวอย่างแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันทางเคมี ดังนั้น แต่ละสมการ จึงจำเพาะกับตัวอย่างแต่ละชนิด และต้องอาศัยค่าทางสถิติมาคำนวณ ทำให้ต้องใช้จำนวนตัวอย่างที่เพียงพอที่จะทำให้สมการมีความผิดพลาดต่ำที่สุด (เข้าใกล้ 0)

### 2.2.4 การประยุกต์ใช้งานสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

ใช้ในการจำแนกความแตกต่างของสินค้าหรือวัสดุต่างๆ เช่น สารที่เป็น excipients หรือสารที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ วิธีการจำแนกวัตถุด้วย NIR นี้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งสามารถตรวจสอบวัสดุในปริมาณมากได้โดยไม่ต้องเสียเวลาไปกับเทคนิคทาง chemical หรือโครมาโตกราฟี สเปกตรัมที่ได้จากตัวอย่างจะถูกตรวจสอบแล้วนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน เพื่อให้ได้ผลการจำแนกที่รวดเร็ว และการตรวจวัดสารที่มีความชื้น เช่น น้ำ ที่เป็นสารที่ดูดกลืนแสงในช่วง NIR เป็นอย่างมาก จึงทำให้เหมาะต่อการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วย NIR ซึ่งสเปกตรัมเช่นกัน โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อความเข้มข้นมีการเปลี่ยนแปลงไป ระดับความชื้นสามารถตรวจวัดได้ด้วยโมเดลการสอบเทียบที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นเทียบกับวิธีการมาตรฐาน เช่น Karl Fischer Titration ความชื้นเป็นตัวแปรที่สำคัญในผลิตภัณฑ์ต่างๆ NIR สามารถตรวจวัดความชื้นในผลิตภัณฑ์แห้งเยือกแข็งได้โดยเช่นกัน โดยที่ไม่ต้องนำตัวอย่างออกจากภาชนะ ตรวจวัดปริมาณน้ำทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในกระบวนการทำแห้ง หรือใช้ตรวจวัดความชื้นในกระบวนการต่างๆในระบบอุตสาหกรรม

## 2.3 แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ

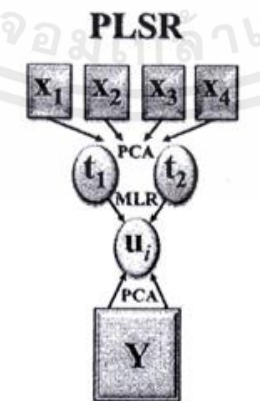
### 2.3.1 Partial Least Squares Regression (PLS-R)

Partial Least Squares Regression (PLS-R) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองการพยากรณ์หรือการทำนายค่าตามตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่เกี่ยวข้องกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีจำนวนตัวแปรต้นที่มาก และมีความสัมพันธ์ซับซ้อนระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม PLS-R ทำงานโดยนำเข้าข้อมูลตัวแปรต้นและตัวแปรตาม และกำหนดค่าที่สอดคล้องกับแนวโน้มหรือความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม โดยการใช้ความสัมพันธ์ทางเชิงเส้นระหว่างสองตัวแปรนี้ในรูปแบบของส่วนของข้อมูลที่สำคัญ (latent variables) หรือส่วนสำคัญที่สุดในการอธิบายความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม

PLS-R จะทำการสร้างแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลส่วนหนึ่งของตัวแปรต้นและตัวแปรตามเป็นชุดการฝึกอบรม (training set) และใช้ข้อมูลส่วนที่เหลือเป็นชุดทดสอบ (test set) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่สร้างขึ้น PLS-R มีความสามารถในการจัดการกับข้อมูลที่ซับซ้อนและมีความสัมพันธ์กัน โดยสามารถรวมความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามในแบบจำลองเดียวกันได้ ทำให้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์และทำนายผลลัพธ์ที่ถูกต้องในงานที่มีข้อมูลซับซ้อนและความสัมพันธ์ซับซ้อนระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม

$$Y = Xb \quad (2.1)$$

เมื่อ  $X$  = เมทริกซ์ของตัวแปรทำนาย  
 $Y$  = เมทริกซ์ของตัวแปรตาม  
 $b$  = ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดโดยกำลังสองน้อยที่สุด



รูปที่ 2.6 การทำแบบจำลองแคลิเบรชันด้วยวิธี PLS

ที่มา: Cho,2556

### 2.3.2 Multiple linear regression (MLR)

Multiple Linear Regression (MLR) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (ตัวแปรตามที่ต้องการทำนาย) กับตัวแปรต้น (ตัวแปรที่ใช้ในการอธิบายหรือทำนายตัวแปรตาม) โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นใน Multiple Linear Regression, ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรต้นถูกแสดงในรูปแบบสมการเชิงเส้น โดยมีสัมประสิทธิ์ (coefficients) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรต้น และสมการเชิงเส้นนี้สามารถใช้ในการทำนายค่าตัวแปรตามจากค่าตัวแปรต้นที่กำหนดได้ MLR ใช้ข้อมูลการสอบถามหรือการวัดของตัวแปรตามและตัวแปรต้นเพื่อสร้างแบบจำลองเชิงสถิติที่อธิบายหรือทำนายค่าตัวแปรตาม โดยพิจารณาความสัมพันธ์ข้ามตัวแปรตามและตัวแปรต้น โดยสามารถใช้เทคนิคการคัดเลือกตัวแปรต้นที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตาม และปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลองโดยการทดสอบและปรับค่าสัมประสิทธิ์ให้เหมาะสมกับข้อมูลที่มีอยู่ในการวิเคราะห์สมการของ Multiple Linear Regression

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_x x_x + b \quad (2.2)$$

เมื่อ  $y$  = ตัวแปรตาม หรือค่าทำนาย  
 $x_i$  = ตัวแปรต้น หรือค่าการสะท้อนแสงในย่านต่าง ๆ  
 $a_i$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าประมาณในตัวแปรต้นนั้น ๆ  
 $b$  = ค่าคงที่

## 2.4 ค่าทางสถิติสำหรับการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง

### 2.4.1 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, $R^2$ ) (Williams, 2007)

เป็นตัวชี้วัดความสอดคล้องของโมเดลทางสถิติที่ใช้ในการอธิบายและทำนาย หรือในกระบวนการตรวจสอบโมเดล ซึ่งสัมประสิทธิ์  $R^2$  วัดระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรตามที่โมเดลสามารถอธิบายได้โดยใช้ตัวแปรต้นค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยที่:

$R^2 = 1$  หมายถึงโมเดลสามารถอธิบายความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้อย่างแม่นยำที่สุด ค่าของตัวแปรต้นอธิบายค่าตัวแปรตามได้อย่างสมบูรณ์

$R^2 = 0$  หมายถึงโมเดลไม่สามารถอธิบายความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้เลย ค่าตัวแปรต้นไม่มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรตาม

$R^2$  สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรต้นโดยใช้เกณฑ์ความสัมพันธ์จากค่าความแปรปรวนของข้อมูล ค่า  $R^2$  สูงก็แสดงถึงความสอดคล้องของโมเดลกับข้อมูลที่มีอยู่ในชุดข้อมูล และค่า  $R^2$  ต่ำก็แสดงถึงข้อมูลที่อธิบายโดยโมเดลไม่เหมาะสม เมื่อใช้  $R^2$  เพื่อวัดประสิทธิภาพของโมเดล ควรพิจารณาพร้อมกับข้อจำกัดและความเหมาะสมของโมเดลในการอธิบายข้อมูล เช่น ตรงกับการเชื่อมโยงทางทฤษฎี และการทดสอบความแม่นยำของโมเดลด้วยชุดข้อมูลทดสอบหรือไม่ เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของโมเดล ในบางกรณีอาจมีค่า  $R^2$  ที่สูง แต่โมเดลอาจไม่เหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่สามารถทำนายได้อย่างแม่นยำ สามารถคำนวณได้จาก

$$R^2 = \left[ 1 - \frac{SSE}{SST} \right] \quad (2.3)$$

$$\text{เมื่อ } SSE = \sum (X - Y)^2 \quad (2.4)$$

$$SST = \sum (X - \bar{X})^2 \quad (2.5)$$

$\bar{X}$  คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตาม

$X$  คือ ตัวแปรตามที่วัดได้จริง

$Y$  คือ ค่าทำนายของตัวแปรตาม

## ตารางที่ 2.4 การแปลความหมายของค่า R และ R<sup>2</sup> [William, 2007]

R <sup>2</sup>	การแปลความหมาย
Up to 0.25	ไม่สามารถใช้ใน NIR calibration
0.26-0.49	เป็นความสัมพันธ์ที่แย่มาก ควรหาเหตุผล
0.50-0.64	ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกอย่างหยาบๆ
0.66-0.81	ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกและการประมาณค่าอย่างหยาบๆ
0.83-0.90	ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย
0.92-0.96	ใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
0.98+	ดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้

### 2.4.2 Root Mean Square Error (RMSE)

RMSE เป็นตัวชี้วัดความคลาดเคลื่อนของโมเดลทางสถิติในการทำนายหรือคาดการณ์ค่าตาม โดยมีนำมาใช้ในการวัดความแม่นยำของโมเดลทำนายและการประเมินค่าคาดการณ์ในการวิเคราะห์ข้อมูล ค่า RMSE ถูกนิยามโดยหาค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนแบบเส้นตรงระหว่างค่าที่ทำนายได้จากโมเดลและค่าจริง (หรือค่าตามที่เราต้องการคาดการณ์) โดยนับค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละค่าในรูปแบบของสี่เหลี่ยมด้านสั้นของความคลาดเคลื่อนในแกนตั้ง จากนั้นจึงนำค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนแต่ละค่านั้นมาหารากที่สองเพื่อให้ได้ค่า RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(y_i - y_i')^2}{n}} \quad (2.6)$$

เมื่อ RMSE = Root Mean Square Error  
 $y_i$  = ค่าแท้จริง  
 $y_i'$  = ค่าที่ได้จากการทำนาย  
 $n$  = จำนวนการเปรียบเทียบ

RMSE มีหน่วยเช่นเดียวกับตัวแปรที่ต้องการคาดการณ์ และค่ามากของ RMSE แสดงถึงความคลาดเคลื่อนที่มากขึ้นของการทำนายหรือคาดการณ์ ในทางปฏิบัติ ค่า RMSE จะถูกใช้เป็นวัดในการเปรียบเทียบความแม่นยำของโมเดลทำนายระหว่างโมเดลที่แตกต่างกัน โดยค่า RMSE ที่น้อยกว่าหมายถึงความแม่นยำที่ดีขึ้น

### 2.4.3 ความสามารถในการทวนซ้ำ (Repeatability) และ ความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility)

เป็นคำที่ใช้ในการวิเคราะห์และวัดความเสถียรภาพหรือความเชื่อถือได้ของผลวิจัยหรือการทดลองทางวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัดค่าทางกายวิเคราะหและการทดลองที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือหรือกระบวนการที่ใช้ในการสอบเทียบหรือวัดผลอย่างมีนัยสำคัญ

Repeatability หมายถึงความสามารถในการทำซ้ำการทดลองหรือการวัดผลซ้ำกันในเรื่องที่เหมือนกัน โดยเน้นที่การทดลองหรือการวัดในเวลาเดียวกันและในสภาวะที่เหมือนกัน ค่าที่ได้จากการทำซ้ำแต่ละครั้งจะถูกใช้ในการประเมินความแม่นยำและความเสถียรของผลวิจัย ค่าที่มีความผิดพลาดปรวนเล็กน้อยและผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันมากจะแสดงถึงความสามารถในการทำซ้ำที่ดีและความน่าเชื่อถือของผลวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reproducibility หมายถึงความสามารถในการทำซ้ำการทดลองหรือการวัดผลในเงื่อนไขที่แตกต่างจากเงื่อนไขเดิม โดยเน้นที่ความสามารถในการทำซ้ำในห้องปฏิบัติการหรือโดยผู้สำรวจที่แตกต่าง ความสามารถในการทำซ้ำนี้ใช้ในการตรวจสอบความเสถียรและความถูกต้องของผลวิจัย ถ้าผู้วิจัยอื่นสามารถทำซ้ำการทดลองหรือการวัดและได้ผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกัน ก็แสดงถึงความเชื่อถือได้ในผลวิจัยนั้น

Repeatability และ Reproducibility เป็นสองแง่มุมที่สำคัญในการวิเคราะห์และวัดความเสถียรภาพของผลวิจัยหรือการทดลองทางวิทยาศาสตร์ โดยการวัดความเสถียรภาพเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้เราเข้าใจถึงความน่าเชื่อถือของผลวิจัย นอกจากนี้ยังช่วยให้เราทราบถึงขอบเขตและความแม่นยำของผลวิจัยด้วย นำเสนอ Repeatability และ Reproducibility โดยใช้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) และค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน (Coefficient of Variation: C.V.) หรือ %Error คำนวณได้จาก

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum (X - \bar{X})^2} \quad (2.7)$$

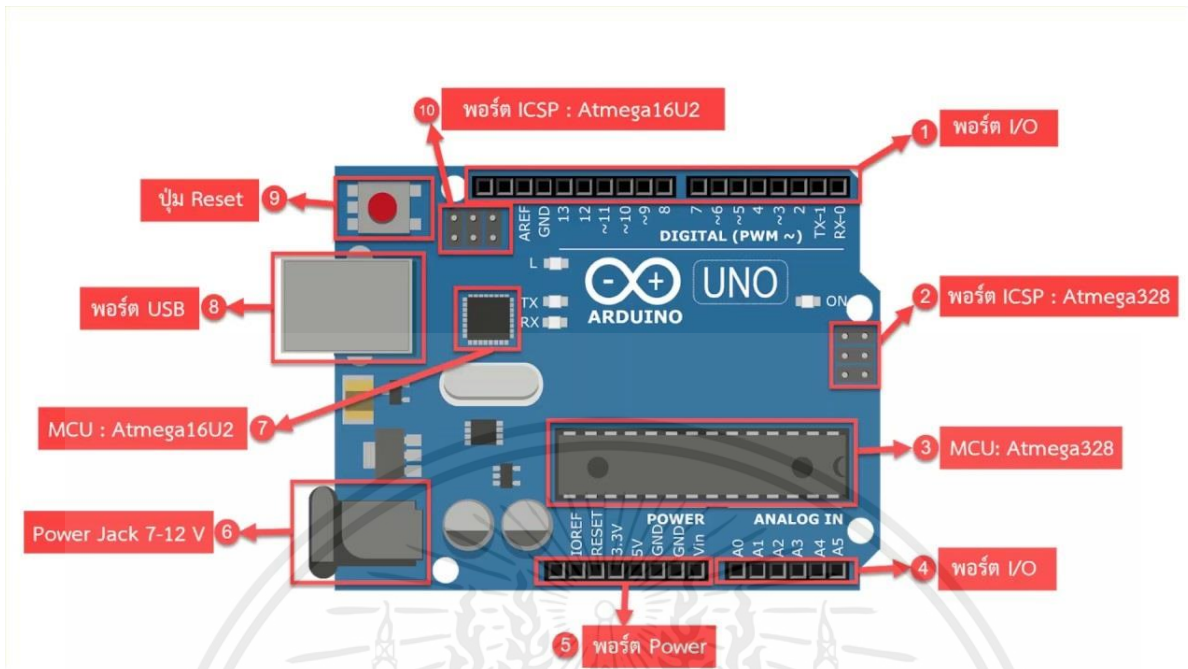
$$\%Error = \frac{SD}{\bar{X}}$$

เมื่อ  $X$  คือ ค่าที่วัดได้  
 $\bar{X}$  คือ ค่าเฉลี่ยของ  $X$   
 $N$  คือ จำนวนค่าที่วัดได้ทั้งหมด

## 2.5 เซนเซอร์และระบบประมวลผลภายใต้เครื่องมือสำหรับการตรวจสอบวัตถุสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ในรูปแบบต้นทุนต่ำ

### 2.5.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3

Arduino เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นิยมนำไปใช้ในปัจจุบัน เพราะประมวลผลและส่งต่อข้อมูลได้อย่างรวดเร็วจึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในโครงการสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ทุกรุ่น จะใช้ชิป AVR เป็นหลัก โดยส่วนที่ช่วยให้ง่ายต่อการทำงานคือตัวบอร์ดสามารถโปรแกรมการทำงานผ่านพอร์ตอนุกรมชนิด UART ได้ จึงทำให้สามารถเขียนโปรแกรมลงไปในชิปโดยใช้การเชื่อมต่อ USB ติดต่อกับ UART ผ่านโปรแกรม Arduino IDE ในการเขียนโปรแกรม และ Upload โปรแกรมลงบอร์ด Arduino



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่างๆบนบอร์ดARDUINO UNO R3

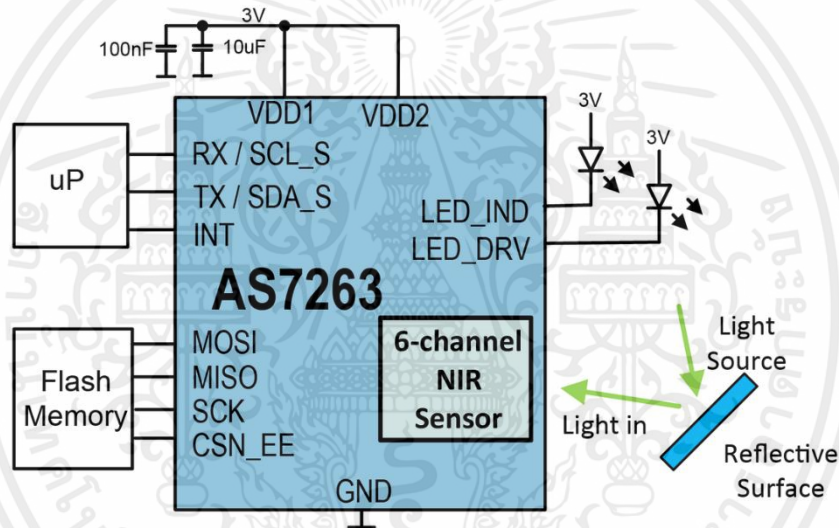
ที่มา: chayasitraphut,2562

1. ส่วนประกอบต่างๆบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3

- 1) I/O Port: Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0,1 เป็นขา Tx,Rx Serial, Pin3,5,6,9,10 และ 11 เป็นขา PWM
- 2) ICSP Port: Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader
- 3) MCU: Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
- 4) I/O Port: นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็น ช่องรับสัญญาณอนาล็อกตั้งแต่ขา A0-A5 ได้อีกด้วย
- 5) Power Port: ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อจะจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, Vin
- 6) Power Jack: รับไฟจาก Adapter โดยมีแรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
- 7) MCU: ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ผ่าน Atmega16U2
- 8) USB Port: ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับ Computer เพื่อใช้ในการอัปโหลดโปรแกรมเข้า MCU และใช้จ่ายไฟให้กับตัวบอร์ด
- 9) Reset Button: ปุ่มกดเพื่อเริ่มการทำงานใหม่.
- 10) ICSP Port: ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Com port บน Atmega16U2

### 2.5.2 เซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ยี่ห้อ Spark Fun รุ่น AS7263

เป็นสเปกโตรมิเตอร์แบบดิจิทัลจำนวน 6 ช่องสัญญาณ สำหรับการระบุสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นแสงใกล้ (NIR) และประกอบด้วยฟิลเตอร์ออปติคอลอิสระ 6 ตัว ซึ่งกำหนดการทำงานในในช่วงความยาวคลื่น NIR ตั้งแต่ 610, 680, 730, 760, 810 และ 860nm ของแสง โดยมีครึ่งความกว้างเต็มความกว้างสูงสุด (FWHM) ที่ 20 นาโนเมตร มีโปรแกรมกำหนดการทำงานหลอด LED ในตัวพร้อมกระแสไฟที่ตั้งโปรแกรมเองได้สำหรับการใช้งานชัตเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ บรรจุในแพ็คเกจ LGA ที่ให้รับแสงในตัวเพื่อควบคุมแสงที่เข้าสู่อาร์เรย์เซ็นเซอร์ การเข้าถึงข้อมูลการควบคุมและสเปกตรัมดำเนินการผ่านการเชื่อมต่อแบบ I<sup>2</sup>C หรือชุดคำสั่ง AT Spectral ระดับสูงผ่าน UART แบบอนุกรม ทำให้สามารถใช้ร่วมกับตัวเซ็นเซอร์อื่นหรือบอร์ดควบคุมได้อย่างง่ายดายรวมถึงการเข้าถึงที่ไม่ยากเย็น



รูปที่ 2.8 ระบบของ เซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ยี่ห้อ Spark Fun รุ่น AS7263

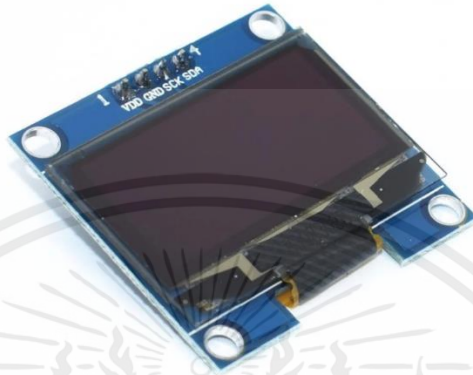
ที่มา: AS7263-General Description, 2559

### 2.5.3 หน้าจอแสดงผลแบบ OLED

จอแสดงผล OLED (Organic Light-Emitting Diode) display เป็นจอแสดงผลที่สร้างจากวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (Organic Semiconductor) ที่มีลักษณะเป็นชั้นสารที่กึ่งตัวนำบางๆ ซึ่งอยู่ระหว่างขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) และสามารถเปล่งแสงได้เมื่อ มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ซึ่งเรียกว่ากระบวนการอิเล็กโทรลูมิเนสเซนส์ (Electroluminescence) จอแสดงผล OLED มีข้อดีซึ่งแตกต่างจากจอแสดงผล LCD (Liquid Crystal Display) ทั่วไปคือ จอ OLED ไม่มีวงจรที่สร้างแสง Backlight จึงทำให้จอมีความ หนาน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และบอกว่า ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ นอกจากนั้นจะไม่มีแสงในบริเวณที่ ต้องการให้เป็นสีดำ ใช้วิธีเชื่อมต่อแบบ บัส I2C (Inter-Integrated Circuit)



รูปที่ 2.9 หน้าจอแสดงผลแบบ OLED  
ที่มา: hkwilwin, 2565

#### 2.5.4. ปุ่มกด (Push Button)

ปุ่มกด (Push Button) คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าพื้นฐานที่ทำหน้าที่ตัดและต่อวงจรไฟฟ้า ถูกนำมาใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์หรืองานทางไฟฟ้าเช่น การเปิดปิด เป็นต้น โดย Push button switch มีหลักการทำงาน เป็นการสัมผัส ซึ่งจะต้องใช้นิ้วมือกดที่ปุ่ม เพื่อให้ระบบทำงานหรือหยุดทำงานโดยประเภทของ Push button switch มี 2 แบบด้วยกัน ได้แก่

1) ปุ่มกดติด-ปล่อยดับ : เมื่อมีการกด push button switch หน้าสัมผัสจะเปลี่ยนสถานะจาก NO เป็น NC หรือ จาก NC เป็น NO และเมื่อปล่อยมือออกจากปุ่มกด หน้าสัมผัสจะกลับสู่ตำแหน่งเดิมในโหมดปกติด้วยแรงดันจากสปริงทันที

2) ปุ่มกดติด-กดดับ : การตรวจเช็คหน้าสัมผัสของ Push button switch จะเปลี่ยนสถานะจาก NO เป็น NC หรือ จาก NC เป็น NO และเมื่อปล่อยมือออกจากปุ่มกด หน้าสัมผัสจะถูกล็อกไว้ด้วยระบบกลไกของสวิทช์ และจะกลับเข้าสู่ตำแหน่งเดิม หรือโหมดปกติด้วยการคลายล็อกในระบบโดยการกด Push button switch อีกครั้ง



รูปที่ 2.10 สวิตช์กดติดปล่อยดับ  
ที่มา: Commandrone, 2559

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การปลอมปนในอาหารนั้นอาจเกิดขึ้นโดยตั้งใจหรือไม่ได้ตั้งใจก็ได้โดยการปลอมปนในอาหารนั้นจะเกิดในระหว่างหรือหลังกระบวนการผลิตก็ย่อมได้ โดยกว่า 60% ของหัวข้อการร้องเรียนเรื่องอาหารจากผู้บริโภคในอังกฤษและยุโรป พบว่าเป็นเกี่ยวกับเรื่องสิ่งปลอมปนในอาหารทั้งสิ้น ซึ่งความเสียหายจากเรื่องดังกล่าวที่ตามมาไม่ใช่แค่เรื่องของความรู้สึกผู้บริโภคเท่านั้น แต่ยังอาจร้ายแรงถึงขั้นความเสี่ยงด้านสุขภาพของผู้บริโภค (tephanie Anthony, 2016) ซึ่งการปลอมปนหรือเจือปนในอาหารนั้นย่อมส่งผลต่อความเชื่อมั่นของผู้บริโภคเป็นอย่างมาก รวมถึงยังส่งผลกระทบต่อภาพลักษณ์ของผู้ค้าในแง่ลบ

ในการตรวจสอบสารเจือปนในอาหารนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธีการอาทิเช่น การตรวจสอบด้วยประสาทสัมผัสของมนุษย์ หรือ การตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์ทางเคมี หรือกรรมวิธีอื่นๆ (เจ็ดโถม พบฤกษ์ และประเสริฐ เจริญแก้ว, 2511) แต่การตรวจสอบทางด้วยกรรมวิธีแบบเคมีหรือประสาทสัมผัสของมนุษย์นั้นย่อมมีข้อจำกัดอยู่เช่น ความสามารถในการรับรู้ของมนุษย์ที่ไม่เท่ากัน ระยะเวลาในการตรวจสอบที่ไม่แน่นอนหรือการตรวจสอบทางเคมีนั้นมีความค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงและใช้เวลานานรวมถึงไม่สามารถนำไปใช้งานต่อได้หลังจบการทดลองดังนั้นการนำเทคโนโลยีทางด้านสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy) มาประยุกต์ใช้งานซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ทำลายตัวอย่างและดำเนินการโดยใช้การวัดสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างที่รวดเร็วในระดับวินาทีที่มีความแม่นยำ และมีความสามารถในการทำซ้ำสูง วิธีนี้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและไม่ใช้สารเคมี เพื่อตรวจสอบการปลอมปนของอาหาร (Zhu et al., 2010)

2.6.1 วิธีการทดสอบคุณภาพของกล้วยหอมทองโดยวิธีไม่ทำลายตัวอย่าง (ธนชาติ ศรีเปารยะและคณะ, 2020) ได้ศึกษาและนำเสนอวิธีการทดสอบกล้วยหอมทองโดยไม่ทำลายตัวอย่างด้วย NIR Spectral Sensor

Model AS7263 เทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน Brix refractometer รุ่น Type Model Pen-Pro Cat.No.3730 วัดความหวานของกล้วยหอมทองตัวอย่างที่ระยะความสูงต่างกัน การทดสอบ NIR Spectral Sensor มีค่าความยาวคลื่น 6 ย่านคือ 610 nm, 680 nm, 730 nm, 760 nm, 810 nm และ 860 nm จากการทดลองได้ค่าทางสเปกตรัมในแต่ละความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์และสอดคล้องกับค่าความหวานที่วัดได้จากเครื่องวัดมาตรฐาน Brix refractometer ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบกล้วยหอมทองโดยวิธีไม่ทำลายตัวอย่างด้วยการใช้ NIR Spectral Sensor และยังสามารถขยายผลการศึกษาไปยังผลผลิตทางการเกษตรอื่นๆได้อีกด้วย

2.6.2 งานวิจัยเรื่องการศึกษาการทำนายปริมาณไขมันในน้ำกะทิด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Natrapee Nakawajana et al., 2560) โดยเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดแบบดั้งเดิม (วิธีเกอร์เบอร์) ซึ่งมีตัวอย่างจำนวน 100 ตัวอย่าง ถูกวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 870–2,500 nm ด้วยโหมดการวัดแบบ diffuse reflectance แล้วสร้างสมการทำนายปริมาณไขมันในน้ำกะทิด้วยวิธี Partial least square regression แบบ full cross validation โดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำกะทิเดิมที่ไม่ปรับแต่งด้วยวิธีการใดๆ นำสมการที่ได้มาทำนายค่าปริมาณไขมันของกลุ่มตัวอย่างและได้ผลพบว่ามีค่า  $R_p^2$  อยู่ที่เท่ากับ 0.9887 ค่า RMSEP เท่ากับ 0.411% ค่า RPD เท่ากับ 12.1 และค่า Bias เท่ากับ -0.258% แสดงให้เห็นว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ ซึ่งสรุปได้ว่าเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสามารถนำมาใช้ในการทำนายปริมาณไขมันในน้ำกะทิได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง

2.6.3 งานวิจัยเรื่องการสร้างเครื่อง NIR Spectral meter เพื่อการตรวจสอบประเภทของนมและทำนายความบริสุทธิ์ของนม (Atharva Deshpande และคณะ, 2021) เป็นการศึกษาที่ศึกษาในการสร้างเครื่องสำหรับการจำแนกประเภทของนมรวมถึงศึกษาถึงการเจือปนของน้ำในนมโดยการเก็บชุดข้อมูลจากนมวัวและนมควายที่มีการผสมน้ำลงไปตัวอย่างการทดลองซึ่งการทดลองนี้ใช้วิธีการจำแนกนมวัวและนมควายด้วยระบบ KNN (k-nearest neighbors) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมแมชชีนเลิร์นนิงใช้ในการจัดหมวดหมู่ ส่วนข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเซนเซอร์ NIR spectral รุ่น AS7263 จะถูกไปทำนายผลความบริสุทธิ์ด้วยการถดถอยเชิงเส้นและได้ผลลัพธ์ว่าเซนเซอร์รุ่นดังกล่าวสามารถเก็บข้อมูลได้ดีในช่วง 610 nm ถึง 860 nm ซึ่งจะสามารถตรวจสอบการปลอมปนของน้ำได้ดีและแม่นยำ

2.6.4 Vis/NIR Spectroscopy ในการทดสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่างเพื่อตรวจสอบความมีชีวิต (viability) ของเมล็ดถั่วเหลือง (et al., 2022) ช่วงความยาวคลื่น 350-1000 nm ในการศึกษาได้เก็บรวบรวมและวิเคราะห์ค่าแถบสี Vis/NIR ของเมล็ดถั่วเหลืองด้วยวิธีการ PLS-DA เพื่อระบุเมล็ดถั่วเหลืองที่ตายแล้วออกจากเมล็ดที่ยังมีชีวิต โดยจากการเปรียบเทียบการทดลองปลูกเมล็ดถั่วเหลืองกับการตรวจสอบเมล็ดถั่วเหลืองด้วย Vis/NIR Spectroscopy ได้ผลลัพธ์ที่แสดงให้เห็นถึงความถูกต้องและความน่าเชื่อถือถึง 100% งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ Vis/NIR Spectroscopy ร่วมกับการวิเคราะห์ผลทางเคมีสามารถตรวจสอบความมีชีวิตของเมล็ดถั่วเหลืองได้อย่างแม่นยำ

2.6.5 การตรวจจับการเจือปนน้ำผึ้งด้วย NIR เผยให้เห็นความแตกต่างในรูปแบบสเปกตรัมของน้ำ (György Bázár et al., 2558) เป็นการนำน้ำเชื่อมข้าวโพดฟรุคโตสสูง (HFCS) ผสมกับน้ำผึ้ง Robinia สีชนิดใน

อัตราส่วนต่างๆ (0–40%) และใช้สเปกตรัมใกล้อินฟราเรด (NIR) ด้วยวิธีการบันทึกค่าแบบ fiber optic immersion probe ซึ่งสามารถตรวจจذبระดับการเจือปนของ HFCS ได้อย่างแม่นยำโดยใช้การตรวจสอบความถูกต้อง (RMSECV = 1.48; R<sup>2</sup>CV = 0.987) การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน และช่วงสเปกตรัม 1300–1800 นาโนเมตร ที่มีแถบการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับทั้งน้ำและคาร์โบไฮเดรต การประเมินโดยใช้ Aquaphotomics แสดงให้เห็นว่าน้ำผึ้งดอกเดียมมีน้ำที่มีการจัดระเบียบสูงมากกว่าน้ำเชื่อมที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งน่าจะเป็นเพราะความหลากหลายของโมเลกุลที่มากกว่าที่ละลายในน้ำผึ้งที่มีองค์ประกอบหลากหลาย การเจือปนด้วย HFCS ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของน้ำค่อยๆ ลดลง โดยเฉพาะตัวตัดทอนน้ำ ซึ่งช่วยให้เกิดปฏิสัมพันธ์กับโมเลกุลอื่นๆ ได้ง่ายขึ้น สเปกโทรสโกปี NIR แบบไม่ทำลายที่รวดเร็วและไม่ทำลายร่วมกับอะควาโฟโตมิกส์สามารถนำมาใช้เพื่ออธิบายโครงสร้างโมเลกุลของน้ำในน้ำผึ้งและเพื่อตรวจจذبการเจือปนในรูปแบบที่ค่อนข้างพบได้ทั่วไป



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 แนวคิดการออกแบบสร้างเครื่อง Vis-NIR multispectrometer แบบต้นทุนต่ำ: กรณีการตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตร

การสร้างเครื่อง Vis-NIR multispectrometer แบบต้นทุนต่ำ: กรณีการตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุทางการเกษตรนั้นทางผู้จัดทำได้มีการออกแบบให้มีขนาดที่กะทัดรัดและใช้งานง่ายเพื่อสะดวกต่อการใช้งานและการพกพาโดยตัวเครื่องจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

##### 3.1.1 ส่วนสำหรับใช้ในการตรวจวัด

ได้มีการดำเนินการออกแบบทั้งหมด 3 รูปแบบ โดยมีหลักการใช้งานที่แตกต่างกันตามลักษณะของวัสดุทางการเกษตร ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

##### 1) หลักการออกแบบส่วนสำหรับการตรวจวัดรูปแบบที่ 1

เป็นการออกแบบเพื่อต้องการตรวจสอบตัวอย่างโดยตรงโดยไม่ผ่านภาชนะที่ใส่ตัวอย่าง โดยแสงจากเซ็นเซอร์จะกระทบตัวอย่างที่อยู่ด้านล่าง และสะท้อนไปหาเซนเซอร์ที่อยู่ด้านบน รูปแบบนี้เหมาะสำหรับตรวจสอบวัสดุตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นของเหลว

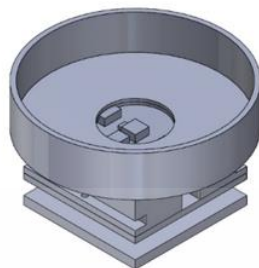


รูปที่ 3.1 ส่วนสำหรับใช้ในการตรวจวัดรูปแบบที่ 1

##### 2) หลักการออกแบบรูปแบบการตรวจวัดรูปแบบที่ 2

เป็นการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผง ที่มีพื้นผิวที่ตรวจสอบไม่ราบเรียบ ซึ่งทำให้ผลการทดลองมีโอกาสคลาดเคลื่อนได้ จึงควรตรวจสอบจากด้านล่างผ่านภาชนะทดลอง ซึ่งจะทำให้ตัวอย่างที่อยู่ก้นภาชนะจะมีพื้นผิวราบเรียบเสมอกัน แสงจากเซนเซอร์ด้านล่างจะกระทบตัวอย่างด้านบนแล้วสะท้อนกลับลงมาหาเซนเซอร์ทำให้สามารถตรวจสอบได้ทั้งของแข็งและของเหลว

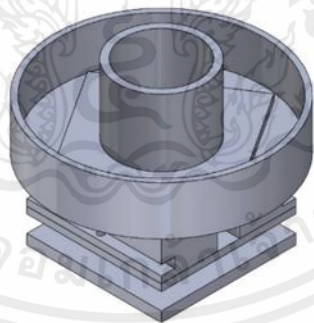
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ส่วนสำหรับใช้ในการตรวจวัดรูปแบบที่ 2

3) หลักการออกแบบรูปแบบการตรวจวัดรูปแบบที่ 3

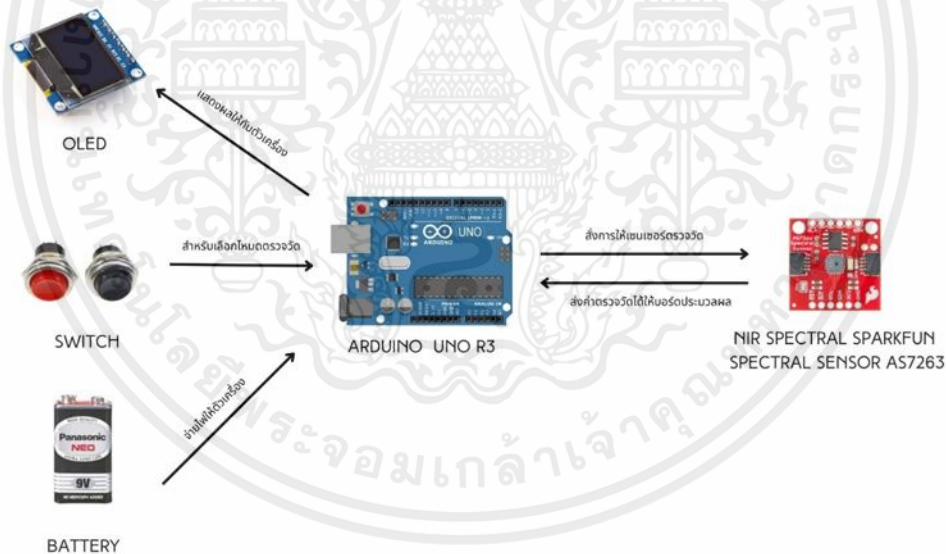
เป็นการออกแบบเพื่อตรวจสอบตัวอย่างจากด้านล่างเช่นเดียวกับแบบที่ 2 แต่ใช้ภาชนะใส่ตัวอย่างเป็นหลอดทดลองสำหรับเครื่อง FT-NIR spectrometer มาใช้ในการทดลองแทน ซึ่งออกแบบมาเพื่อตรวจสอบด้วยวิธี NIRS โดยตรง ส่งผลให้ใช้ปริมาณตัวอย่างทดลองที่น้อยกว่าการตรวจสอบแบบที่ 2



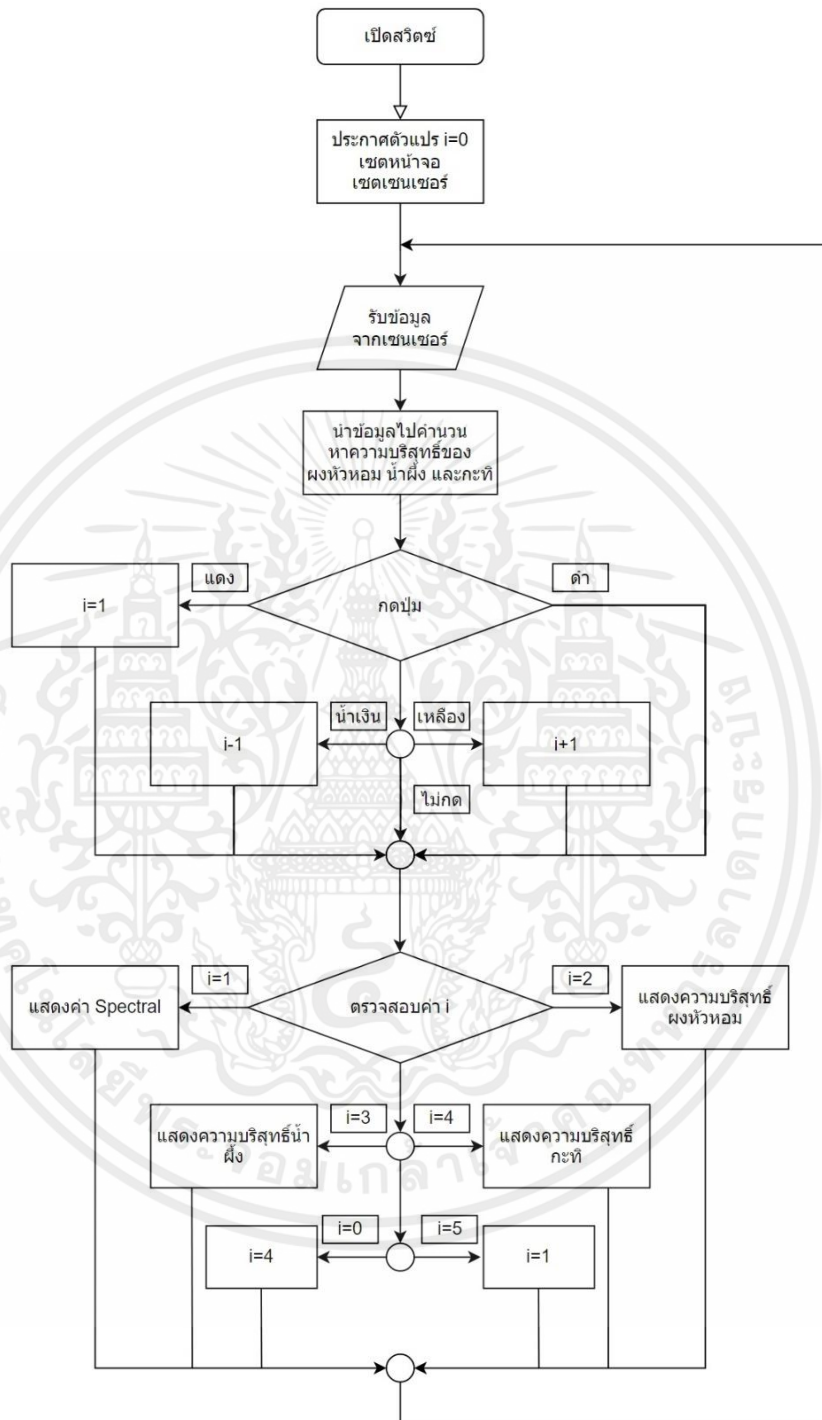
รูปที่ 3.3 ส่วนสำหรับใช้ในการตรวจวัดรูปแบบที่ 3

### 3.1.2 ส่วนสำหรับการแสดงค่าและประมวลผลรวมถึงแหล่งจ่ายพลังงานให้กับตัวเครื่อง

มีระบบการทำงานที่เริ่มต้นโดยการนำค่าการสะท้อนของวัสดุการเกษตรที่นำมาทดลองซึ่งได้จากเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ยี่ห้อ Spark Fun รุ่น AS7263 และส่งค่าเข้ามาประมวลผลที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 และซึ่งมีการโปรแกรมสมการการทำนายความบริสุทธิ์ จากแบบจำลองด้วยเทคนิค Multiple linear regression (MLR) และ Partial least square regression (PLSR) ซึ่งค่าที่ทำการทำนายผลเรียบร้อยแล้วนั้นจะถูกนำไปแสดงผลบนจอแสดงผล OLED 1.54 นิ้ว ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ ประกอบด้วย 4 โหมดแสดงผลคือ โหมด 1 แสดงค่าสเปกตรัมที่ตรวจวัดได้ โหมด 2 แสดงค่าความบริสุทธิ์ของผงหัวหอมในรูปแบบ % โหมด 3 แสดงค่าความบริสุทธิ์ของน้ำผึ้งในรูปแบบ % และโหมดที่ 4 แสดงค่าความบริสุทธิ์ของกะทิในรูปแบบ % และทำหน้าที่อื่นๆอีก คือ การเลือกโหมดในการตรวจสอบ ที่ใช้วิธีการเลือกด้วยสวิตช์แบบกดติดปล่อยดับ สำหรับการปรับเลือกโหมดการทำงานซึ่งจะทำการร่วมกัน 3 สวิตช์ คือ 1) สวิตช์เลือกโหมดต่อไป 2) สวิตช์เลือกย้อนกลับไปโหมดก่อนหน้า 3) สวิตช์เลือกโหมดที่ 1 ซึ่งสวิตช์ทั้งหมดจะทำงานสอดคล้องไปกับจอแสดงผลในการปรับเลือกไปยังโหมดต่างๆ และในระบบการทำงานจะมีแหล่งพลังงานคือถ่านไฟฉายขนาด 9 โวลต์

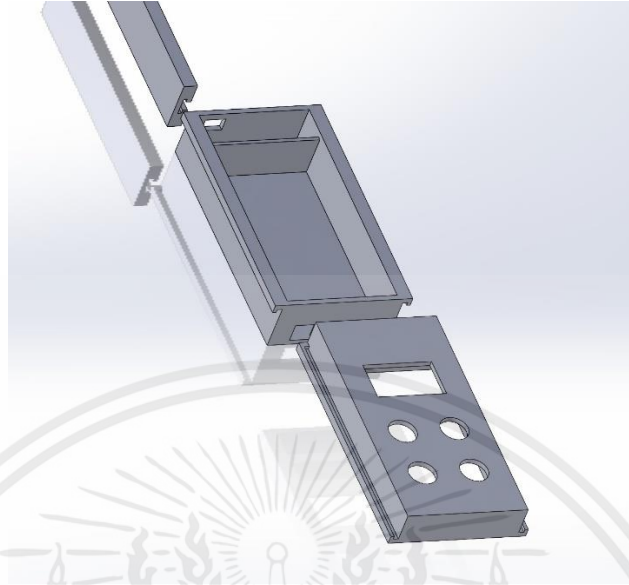


รูปที่ 3.4 ระบบการทำงานของเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุการเกษตร

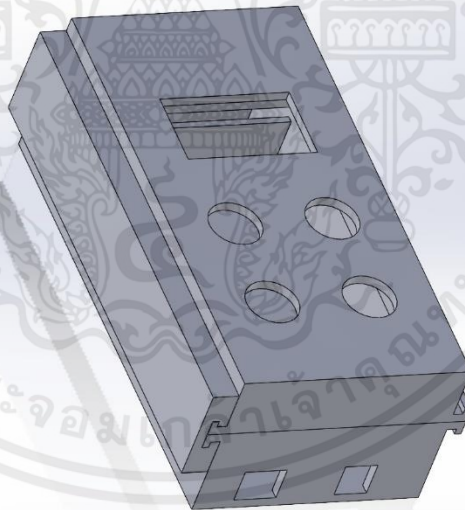


รูปที่ 3.5 Flow chat การทำงานของเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุการเกษตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เคสเครื่องมือตรวจวัด



รูปที่ 3.7 เคสเครื่องมือตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 เครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุการเกษตรที่เสร็จสมบูรณ์

### 3.2 ต้นทุนของเครื่องเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุการเกษตรด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ในรูปแบบต้นทุนต่ำ

เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนั้นทางผู้พัฒนาได้มีเลือกใช้อุปกรณ์และวัสดุที่มีต้นทุนต่ำเพื่อให้มีราคาต้นทุนต่อเครื่องนั้นถูกที่สุดเท่าที่สามารถเป็นไปได้ โดยที่ต้นทุนสุทธิของเครื่องมือนั้นมีราคาอยู่ที่ 4,000 บาท และมีราคาของอุปกรณ์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ต้นทุนของเครื่องเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุการเกษตรด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ในรูปแบบต้นทุนต่ำ

รายการ	ราคา (บาท)
เซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ยี่ห้อ Spark Fun รุ่น AS7263	1,785
บอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3	290
จอแสดงผล OLED 1.54 นิ้ว	370
สวิตช์แบบกดติดปล่อยดับ	80
ถ่านไฟฉายขนาด 9 โวลต์	40
สายไฟและอุปกรณ์เบ็ดเตล็ดอื่นๆ	1,400
รวม	4,000

### 3.3 การทดสอบความเป็นไปได้ของการใช้งานเซนเซอร์เบื้องต้น

เป็นการนำวัสดุทางการเกษตรที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ผงหัวหอม น้ำผึ้ง และ กะทิ รวมไปถึงวัสดุปลอมปนได้แก่ แป้งข้าวโพด น้ำเชื่อม และน้ำกลั่นตามลำดับ มาวัดค่าการสะท้อนของวัสดุเทียบกับวัสดุปลอมปน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อตรวจสอบเบื้องต้นว่าการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของวัสดุดังกล่าวด้วยวิธีการแบบ NIR spectroscopy นั้นสามารถทำได้หรือไม่

### 3.4 การหาค่า Repeatability และ Reproducibility ของเครื่องมือที่ประดิษฐ์ขึ้น

1) การหาความสามารถในการทวนซ้ำ (Repeatability) เป็นการทดลองด้วยการวัดค่าการสะท้อนแสงในตัวอย่างผงหัวหอม น้ำผึ้ง และกะทิบริสุทธิ์ เก็บข้อมูลในตัวอย่างเดิมและสภาพแวดล้อมเดิมโดยไม่รบกวนการบันทึกผลการทดลอง บันทึกข้อมูลการทดลองจากทั้งสามวัสดุมาเป็นจำนวนวัสดุละ 10 ข้อมูล รายงานความสามารถในการทวนซ้ำประกอบด้วยค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) และค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน (Coefficient of Variation: C.V.) หรือ %Error

2) การหาความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) ด้วยการทดลองวัดค่าการสะท้อนแสงในตัวอย่างผงหัวหอม น้ำผึ้ง และกะทิบริสุทธิ์ เก็บข้อมูลในตัวอย่างเดิมและสภาพแวดล้อมเดิมแต่ในการบันทึกค่าแต่ละครั้งจะทำการคนตัวอย่างใหม่แล้ววัดค่า เก็บข้อมูลจากทั้งสามวัสดุทดลองมาเป็นจำนวนวัสดุละ 10 ข้อมูล รายงานความสามารถในการทำซ้ำประกอบด้วยค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) และค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรปรวน (Coefficient of Variation: C.V.) หรือ %Error

### 3.5 การทดลองการใช้การเซนเซอร์ในการตรวจสอบการปลอมปนในวัสดุการเกษตร

#### 3.5.1 การทดสอบการปลอมปนแป้งข้าวโพดในผงหัวหอม

เป็นการทดสอบโดยการนำแป้งข้าวโพดยี่ห้อ ปลาแฟนซีคาร์ฟ มาทำการปลอมปนในผงหัวหอม ยี่ห้อ ยูพี สไปซ์ ที่อัตราส่วนน้ำหนักต่อน้ำหนัก (w/w) ที่ 100% 90% 80% 70 % 60% 50% 40% 30% 20% 10% และ 0% ตามลำดับและทำการบรรจุลงในจานทดลองขนาด 60\*15 mm เพื่อทำการตรวจสอบการปลอมปนด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ยี่ห้อ SparkFun รุ่น AS7263 ในรูปแบบการตรวจวัดที่ 1 และ 2 รวมถึงทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer



รูปที่ 3.9 แป้งข้าวโพด ยี่ห้อ ปลาแฟนซีคาร์ฟ



รูปที่ 3.10 ผงหัวหอมยี่ห้อ ยูพี สไปซ์

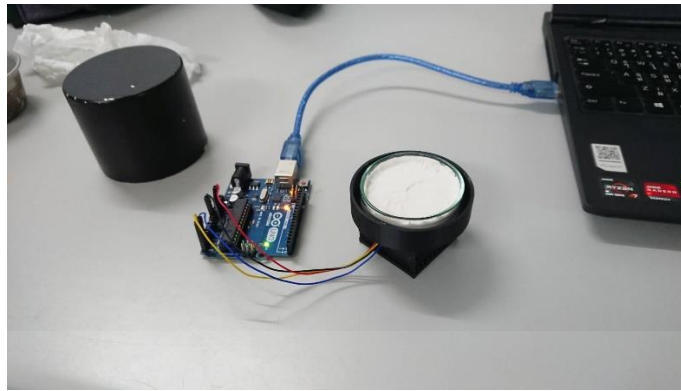


ภาพที่ 3.11 ตัวอย่างทดลองในงานเพาะเชื้อขนาด 60\*15 mm



ภาพที่ 3.12 ตัวอย่างทดลองในงานเพาะเชื้อที่ปลอมปนในอัตราส่วนน้ำหนักต่อน้ำหนัก (%w/w)

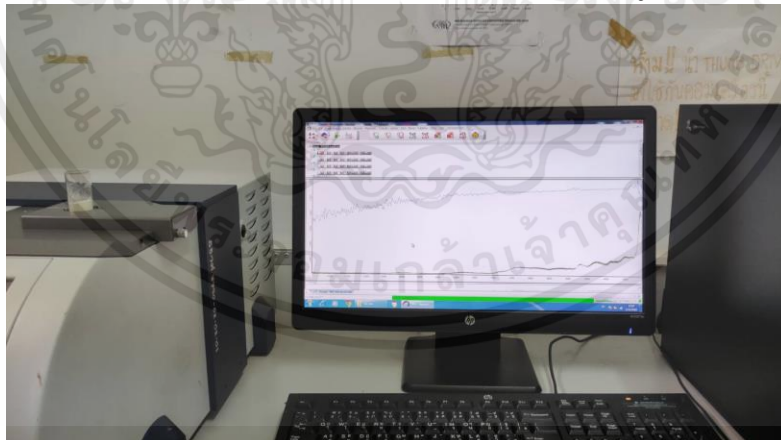
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 การตรวจวัดการปลอมปนแป้งข้าวโพดในผงหัวหอมด้วยรูปแบบการตรวจวัดที่ 1



รูปที่ 3.14 การตรวจวัดการปลอมปนแป้งข้าวโพดในผงหัวหอมด้วยรูปแบบการตรวจวัดที่ 2



รูปที่ 3.15 การตรวจวัดการปลอมปนแป้งข้าวโพดในผงหัวหอมด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 การทดสอบการปลอมปนน้ำเชื่อมในน้ำผึ้ง

เป็นการทดสอบโดยการนำน้ำเชื่อมยี่ห้อ มิตรผล มาทำการปลอมปนในน้ำผึ้งยี่ห้อ Glory ที่อัตราส่วนน้ำหนักต่อน้ำหนัก (%w/w) ที่ 100% 90% 80% 70 % 60% 50% 40% 30% 20% 10% และ 0% ตามลำดับโดยใช้แม่เหล็กสำหรับผสมสารในการผสม และทำการบรรจุลงในหลอดทดลองสำหรับเครื่อง FT-NIR เพื่อทำการตรวจสอบการปลอมปนด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ยี่ห้อ SparkFun รุ่น AS7263 ในรูปแบบการตรวจวัดที่ 3 รวมถึงทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

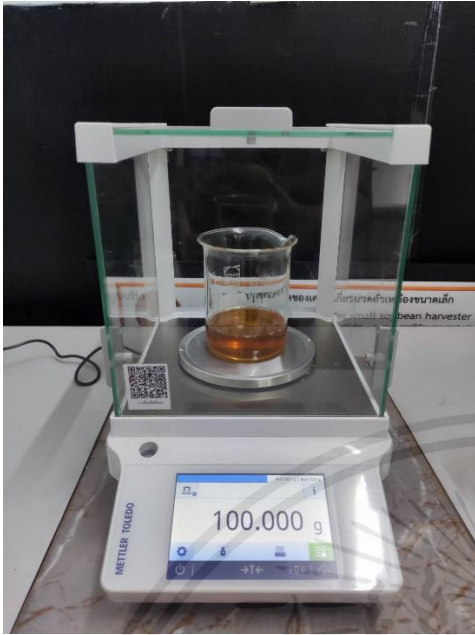


รูปที่ 3.16 น้ำผึ้งตรา Glory



รูปที่ 3.17 น้ำเชื่อมยี่ห้อ มิตรผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

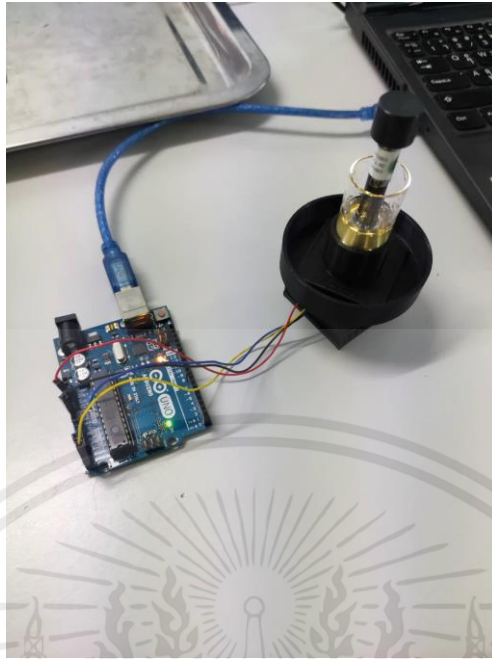


รูปที่ 3.18 การเตรียมตัวอย่างการทดลองน้ำผึ้ง



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างทดลองที่ถูกแบ่งออกลงในหลอดทดลองสำหรับเครื่อง FT-NIR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 การตรวจวัดการปลอมปนน้ำเชื่อมในน้ำผึ้งด้วยส่วนสำหรับการตรวจวัดรูปแบบที่ 3



รูปที่ 3.21 การตรวจวัดการปลอมปนน้ำเชื่อมในน้ำผึ้งด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.3 การทดสอบการปลอมปนน้ำในน้ำกะทิ

เป็นการทดสอบโดยการนำน้ำมาทำการปลอมปนในกะทิตัวอย่าง ซึ่งกะทินั้นถูกซื้อมาจากท้องตลาดสด และผ่านกระบวนการกรองและพาสเจอร์ไรส์เสียก่อน เพื่อเป็นการนำกากหรือสิ่งแปลกปลอมออกจากกะทิ ก่อนที่จะทำการปลอมปนน้ำลงไปในตัวอัตราส่วนน้ำหนักต่อน้ำหนัก (%w/w) ที่ 0% 50% 60% 70% 80% 90% 95% และ 100% ตามลำดับและทำการบรรจุลงในหลอดทดลองสำหรับเครื่อง FT-NIR เพื่อทำการตรวจสอบการปลอมปนด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ยี่ห้อ SparkFun รุ่น AS7263 ในรูปแบบการตรวจวัดที่ 3 รวมถึงทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer



รูปที่ 3.22 การเตรียมตัวอย่างการทดลองกะทิ



รูปที่ 3.23 การตรวจวัดการปลอมปนน้ำในกะทิด้วยรูปแบบการตรวจวัดที่ 3



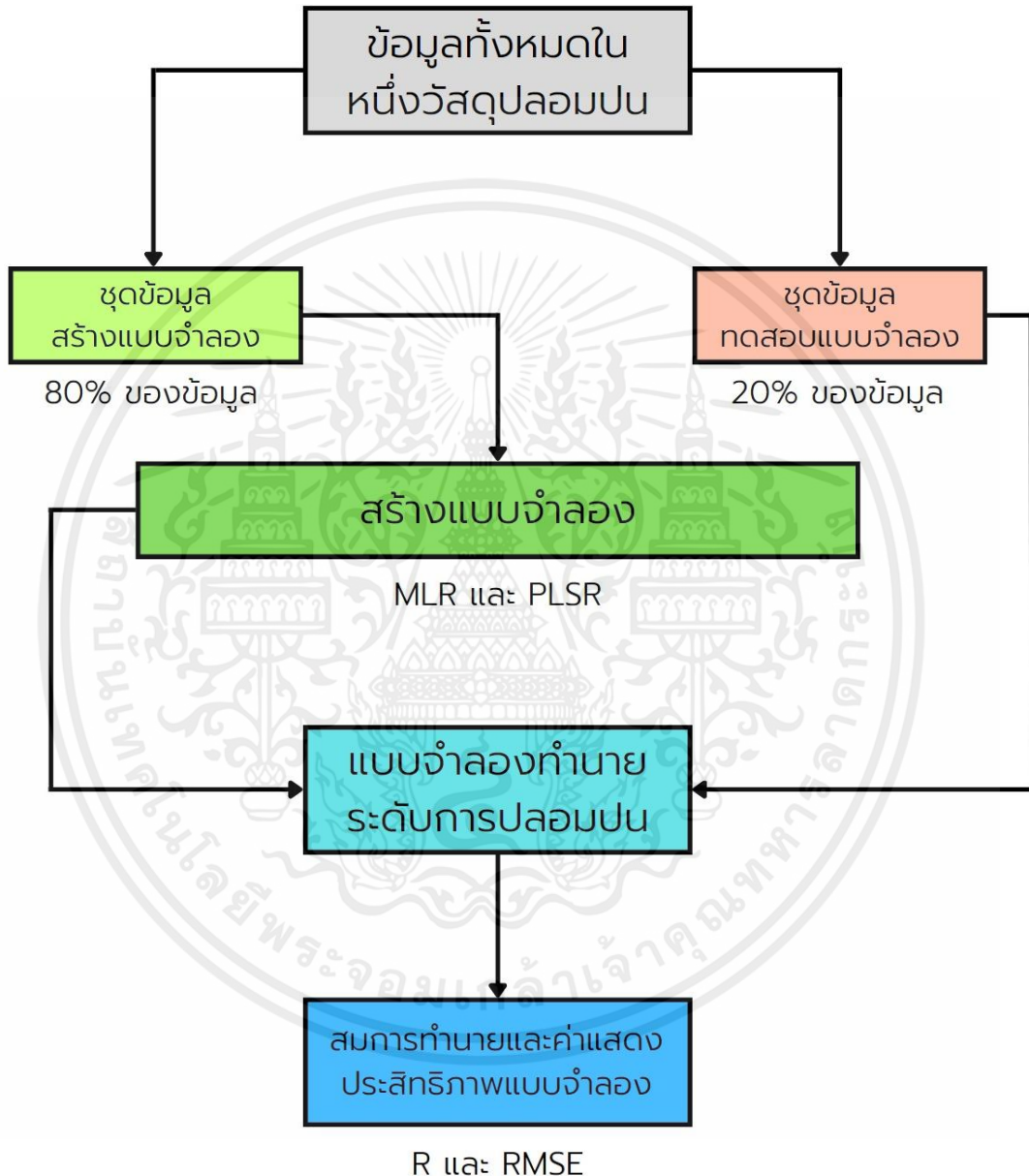
รูปที่ 3.24 การตรวจวัดการปลอมปนน้ำในกะทิด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

### 3.6 การสร้างแบบจำลองการทำนายผลทางคณิตศาสตร์และการทดสอบสมรรถนะ

เป็นการนำค่าสเปกตรัมที่ได้จากการทดลองมาสร้างแบบจำลองการทำนายผลทางคณิตศาสตร์ด้วยเทคนิค Multiple linear regression (MLR) และ Partial least square regression (PLSR) ข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลองประกอบด้วยข้อมูลจากเครื่อง Vis-NIR multispectrometer จากเครื่อง FT-NIR spectrometer ทุกช่วงคลื่น และจากเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่แบ่งเฉพาะข้อมูลช่วงคลื่น 800-860 nm เพื่อเปรียบเทียบจากทั้งสาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองในตัวอย่างเดียวกัน ใช้อัตราส่วนชุดสร้างแบบจำลองต่อชุดทดสอบแบบจำลองเป็น 80:20 และทดสอบสมรรถนะต่าง ๆ ด้วยค่า Coefficient of determination ( $R^2$ ), Root Mean Square Error (RMSE) เพื่อศึกษาถึงสมรรถนะของเครื่องมือวัดนั้น ๆ มีความสามารถมากพอและน่าเชื่อถือในการตรวจวัดการปลอมปนต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้หรือไม่



รูปที่ 3.25 แผนภาพแสดงกระบวนการสร้างแบบจำลองการทำนายผลทางคณิตศาสตร์และการทดสอบสมรรถนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ค่า Repeatability และ Reproducibility ของเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุ การเกษตรด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ในรูปแบบต้นทุนต่ำ

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าความสามารถในการทวนซ้ำและความสามารถในการทำซ้ำของอุปกรณ์ในการ ตรวจสอบวัสดุทดลองทั้งสาม ซึ่งความสามารถในการทวนซ้ำของวัสดุทั้งหมดมีค่า %Error น้อยกว่า 1% หมายความว่าอุปกรณ์มีความแม่นยำอย่างมากในการตรวจวัดวัสดุเดิมในสภาพแวดล้อมเดิม และความสามารถในการทำซ้ำของวัสดุทั้งสาม มี %Error น้อยกว่า 5% ในน้ำผึ้งและกะทิ และน้อยกว่า 1% ในผงหัวหอม ซึ่งยังถือว่า เครื่องตรวจวัดที่สร้างขึ้นมีความสามารถในการทำซ้ำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.1 แสดงความสามารถในการทวนซ้ำและความสามารถในการทำซ้ำของอุปกรณ์

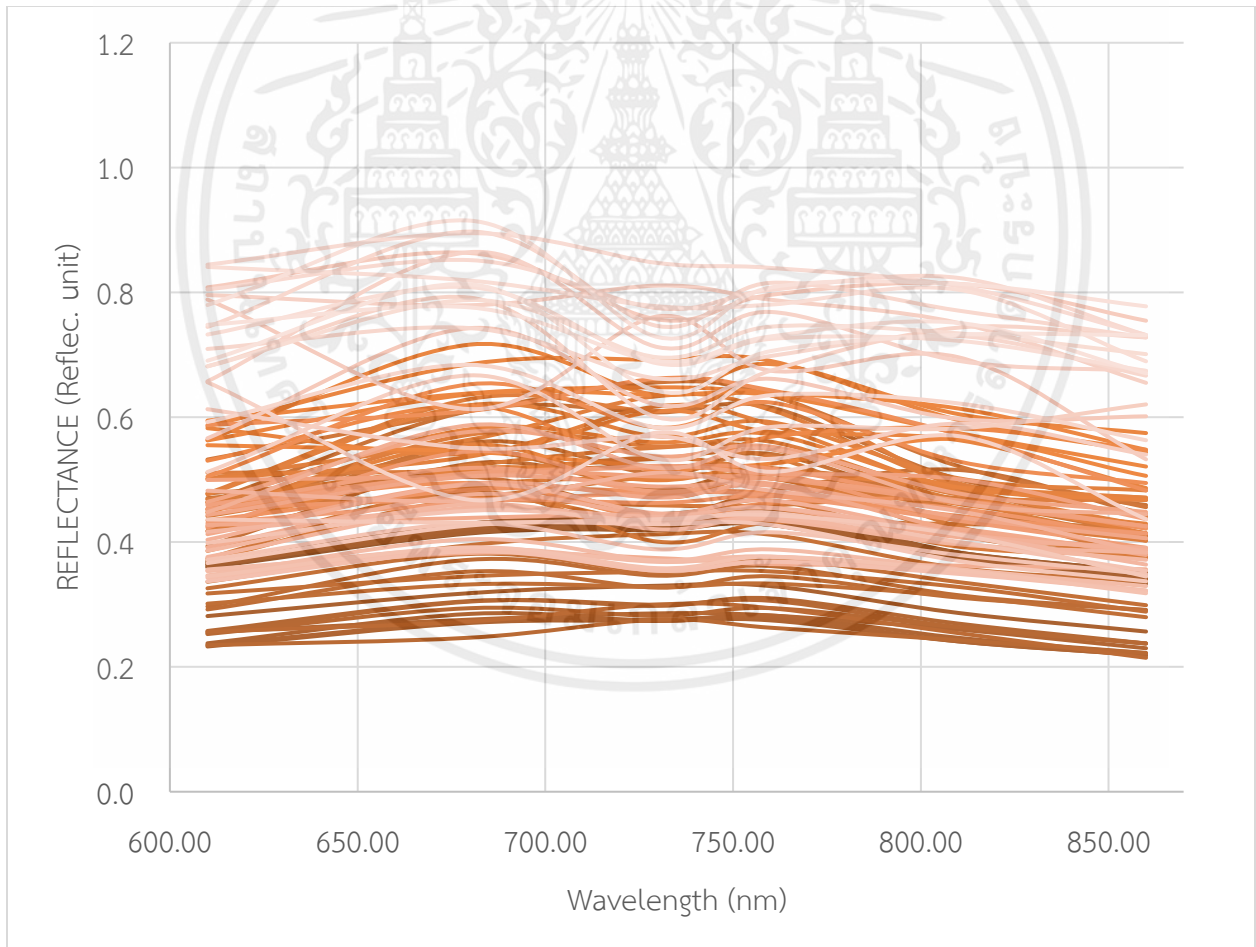
ตัวอย่าง	Repeatability		Reproducibility	
	SD	%Error	SD	%Error
ผงหัวหอม	0.0002	0.0227%	0.0049	0.5766%
น้ำผึ้ง	0.0003	0.1095%	0.0095	3.2434%
กะทิ	0.0006	0.1792%	0.0090	2.4643%

## 4.2 กราฟแสดงค่าการสะท้อนของวัสดุการเกษตรตัวอย่างจากเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุการเกษตรด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ในรูปแบบต้นทุนต่ำ

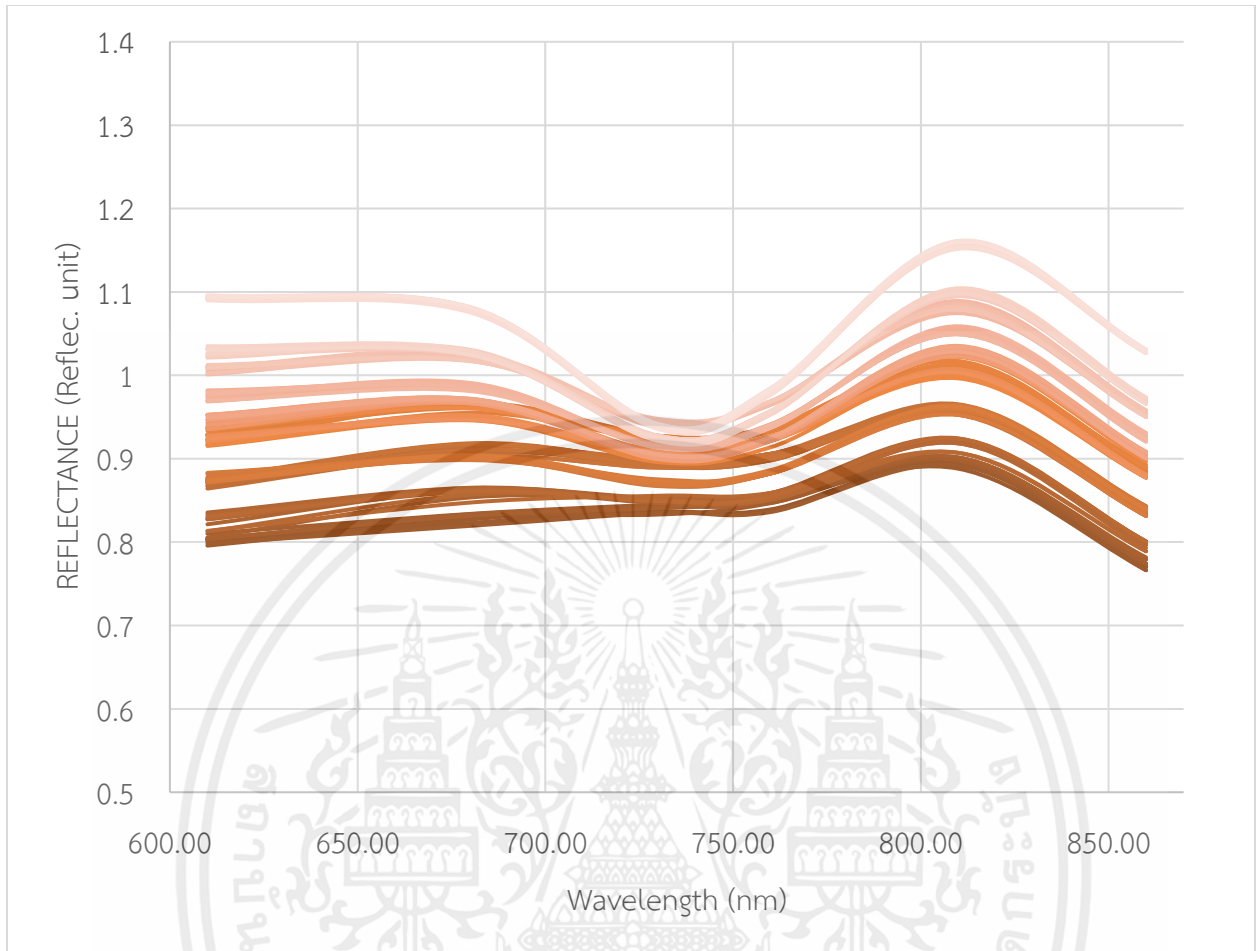
### 4.2.1 ผงหัวหอม

ผงหัวหอมนี้มีลักษณะของวัสดุที่เป็นผง ดังนั้นจึงเลือกทำการตรวจวัดด้วยวิธีการแบบที่ 1 และ 2 ซึ่งได้ผลการการดูดซับของตัวอย่างทดลองดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

จากรูปที่ 4.2 ที่ความยาวคลื่น 610-860 nm มีการสะท้อนต่ำที่ 738 nm (O-H str. Third overtone) และ ที่ 740 nm (C-H str. fourth overtone) เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่พบในแป้งข้าวโพด ที่ 762 nm (C-H str. fourth overtone) ของ Allyl propyl disulfide และ Allicin ในหัวหอม และมีการสะท้อนสูงที่ 806 nm (N-H str. third overtone) และ 808 nm (2xN-H str.+2N-H def.+2C-N str.) ซึ่งเป็น Folic Acid ในหัวหอม



รูป 4.1 กราฟแสดงค่าการสะท้อนของตัวอย่างผงหัวหอมด้วยวิธีการตรวจสอบแบบที่ 1

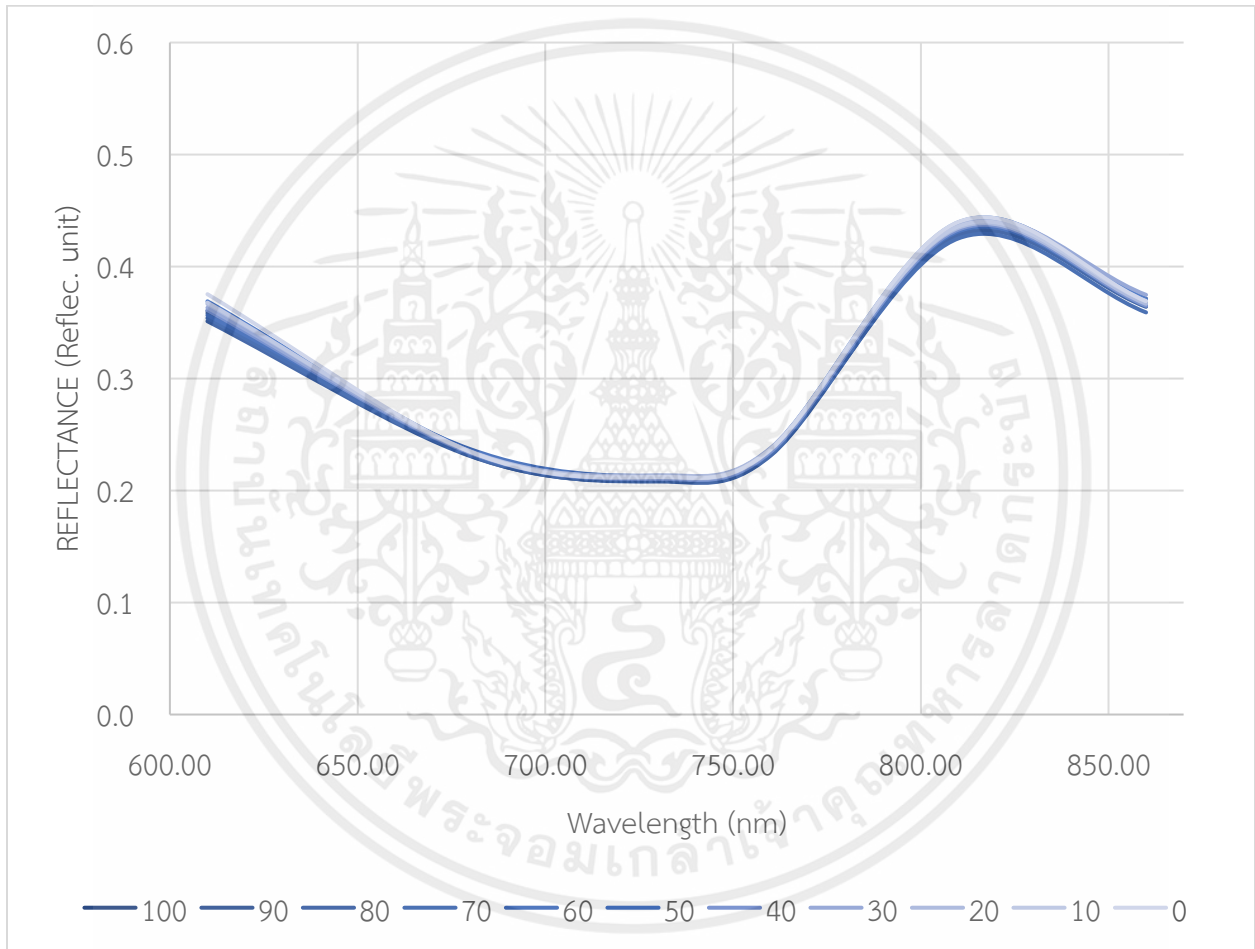


รูป 4.2 กราฟแสดงค่าการสะท้อนของตัวอย่างผงหุ้มด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 2

#### 4.2.2 น้ำผึ้ง

น้ำผึ้งนั้นมีลักษณะของวัสดุที่เป็นของเหลว ดังนั้นจึงเลือกทำการตรวจวัดด้วยวิธีการแบบที่ 3 ซึ่งได้ผลการสะท้อนของตัวอย่างทดลองดังรูปที่ 4.3

จากรูปที่ 4.3 ที่ความยาวคลื่น 610-860 nm มีการสะท้อนต่ำที่ 738 nm (O-H str. Third overtone) และ ที่ 740 nm (C-H str. fourth overtone) กลูโคส ฟรุกโทสและซูโครสในน้ำผึ้ง ที่ 760 nm (O-H str. third overtone) ของน้ำ ที่ 762 nm (C-H str. fourth overtone) ของกลูโคส, ฟรุกโตส, ซูโครสในน้ำผึ้ง

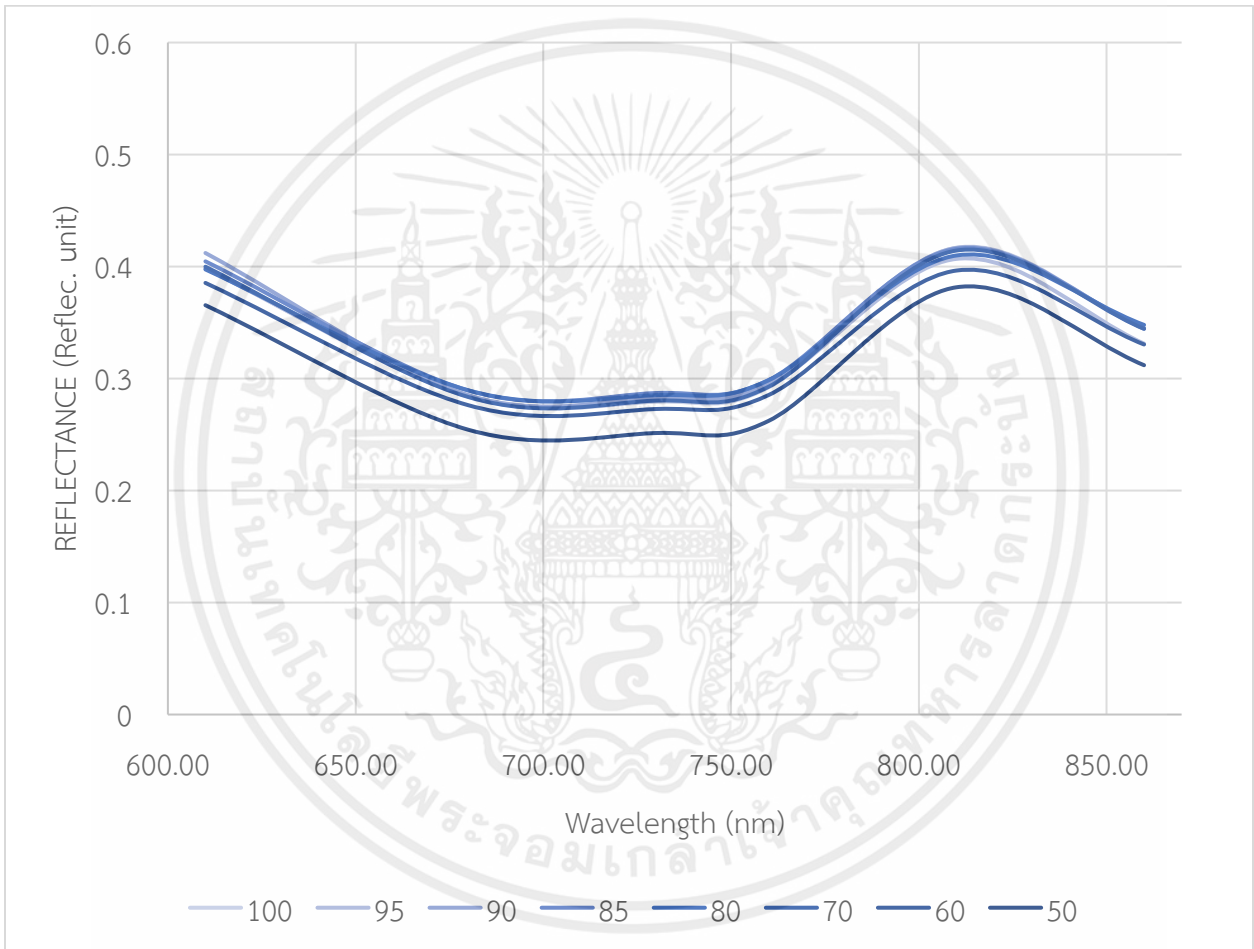


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าการสะท้อนของตัวอย่างน้ำผึ้งด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 3

### 4.2.3 กะทิ

กะทินั้นมีลักษณะของวัสดุที่เป็นของเหลว ดังนั้นจึงเลือกทำการตรวจวัดด้วยวิธีการแบบที่ 3 ซึ่งได้ผลการการสะท้อนของตัวอย่างทดลองดังรูปที่ 4.4

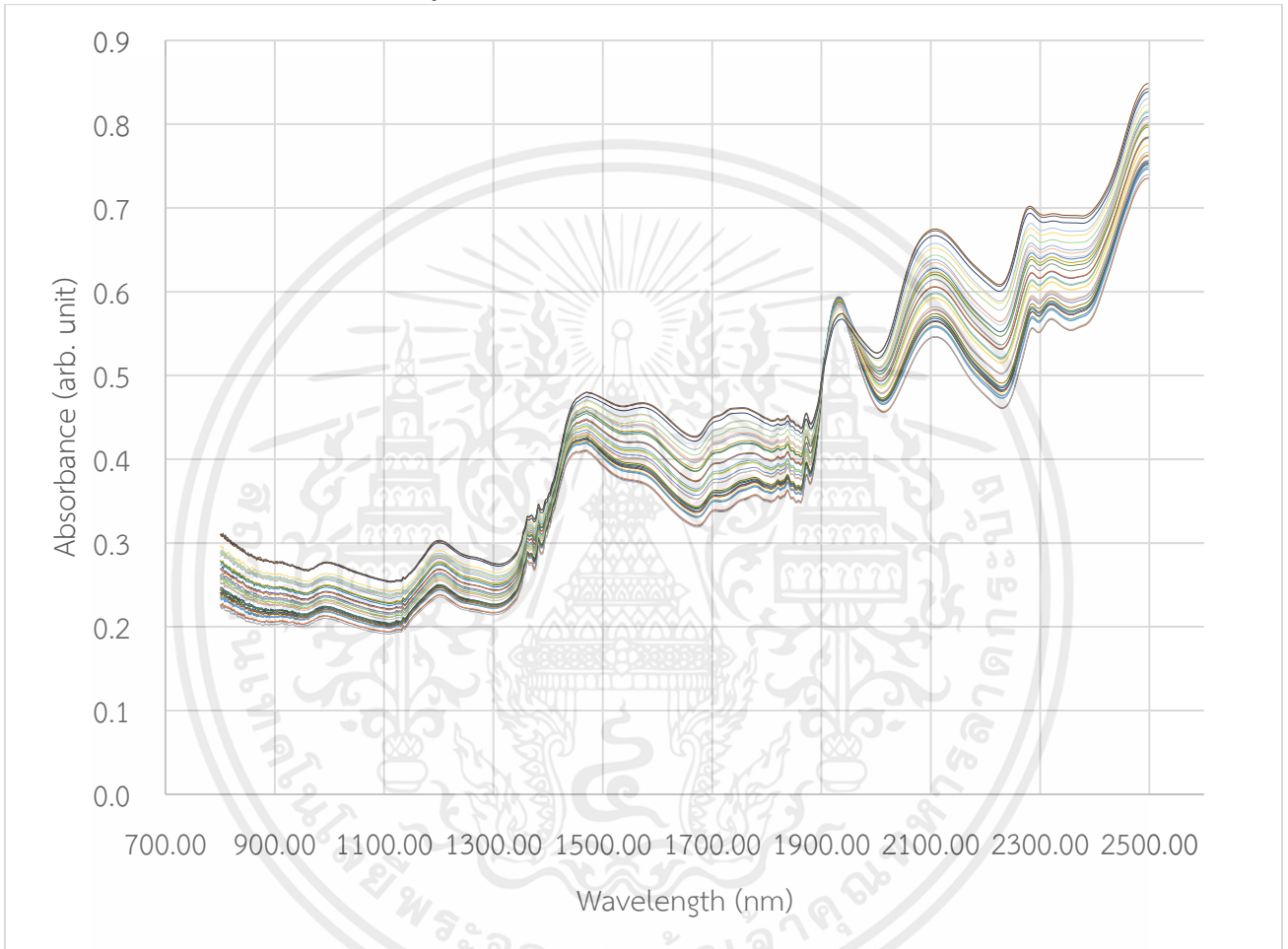
จากรูปที่ 4.2 ที่ความยาวคลื่น 610-860 nm มีการสะท้อนต่ำที่ 738 nm (O-H str. Third overtone) เป็นโปรตีนอัลบูมินในน้ำกะทิ ที่ 740 nm (C-H str. fourth overtone) กรดลอริกในน้ำกะทิ และที่ 760 nm (O-H str. third overtone) ของน้ำ



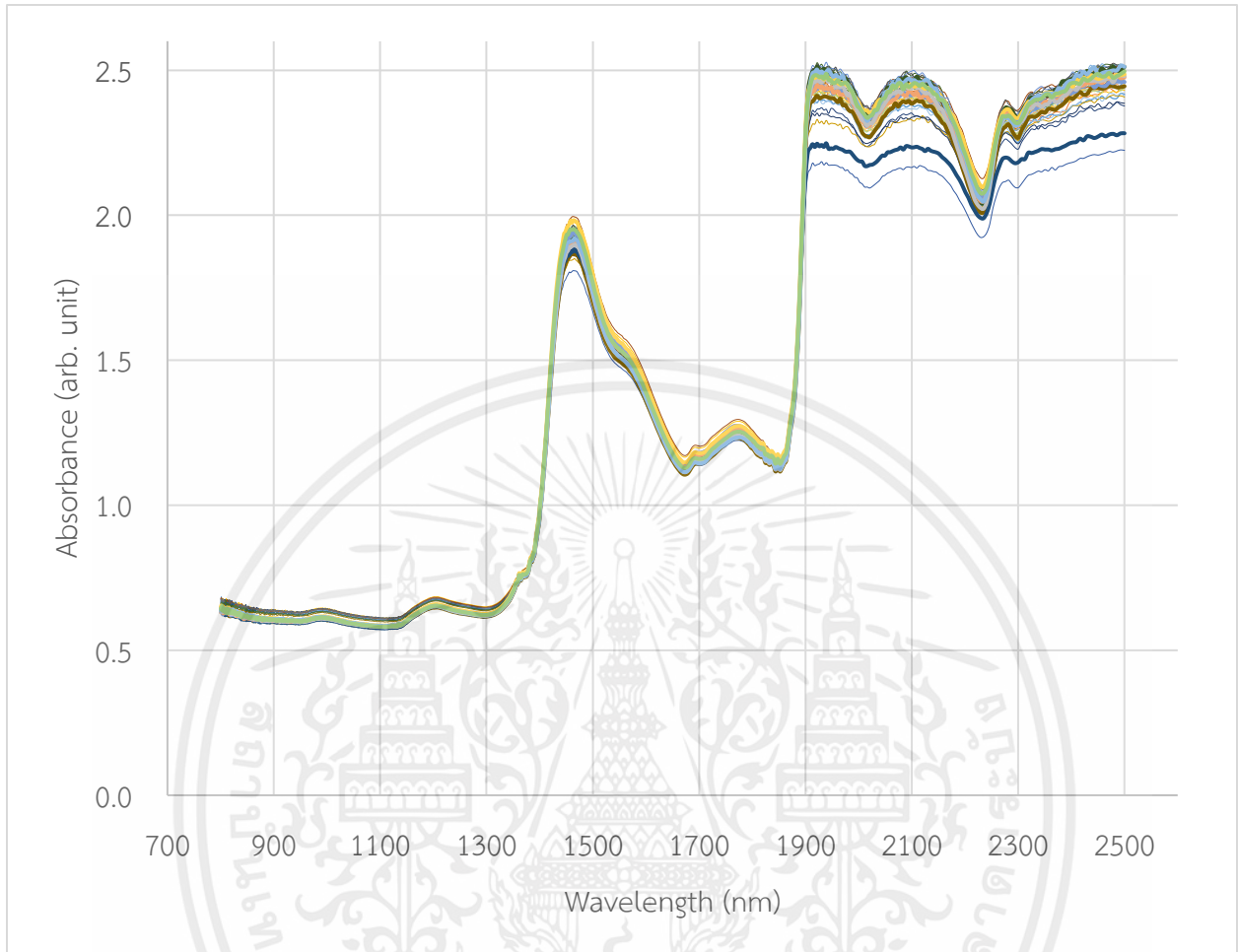
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าการดูดซับของตัวอย่างกะทิด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 3

### 4.3 กราฟแสดงค่าการดูดซับวัสดุการเกษตรตัวอย่างจากเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany)

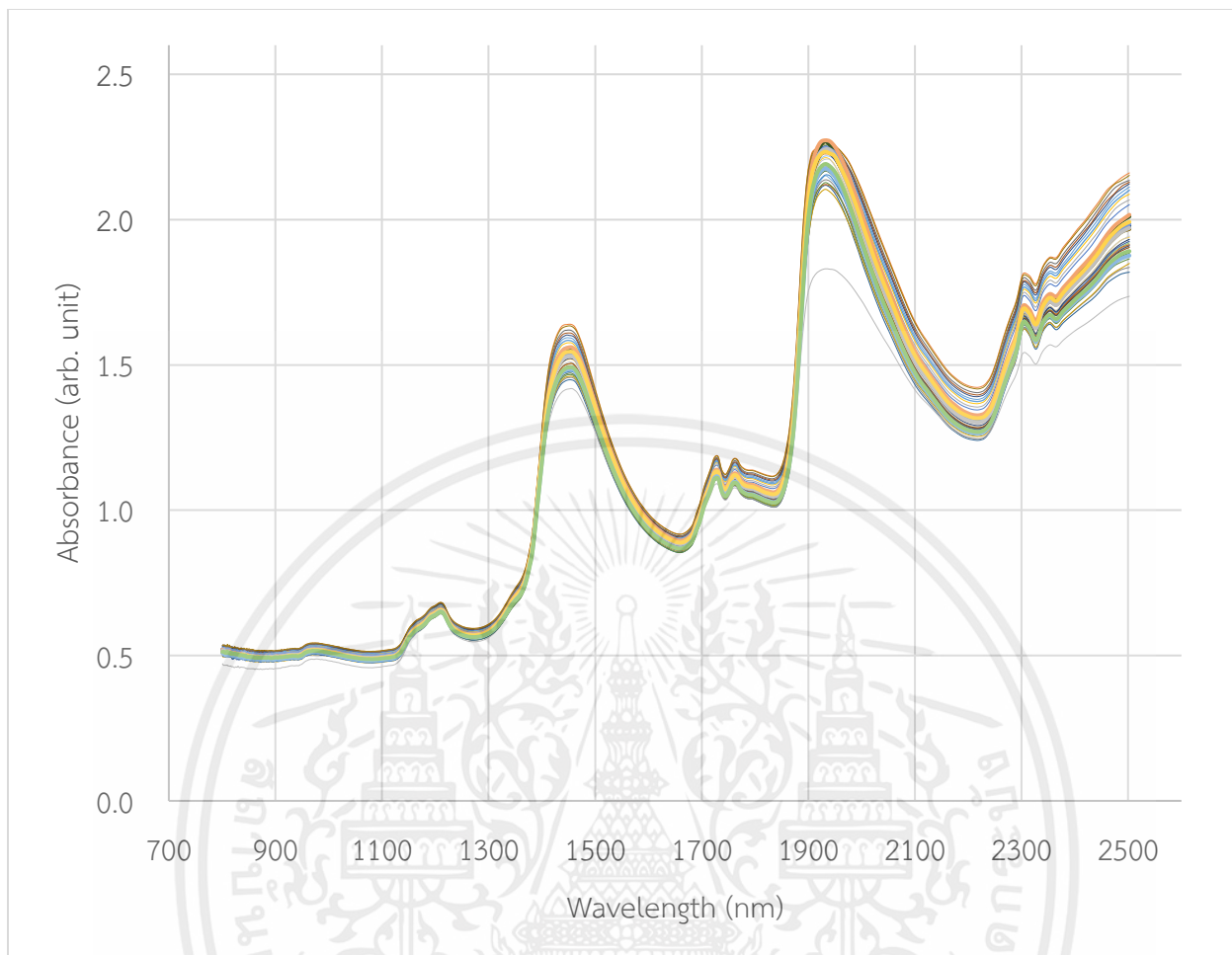
การตรวจวัดด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer นั้นมีการตรวจวัดในรูปแบบเดียวกันกับทุกรูปแบบของวัสดุคือการนำวัสดุทดลองใส่ในหลอดทดลองสำหรับเครื่อง FT-NIR spectrometer และได้ผลการทดลองการดูดซับของแต่ละตัวอย่างวัสดุการเกษตรดังรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าการดูดซับของตัวอย่างผงหัวหอมด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าการดูดซับของตัวอย่างน้ำฝิ่งด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าการดูดซับของตัวอย่างกะทิด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

#### 4.4 ผลทำนายผลการปลอมปนของวัสดุทางการเกษตรจากเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนที่สร้างขึ้นและจากเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany)

จากตารางที่ 4.2 โดยรวมแล้วแบบจำลอง MLR นั้นสามารถทำนายความบริสุทธิ์ของตัวอย่างได้ดีกว่าแบบจำลอง PLSR เล็กน้อย ในการตรวจสอบผงหัวหอมวิธีที่ 2 ที่มีค่า  $R^2 = 0.9758$  มีความแม่นยำในการทำนายความบริสุทธิ์ได้ดีกว่าวิธีที่ 1 ที่มี  $R^2 = 0.6886$  ส่วนการทำนายความบริสุทธิ์ของกะทิและน้ำผึ้งนั้นไม่ได้ผลลัพธ์ที่ดีเท่าที่ควร มีค่า  $R^2 = 0.6562$  และ  $0.4751$  ตามลำดับเพียงเท่านั้น ในแบบจำลองการทำนายที่เก็บข้อมูลด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ของทั้งสามวัสดุนั้นสามารถทำนายความบริสุทธิ์ได้ดีมาก มีค่า  $R^2$  ของผงหัวหอม น้ำผึ้ง และกะทิเป็น  $0.9986$   $0.9760$  และ  $0.9899$  ตามลำดับ สอดคล้องเช่นเดียวกับการตรวจสอบผงหัวหอมของเครื่องตรวจวัดที่สร้างขึ้น ผลการทำนายของเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่คัดช่วงความถี่  $800-860$  nm สามารถทำนายความบริสุทธิ์ของผงหัวหอมได้ดีเยี่ยม ที่ระดับ  $R^2 = 0.9467$  ส่วนการทำนายน้ำผึ้งและกะทิของเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่คัดช่วงความถี่  $800-860$  nm มานั้นมีผลการทำนายที่ไม่ดี มี  $R^2$  เป็น  $-0.4406$  และ  $-0.4258$  ตามลำดับ ค่า  $R^2$  มีค่าเป็นลบ หมายถึง ค่าของตัวแปรตามแท้จริงและตัวแปรตามทำนายมีความแตกต่างกันมากเกินไป ทำให้ SSE/SST มีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงแบบจำลองไม่สามารถทำนายความบริสุทธิ์ของวัสดุตัวอย่างได้

จากตารางที่ 4.3 ในส่วนของค่า RMSE แสดงถึงความคลาดเคลื่อนในการทำนาย ตัวอย่างที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10% นั้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ประกอบด้วย การทำนายหัวหอมด้วยวิธีตรวจแบบที่ 2 และกะทิในเครื่องวัดที่สร้างขึ้น การทำนายความบริสุทธิ์ของวัสดุทั้งสามที่วัดด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer และการทำนายผงหัวหอมด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่คัดช่วงคลื่น  $800-860$  nm โดยเฉพาะการตรวจสอบผงหัวหอมและกะทิด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer นั้นมีค่า RMSE ต่ำกว่า 2% ซึ่งถือว่ามีค่าแม่นยำอย่างมาก ส่วนการทำนายที่นอกเหนือจากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นมีความคลาดเคลื่อนที่มากกว่า 15% ซึ่งถือว่ามีค่าคลาดเคลื่อนสูง โดยค่า RMSE ที่สูงที่สุดอยู่คือการทำนายน้ำผึ้งที่วัดด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่คัดช่วงความถี่  $800-860$  nm ที่ความค่า RMSE สูงถึง 44.8186% ในแบบจำลอง MLR

**ตารางที่ 4.2** ตารางแสดงสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R<sup>2</sup>) จากทั้งสองแบบจำลอง

ตัวอย่าง	R <sup>2</sup> ของ Multiple Linear Regression (MLR)		R <sup>2</sup> ของ Partial least square regression (PLSR)	
	Training	Testing	Training	Testing
Onion_1	0.6741	0.6886	0.5522	0.5534
Onion_2	0.9720	0.9758	0.9704	0.9741
Honey	0.4440	0.4751	0.3897	0.4647
Coconut milk	0.6531	0.6562	0.6186	0.6285
FT_Onion	1.0000	0.9986	0.9848	0.9648
FT_Honey	1.0000	0.9760	0.5026	0.6023
FT_Coconut milk	1.0000	0.9899	0.8147	0.8523
FT_Onion_860	1.0000	0.9467	0.9901	0.9645
FT_Honey_860	1.0000	-0.4406	0.6570	0.5123
FT_Coconut milk_860	0.9666	-0.4258	0.7293	0.4626

**หมายเหตุ:** Onion\_1 = ผลทำนายการปลอมปนของผงหัวหอมด้วยเครื่อง Vis-NIR multispectrometer ด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 1, Onion\_2 = ผลทำนายการปลอมปนของผงหัวหอมด้วยเครื่อง Vis-NIR multispectrometer ด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 2, Honey = ผลทำนายการปลอมปนของน้ำผึ้งด้วยเครื่อง Vis-NIR multispectrometer multispectral, Coconut = ผลทำนายการปลอมปนของกะทิด้วยเครื่อง Vis-NIR multispectrometer multispectral, FT\_Onion = ผลทำนายการปลอมปนของผงหัวหอมด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ในช่วงคลื่น 800-2500 nm, FT\_Honey = ผลทำนายการปลอมปนของน้ำผึ้งด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ในช่วงคลื่น 800-2500 nm, FT\_Coconut milk = ผลทำนายการปลอมปนของกะทิด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ในช่วงคลื่น 800-2500 nm, FT\_Onion\_860 = ผลทำนายการปลอมปนของผงหัวหอมด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ในช่วงคลื่น 800-860 nm, FT\_Honey\_860 = ผลทำนายการปลอมปนของน้ำผึ้งด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ในช่วงคลื่น 800-860 nm, FT\_Coconut milk\_860 = ผลทำนายการปลอมปนของกะทิด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ในช่วงคลื่น 800-860 nm

ตารางที่ 4.3 ตาราง Root Mean Square Error (RMSE) จากทั้งสองแบบจำลอง

ตัวอย่าง	RMSE ของ Multiple Linear Regression (MLR)		RMSE ของ Partial least square regression (PLSR)	
	Training	Testing	Training	Testing
Onion_1	17.9653	17.8881	21.0577	21.4211
Onion_2	5.2688	4.9815	5.4115	5.1542
Honey	25.6841	24.1880	26.9102	24.4268
Coconut milk	9.0065	9.0783	9.4431	9.4380
FT_Onion	5.2482	1.4204	3.6668	7.0039
FT_Honey	1.5204	5.7801	23.4269	23.5485
FT_Coconut milk	6.3962	1.2120	6.3241	4.6437
FT_Onion_860	5.6117	8.6281	2.9577	7.0434
FT_Honey_860	3.0355	44.8186	19.4541	26.0771
FT_Coconut milk_860	2.4487	20.5952	7.6434	8.8590

หมายเหตุ: Onion\_1 = ผลทำนายการปลอมปนของผงหัวหอมด้วยเครื่อง Vis-NIR multispectrometer ด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 1, Onion\_2 = ผลทำนายการปลอมปนของผงหัวหอมด้วยเครื่อง Vis-NIR multispectrometer ด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 2, Honey = ผลทำนายการปลอมปนของน้ำผึ้งด้วยเครื่อง Vis-NIR multispectrometer multispectral, Coconut = ผลทำนายการปลอมปนของกะทิด้วยเครื่อง Vis-NIR multispectrometer multispectral, FT\_Onion = ผลทำนายการปลอมปนของผงหัวหอมด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ในช่วงคลื่น 800-2500 nm, FT\_Honey = ผลทำนายการปลอมปนของน้ำผึ้งด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ในช่วงคลื่น 800-2500 nm, FT\_Coconut milk = ผลทำนายการปลอมปนของกะทิด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ในช่วงคลื่น 800-2500 nm, FT\_Onion\_860 = ผลทำนายการปลอมปนของผงหัวหอมด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ในช่วงคลื่น 800-860 nm, FT\_Honey\_860 = ผลทำนายการปลอมปนของน้ำผึ้งด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ในช่วงคลื่น 800-860 nm, FT\_Coconut milk\_860 = ผลทำนายการปลอมปนของกะทิด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ในช่วงคลื่น 800-860 nm

## 4.5 สมการการทำนายความบริสุทธิ์ของเครื่องมือตรวจวัดสิ่งปลอมปนในวัสดุการเกษตรด้วยเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ในรูปแบบต้นทุนต่ำ

### 4.5.1 ผงหัวหอม

เลือกใช้แบบจำลอง Multiple Linear Regression (MLR) ในการสร้างสมการการทำนายความบริสุทธิ์ของผงหัวหอมจากวิธีตรวจสอบแบบที่ 2 ได้สมการ คือ ความบริสุทธิ์ (%w/w) =  $-95.1849R + 80.0682S - 48.7582T + 67.7590U - 471.7487V + 77.7621W + 453.5591$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร ย่านความถี่ที่มีผลต่อแบบจำลองมากที่สุด คือ V หรือ 810 นาโนเมตร

### 4.5.2 น้ำผึ้ง

เลือกใช้แบบจำลอง Multiple Linear Regression (MLR) ในการสร้างสมการการทำนายความบริสุทธิ์ของน้ำผึ้งจากวิธีตรวจสอบแบบที่ 3 ได้สมการ คือ ความบริสุทธิ์ (%w/w) =  $-351.3965R + 3633.4769S + 1115.6385T - 5510.7660U - 1389.4767V + 776.3497W + 707.3998$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร ย่านความถี่ที่มีผลต่อแบบจำลองมากที่สุด คือ U หรือ 760 นาโนเมตร

### 4.5.3 กะทิ

เลือกใช้แบบจำลอง Multiple Linear Regression (MLR) ในการสร้างสมการการทำนายความบริสุทธิ์ของน้ำผึ้งจากวิธีตรวจสอบแบบที่ 3 ได้สมการ คือ ความบริสุทธิ์ (%w/w) =  $-39.8848R + 29.4538S + 704.4501T + 53.3260U + 630.8560V - 402.1645W - 248.6880$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร ย่านความถี่ที่มีผลต่อแบบจำลองมากที่สุด คือ T หรือ 730 นาโนเมตร และ V หรือ 810 นาโนเมตร

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองดำเนินการและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

เครื่องมือตรวจวัดการปลอมปนในวัสดุการเกษตรจากเซนเซอร์ Vis-NIR multispectrometer ในรูปแบบต้นทุนต่ำนั้นสามารถทำนายค่าการปลอมปนสำหรับผงหัวหอมได้มีประสิทธิภาพ สามารถทำนายความบริสุทธิ์ของผงหัวหอมได้ 97.58% และมี RMSE เท่ากับ 4.9815 ซึ่งใกล้เคียงกับผลของแบบจำลองที่ได้จาก FT-NIR spectrometer อุปกรณ์มีความสามารถในการทวนซ้ำ (Repeatability) และ ความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) ที่ดี แต่จะมีข้อจำกัดในการตรวจสอบกับวัสดุตัวอย่างประเภทของเหลวอย่างได้แก่ น้ำผึ้ง และ กะทิ ที่มีประสิทธิภาพการทำนาย 47.51% และ 65.62% ตามลำดับ อุปกรณ์วัดความบริสุทธิ์นี้มีความเหมาะสมในด้านวัดความบริสุทธิ์ของผงหัวหอมที่ปลอมปนแป้งข้าวโพด แต่ยังไม่สามารถใช้งานด้านวัสดุประเภทของเหลวได้

เช่นเดียวกับความสามารถของอุปกรณ์ แบบจำลองที่สามารถทำนายความบริสุทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพคือแบบจำลองการทำนายความบริสุทธิ์ของผงหัวหอมที่ปลอมปนแป้งข้าวโพดที่ได้จากเทคนิค Multiple linear regression (MLR) มีสมการการทำนายคือ

$$\text{ความบริสุทธิ์ผงหัวหอม (\%w/w)} = -95.1849R + 80.0682S - 48.7582T + 67.7590U - 471.7487V + 77.7621W + 453.5591$$

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สังเกตจากผลการทำนายของ FT-NIR ในช่วงคลื่น 800-860 nm นั้น ไม่สามารถทำนายของเหลวได้อย่างแม่นยำเช่นกัน ดังนั้นปัญหาการตรวจวัดวัสดุประเภทของเหลวจึงอยู่ที่ข้อจำกัดเรื่องความยาวคลื่นของเซนเซอร์ ซึ่งมีเพียง 610-860 nm ทำให้การวัดมีข้อจำกัดในวัสดุประเภทของเหลว จึงควรเลือกใช้เซนเซอร์ที่มีช่วงความยาวคลื่นที่มากขึ้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัด

2. เนื่องจากการเปิดใช้งานอุปกรณ์ต้องเปิดแหล่งกำเนิดแสงตลอดเวลา ทำให้ต้องใช้พลังงานมากและต้องการแหล่งพลังงานที่มีความเสถียร ควรเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟใหม่ให้มีความจุมากขึ้น

## บรรณานุกรม

- Chen, L., Xue, X., Ye, Z. et al. (2011). **Determination of Chinese honey adulterated with high fructose corn syrup by near infrared spectroscopy.** Food Chemistry, 2011. Volume 128, Pages 1110-1114
- Deshpande, A., Deshpande, S., and Dhande, S., (2021). **NIR Spectroscopy Based Milk Classification and Purity Prediction.** IEEE Pune Section International Conference (PuneCon). MIT ADT University, Pune, India.
- Alyaqoubi, S., Abdullah, A., Samudi, M., Sani, A.N., Addai, Z. R., and Musa, K.H. (2015). **Study of antioxidant activity and physicochemical properties of coconut milk (Pati santan) in Malaysia.** Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 7(4), 967-973.
- Guelpa, A., Marini, F., Plessis, A.D., Slabbert, R., and Manley, M. (2017). **Verification of authenticity and fraud detection in South African honey using NIR spectroscopy.** Food Control. 73: 1388-1396
- Ballabio, O. and Todeschini, R. (2009). **Multivariate Classification for Qualitative Analysis.** Page 83-104. In Sun, D. A. infrared spectroscopy food quality analysis and control. New York: Elsevier
- Pandiselvam, R., Kaavya, R., Monteagudo, M. et al. (2022). **Contemporary Developments and Emerging Trends in the Application of Spectroscopy Techniques: A Particular Reference to Coconut (Cocos nucifera L.).** Molecules, 2022. 27, 3250
- Anthony, S. (2016). **Foreign Body Detection: Transparency in the food and beverage industry.** <https://www.newfoodmagazine.com/article/23915/foreign-body-detection-transparency-food-beverage-industry/>
- Thanyasorn M., Prima T. (2020). **Non-Destructive Discrimination of Beef-Blood Adulterated in Pork Using NIR Spectroscopy Combined with Chemometrics.** Bachelor dissertation. Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University.
- นารณะพี นาคะวัจนะ, จารุวัฒน์ แป๊ะอู๋, พงศกร เจริญประเสริฐกุล, วรุตม์ วงศ์วานิชย์ศิลป์. 2560. **การศึกษาการทำนายปริมาณไขมันในน้ำกะทิด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.** วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.ปีที่ 23 ฉบับที่ 1 (2560) 60-65
- จิรยุทธ หงส์เวียงจันทร์, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, Satoru Tsuchikawa, Tetsuya Inagaki, สิรินาฏ น้อยพิทักษ์. 2559. **การคัดแยกความแก่ชิงผงด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้.** วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.ปีที่ 22 ฉบับที่ 1 (2559) 56-63
- สุภารัตน์ เรื่องมณีฑูรย์, รมณี สงวนดีกุล. **สารความรู้เกี่ยวกับอาหารกระป๋องที่มีความเป็นกรดต่ำวิธีการวิเคราะห์**

- สิ่งสกปรกและแปลกปลอมในอาหาร.** อาหาร : ปีที่ 25 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม (2538) -290-292  
จิตรานุช จันทร์สมบูรณ์.2563. การวิเคราะห์เชิงปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ด้วยเทคนิคเนียร์  
**อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.** ปรินูญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต.กรุงเทพมหานคร:ภาควิชาเคมี.คณะวิทยาศาสตร์,  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐภัทร สีนสุวรรณภรณ์. 2561. การตรวจวัดไมโครพลาสติกในดินด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.  
ปรินูญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต.กรุงเทพมหานคร:ภาควิชาเคมี.คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์,ศาสตราจารย์เกียรติคุณ, ดร.นิธิยา รัตนาปนนท์. **Coconut milk น้ำกะทิ.**  
[ออนไลน์]. แหล่งข้อมูล: <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3066/coconut-milk-> เข้าถึงเมื่อ: 15 พ.ค. 2565
- พรรณทิพย์ ห่อศรีสัมพันธ์. **NIR Spectrometer เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์สารอินทรีย์.** แหล่งข้อมูล  
<https://nirapplication.blogspot.com/2008/03/nir-spectrometer.html>. เข้าถึงเมื่อ: 15 พ.ค.  
2565
- กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. **คุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทย.**  
แหล่งข้อมูล: <https://nutrition2.anamai.moph.go.th/th/thai-food-composition-table>. เข้าถึง  
เมื่อ: 15 พ.ค. 2565
- กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ. **สินค้ามะพร้าวและกะทิ.** แหล่งข้อมูล  
<https://api.dtn.go.th/files/v3/60f7d503ef41404c21342ef0/download>. เข้าถึงเมื่อ: 20 พ.ค.  
2565
- SparkFun Electronics. **SparkFun Spectral Sensor Breakout - AS7263 NIR (Qwiic).** [ออนไลน์].  
แหล่งข้อมูล: SparkFun Spectral Sensor Breakout - AS7263 NIR (Qwiic) - SEN-14351 -  
SparkFun Electronics.เข้าถึงเมื่อ: 25 พ.ค. 2565
- ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, ศาสตราจารย์เกียรติคุณ, ดร.นิธิยา รัตนาปนนท์. **Spice / เครื่องเทศ**  
เข้าถึงได้จาก : <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1331/spice> เข้าถึงเมื่อ: 20  
มี.ค. 2566
- ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์,ศาสตราจารย์เกียรติคุณ, ดร.นิธิยา รัตนาปนนท์. **Honey / น้ำผึ้ง** แหล่งข้อมูล  
<https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1155/honey> เข้าถึงเมื่อ: 12 เม.ย. 2566
- ภญ.ดร.สุภาภรณ์ ปิติพร. 2552. **น้ำผึ้ง เพื่อสุขภาพและความงาม** แหล่งข้อมูล  
<https://www.doctor.or.th/article/detail/6413>.เข้าถึงเมื่อ: 12 เม.ย. 2566
- ดร. ปาริชาติ เทียนจุมพล.2560. การประยุกต์เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับการตรวจหาสาร  
**ตกค้างในผลิตผลเกษตร.** แหล่งข้อมูล : <https://www.phtnet.org/2017/10/579/>.เข้าถึงเมื่อ: 12  
เม.ย. 2566



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ภาคผนวก ก**  
**ตารางผลทำนายการปลอมปนของแต่**  
**วัสดุการเกษตรด้วยเครื่องมือต่างๆอย่างละเอียด**

**ตารางที่ ก.1** ผลการทำนายการปลอมปนในหงหัวหอมด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 1

แบบจำลอง	การทำนายชุดสร้างแบบจำลอง		การทำนายชุดทดสอบแบบจำลอง	
	$R^2_{\text{training}}$	RMSE <sub>training</sub> (%w/w)	$R^2_{\text{testing}}$	RMSE <sub>testing</sub> (%w/w)
PLSR	0.5522	21.0577	0.5534	21.4211
MLR	0.6741	17.9653	0.6886	17.8881

**ตารางที่ ก.2** ผลการทำนายการปลอมปนในหงหัวหอมด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 2

แบบจำลอง	การทำนายชุดสร้างแบบจำลอง		การทำนายชุดทดสอบแบบจำลอง	
	$R^2_{\text{training}}$	RMSE <sub>training</sub> (%w/w)	$R^2_{\text{testing}}$	RMSE <sub>testing</sub> (%w/w)
PLSR	0.9704	5.4115	0.9741	5.1542
MLR	0.9720	5.2688	0.9758	4.9815

**ตารางที่ ก.3** ผลการทำนายการปลอมปนในหงหัวหอมด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

แบบจำลอง	การทำนายชุดสร้างแบบจำลอง		การทำนายชุดทดสอบแบบจำลอง	
	$R^2_{\text{training}}$	RMSE <sub>training</sub> (%w/w)	$R^2_{\text{testing}}$	RMSE <sub>testing</sub> (%w/w)
PLSR	0.9848	3.6668	0.9648	7.0039
MLR	1.0000	5.2482	0.9986	1.4204

**ตารางที่ ก.4** ผลการทำนายการปลอมปนในหงหัวหอมด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer  
ในช่วงคลื่น 800-860 นาโนเมตร

แบบจำลอง	การทำนายชุดสร้างแบบจำลอง		การทำนายชุดทดสอบแบบจำลอง	
	$R^2_{\text{training}}$	RMSE <sub>training</sub> (%w/w)	$R^2_{\text{testing}}$	RMSE <sub>testing</sub> (%w/w)
PLSR	0.9901	2.9577	0.9645	7.0434
MLR	1.0000	5.6117	0.9467	8.6281

**ตารางที่ ก.5** ผลการทำนายการปลอมปนในน้ำผึ้งด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 3

แบบจำลอง	การทำนายชุดสร้างแบบจำลอง		การทำนายชุดทดสอบแบบจำลอง	
	$R^2_{\text{training}}$	RMSE <sub>training</sub> (%w/w)	$R^2_{\text{testing}}$	RMSE <sub>testing</sub> (%w/w)
PLSR	0.3897	26.9102	0.4647	24.4268
MLR	0.4440	25.6841	0.4751	24.1880

ตารางที่ ก.6 ผลการทำนายการปลอมปนในน้ำผึ้งด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

แบบจำลอง	การทำนายชุดสร้างแบบจำลอง		การทำนายชุดทดสอบแบบจำลอง	
	$R^2_{\text{training}}$	RMSE <sub>training</sub> (%w/w)	$R^2_{\text{testing}}$	RMSE <sub>testing</sub> (%w/w)
PLSR	0.5026	23.4269	0.6023	23.5485
MLR	1.0000	1.5204	0.9760	5.7801

ตารางที่ ก.7 ผลการทำนายการปลอมปนในน้ำผึ้งด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

ในช่วงคลื่น 800-860 นาโนเมตร

แบบจำลอง	การทำนายชุดสร้างแบบจำลอง		การทำนายชุดทดสอบแบบจำลอง	
	$R^2_{\text{training}}$	RMSE <sub>training</sub> (%w/w)	$R^2_{\text{testing}}$	RMSE <sub>testing</sub> (%w/w)
PLSR	0.6570	19.4541	0.5123	26.0771
MLR	1.0000	3.0355	-0.4406	44.8186

ตารางที่ ก.8 ผลการทำนายการปลอมปนในกะทิด้วยวิธีตรวจสอบแบบที่ 3

แบบจำลอง	การทำนายชุดสร้างแบบจำลอง		การทำนายชุดทดสอบแบบจำลอง	
	$R^2_{\text{training}}$	RMSE <sub>training</sub> (%w/w)	$R^2_{\text{testing}}$	RMSE <sub>testing</sub> (%w/w)
PLSR	0.6186	9.4431	0.6285	9.4380
MLR	0.6531	9.0065	0.6562	9.0783

ตารางที่ ก.9 ผลการทำนายการปลอมปนในน้ำผึ้งด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

แบบจำลอง	การทำนายชุดสร้างแบบจำลอง		การทำนายชุดทดสอบแบบจำลอง	
	$R^2_{\text{training}}$	RMSE <sub>training</sub> (%w/w)	$R^2_{\text{testing}}$	RMSE <sub>testing</sub> (%w/w)
PLSR	0.8147	6.3241	0.8523	4.6437
MLR	1.0000	6.3962	0.9899	1.2120

ตารางที่ ก.10 ผลการทำนายการปลอมปนในน้ำผึ้งด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

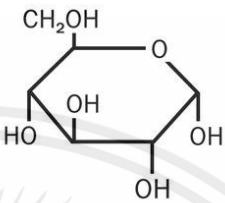
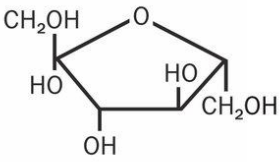
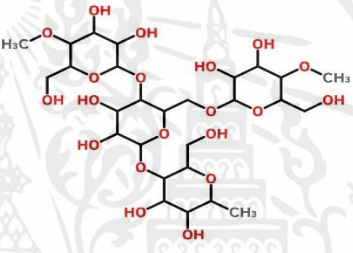
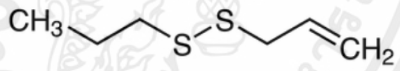
ในช่วงคลื่น 800-860 นาโนเมตร

แบบจำลอง	การทำนายชุดสร้างแบบจำลอง		การทำนายชุดทดสอบแบบจำลอง	
	$R^2_{\text{training}}$	RMSE <sub>training</sub> (%w/w)	$R^2_{\text{testing}}$	RMSE <sub>testing</sub> (%w/w)
PLSR	0.7293	7.6434	0.4626	8.8590
MLR	0.9666	2.4487	-0.4258	20.5952



**ภาคผนวก ข**  
**ตารางคาดการณ์สารที่ตรวจพบในกลิ่นต่าง ๆ**  
**ของวัสดุการเกษตรที่ใช้ในการทดลอง**

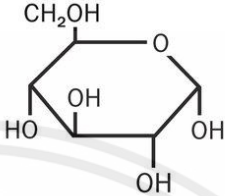
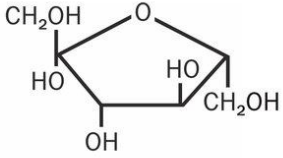
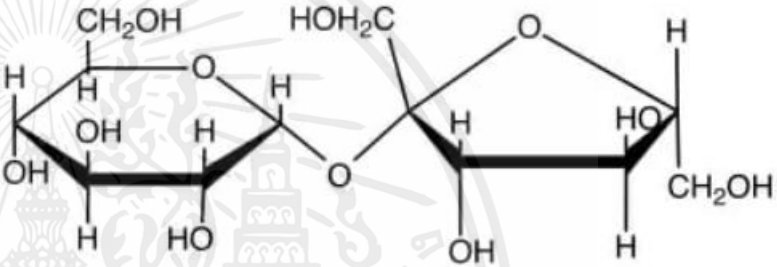
ตารางที่ ข.1 คาดการณ์สารที่ตรวจพบในช่วงคลื่นต่าง ๆ ของผงหัวหอม

Wavelength (nm)	Bond Vibration	Structure	คาดการณ์สารที่ตรวจพบ
738	O—H str. Third overtone	ROH	<p>แป้งข้าวโพด</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>Glucose</b></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>Fructose</b></p>  </div> </div>
740	C—H str. fourth overtone	CH <sub>3</sub>	<p>แป้งข้าวโพด</p>  <p>(Spectrum Chemical Mfg. Corp.) Allyl propyl disulfide ในหัวหอม</p>  <p>(TCI - Tokyo Chemical Industry)</p>
760	O—H str. third overtone	H <sub>2</sub> O	น้ำ

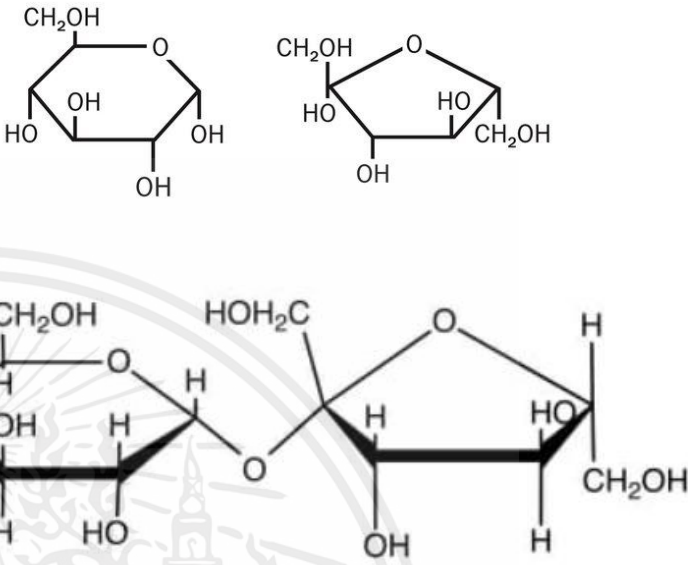
762	C—H str. fourth overtone	CH <sub>2</sub>	<p>Allyl propyl disulfide ในหัวหอม</p> <chem>CCCS=CC</chem> <p>(TCI - Tokyo Chemical Industry)</p> <p>Allicin ในหัวหอม</p> <chem>C=CC=S+(O-)=CC</chem> <p>(Abcam: global research support)</p> <p>กลูโคสและฟรุคโทสในน้ำผึ้ง</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>Glucose</b></p> <chem>OC[C@H]1O[C@@H](O)[C@H](O)[C@@H](O)[C@H]1O</chem> </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>Fructose</b></p> <chem>OC[C@H]1O[C@H](O)[C@@H](O)[C@@H]1O</chem> </div> </div>
806	N—H str. third overtone	RNH <sub>2</sub>	<p>Folic Acid ในหัวหอม</p> <chem>NC1=NC2=C(N1)N=CN=C2NC(=O)Nc3ccc(cc3)C(=O)NCC(=O)O</chem> <p>(Abcam: global research support)</p>
808	2xN—H str.+2N—H def.+2C—N str.	RNHR'	<p>Folic Acid ในหัวหอม</p> <chem>NC1=NC2=C(N1)N=CN=C2NC(=O)Nc3ccc(cc3)C(=O)NCC(=O)O</chem> <p>(Abcam: global research support)</p>

B.G. Osborne, T. Fearn, P.H. Hindle, *Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis*. Longman Scientific and Technical, 1993.

ตารางที่ ข.2 คาดการณ์สารที่ตรวจพบในช่วงคลื่นต่าง ๆ ของน้ำผึ้ง

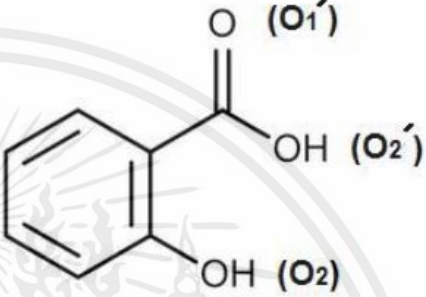
Wavelength (nm)	Bond Vibration	Structure	คาดการณ์สารที่ตรวจพบ
738	O—H str. Third overtone	ROH	<p>กลูโคส, ฟรุคโตส, ซูโครสในน้ำผึ้ง</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>Glucose</b></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>Fructose</b></p>  </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  <p><b><math>\alpha</math>-D-glucopyranosyl-(1<math>\rightarrow</math>2)-<math>\beta</math>-D fructofuranose (Sucrose)</b></p> <p>(Sucrose Definition – biologydictionary.net)</p> </div>
760	O—H str. third overtone	H <sub>2</sub> O	น้ำ

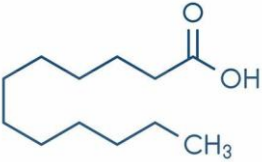
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

762	C—H str. fourth overtone	CH <sub>2</sub>	<p>กลูโคส, ฟรุกโตส, ซูโครสในน้ำผึ้ง</p> <p style="text-align: center;"><b>Glucose</b>                      <b>Fructose</b></p>  <p style="text-align: center;"><math>\alpha</math>-D-glucopyranosyl-(1<math>\rightarrow</math>2)-<math>\beta</math>-D fructofuranose (Sucrose)</p> <p style="text-align: center;">(Sucrose Definition – biologydictionary.net)</p>
-----	--------------------------	-----------------	--

B.G. Osborne, T. Fearn, P.H. Hindle, *Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis*. Longman Scientific and Technical, 1993.

ตารางที่ ข.3 คาดการณ์สารที่ตรวจพบในช่วงคลื่นต่าง ๆ ของกะทิ

Wavelength (nm)	Bond Vibration	Structure	คาดการณ์สารที่ตรวจพบ
738	O—H str. Third overtone	ROH	<p>โปรตีนอัลบูมินในน้ำกะทิ</p>  <p>(a-Secondary-structure-of-Human-Serum-Albumin – researchgate)</p>

740	C—H str. fourth overtone	CH <sub>3</sub>	<p>กรดลอริกในน้ำกะทิ</p>  <p>lauric acid</p> <p>(acme-hardesty.com)</p>
760	O—H str. third overtone	H <sub>2</sub> O	น้ำ