



การตรวจสอบสารพิษตกค้างในพืชผัก ด้วยการวิเคราะห์แถบความถี่คลื่นแสง



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การตรวจหาสารพิษตกค้างในพืชผัก ด้วยการใช้กระดาษกรองที่เคลือบด้วยสารเคมี



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การตรวจหาสารพิษตกค้างในพืชผัก ด้วยการวิเคราะห์แถบความถี่คลื่นแสง"  
ของ ณัฐศักดิ์ แย้มสุข  
ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

### คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิระสิทธิ์ อิ่มถวิล)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ แย้มเม่น)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มุณีสว่าง)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ดร.จิรวดี ผลประเสริฐ)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยนัย ภาชนะพรรณ)

### อนุมัติ

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรองกาญจน์ ชูทิพย์)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การตรวจหาสารพิษตกค้างในพืชผัก ด้วยการวิเคราะห์แถบความถี่คลื่นแสง
<b>ผู้วิจัย</b>	ณัฐศักดิ์ แย้มสุข
<b>ประธานที่ปรึกษา</b>	รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ แย้มเม่น
<b>กรรมการที่ปรึกษา</b>	ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มุณีสว่าง
<b>ประเภทสารนิพนธ์</b>	วิทยานิพนธ์ ปร.ด. วิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2565
<b>คำสำคัญ</b>	สเปกโตรสโคปิก วิสิเบิล-เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปิก อุปกรณ์ตรวจหาสารพิษกำจัดศัตรูพืชแบบพกพา

### บทคัดย่อ

ผลกระทบด้านสุขภาพของมนุษย์ที่เกิดจากสารพิษตกค้างในผักผลไม้ สร้างปัญหาให้กับมนุษยชาติเป็นอย่างมาก จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน สาเหตุส่วนหนึ่งมาจากการใช้สารพิษกำจัดศัตรูพืชไม่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด สารพิษกำจัดศัตรูพืชชนิดคาร์เบนดาซิม ไชเปอร์เมทริน ไดอะซินอน และอิมิดาคลออร์พริด มีอันตรายต่อสุขภาพอย่างมาก และการตรวจหาสารพิษทั้ง 4 ชนิดที่ตกค้างในพืชผักจำเป็นต้องใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ซับซ้อน มีราคาแพง และต้องใช้บุคลากรที่เชี่ยวชาญ เทคโนโลยีและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่จึงมีความสำคัญเนื่องจากความจำเป็นในการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือหรืออุปกรณ์พร้อมวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ ราคาถูก คล่องตัว ใช้งานสะดวก ในทุกสถานที่ คณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาและประยุกต์ใช้เทคนิค NIRs ในช่วงความยาวคลื่น VIS-NIR สำหรับพัฒนาสเปกโตรมิเตอร์สำหรับตรวจสอบสารพิษจำนวน 4 ชนิดได้แก่ คาร์เบนดาซิม ไชเปอร์เมทริน ไดอะซินอน และอิมิดาคลออร์พริด ที่ตกค้างในพืชผัก 2 ชนิด คือ พริก และใบกะเพรา ทราบผลลัพธ์ได้ทันที เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพด้านเวลา ค่าใช้จ่าย และความสามารถในการบริหารจัดการปัญหาสารพิษตกค้างโดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งโดยรวมคณะผู้วิจัยได้นำเสนอการจัดการปัญหาสารพิษตกค้างในผักผลไม้ด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสเปกโตรสโคปิก ที่มีต้นทุนต่ำ คล่องตัว ผู้เกี่ยวข้องกับสารพิษสามารถหลีกเลี่ยงผลที่อาจเกิดขึ้นจากสารพิษทั้ง 4 ชนิดนี้ เนื่องจากการบริโภคผักผลไม้ที่ปนเปื้อนสารพิษได้

<b>Title</b>	DETECTION OF TOXIC RESIDUES IN VEGETABLES BY ANALYZING LIGHT SPECTRUM
<b>Author</b>	Natthasak Yaemsuk
<b>Advisor</b>	Associate Professor Suchart Yammen, Ph.D.
<b>Co-Advisor</b>	Professor Paisarn Muneesawang
<b>Academic Paper</b>	Ph.D. Dissertation in Electrical Engineering, Naresuan University, 2022
<b>Keywords</b>	Spectroscopy VIS-NIR spectroscopy Portable spectrometer

### ABSTRACT

Human health effects of pesticide residues in fruits and vegetables create a lot of problems for humanity It needs to be fixed urgently. Part of the reason is that the use of pesticides does not meet the specified standards. Carbendazim Pesticide Cypermethrin, diazinon and imidachlorfrid There is a great danger to politeness. And the detection of all 4 types of toxins remaining in vegetables requires the use of tools. Equipment is complex, expensive and requires specialized personnel. Technology and the application of modern technology are therefore important due to the need to design and develop tools or equipment with data analysis methods that are reliable, cheap, flexible, and convenient to use in all places. NIRs in the VIS-NIR wavelength range were used for the development of spectrometers for the detection of four toxic substances: carbendazim, cypermethrin, diazinon and imidachlorfrid. Residues in 2 types of vegetables, chili and basil leaves, the results can be known immediately. It increases efficiency in terms of time, cost and ability to manage pesticide residues by relevant agencies. Overall, the research team presented the management of pesticide residues in fruits and vegetables by applying spectroscopic technology. With a low cost, flexibility, those involved with toxins can avoid the potential consequences of these 4 toxins due to the consumption of contaminated fruits and vegetables.



## ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ แย้มเม่น ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์อย่างสูง ที่ได้เสียสละเวลามาเป็นที่ปรึกษา พร้อมทั้งให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.วิระสิทธิ์ อิ่มถวิล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มุณีสว่าง กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.จิรวดี ผลประเสริฐ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปิยคนัย ภาชนะพรธรรม ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนงานวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) และขอขอบคุณ นางพรศิริ สายะพันธ์ นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 2 กรมวิชาการเกษตร สำหรับคำปรึกษาและสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ณัฐศักดิ์ แย้มสุข

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
ประกาศคุณูปการ.....ฉ	ฉ
สารบัญ.....ช	ช
สารบัญตาราง.....ซ	ซ
สารบัญภาพ.....ฅ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6	6
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....23	23
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....41	41
บทที่ 5 บทสรุป.....60	60
บรรณานุกรม.....81	81
ประวัติผู้วิจัย.....82	82



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ความยาวคลื่นช่วง VIS-NIR ที่มีรายงานการใช้ตรวจสอบสารพิษตกค้างในผักผลไม้.....	14
ตารางที่ 2 แสดงค่า MRL ของ CBZ, CPT, DAN และ IMP สำหรับพริกและโสมกะเพรา ...	23
ตารางที่ 3 แสดงการรวบรวมข้อมูลสเปกตรัมของสารพิษ 1 ชนิด ทุกค่าความเข้มข้น.	32
ตารางที่ 4 แสดงรายการและราคาวัสดุที่ใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์.....	45
ตารางที่ 5 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติ Portable VIS-NIR Spectrometer ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดกับคณะวิจัยพัฒนาขึ้น .....	45
ตารางที่ 6 แสดงผลของค่าสูงสุดของชุดข้อมูลสเปกตรัมและค่าของความยาวคลื่นของค่าสูงสุดของชุดข้อมูลสเปกตรัม .....	52
ตารางที่ 7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติสำหรับพิจารณาประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	56
ตารางที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าอ้างอิงความเข้มข้นของสารพิษมาตรฐานชนิด CBZ กับค่าที่ทำนายจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น.....	57
ตารางที่ 9 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจหาสารพิษตกค้างในตัวกลางพริกและโสมกะเพราด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบผลการตรวจด้วยวิธีโครมาโตกราฟีแบบชั้นบาง .....	58
ตารางที่ 10 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจหาสารพิษตกค้างในตัวกลางพริกและโสมกะเพราด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น.....	59

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนการจัดการสารพิษตกค้างในผักผลไม้ สภาพปัญหาและผลกระทบที่เกิดขึ้น.....	4
ภาพที่ 2 แสดงภาพรวมของกระบวนการในแต่ละขั้นตอนของวิธีการตรวจหาสารพิษตกค้างในผักผลไม้ที่มีใช้ในห้องปฏิบัติการ .....	9
ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลของสารพิษในงานวิจัย (ก) คาร์เบนดาซิม (ข) ไสเปอร์เมทริน (ค) ไดอะซินอน (ง) สารอิมิดาคลออร์พริด .....	21
ภาพที่ 4 แสดงขั้นตอนการทำงานของสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพาที่พัฒนาขึ้น.....	28
ภาพที่ 5 แสดงการออกแบบและเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา.....	29
ภาพที่ 6 แสดงการออกแบบและจัดวางส่วนประกอบของสเปกโตรมิเตอร์ (ก) มุมมองด้านข้าง (ข) มุมมองด้านบน (ค) โครงสร้างภายนอก.....	30
ภาพที่ 7 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเพื่อการทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ.....	31
ภาพที่ 8 แสดงตัวอย่างการรวบรวมข้อมูลสเปกตรัมสารพิษในแต่ละกลุ่มย่อยของตัวกลาง .....	33
ภาพที่ 9 แสดงตัวอย่างรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลสเปกตรัมของแต่ละกลุ่มย่อยในไฟล์ AllRawData.csv.....	33
ภาพที่ 10 แสดงการปรับปรุงพลังงานของข้อมูลสเปกตรัมและหาค่าสูงสุดของสเปกตรัม.....	34
ภาพที่ 11 แสดงสารพิษที่ใช้ในงานวิจัยระดับความเข้มข้น 0.05, 0.1, 1, 2, 3, 4, 5 mg/l ตามลำดับ บรรจุขวดละ 10 ml (ก) CBZ (ข) CPT (ค) DAN (ง) IMP .....	42

ภาพที่ 12 แสดงการแบ่งกลุ่มย่อยของตัวกลางพืชผักที่ถูกปนเปื้อนสารพิษ กลุ่มที่ 1 - 4 ตามลำดับ (ก) สารคาร์เบนดาซีม (ข) สารไซเปอร์เมทริน (ค) สารไดอะซินอน (ง) สารอิมิดาครอพริด.....	43
ภาพที่ 13 แสดงอุปกรณ์ตรวจวัดและส่งผ่านข้อมูลสปكتروม (ก) แสดงส่วนประกอบภายใน (ข) แสดงมุมมองด้านล่างให้เห็นช่องรับข้อมูลสปكتروม (ค) แสดงโครงสร้างภายนอกของอุปกรณ์.....	44
ภาพที่ 14 แสดงการสแกนข้อมูลสปكتروมของสารพิษบนตัวกลางชนิดใบกะเพรา.....	46
ภาพที่ 15 แสดงข้อมูลสปكتروมของ CBZ ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บนตัวกลางชนิดพริก (ก) 0.05 mg/l (ข) 0.1 mg/l (ค) 1 mg/l (ง) 2 mg/l (จ) 3 mg/l (ฉ) 4 mg/l (ช) 5 mg/l.....	47
ภาพที่ 16 แสดงข้อมูลสปكتروมของสารพิษที่ระดับความเข้มข้น 1 mg/l (ก) CBZ บนพริก (ข) CBZ บนใบกะเพรา (ค) CPT บนพริก (ง) CPT บนใบกะเพรา (จ) DAN บนพริก (ฉ) DAN บนกะเพรา (ช) IMP บนพริก (ซ) IMP บนใบกะเพรา.....	48
ภาพที่ 17 แสดงข้อมูลสปكتروมของ CBZ ที่ค่าความเข้มข้น 7 ระดับที่ปนเปื้อนบนพริก (ก) 0.05 mg/l (ข) 0.1 mg/l (ค) 1 mg/l (ง) 2 mg/l (จ) 3 mg/l (ฉ) 4 mg/l (ช) 5 mg/l.....	51
ภาพที่ 18 แสดงแนวโน้มข้อมูลความสัมพันธ์ค่าสูงสุดของข้อมูลสปكتروม (m) กับค่าความเข้มข้นของสารพิษ (p) ของแต่ละสารพิษ (ก) CBZ (ข) CPT (ค) DAN (ง) IMP...53	
ภาพที่ 19 แสดงกราฟแบบจำลองอ้างอิงที่พัฒนาขึ้นของสารไซเปอร์เมทรินบนตัวกลางพริกจากวิธี (ก) linear regression (ข) Exponential Regression (ค) Polynomial regression.....	54
ภาพที่ 20 แสดงการเปรียบเทียบค่าอ้างอิงความเข้มข้นของสารพิษและค่าจากการทำนายความเข้มข้นของสารพิษจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (ก) CBZ (ข) CPT (ค) DAN (ง) IMP.....	55

ภาพที่ 21 แสดงรูปแบบการใช้สเปกโตรมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเป็นอุปกรณ์หลักในระบบ  
ตรวจและวิเคราะห์สารพิษตกค้างในพืชผักและผลไม้.....62



# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาของปัญหา

ปัญหาสารเคมีที่นำมาใช้ในการเกษตรกำลังเป็นที่สนใจกันเป็นอย่างมาก ทั้งในด้านวิธีและปริมาณการใช้ รวมถึงการตกค้างในผลผลิตการเกษตร (เครือข่ายเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช, 2563) ได้เปิดเผยผลกาเฝ้าระวังสารพิษตกค้างในผักผลไม้ ปี 2563 โดยดำเนินการสุ่มเก็บตัวอย่างผักผลไม้จำนวน 509 ตัวอย่างจากทั่วประเทศ จำแนกเป็นผลไม้จำนวน 9 ชนิด ผักจำนวน 18 ชนิด และของแห้ง 2 ชนิด ได้แก่ ส้มโอ ส้มแมนดารินนำ้เข้า ลองกอง น้อยหน่า แก้วมังกร ฝรั่ง ส้มสายน้ำผึ้ง พุทราจีน องุ่นแดงนอก ข้าวโพดหวาน มันฝรั่ง หน่อไม้ฝรั่ง กระจับปี่เขียว แครอท ถั่วฝักยาว บล็อกโคลี หัวไชเท้า ผักบุ้ง มะระ กะเพรา กวางตุ้ง ผักชี มะเขือเทศผลเล็ก คื่นช่าย ขึ้นฉ่าย พริกแดง และพริกชี้หนู พริกแห้ง และเห็ดหอม ตามลำดับ ตัวอย่างทั้งหมดดำเนินการส่งตรวจที่ห้องปฏิบัติการในประเทศสหราชอาณาจักร ซึ่งสามารถตรวจวัดผลได้ครอบคลุมสารเคมีกำจัดแมลงและเชื้อรา (ไม่รวมสารเคมีกำจัดวัชพืช) กว่า 500 ชนิด และมีมาตรฐานระหว่างประเทศ (ISO17025) รองรับ โดยผลการตรวจวิเคราะห์พบว่า มีผักและผลไม้มากถึง 58.7 % ที่พบสารพิษตกค้างเกินมาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขเลขที่ 387 พ.ศ. 2560 เรื่องอาหารที่มีสารพิษตกค้าง (กระทรวงสาธารณสุข, 2560) ผักที่พบการตกค้างเกินมาตรฐานมากที่สุดคือ มะเขือเทศผลเล็ก พริกชี้หนู พริกแดง ขึ้นฉ่าย คื่นช่าย พบตกค้างเกินมาตรฐานทั้งหมดทุกตัวอย่าง (100%) จากตัวอย่างที่เก็บมาชนิดละ 16 ตัวอย่าง ผักผลไม้ที่พบการตกค้างรองลงมาได้แก่ กะเพรา (81%) มะระ (62%) ผักบุ้ง (62%) หัวไชเท้า (56%) บล็อกโคลี (50%) ถั่วฝักยาว (44%) แครอท (19%) กระจับปี่เขียว (6%) และหน่อไม้ฝรั่ง (6%) ส่วนมันฝรั่งพบการตกค้างในระดับไม่เกินมาตรฐาน และข้าวโพดหวานไม่พบการตกค้างเลย ในส่วนของผลไม้ที่พบสารพิษตกค้างมากที่สุดตามลำดับได้แก่ องุ่นแดงนอก (100%) พุทราจีน (100%) ส้มสายน้ำผึ้ง (81%) ฝรั่ง (60%) แก้วมังกร (56%) น้อยหน่า (43%) ที่พบการตกค้างน้อยได้แก่ ลองกอง (14%) ส้มแมนดารินนำ้เข้า (13%) และส้มโอไม่พบการตกค้างเกินมาตรฐาน ด้านสารพิษที่พบการตกค้างได้แก่ สารคาร์เบนดาซิม สารไซเปอร์เมทริน สารอิมิดาคลอร์พริด และสารไดอะซินอน เป็นต้น

สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาสารพิษตกค้างในผลผลิตการเกษตร นั่นคือเกษตรกรใช้วิธีฉีดสารเคมีป้องกันไว้ก่อน ทั้งที่ยังไม่มีลักษณะการเกิดของโรคหรือการเข้าทำลายของแมลงศัตรูพืช ซึ่งจากข้อมูลเนื้อที่ที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตร รายจังหวัด ปี พ.ศ. 2562 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) พบว่า ประเทศไทยมีพื้นที่การทำสวนผักและไม้ดอกไม้ประดับ รวม 1,400,999 ไร่ ซึ่งพื้นที่ที่มีการปลูกผักมากที่สุดจะอยู่ในภาคกลางจำนวน 507,656 ไร่ รองลงมาคือภาคเหนือ 447,066 ไร่ ต่อมาเป็นภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 318,047 ไร่ และภาคใต้ 128,230 ไร่ แม้ว่าพื้นที่ปลูกผักจะมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับพื้นที่การเกษตรอื่นที่มีจำนวนถึง 11,458,278 ไร่ แต่พืชผักเป็น พืชที่มีอายุสั้น คือ มีอายุประมาณ 45-60 วันสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้แล้วส่งผลให้ผักเป็นพืช เศรษฐกิจที่ทำรายได้ให้กับครัวเรือนได้เป็นอย่างดี โดยพืชผักเป็นพืชที่สามารถให้ผลผลิตได้ตลอดทั้งปี แต่พืชผักเป็นพืชอายุสั้นที่มีความอ่อนแอ ไม่ทนต่อโรคและแมลงเกษตรกรผู้ปลูกผักจึงมักประสบกับ ปัญหาโรคและแมลงศัตรูพืช ได้แก่ เพลี้ยอ่อน เพลี้ยไฟ ไรแดง ไรขาว แมลงหวี่ขาว และหนอนกัดกินผล เกษตรกรส่วนใหญ่จึงใช้สารเคมีในการป้องกันและกำจัดศัตรูพืชจำนวนมาก ทำให้มีสารเคมีตกค้างในพืชผักสูง

จากภาคการเกษตรที่ไม่สามารถจัดการกับวิธีและปริมาณการใช้สารเคมี ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพกับประชาชนโดยทั่วไป ดังจะเห็นได้จากข้อมูลผู้ป่วยบัตรทอง (สำนักงานหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ : สปสช., 2562) ซึ่งพบว่าข้อมูลการเข้ารับบริการภายใต้ “ระบบหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ” หรือ “กองทุนบัตรทอง” ในช่วง 10 เดือนของปีงบประมาณ 2562 (ข้อมูล 1 ต.ค. 61 - 17 ก.ค. 62) ผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลต่าง ๆ ทั่วประเทศ ในจำนวนนี้เป็นผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาโดยมีสาเหตุจากการได้รับสารเคมีกำจัดศัตรูพืช จำนวน 3,067 ราย เสียชีวิต 407 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 14.64 ล้านบาท จากข้อมูลนี้แยกผู้ป่วยตามประเภทของสารเคมีที่ได้รับ ดังนี้ 1) ยาฆ่าแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตและคาร์บาเมต (organophosphate and carbamates insecticides) จำนวน 705 ราย เสียชีวิต 58 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 4.27 ล้านบาท 2) ยาฆ่าหญ้าและยาฆ่าเชื้อรา (Herbicides and fungicides) จำนวน 1,337 ราย เสียชีวิต 336 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 6.79 ล้านบาท 3) สารเคมีทางการเกษตรประเภทอื่น ๆ จำนวน 1,025 ราย เสียชีวิต 13 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 3.57 ล้านบาท ทั้งนี้เมื่อดูข้อมูลโดยแยกรายเขตบริการ 13 เขต พบว่า เขตเชียงใหม่มีผู้ป่วยเข้ารับบริการมากที่สุด จำนวน 506 ราย รองลงมาเขตราชบุรี จำนวน 390 ราย เขตนครสวรรค์ จำนวน 340 ราย และนครราชสีมา จำนวน 338 ราย เป็นต้น และเมื่อจำแนกผู้ป่วยสาเหตุจากการได้รับสารเคมีกำจัดศัตรูพืชเป็นรายปี พบว่า ปี 2559 มีผู้ป่วยจำนวน 4,876 ราย เสียชีวิต 606 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 22.19 ล้านบาท ปี 2560

มีผู้ป่วย 4,916 ราย เสียชีวิต 579 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 21.85 ล้านบาท และในปี 2561 มีผู้ป่วย 4,736 ราย เสียชีวิต 601 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 21.78 ล้านบาท ซึ่งหากรวมจำนวนผู้เสียชีวิตที่มีสาเหตุจากการได้รับสารเคมีกำจัดศัตรูพืชในช่วง 4 ปี ตั้งแต่ปี 2559-2562 มีจำนวนถึง 2,193 ราย รวมถึงงบประมาณค่ารักษาพยาบาลกว่า 20 ล้านบาทต่อปี (ภาพที่ 1) ไม่รวมผู้ป่วยในสิทธิรักษาพยาบาลอื่น สะท้อนให้เห็นผลกระทบของการใช้สารเคมีปราบศัตรูพืชที่เกิดขึ้น โดยถือเป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ นับเป็นข้อมูลหลักฐานสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบด้านสุขภาพประชาชนจากสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่เป็นอันตรายเหล่านี้ ทั้งนี้ยังไม่รวมถึงผลกระทบต่อสุขภาพระยะยาวของประชาชน จากการรับสารเคมีกำจัดศัตรูพืชทางอ้อมที่ตกค้างและปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม อาจก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ ตามมาได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการรักษาพยาบาลที่ยังไม่สามารถประเมินตัวเลขได้ในอนาคต

จากปัญหาสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในพืชผัก ทุกภาคส่วนได้ค้นหาคณะกรรมกรมากมาย เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ไม่ว่าจะเป็นการส่งเสริมให้มีการผลิตที่มีรับรองมาตรฐานการผลิตทั้ง GAP และ Organic ซึ่งจากข้อมูลของกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ปี 2562 มีเกษตรกรที่ได้รับการรับรองการผลิตแบบ GAP จำนวน 108,962 ราย ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 827,105 ไร่ (กรมวิชาการเกษตร, 2562) รวมไปถึงโครงการต่าง ๆ ที่ส่งเสริมการเกษตรที่ปลอดภัย อาทิเช่น สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.) มีโครงการ Q Mark, Q อาสา, โครงการส่งเสริมการบริโภคและส่งเสริมการใช้สินค้า Q ด้านกระทรวงสาธารณสุขได้มีการรณรงค์อย่างต่อเนื่อง และลงพื้นที่ตรวจสอบสารปนเปื้อนในพืชผัก ผลไม้ เพื่อป้องกันและลดปริมาณสารปนเปื้อนในผัก ผลไม้ให้เป็นไปตามมาตรฐาน เป็นประจำ โดยองค์การเภสัชกรรมได้ผลิต “ชุดตรวจคัดกรองสารเคมีกำจัดแมลงในผักผลไม้และธัญพืช 2 กลุ่ม (GPO-M Kit) และชุดตรวจหาชนิดสารเคมีกำจัดแมลงในผักผลไม้และธัญพืช 4 กลุ่ม (GPO-TM Kit) โดยได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยี จากกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ เพื่อให้เป็นเครื่องมือของหน่วยงานภาครัฐ และเอกชน นำไปเฝ้าระวัง ตรวจสอบและติดตามการปนเปื้อนของสารเคมีกำจัดแมลงในผัก ผลไม้ตามด้านอาหารและยา รวมถึงตลาดสด และห้างสรรพสินค้าต่าง ๆ (สำนักสารนิเทศ สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข, 2562) ทั้งนี้ชุดทดสอบ GPO-TM Kit มีน้ำยาที่ใช้ช่วยในกระบวนการทดสอบ 13 ชนิด มีอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง 14 ชนิด มีขั้นตอนในการตรวจ 13 ขั้นตอน และใช้เวลาในการตรวจเฉลี่ย 30-60 นาทีต่อการตรวจ 1 ตัวอย่าง (สำนักมาตรฐานห้องปฏิบัติการกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข, 2562) (ภาพที่ 1.1)



ภาพที่ 1 แสดงขั้นตอนการจัดการสารพิษตกค้างในผักผลไม้ สภาพปัญหาและผลกระทบที่เกิดขึ้น

ที่มา กรมวิชาการเกษตร (2562), สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข (2562), สำนักงานหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ (2562)

จากการตรวจหาสารพิษตกค้างในพืชผักด้วยชุดทดสอบ GPO-TM Kit ของกระทรวงสาธารณสุขที่มีขั้นตอนและใช้เวลาเป็นจำนวนมาก และปัจจุบันเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy, NIRS) เริ่มเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ซึ่ง NIRS ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยด้านการเกษตรได้อย่างกว้างขวาง ทั้งการตรวจวิเคราะห์คุณภาพผลผลิต รวมถึงตรวจวิเคราะห์สารตกค้างในผลิตผลเกษตรจำนวนมาก โดยส่วนใหญ่จะดำเนินการในโดย



ใช้เครื่องวัดสเปกตรัม Fourier Transform Near-Infrared (FT-NIR) ซึ่งมีขนาดใหญ่ ไม่สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย มีราคาแพง และการวัดต้องใช้งานร่วมกับ Cuvette cell จึงต้องอาศัยบุคลากรที่มีความชำนาญเฉพาะ (Brunet, et al, 2009) ลักษณะดังกล่าวไม่เป็นการส่งเสริมให้ปัญหาสารพิษตกค้างในพืชผักลดลง เนื่องจากประชาชนโดยทั่วไปไม่สามารถรับรู้ผลการตรวจสอบสารพิษตกค้างในพืชผักได้โดยสะดวก และรวดเร็ว ดังนั้นผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นศึกษาและประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์คลื่นแสง สำหรับตรวจหาสารพิษตกค้างในพืชผักที่พบมากในประเทศไทย ได้แก่ สารไซเปอร์เมทริน คาร์เบนดาซิม อิมิดาคลอร์พริด และไดอะซินอน จากพืชผักที่มีผลค่าสารพิษตกค้างมาก และเป็นตัวแทนของพืชผักประเภทต่าง ๆ ได้แก่ พริกและใบกะเพรา (เครือข่ายเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช, 2563) เพื่อหาแนวทางการพัฒนาเครื่องมือตรวจวิเคราะห์หาพิษตกค้างในพืชผักที่สะดวก ถูกต้องเป็นไปตามมาตรฐาน เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปและใช้เวลาน้อยต่อทุกภาคส่วน ที่ประสงค์ตรวจหาสารพิษตกค้างด้วยตนเอง

### จุดมุ่งหมายของการศึกษา

เพื่อพัฒนาเครื่องมือทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษและประยุกต์ใช้งานการวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่แสงสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นของสารคาร์เบนดาซิม (Carbendazim: CBZ) ไซเปอร์เมทริน (Cypermethrin: CPT) ไดอะซินอน (Diazinon: DAN) และอิมิดาคลอร์พริด (Imidacloprid: IMP) ที่ปนเปื้อนบนพริกและใบกะเพรา

### ขอบเขตของงานวิจัย

1. การวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่แสงที่ใช้คือเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปิก (Near Infrared Spectroscopy: NIRs) ในช่วงความยาวคลื่นแสง 410 nm ถึง 940 nm
2. สารพิษที่ต้องการตรวจหา ได้แก่ คาร์เบนดาซิม ไซเปอร์เมทริน ไดอะซินอน และอิมิดาคลอร์พริด
3. ค่าความเข้มข้นของสารพิษมาตรฐานได้รับการปรับแต่งตามมาตรฐานห้องปฏิบัติการ สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 2 กรมวิชาการเกษตร มี 7 ระดับ (0.05 mg/l, 0.1 mg/l, 1 mg/l, 2 mg/l, 3 mg/l, 4 mg/l, 5 mg/l)
4. พืชผักที่ใช้ทดสอบสารพิษที่ตกค้างคือพริกและใบกะเพรา

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากปัญหาด้านสุขภาพของผู้คนที่เกิดจากการบริโภคอาหารที่ปรุงแต่งจากวัตถุพิษที่มีสารพิษตกค้าง โดยมีข้อมูลจาก World Health Organization (WHO) ประเมินว่ามีผู้ป่วยจากพิษของสารพิษกำจัดศัตรูพืช (unintentional, acute pesticide poisoning: UAPP) ประมาณ 385 ล้านรายต่อปีทั่วโลก ในจำนวนนี้มีผู้เสียชีวิตประมาณ 11,000 ราย (Boedeker., et al., 2020) ซึ่งการใช้สารพิษกำจัดศัตรูพืชไม่เพียงจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ยังมีผลกระทบถึงการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม โดยมีการตรวจพบว่าคุณภาพดินและน้ำเสื่อมโทรมลงเนื่องจากการทับถมของยาฆ่าแมลง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอากาศของดินลดลง 35% และแหล่งน้ำเกือบ 90% ในพื้นที่เกษตรกรรมปนเปื้อนด้วยสารพิษกำจัดศัตรูพืช (Ali, S., et al., 2021) สารพิษตกค้างสามารถเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้ทางผัก ผลไม้ อาหารแปรรูป น้ำ อากาศ และดิน การได้รับสารพิษกำจัดศัตรูพืชทางการเกษตรที่ตกค้างในอาหารก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง (Raziq, A., et al., 2021) สาเหตุหลักของปัญหาข้างต้นเกิดจากเกษตรกรยังขาดแรงจูงใจในเรื่องความปลอดภัยของอาหาร ไม่คำนึงถึงผลเสียของการใช้สารพิษกำจัดศัตรูพืชอย่างผิดกฎหมาย โดยใช้สำหรับการผลิตเพื่อการจำหน่าย และหลีกเลี่ยงพวกเขาใช้สำหรับการผลิตเพื่อการบริโภคในครอบครัว (Zikankuba, V. L., et al., 2019) รวมถึงการตรวจสอบสารพิษตกค้างในอาหารที่ไม่ได้ประเมินความเป็นจริง (Gerage, J., et al., 2017)

แนวทางการจัดการสารพิษตกค้างในอาหาร ที่มีการดำเนินการได้แก่การเสริมสร้างการศึกษาของเกษตรกรและการเสนอสิ่งจูงใจแก่ผู้ผลิตในแนวทางปฏิบัติทางการเกษตรที่ดี (Good Agriculture Practices: GAP) การใช้นโยบายการตรวจสอบผลผลิต การทบทวนและบังคับใช้กฎระเบียบด้านสารพิษกำจัดศัตรูพืช (Qian et al., 2018) (Philippe, V., et al., 2021) พร้อมกันนี้ในหลายประเทศยังมีการกำหนดระดับสูงสุดของสารพิษกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่ยอมรับได้ตามกฎหมายในสินค้า มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมสารพิษตกค้างต่อกิโลกรัมสินค้า (Maximum Residue Limits: MRLs) เพื่อส่งเสริมความปลอดภัยของอาหาร โดยการจำกัดความเข้มข้นของสารพิษตกค้างในสินค้าและจำกัดประเภทของสินค้าที่อนุญาต (EFSA., 2016) หากสารพิษตกค้างเกินค่า MRL จะเป็นตัวบ่งชี้ที่ชัดเจนความไม่ปลอดภัยในการบริโภคและละเมิด GAP (Leong, W., et al., 2020) โดยใช้เกณฑ์จากโคเด็กซ์ (CODEXALIMENTARIUS FAO-WHO., 2023), สหภาพยุโรป

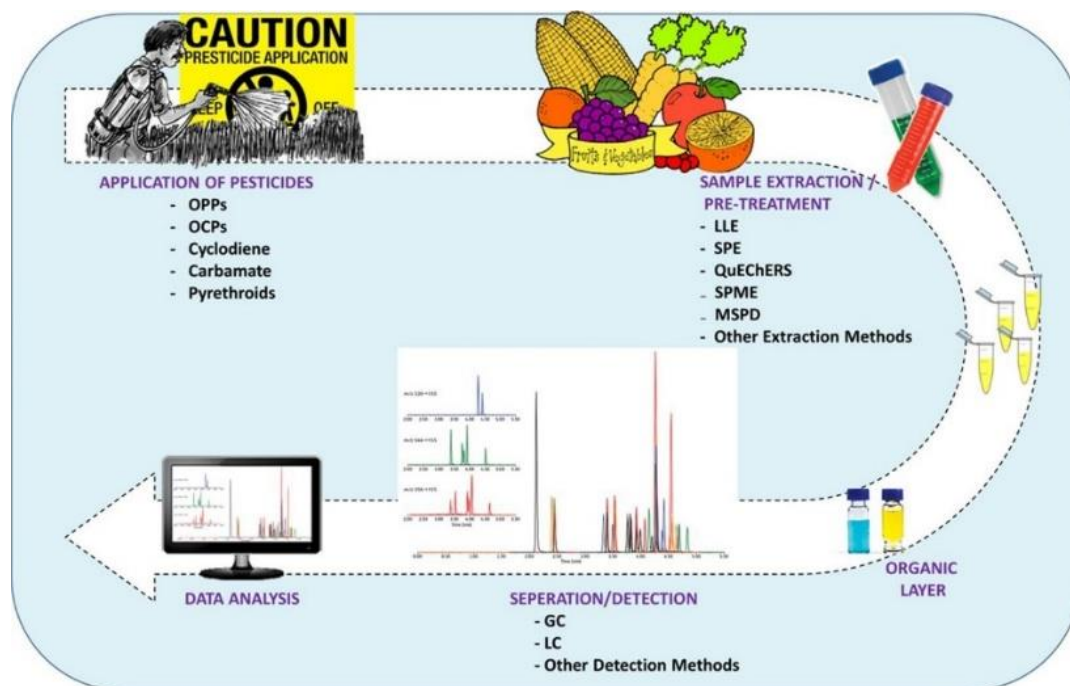
(EU Pesticides Database., 2023) หรือจากการทดลองภายในประเทศ ซึ่งค่า MRLs ของประเทศต่าง ๆ จะมีความแตกต่างกันตามเกณฑ์ที่ใช้ในการอ้างอิง และถูกใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการตรวจสอบสารพิษตกค้างในอาหารหรือผลผลิตทางการเกษตรในประเทศนั้น ๆ ทั้งนี้ข้อจำกัดที่พบจากค่า MRLs ของแต่ละประเทศที่ใช้เกณฑ์อ้างอิงจากโคเด็กซ์ คือหลายชนิดของสินค้าที่ผลิตในประเทศ ไม่มีการกำหนดค่าไว้ในโคเด็กซ์ และสินค้าที่มีค่า MRLs ตามที่กำหนดในประเทศ แต่เกินค่ามาตรฐานของสหภาพยุโรป และค่า MRLs ยังระบุแยกย่อยในแต่ละชนิดของสารพิษและชนิดของสินค้า เช่น สินค้าเกษตรชนิดพริก (chili peppers) ระบุให้สารไซเปอร์เมทริน (cypermethrin) ตกค้างสูงสุดได้ตามมาตรฐานโคเด็กซ์, สหภาพยุโรป และไทย มีค่าเป็น 2 mg/kg, 1 mg/kg และ 0.5 mg/kg ตามลำดับ ดังนั้นการตรวจสอบสารพิษตกค้างอย่างรวดเร็ว จึงต้องได้รับการพัฒนาอย่างเร่งด่วน และต้องดำเนินการอย่างเข้มงวดเพื่อปรับปรุงการบริหารจัดการปัญหาสารพิษตกค้างอย่างเป็นระบบด้วยวิธีการที่เหมาะสม (Umapathi, R., et al., 2021)

พัฒนาการของการตรวจหาสารพิษตกค้างเป็นไปอย่างรวดเร็ว นาเรนเดรันและคณะได้ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวิเคราะห์สารพิษตกค้างในผักและผลไม้ (ภาพที่ 2.1) โดยแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) ส่วนสารพิษ ได้แบ่งกลุ่มสารพิษตามลักษณะโครงสร้างทางเคมี ได้แก่ สารพิษกลุ่มออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine pesticides: OCPs), กลุ่มไซคลอดีน (Cyclodiene), สารพิษกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต (Organophosphorus / Organophosphate pesticides: OPPs), สารพิษกลุ่มคาร์บาเมต (Carbamate), สารพิษกลุ่มไพเรทรอยด์ (Pyrethroid) และสารพิษกลุ่ม Nicotinoid 2) การจัดเตรียมตัวอย่างและการสกัดสารพิษ มีการใช้เทคนิคการเตรียมและการสกัดสารกำจัดศัตรูพืชจากพืชผักที่หลากหลาย เช่น Liquid-liquid extraction (LLE), Solid phase extraction (SPE), Solid phase microextraction (SPME), Matrix solid phase dispersion (MSPD), Quick, easy, cheap, effective, rugged, and safe method (QuEChERS), Gel permeation chromatography (GPC), Liquid-liquid microextraction (LLME), Capillary electrophoresis (CE), Dispersive liquid-liquid microextraction (DLLME) ซึ่งไม่มีวิธีมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปสำหรับการสกัดสารกำจัดศัตรูพืชในห้องปฏิบัติการ ขั้นตอนการสกัดเป็นไปตามวิธีทั่วไปที่ใช้การแยกสารเคมีที่มีอยู่ในสารละลายออกจากกันด้วยตัวพา ด้วยวิธีการทางกายภาพหรือเคมี เช่น ใช้เกลือสำหรับการสกัดและตัวทำละลายผสมเข้ากับตัวอย่างให้เกิดการแยกชั้น และทำความสะอาดตัวอย่าง โดยใช้ตัวดูดซับที่จำเพาะผสมเข้ากับตัวอย่างเพื่อกำจัดสิ่งรบกวนเพื่อให้ได้ชั้นของโมเลกุลที่พร้อมจะนำไปใช้ตรวจหาสารพิษเป็นต้น 3) ส่วนวิธีการที่ใช้ในการตรวจหา ได้รวบรวมเทคนิคการตรวจประมาณค่าสารเคมีกำจัดศัตรูพืช

ตกค้างในผักและผลไม้ไว้ดังนี้ BI: Biomimetic immunoassay; CE: Capillary electrophoresis; CL: Chemiluminescence detector; DAD: Diode array detection; ECD: Electron capture detection; ELISA: Enzyme linked immunosorbent assay; FPD: Flame photometric detection; GC-MS: Gas chromatography-mass spectrometry; HPLC: High-performance liquid chromatography; IT: Ion trap analyzer; LC-HRMS: Liquid chromatography-high resolution mass spectrometry; LC-MS: Liquid chromatography-mass spectrometry; MIP: Molecular imprinted polymer; MSD: Mass selective detection; MS-MS: Tandem mass spectrometry; NCI: Negative chemical ionization; NPD: Nitrogen phosphorus detection; PDA: Photo diode array detection; Q: Single quadrupole mass analyzer; QqQ: Triple quadrupole mass analyzer; Q-Trap: Triple quadrupole linear ion trap mass analyzer; Q-TOF: Quadrupole-time of flight mass analyzer; RRLC-MS: Rapid resolution liquid chromatography-mass spectrometry; UV: Ultraviolet; UPLC-MS: Ultra-performance liquid chromatography-mass spectrometry;  $\mu$ ECD: Micro electron-capture detection

เทคนิคเหล่านี้ จะใช้การตรวจจับของเหลวหรือแก๊สของสารพิษโดยดีเทคเตอร์ แล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ดีเทคเตอร์ตรวจจับได้กับเวลา เรียกว่าโครมาโตแกรม 4) ส่วนวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้โครมาโตแกรมในการตรวจหาสารพิษเนื่องจาก peak ที่ได้จากดีเทคเตอร์สัมพันธ์กับปริมาณสารพิษที่ดีเทคเตอร์ตรวจจับได้นั่นเอง ทั้งนี้เราเรเนตรันและคณะได้สรุปไว้ว่า มีการพัฒนากระบวนการต่าง ๆ อย่างมากทั้งการเตรียมตัวอย่าง การสกัด และการตรวจจับ ซึ่งช่วยลดเวลาขนาดตัวอย่าง และการรบกวนระหว่างการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม วิธีการเหล่านี้ใช้เวลานานและมีราคาแพง ซึ่งจำเป็นต้องแก้ไขข้อจำกัดของวิธีการขั้นสูงเหล่านี้ (Narenderan, S. T., et al., 2020) สอดคล้องกับหลายงานวิจัยที่ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ทั่วไปสำหรับการตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืช ได้แก่ แก๊สโครมาโตกราฟี (GC), โครมาโตกราฟีของเหลว (LC), โครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC), แก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS), โครมาโตกราฟีของเหลว-แมสสเปกโตรเมทรี (LC-MS) แม้ว่าสิ่งเหล่านี้จะมีความแม่นยำในการระบุชนิดของสารพิษ มีความละเอียดในการตรวจหาปริมาณสารพิษในขนาดเพียงเล็กน้อยได้ อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดด้านการใช้งาน คือจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการที่มีความซับซ้อนและผู้เชี่ยวชาญที่ผ่านการฝึกอบรมอย่างมืออาชีพ เครื่องมือที่ใช้มีราคาแพง ค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์สูง ขั้นตอนการปฏิบัติงานมีความยุ่งยาก ใช้เวลานาน ยิ่งไปกว่านั้น เทคนิคเหล่านี้จำเป็นต้องมีการ

เตรียมตัวอย่าง การสกัด การปรับสภาพ และการปรับความเข้มข้นก่อนการตรวจหาสารพิษตกค้างได้ (Luo, L., et al., 2021) (Chu, Y., et al., 2020) (Kowalska, G., et al., 2021)



ภาพที่ 2 แสดงภาพรวมของกระบวนการในแต่ละขั้นตอนของวิธีการตรวจหาสารพิษตกค้างในผักผลไม้ที่มีใช้ในห้องปฏิบัติการ

ทีมา (Narendran, S. T., et al., 2020)

ด้วยข้อจำกัดดังกล่าวข้างต้นทำให้เทคนิคเหล่านี้ไม่เหมาะสมสำหรับการคัดกรองหรือตรวจสอบสารพิษที่ตกค้างในอาหารหรือผลผลิตทางการเกษตร ณ แปลงเกษตรหรือนอกสถานที่ได้ และอีกด้านหนึ่ง เทคนิคสเปกโตรสโคปที่มีความรวดเร็วในการตรวจสอบ ใช้งานง่าย ไม่ต้องมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการสกัดสารพิษที่ยุ่งยาก เหมาะสำหรับการวัดในภาคสนาม เริ่มมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบสารพิษตกค้างในอาหารมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยมีรายงานการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรด-เอฟทีไออาร์อินฟราเรด (NIR-FTIR) เพื่อตรวจหาสารพิษตกค้างในอาหาร (Aykas, D. P., et al., 2021) ค่ะน้ำ กะหล่ำปลี และพริกชี้ฟ้า (Sankom, A., et al., 2021) มีรายงานการใช้ NIR สเปกโทรสโกปีสำหรับการตรวจหาสารพิษตกค้างในผักกาดกวางตุ้ง (Lapcharoensuk, R., et al., 2023) ด้วยข้อดีของเทคนิคสเปกโตรสโคปทำให้สามารถวัดค่า

จำนวนมากได้อย่างรวดเร็ว ตัวอย่างยังคงสภาพสมบูรณ์และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไปได้ การสะท้อนแสงแบบสเปกตรัมในย่านวิสิเบิลถึงเนียร์อินฟราเรด (400 – 2500 นาโนเมตร) ได้รับการระบุว่า เป็นวิธีที่นิยมในการตรวจสอบคุณลักษณะของดินและพืช ผลลัพธ์จากการวัดการสะท้อนแสงแบบสเปกตรัมถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการตรวจสอบสารพิษตกค้างในผักผลไม้ (Armenta, S., et al., 2007) (Mirghafouri, M., et al., 2020) (Chen, Y., et al., 2020) อีกทั้งรายงานที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบสารพิษตกค้างในผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจำนวนมาก แต่วิธีการที่นำเครื่องมือที่มีราคาถูกลง มาประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบในภาคสนามได้อย่างรวดเร็ว สำหรับการตรวจสอบการตกค้างของสารคาร์เบนดาซิม, สารไซเปอร์เมทริน, สารไดอะซินอน และสารอิมิดาโครพริดในพริกและใบกะเพรายังมีจำกัด เช่นรายงานการวิเคราะห์สารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตและสารตกค้างโดยโครมาโตกราฟีแบบกระดาษ (Getz, M. E., 1963) รายงานการใช้ไมโครฟลูอิดิกชิปที่ใช้กระดาษหลายชั้นผสานรวมกับการฉีดตัวอย่าง ปฏิบัติการยับยั้งเอนไซม์ เป็นวิธีการตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตและคาร์บาเมตแบบพกพา (Yang, N., et al., 2018) คณะวิจัยจึงศึกษาเครื่องมือและวิธีสเปกโตรสโคปี เนื่องจากพบรายงานหลายชิ้นที่มีการใช้เทคนิคดังกล่าวตรวจหาสารพิษตกค้างในผักผลไม้ (Nazarloo, et al., 2021), (Ye, W., et al., 2022) (Jamshidi, et al., 2016), (Viet-Duc, et al., 2022)

## 2.1 เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Near Infrared Spectroscopy: NIRs)

สเปกโตรสโคปี (Spectroscopy) เป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแถบพลังงาน (spectrum) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ในช่วงของคลื่นวิทยุ ไปจนถึงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต (Chu, S, et al, 2023) สเปกโตรสโคปีได้ถูกขยายให้รวมถึงการศึกษาอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างสสาร (matter) กับ รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) ที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (electronic) การเปลี่ยนระดับพลังงานการหมุน (rotation) และการสั่นสะเทือน (vibration) ของโมเลกุล ซึ่งจากสเปกตรัมของโมเลกุลจะทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุลของสสารและสมบัติทางเคมี รวมถึงพลังงานที่เปลี่ยนไปของนิวเคลียส อะตอม ไอออน หรือโมเลกุลพลังงานที่เปลี่ยนไป ซึ่งเกิดจากการปลดปล่อย (emission) การดูดกลืน (absorption) หรือการกระเจิง (scattering) ของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า

NIRs เป็นกระบวนการใช้สเปกตรัม (Spectrum) ในย่านเนียร์อินฟราเรด (Near Infrared: NIR) ส่งเข้าไปที่ตัวอย่าง ทำให้โมเลกุลของตัวอย่างดูดกลืน (absorb) พลังงาน แล้วเกิดการสั่นสะเทือน (vibration) แล้วทำการตรวจวัดพลังงานของสเปกตรัม คลื่นแสง NIR มีช่วงความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 400 นาโนเมตร (nanometer: nm) ถึง 2,500 ครอบคลุมช่วงวิสิเบิล (Visible: VIS) ที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 400nm ถึง 800nm และช่วงอินฟราเรดคลื่นสั้น (Short-wavelength infrared : SWIR) ที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 800nm ถึง 1,100nm (Ozaki and Huck, 2021) และเนื่องจากช่วงคลื่นครอบคลุมทั้งช่วง VIS ไปจนถึง SWIR จึงอาจเห็นในงานวิจัยส่วนหนึ่งกล่าวถึงลักษณะการทดสอบด้วยช่วงคลื่นนี้ว่า Vis-NIRs ทั้งนี้เมื่อคลื่นช่วง VIS ส่งไปยังวัตถุ จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทรานซิชัน (electronic transition) ของอิเล็กตรอน ส่วนคลื่น NIR ส่งไปยังวัตถุ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานของพันธะของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดกลืนคลื่น NIR ซึ่งวัตถุต่างชนิดกันจะมีโมเลกุลที่มีพันธะที่เป็นตัวดูดกลืนคลื่นที่แตกต่างกัน และสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ 1) การยืดหด (stretching) ของพันธะเป็นการสั่นของโมเลกุลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวระหว่างอะตอมที่สร้างพันธะกันซึ่งมีสองรูปแบบย่อยคือ แบบสมมาตร (symmetric) และแบบอสมมาตร (asymmetric) และ 2) การงอ (bending) หรือการผิดรูป (deformation) เป็นการสั่นของโมเลกุลที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมพันธะ ที่มีรูปแบบปลีกย่อยอีกได้แก่ scissoring, rocking, wagging และ twisting ซึ่งทั้งหมดนี้อาจเกิดการเคลื่อนที่อยู่ในระนาบเดียวกัน (in-plane) หรือต่างระนาบกัน (out-of-plane) ก็ได้ การสั่นของพันธะมีหลายลักษณะ และจะมีการดูดกลืนพลังงานที่เป็นเฉพาะ เนื่องจากโมเลกุลมีพันธะได้หลายแบบ ซึ่งแต่ละพันธะก็มีรูปแบบการสั่นได้อีกหลายรูปแบบ ทำให้โมเลกุล จะแสดงการดูดกลืนแสง NIR ได้หลายช่วงคลื่นพร้อมกัน ลักษณะการดูดกลืนแสงจะเกิดเป็นแถบ (band) หรือ พีค (peak) แสดงถึงพลังงานคลื่นแสง NIR ที่ถูกดูดกลืน ซึ่งสามารถวัดได้ใน 2 รูปแบบ คือรูปแบบความเข้มแสงที่ส่องผ่าน (transmittance) และรูปแบบความเข้มแสงสะท้อนออกมา (reflectance) แล้วนำค่าความเข้มแสงที่ได้ในแต่ละความยาวคลื่นมาเขียนกราฟ โดยให้แกนนอนเป็นค่าความยาวคลื่น แกนตั้งเป็นค่าการดูดกลืนแสง จะได้กราฟการดูดกลืนหรือสะท้อนคลื่นแสงของตัวอย่าง กราฟที่ได้เรียกว่า เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม (NIR spectrum) โมเลกุลของสารแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างกัน เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจึงได้สเปกตรัมที่มีลักษณะต่างกัน ซึ่งโอซากิและฮัคได้ให้รายละเอียดว่า ช่วงอินฟราเรดคลื่นสั้น (800 -1,100 nm) เป็นช่วงที่มีพลังงานสูงสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อของตัวอย่างได้ดี โดยทั่วไปสามารถทะลุเข้าไปได้ถึง 1 cm เหมาะกับผลผลิตทางการเกษตร (ผัก, ผลไม้) (Ozaki

and Huck, 2021) ทั้งนี้ลักษณะสำคัญของโมเลกุลที่สามารถดูดกลืนคลื่น NIR ได้ จะต้องประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจน (X-H) อะตอม X ได้แก่ C, O, N, S ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีในสารพิษมาตรฐานทั้ง 4 ชนิด และตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัย

จากลักษณะการทำงานของ NIRs ข้างต้น จึงมีการนำ NIRS มาใช้ในการวิเคราะห์สารพิษตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรอย่างกว้างขวาง เช่น ยี่และคณะใช้ Vis-NIR ในช่วง 376 nm ถึง 1,044 nm และ NIR ช่วง 915–1,699 nm ตรวจหาระดับสารเคมีตกค้างขององุ่น 3 สายพันธุ์ที่แตกต่างกันและถูกฉีดพ่นด้วยสารกำจัดศัตรูพืช 4 ระดับ (Ye, W., et al, 2022) ส่วนซีไฮลีและคณะใช้ Vis-NIRS ที่ช่วงคลื่น 400 ถึง 2,500 nm ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของสารไกลโฟเสต (Glyphosate) ในดิน โดยพัฒนาสมการการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนการทดสอบสมการด้วยวิธี ten-fold cross-validation สำหรับหาความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของอุณหภูมิเนียมออกไซด์ ฟอสฟอรัส และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) โดยใช้ตัวอย่างจากดินชั้นบน 68 ตัวอย่างทั่วเกาะใต้ของประเทศนิวซีแลนด์ พบว่าแบบจำลองให้ค่า  $R^2$  0.93 และ  $RMSECV = 207.58 L kg^{-1}$  ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่า vis-NIRS สามารถทำนายการดูดซับสารพิษไกลโฟเสตในดินได้ด้วยความแม่นยำสูง (Cecilie H, et al, 2020) เป็นต้น สอดคล้องกับนาซาธุและคณะ (Nazarloo, et al., 2021) ที่ใช้ Vis-NIRs ตรวจจับค่าการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่น 350-1100nm ร่วมกับแบบจำลองการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Squares regression: PLSR) และโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks: ANN) มาทดสอบความเป็นไปได้ของการตรวจหาสารพิษตกค้างในมะเขือเทศแบบไม่ทำลายตัวอย่าง พบว่าแบบจำลองให้ค่า  $RC = 0.988$ ,  $RP = 0.982$ ,  $RMSEC = 0.141$ ,  $RMSEP = 0.166$  สอดคล้องกับโรฮินีและคณะ ที่เห็นว่า NIRs มีการนำไปใช้ในวงกว้างทั้งด้านอาหาร เกษตร อุตสาหกรรม ประยุกต์ใช้ในการหาสารพิษตกค้างในพืชผักและอาหาร การตรวจหาชนิดสารเคมี และขยายรวมไปถึงการตรวจวิเคราะห์ผลผลิตทางการเกษตร เช่น ผัก ผลไม้ นม น้ำมัน และเครื่องมือ เป็นต้น ซึ่งจุดเด่นของ NIRs คือการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง ใช้เวลาน้อย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และต้นทุนต่ำกว่าวิธีการและเทคนิคแบบดั้งเดิม เช่น Chromatography, High-Performance Liquid Chromatography และ Gas Chromatography – Mass Chromatography (Rohinee, M., et al., 2021) สอดคล้องกับยานหวังและคณะได้รวบรวมเทคนิคการวิเคราะห์สารพิษตกค้างในพืชผักไว้ ได้แก่ liquid chromatography (LC), thin layer chromatography (TLC), micellar electrokinetic chromatography (MEKC), และ supercritical fluid chromatography (SFC) (Yan Wang., et al., 2020)



งานวิจัยดังกล่าวข้างต้นพบว่าการใช้เทคนิค NIRs สามารถนำไปใช้ตรวจวัดสารพิษตกค้างได้อย่างรวดเร็ว ลดขั้นตอนและวิธีการที่ซับซ้อน ของวิธีการดั้งเดิม แต่เนื่องจากเครื่อง NIRs ยังมีขนาดใหญ่และตั้งอยู่ในห้องปฏิบัติ เคลื่อนย้ายไปตรวจวัดนอกสถานที่ไม่ได้ จึงมีนักวิจัยสนใจในการพัฒนาให้เทคนิค NIRs สามารถนำไปตรวจวัดนอกสถานที่ได้ ซึ่งชานเซตและคณะเห็นว่าเทคนิคแบบที่ต้องทำลายตัวอย่าง ไม่สามารถควบคุมคุณภาพตัวอย่างได้หรือควบคุมได้เพียงไม่กี่ตัวอย่างต่อชุดเท่านั้น ตัวอย่างอื่นอาจต้องได้รับการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการยืนยันที่ซับซ้อนมากขึ้น จึงได้ใช้เทคนิค NIRs ในรูปแบบอุปกรณ์พกพา ตรวจจับสเปกตรัมของสารพิษที่ตกค้างในพริกด้วยเครื่อง Perten DA-7000 parallel diode-array Vis-NIR spectrophotometer และวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเครื่องมือ FNS-6500 scanning monochromator (I) และสรุปว่าเทคนิค NIRs นี้สามารถนำมาใช้คัดกรองการตรวจหาสารพิษตกค้างได้แบบไม่ทำลายตัวอย่าง และทำให้สามารถทดสอบตัวอย่างจำนวนมากขึ้นได้ (Sánchez., et al., 2010) และจามซิดิและคณะ ยังให้ข้อมูลว่าเทคนิคที่ใช้ตรวจวัดสารพิษตกค้างในพืชผักเช่น แก๊สโครมาโตกราฟี (GC) และโครมาโตกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HP-LC) จำเป็นต้องมีกรรมวิธีในการสกัดสารพิษ เช่น solid-phase extraction, supercritical fluid extraction และ accelerated solvent extraction microwave-assisted extraction จึงทดลองใช้ NIRs บนอุปกรณ์พกพา ตรวจวัดสารพิษที่ตกค้างในแตงกวาด้วยเครื่อง USB2000 fibre optic spectrometer และสรุปว่ารูปแบบที่ดำเนินการสามารถใช้คัดกรองสารพิษตกค้างในแตงกวาได้อย่างรวดเร็ว ต้นทุนต่ำ ไม่ทำลายตัวอย่าง และพกพาได้ และจุดเด่นที่สำคัญคือผู้ใช้สามารถเรียนรู้และใช้งานได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนโปรแกรมการตรวจหาสารเคมีตกค้างในผักและผลไม้อื่นๆ ได้โดยใช้อุปกรณ์ตัวเดิม (Jamshidi., Et al., 2016) ส่วนเวียดและคณะ ได้ใช้เทคนิค NIRs ตรวจหาสาร Indoxacarb, chlorantraniliprole, emamectin-benzoate, Carbendazim and Gibberellic acid ที่ตกค้างในผักกาดหอม, ผักกาดเขียว และผักกวางตุ้ง โดยพัฒนาสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพาจากชุดพัฒนาแอปพลิเคชัน Nanolambda ชื่อ NSP32m-W1 ADK และได้ข้อสรุปว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้อุปกรณ์แบบพกพาตรวจหาสารพิษตกค้างในพืชผักได้ (Viet-Duc., et al. 2022) จะเห็นได้ว่าเทคนิคการตรวจวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมบนอุปกรณ์แบบพกพาสามารถลดขั้นตอน ลดขนาดเครื่องมือ ลดเวลา ลดค่าใช้จ่าย และสามารถพกพาไปตรวจวัดภายนอกสถานที่ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม Vis-NIRs ยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง จากความต้องการข้อมูลอ้างอิงที่เที่ยงตรง และชุดข้อมูลสอบเทียบจำนวนมาก สอดคล้องกับโนกูเอรา (Noguera., et al., 2021) ที่เห็นว่าในงานวิจัยส่วนใหญ่ ข้ามข้อจำกัดด้านความเที่ยงตรงและจำนวนข้อมูล มุ่งเน้นประสิทธิผลสำเร็จและได้ค่าความแม่นยำสูง

ด้วยอุปกรณ์ราคาแพง ซึ่งแพงเกินไปสำหรับผู้ใช้งานส่วนใหญ่ ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนาให้เทคนิค Vis-NIRs สามารถใช้งานได้บนอุปกรณ์ขนาดเล็กพกพาได้ แต่ยังมีขีดความสามารถด้านความเร็ว และมีความถูกต้องกว่าเครื่องที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

จากคุณสมบัติของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีที่มีแหล่งแสงในช่วงความยาวคลื่น NIR ส่งลงไปบนตัวอย่างแสงจะถูกดูดกลืนโดยกระตุ้นให้เกิดการสั่นของโมเลกุลใน functional groups ต่างๆ 2 ลักษณะ คือ การยืดหด (stretching) และ การเปลี่ยนมุม (bending) ช่วงความถี่ overtones และ combination ของหมู่ฟังก์ชัน O-H, C-H, N-H และ O=H ซึ่งเป็นโมเลกุลหลักของสารอินทรีย์ ถ้าโครงสร้างโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ตรวจวัดมีความซับซ้อน สเปกตรัมที่ได้จะยิ่งมีการซ้อนทับกันมากขึ้น โดยองค์ประกอบทางเคมีของสารพืชแต่ละชนิดและพื้นผิวของวัตถุจะส่งผลให้สเปกตรัมแตกต่างกันไป โดยมีรายงานการพบตำแหน่งของค่าสูงสุด (peak) และมีรายงานการเลือกใช้บางตำแหน่งของข้อมูลสเปกตรัมของการตรวจสอบสารพิษ 4 ชนิดที่ใช้ในการศึกษา (คาร์เบนดาซิม, ไซเปอร์เมทริน, ไดอะซินอน, อิมิดาโคลพริด) ที่ตกค้างในผักผลไม้ (ตารางที่ 1)

**ตารางที่ 1** ความยาวคลื่นช่วง VIS-NIR ที่มีรายงานการใช้ตรวจสอบสารพิษตกค้างในผักผลไม้

ชื่อสารพิษ	ความยาวคลื่น (nm)	ผักผลไม้	แหล่งที่มารายงาน
Carbendazim	482, 530, 589, 623, 751, 785, 833	ผักกาดหอม	Viet-Duc Ngo., et al., (2021)
Cypermethrin	350 - 1050	ใบชา	Mohite, J., (2019)
	376 - 1044	งุ่น	Ye, W., et al., (2022)
	380 - 1100	แคนตาลูป	Yu, G., (2022)
Diazinon	450 - 1000	แตงกวา	Jamshidi, B., (2015)
	680, 900	แตงกวา	Jamshidi, B., (2017)
Imidacloprid	348.45 - 1,141.34	แคนตาลูป	Yu, G., (2021)

และจากรายงานของ ยี่และคณะ พบว่าสารพิษตกค้างไม่ได้เปลี่ยนตำแหน่งของค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัม แต่ปัจจัยอื่นเช่น อุณหภูมิ ความชื้น ขนาดอนุภาค สิ่งเจือปนอื่น เป็นต้น จะส่งผลต่อการแสดงค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัม และข้อมูลสเปกตรัมของปริมาณสารพิษตกค้างในช่วงเวลา

ต่างๆ กันจะซ้อนทับกันบางส่วน ซึ่งจะไม่เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน (Ye, W., et al., 2022) (Yu, G., et al., 2021)

## 2.2 การปรับปรุงข้อมูลสเปกตรัม (Spectrum pretreatment)

การปรับปรุงข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องวัด NIR เพื่อลดอิทธิพลของปัจจัยที่อาจมีผลต่อสเปกตรัมของ NIR เช่น ความชื้น อุณหภูมิ และขนาดอนุภาคของตัวอย่าง เป็นต้น ซึ่งปัจจัยข้างต้นจะส่งผลให้สเปกตรัมที่ได้มีความคลาดเคลื่อน และแบบจำลองที่จะสร้างขึ้นจากสเปกตรัมนี้ จะมีความแม่นยำลดลง (Zhu, S., et al. 2019) ดังนั้นการแปลงข้อมูลสเปกตรัมโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ถือเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้ขั้นตอนการสร้างสมการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ในการแปลงข้อมูลสเปกตรัมได้แก่

2.2.1 วิธี multiplicative scatter correction (MSC) เป็นการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสเปกตรัม เพื่อลดอิทธิพลของการกระเจิงของแสงที่เกิดจากสาเหตุที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการลดค่าผิดพลาด โดยมาเล็กและคณะใช้ NIRS วัดค่าสเปกตรัมของเพื่อหาคุณสมบัติของดินจำนวน 300 ตัวอย่างผ่านออนไลน์ โดยแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี MSC พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  มีค่ามากกว่า 0.99 (Maleki., et al, 2007)

2.2.2 วิธี smoothing เป็นการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อน โดยมีการแทนค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความยาวคลื่นด้วยค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีจุดศูนย์กลางของช่วงความยาวคลื่นตรงกับจุดที่ถูกแทนที่ ต่อจากนั้นเลื่อนช่วงไปหนึ่งความยาวคลื่น แล้วคำนวณซ้ำจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ซึ่งสามารถลดปัญหาของสัญญาณรบกวนต่อค่าการดูดกลืนแสง โดยจะได้สเปกตรัมที่มีลักษณะเหมือนสเปกตรัมดั้งเดิม แต่จะเรียบสม่ำเสมอมากกว่า

2.2.3 วิธีปรับช่วงขอบเขตของข้อมูล (Feature Scaling) เป็นวิธีการปรับช่วงขอบเขตของข้อมูลชนิดตัวเลขให้อยู่ในช่วงหรือขอบเขตเดียวกัน เนื่องจากข้อมูลสเปกตรัมหรือค่าความเข้มของแสงที่ได้จากวัดด้วยเทคนิค NIRs มีค่าที่หลากหลาย การปรับช่วงหรือขอบเขตที่เหมาะสมและง่ายกับการนำไปประมวลผลในขั้นต่อไป เช่น ช่วง  $[0, 1]$  หรือ  $[-1, 1]$  จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลสเปกตรัมนี้ได้ การปรับช่วงขอบเขตของข้อมูลมีหลายวิธี เช่น Min-Max Normalization, Mean Normalization, Z-Score Normalization, Scale to Unit Length เป็นต้นหวังและคณะ ได้เสนอวิธีการจัดหมวดหมู่ข้อมูลแบบใหม่ และประยุกต์ใช้การปรับช่วงข้อมูลที่นิยามในสมการที่ 2.1

$$D_{\sigma}(p, q) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{\sigma_i} (p(i) - q(i))^2} \quad (2.1)$$

โดยที่  $p = (x_1, y_1, t_1)$  และ  $q = (x_2, y_2, t_2)$  และ  $x_1, y_1, t_1$  เป็นตำแหน่งใดของข้อมูล  $p$  และ  $x_2, y_2, t_2$  เป็นตำแหน่งใด ๆ ของข้อมูล  $q$  และ  $p(i)$  คือมิติที่  $i$  ของเวกเตอร์  $p$  และ  $\sigma_i$  คือน้ำหนักที่ปรับขนาดมิติ  $x, y$  หรือ  $t$  (Wang, H., et al., 2012)

### 2.3 การสร้างแบบจำลอง (Calibration model) แบ่งได้ 2 วิธีหลักคือ

2.3.1 *Wavelength selected method* เป็นวิธีการที่ต้องเลือกข้อมูลแต่ละความยาวคลื่นหนึ่ง ๆ ที่มีความสัมพันธ์กับค่าวิเคราะห์ทางเคมีโดยการพิจารณาจากข้อมูลทางสถิติดังนี้

1) *Single linear regression (SLR)* เป็นการสร้างสมการที่ประกอบด้วยตัวแปรสองชนิดที่มีความสัมพันธ์กัน คือ ตัวแปรอิสระ ( $X$ ) และตัวแปรตาม ( $Y$ ) *SLR* เป็นการเลือกพิจารณาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างที่ความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียว (*single wavelength*)

2) *Multiple linear regression (MLR)* เป็นการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่นำตัวแปรอิสระ ( $X$ ) มากกว่าหนึ่งตัวมาใช้ในการประเมินค่าตัวแปรตาม ( $Y$ ) การพิจารณาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างจากหลายความยาวคลื่น การใช้เทคนิค *MLR* ในการสร้างสมการ โดยใช้ตัวแปรอิสระที่ได้จากการเลือกความยาวคลื่นมากกว่าหนึ่งความยาวคลื่นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม

2.3.2 *Full spectrum method* เป็นการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดในสเปกตรัม (*full spectrum*) มาสร้างสมการ โดยทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ ( $X$ ) และสร้างตัวแปรกลุ่มใหม่ขึ้นมาวิธีทางสถิติที่นิยมใช้ได้แก่

1) *Principle component regression (PCR)* เป็นการวิเคราะห์ผล โดยทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ ( $X$ ) ด้วยการแบ่งกลุ่มตัวแปรอิสระเดิมที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรใหม่หรือองค์ประกอบที่เรียกว่าแฟกเตอร์ (*factor score; F*) หรือ *principal combination (PC)* แล้วจึงนำค่าแฟกเตอร์ไปสร้างสมการเชิงถดถอย ก่อนการนำมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม ( $Y$ ) ที่ได้จากวิธีวิเคราะห์มาตรฐาน เพื่อสร้างสมการทำนายค่าตัวแปรตาม ( $Y$ )

2) *Partial least square regression (PLSR)* เป็นเทคนิคในการลดจำนวนตัวแปรอิสระ ( $X$ ) เช่นเดียวกับวิธี *PCR* แต่จะแตกต่างตรงที่ในช่วงจัดกลุ่มการลดจำนวนตัวแปรอิสระ ( $X$ ) โดยการสร้างแฟกเตอร์นั้นจะมีการนำข้อมูลตัวแปรตาม ( $Y$ ) เข้ามารวมในการสร้างแฟกเตอร์ ซึ่งใน

การหาค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นมีน้ำหนัก (*loading weight; W*) แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ได้จากวิธีทางเคมีที่นำมาหาความสัมพันธ์กัน

## 2.4 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis)

การวิเคราะห์เชิงปริมาณจะใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นทำนายปริมาณทางกายภาพหรือค่าอ้างอิง และจำเป็นต้องมีกลุ่มตัวอย่างที่ใช้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างข้อมูลทางกายภาพหรือค่าอ้างอิงกับข้อมูลสเปกตรัม กลุ่มตัวอย่างที่ดีจะต้องมีจำนวนตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์หรืออย่างน้อยเพียงทั้งตัวอย่างในปัจจุบันและตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ในอนาคต โดยเฉพาะปริมาณทางกายภาพ จะต้องมียุคครอบคลุมปริมาณทั้งต่ำสุดและสูงสุดของตัวอย่าง ลูและคณะ ใช้เทคนิค NIRs ร่วมกับเทคนิคการจดจำรูปร่างสำหรับแยกแยะแหล่งกำเนิดทางภูมิศาสตร์ของสมุนไพรทางการแพทย์ โดยใช้ตัวอย่างสมุนไพรจีนไป๋จื่อ (Bai-Zhi) จำนวน 269 ตัวอย่าง และตั้งเข็มจำนวน 350 ตัวอย่าง ได้รับความแม่นยำในการตรวจสอบสูงถึง 99% (Liu., et al., 2006) นอกจากนี้ควรพิจารณาทางกายภาพหรือค่าอ้างอิง ซึ่งควรได้มาจากวิธีมาตรฐานและมีความแม่นยำเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง เนื่องจากส่งผลกระทบต่อสมการที่สร้างขึ้นต่อไป แชนและคณะรายงานถึงวิธีทางคณิตศาสตร์ เช่น กำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน การถดถอยพหุเชิงเส้น และการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการสอบเทียบ บางครั้งอัลกอริทึมที่แตกต่างกันจะถูกรวมเข้าด้วยกันเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลองการสอบเทียบ (Zheng, S., et al., 2019) การวิเคราะห์เชิงปริมาณของเทคนิค NIRS จำเป็นต้องมีสมการสำหรับทำนายค่าทางกายภาพหรือค่าอ้างอิง โดยการสร้างสมการทำนายผลเป็นการเลือกข้อมูลความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับทางกายภาพหรือค่าอ้างอิง (Wavelength selected method) โดยการพิจารณาจากข้อมูลทางสถิติ สำหรับสร้างสมการที่ประกอบด้วยตัวแปรสองชนิดที่มีความสัมพันธ์กัน คือ ตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) เป็นการเลือกพิจารณาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างที่ความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียว (single wavelength) ข้อมูลในลำดับข้อมูลใด ๆ มีแนวโน้มของข้อมูลประมาณค่าเส้นตรง สามารถประมาณการข้อมูลที่ถูกกำหนดจากแบบจำลองพาราเมตริกสำหรับแนวโน้มข้อมูลแบบต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้ (Suchart Y., 2022)

2.4.1 แบบจำลองพาราเมตริกสำหรับแนวโน้มข้อมูลแบบเส้นตรง แสดงดังสมการที่ 2.2 ได้ว่า

$$\hat{x}[n] = a_0 + a_1 n \quad (2.2)$$

โดยที่ค่า  $a_0$  กับ  $a_1$  คือพารามิเตอร์ของแบบจำลองซึ่งถูกเลือกให้เหมาะสมที่สุดกับลำดับข้อมูลที่ป้อนให้กับแบบจำลองสำหรับแนวโน้มข้อมูลแบบเส้นตรง

2.4.2 แบบจำลองพาราเมตริกสำหรับแนวโน้มข้อมูลแบบโพลีโนเมียล ในทางปฏิบัติ ข้อมูลในลำดับข้อมูลมักมีพฤติกรรมข้อมูลที่ซับซ้อนมาก การประมาณการข้อมูลด้วยการใช้แบบจำลองพาราเมตริกแบบค่าคงที่กับเส้นตรงจึงไม่สามารถกำหนดลักษณะลำดับข้อมูลชนิดดังกล่าวนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองพาราเมตริกที่ซับซ้อนมากขึ้นในการประมาณค่าข้อมูลในลำดับข้อมูลที่ซับซ้อนเหล่านี้ ในกรณีเช่นนี้ ใช้แบบจำลองพาราเมตริกสำหรับแนวโน้มข้อมูลแบบโพลีโนเมียลดังสมการ (2.3) ซึ่งมีนิยามว่า

$$\hat{x}[n] = a_0 + \sum_{k=1}^p a_k n^k \quad (2.3)$$

โดยที่  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$  เป็นสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียลดีกรี  $p$  ซึ่งถูกเลือกให้เหมาะสมที่สุดกับลำดับข้อมูลที่ป้อนให้กับแบบจำลองพาราเมตริกสำหรับแนวโน้มข้อมูลแบบโพลีโนเมียลในความสัมพันธ์ (2.3)

2.4.3 แบบจำลองพาราเมตริกสำหรับแนวโน้มข้อมูลแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล แสดงดังสมการ (2.4) ซึ่งมีนิยามว่า

$$\hat{x}[n] = \sum_{k=1}^p a_k (z_k)^n \quad (2.4)$$

โดยที่  $a_k$  กับ  $z_k$  เป็นแอมพลิจูดกับรากของเอกซ์โพเนนเชียลอันดับที่  $p$  ที่ถูกเลือกให้เหมาะสมที่สุดกับลำดับข้อมูลซึ่งป้อนให้กับแบบจำลองพาราเมตริกสำหรับแนวโน้มข้อมูลแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในความสัมพันธ์ (2.4)

## 2.5 การทดสอบหาประสิทธิภาพของแบบจำลอง

เมื่อได้แบบจำลองทำนายค่าทางกายภาพหรือค่าอ้างอิงแล้ว ต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพของสมการก่อนนำไปใช้จริง ได้แก่

2.5.1 การทดสอบหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม เป็นการทดสอบภายในกลุ่มตัวอย่าง โดยเป็นกลุ่มตัวอย่างกลุ่มเดียวกับที่ใช้สร้างแบบจำลองทำนายค่าทางกายภาพหรือค่าอ้างอิง เรียกกลุ่มตัวอย่างนี้ว่า *กลุ่มตัวอย่างสำหรับพัฒนาแบบจำลองทำนายค่าทางกายภาพ*

หรือค่าอ้างอิง โดยสร้างสมการทำนายค่าทางกายภาพหรือค่าอ้างอิงโดยไม่มีตัวอย่างที่ 1 เมื่อได้แบบจำลองแล้ว จึงนำตัวอย่างที่ 1 มาทดสอบแบบจำลอง ต่อมาสร้างแบบจำลองทำนายค่าทางกายภาพหรือค่าอ้างอิงโดยไม่มีตัวอย่างที่ 2 เมื่อได้แบบจำลองทำนายค่าทางกายภาพหรือค่าอ้างอิง นำทำนายด้วยตัวอย่างที่ 2 ทำขั้นตอนข้างต้นซ้ำจนกระทั่งหาค่าทางกายภาพหรือค่าอ้างอิงของตัวอย่างครบทั้งกลุ่ม ดังนั้นตัวอย่างแต่ละความเข้มข้นจะถูกตัดออกจากชุดตัวอย่าง 1 ครั้งเท่ากัน ทำการหาค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนอง ( $R^2$ ) และค่าความแม่นยำของการทำนาย (Root Mean Square Error:  $RMSE$ )

2.5.2 การทดสอบหาประสิทธิภาพของแบบจำลอง เป็นการทดสอบแบบจำลองด้วยกลุ่มตัวอย่างที่ต่างจากกลุ่มตัวอย่างที่ใช้พัฒนาแบบจำลอง โดยการเตรียมตัวอย่างกลุ่มนี้มาทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับกับตัวอย่างที่ใช้พัฒนาแบบจำลองทำนายค่าทางกายภาพหรือค่าอ้างอิง รวมถึงวิธีการปรับปรุงข้อมูลสเปกตรัมที่ต้องเป็นวิธีเดียวกันกับตัวอย่างพัฒนาแบบจำลอง เรียกกลุ่มตัวอย่างที่นำมาทดสอบแบบจำลองนี้ว่า *กลุ่มทดสอบหาประสิทธิภาพของแบบจำลอง* วิธีการเตรียมตัวอย่างทำเช่นเดียวกับกลุ่มตัวอย่างที่ใช้พัฒนาแบบจำลอง โดยค่าทางกายภาพหรือค่าอ้างอิงที่ต้องการหาในตัวอย่างกลุ่มตัวอย่างสำหรับทดสอบแบบจำลอง ต้องมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับกลุ่มตัวอย่างที่ใช้พัฒนาแบบจำลอง หลังจากได้ข้อมูลสเปกตรัมของชุดทดสอบแบบจำลอง นำค่าไปคำนวณหาค่าทางกายภาพโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น จากนั้นดูผลการคำนวณที่ได้จากค่าสถิติ ได้แก่ ค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนอง ( $R^2$ ) และค่าความแม่นยำของการทำนาย (Root Mean Square Error:  $RMSE$ ) ถ้าผลการทำนายค่าทางกายภาพหรือค่าอ้างอิงใกล้เคียงกันทั้งสองกลุ่มตัวอย่าง และให้ค่าทางสถิติที่ดี แสดงว่าสมการทำนายค่าทางกายภาพหรือค่าอ้างอิงนั้นยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ทำนายปริมาณตัวอย่างต่อไปได้อย่างถูกต้อง

ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างแบบจำลอง ได้แก่ ค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองหรือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าความแม่นยำของการทำนาย (Root Mean Square Error:  $RMSE$ ) ซึ่งซีกโกและคณะได้ทดสอบค่าสถิติที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง และได้สรุปถึงค่า  $R^2$  และ  $RMSE$  ว่า ค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง  $[+\infty, 1)$  โดย 1 หมายถึงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ดีที่สุด และค่า  $RMSE$  อยู่ในช่วง  $[0, +\infty)$  โดย 0 หมายถึงมีความแม่นยำมากที่สุด (Chicco, D., et al., 2021)

## 2.6 สารพิษมาตรฐานในงานวิจัย

### 2.6.1 คาร์เบนดาซิม (Carbendazim: CBZ)

มีชื่อสามัญคือคาร์เบนดาซิม สูตรโมเลกุลคือ  $C_9H_9N_3O_2$  และสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 3(ก) เป็นสมาชิกของกลุ่มเบนซิมิดาโซล (National Center for Biotechnology Information, 2023) มีลักษณะเป็นผงสีขาว เป็นยาฆ่าเชื้อราทางใบและดินที่เป็นระบบ ดูดซึมได้ทางรากและเนื้อเยื่อสีเขียว นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการป้องกันกำจัดโรคที่เกิดจากเชื้อราไม่ว่าจะเป็นในพืชผัก พืชไร่ ข้าวและธัญพืช ผลไม้ และไม้ดอก

### 2.6.2 สารไซเปอร์เมทริน (Cypermethrin: CPT)

มีชื่อสามัญคือไซเปอร์เมทริน สูตรโมเลกุลคือ  $C_{22}H_{19}Cl_2NO_3$  และสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 3(ข) CPT เป็นสารกลุ่มไพเรทรอยด์ (pyrethroid) ที่ถูกสังเคราะห์เพื่อเทียบเคียงกับสารกลุ่มไพเรทรินในธรรมชาติ การสังเคราะห์เป็นการปรับปรุงให้มีความคงตัวได้ดีขึ้น CPT ถูกใช้เป็นยาฆ่าแมลงในการใช้งานทางการเกษตรเชิงพาณิชย์ขนาดใหญ่ และใช้ป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชหลายชนิด

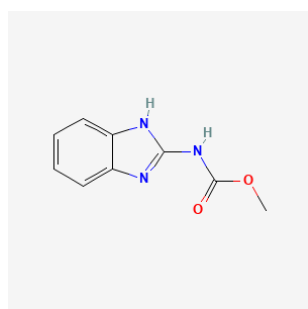
### 2.6.3 สารไดอะซินอน (Diazinon: DAN)

มีชื่อสามัญคือไดอะซินอน สูตรโมเลกุลคือ  $C_{12}H_{21}N_2O_3PS$  และสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 3(ค) ไดอะซินอนบริสุทธิ์เป็นน้ำมันไม่มีสี ใช้เป็นสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนฟอสฟอรัสที่ใช้ในการควบคุมแมลงศัตรูพืชในดิน ไม้ประดับ พืชไร่ ผลไม้และผัก

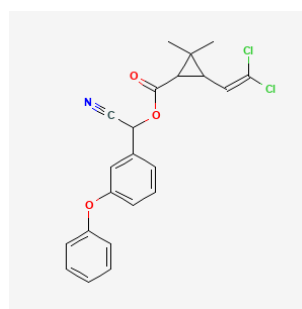
### 2.6.4 สารอิมิดาคลอริด์ (Imidacloprid: IMP)

มีชื่อสามัญคืออิมิดาคลอริด์ สูตรโมเลกุลคือ  $C_9H_{10}ClN_5O_2$  และสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 3(ง) IMP เป็นกลุ่มของยาฆ่าแมลงที่ออกฤทธิ์ต่อระบบประสาทซึ่งจำลองมาจากนิโคติน มีการใช้ในทางเกษตรกรรม การควบคุมศัตรูพืชในพืชไร่ และพืชผัก

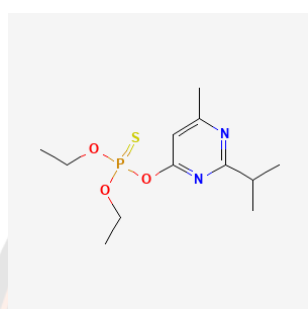




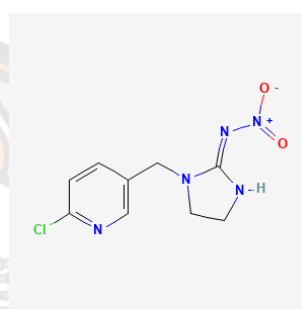
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

**ภาพที่ 3** โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลของสารพิษในงานวิจัย (ก) คาร์เบนดาซิม (ข) ไชเปอร์เมทริน (ค) ไดอะซินอน (ง) สารอิมิดาโคลพริด

ที่มา: National Center for Biotechnology Information (2023)

## 2.7 ตัวกลางพืชผักในงานวิจัย

### 2.7.1 พริก

พริกที่นิยมปลูกมากในประเทศไทยมีแหล่งกำเนิดในเม็กซิโกและอเมริกากลาง ในปี 2562 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกพริกทั้งหมด 167,443 ไร่ พื้นที่เก็บเกี่ยว 343,566 ไร่ ลักษณะลำต้นมีขนค่อนข้างมาก ดอกเรียวยาว มีดอกเดี่ยว ผลเดี่ยว และมีกลีบดอกสีขาวหรือสีขาวนวล ผลแก่สีแดง มีรสชาติเผ็ด องค์ประกอบทางเคมีของพริกคือ Capsaicin ( $C_{18}H_{27}NO_3$ ) ศัตรูพืชในพริกที่พบบ่อย เช่น โรคแอนแทรคโนส หรือโรคกุ้งแห้ง, โรคเหี่ยวที่เกิดจากเชื้อแบคทีเรีย (Bacterial wilt), โรคใบหงิกเหลืองพริก, โรคเหี่ยวที่เกิดจากเชื้อรา (Fusarium wilt) เป็นต้น ซึ่งกรมวิชาการเกษตรแนะนำชนิดของสารเคมีบางชนิด เช่น อิมิดาโคลพริด พร้อมแสดงอัตราส่วนการใช้เพื่อป้องกันและกำจัดศัตรูพืชดังกล่าว (กรมวิชาการเกษตร, 2563)

### 2.7.2 ใบกะเพรา

กะเพรา จัดเป็นพืชล้มลุกที่มีอายุ 1-2 ปี ทรงต้นเป็นพุ่มแตกกิ่งก้านสาขา มีความสูงเฉลี่ย 30 –60 เซนติเมตร เป็นพืชที่อยู่ในตระกูล Labiatae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Ocimum sanctum* Linn. พืชตระกูลนี้ที่สำคัญได้แก่ โหระพาแมงลัก เป็นต้น ลักษณะใบ เป็นใบเดี่ยว แตกใบออกตรงข้ามในแต่ละข้อของลำต้นและกิ่ง ลักษณะใบรูปรีหรือรูปไข่ค่อนข้างยาว ปลายใบแหลม โคนใบรูปกลมหรือมน ขอบใบจักฟันเลื่อยและเป็นคลื่น แผ่นใบบางสีเขียวหรือสีแดง และมีขนปกคลุมทั้งสองด้าน ก้านใบสีเขียวหรือสีแดงแล้วแต่พันธุ์) องค์ประกอบทางเคมีของกะเพราคือ Methyl eugenol ( $C_{11}H_{14}O_2$ ) และ Caryophyllene ( $C_{15}H_{24}$ ) ศัตรูพืชในกะเพราที่พบบ่อย เช่น เพลี้ยไฟ, แมลงหวี่ขาว, หนอนชอนใบ, โรคราน้ำค้าง เป็นต้น ซึ่งกรมวิชาการเกษตรแนะนำชนิดของสารเคมีบางชนิด เช่น อิมิดาโคลพริด พร้อมแสดงอัตราส่วนการใช้เพื่อป้องกันและกำจัดศัตรูพืชดังกล่าว (กรมวิชาการเกษตร, 2563)

จากข้อมูลและรายละเอียดที่กล่าวมา คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้การวิเคราะห์แถบความถี่คลื่นแสงด้วยเทคนิค VIS-NIR spectroscopy เพื่อใช้ในการตรวจหาสารพิษตกค้างในพืชผัก ด้วยวิธีการสเปกโตรสโคปีในช่วงความยาวคลื่น VIS-NIR โดยประยุกต์ใช้มัลติสเปกตรัมเซ็นเซอร์ AS7565X สำหรับวัดค่าการสะท้อนแสง (%Reflectance) ของสารเคมีตกค้างบนผักที่มีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 410 nm ถึง 940 nm เพื่อนำไปสู่การตรวจหาสารพิษตกค้าง 4 ชนิดบนใบพริกและกะเพรา จากการพัฒนาและวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของกราฟเทียบมาตรฐาน ทั้งนี้จากข้อมูลในหลายรายงานที่นำเซ็นเซอร์หลายสเปกตรัม AS7265X ไปใช้งาน ซึ่งสามารถตรวจสอบและยืนยันการทำงานที่ถูกต้องเป็นที่ประจักษ์จึงทำให้เชื่อมั่นในความถูกต้องของข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากรับจากเซ็นเซอร์นี้ (Bruzzeze, R., et al., 2022), (Yang, B., et al., 2020), (Tran, N., et al., 2020), (Nguyen, C., et al., 2021), (Sowmya, N., et al., 2023), (Botero-Valencia, J., et al., 2021), (Shokrehodaei, M., et al., 2021) โดยได้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและการตอบสนองทางสเปกตรัมกับสเปกโตรมิเตอร์ในห้องปฏิบัติการหรืออุปกรณ์ที่คล้ายกัน และยังประสบความสำเร็จในการเปรียบเทียบการตอบสนองทางสเปกตรัมของเซ็นเซอร์กับไลบรารีสเปกตรัมความละเอียดสูงที่ได้รับการยอมรับในโลกรวมถึงการตั้งที่ปรากฏในรายงานที่จัดทำโดยมูस्ताฟาและคณะ (Mustafa, M. N. S., et al., 2020) (Aira, J., et al., 2022)

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

การพัฒนาเครื่องมือตรวจวัดความเข้มข้นของสารพิษที่ปนเปื้อนบนพืชผัก โดยการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่แสงนั้น มีที่มาจากรายงานการพบสารไซเปอร์เมทริน คาร์เบนดาซิม อิมิดาคลอร์พริด และไดอะซินอนตกค้างในพริกและใบกะเพรา เกินค่ามาตรฐานปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด (Maximum Residue Limit : MRL) ตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุข (กระทรวงสาธารณสุข, 2560) ที่ปรากฏในตารางที่ 2 โดยประชาชนทั่วไปไม่สามารถรับรู้ผลการตรวจสอบสารพิษตกค้างในพืชผักได้โดยสะดวก และรวดเร็ว ประกอบกับมีรายงานพบว่ามีผู้วิจัยจำนวนมากใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy: NIRs) ในการตรวจวัดสเปกตรัมพร้อมทั้งพัฒนาแบบจำลองเพื่อทำนายผลทั้งด้านคุณภาพและปริมาณของสารพิษที่ตกค้างในพืชผัก และจากข้อมูลของ คลื่น NIR ที่สามารถดูดกลืนโมเลกุลที่ประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจน (X-H) อะตอม X ได้แก่ C, O, N, S ซึ่งสารไซเปอร์เมทริน คาร์เบนดาซิม อิมิดาคลอร์พริด และไดอะซินอน มีสูตรโมเลกุลว่า  $C_{22}H_{19}Cl_2NO_3$ ,  $C_9H_9N_3O_2$ ,  $C_9H_{10}ClN_5O_2$ ,  $C_{12}H_{21}N_2O_3PS$  ตามลำดับ ส่วนพริกและใบกะเพรามีสูตรโมเลกุลของสารออกฤทธิ์ว่า  $C_{18}H_{27}NO_3$ ,  $C_{11}H_{14}O_2$  ตามลำดับ ผู้วิจัยจึงดำเนินการงานวิจัยจากองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องข้างต้นและมีรายละเอียดดังจะได้นำเสนอต่อไป

**ตารางที่ 2** แสดงค่า MRL ของ CBZ, CPT, DAN และ IMP สำหรับพริกและใบกะเพรา

ชนิดของพืชผัก	MRL (mg/kg)			
	CBZ	CPT	DAN	IMP
พริก	2	2	0.01	0.01
กะเพรา	0.1	0.02	0.01	20

**ที่มา** กระทรวงสาธารณสุข, 2560

การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมสารพิษมาตรฐานและตัวกลาง ในขั้นตอนนี้จะประกอบด้วยรายละเอียดและวิธีการเตรียมสารพิษมาตรฐานและการเตรียมพืชผัก(ตัวกลาง) สำหรับปนเปื้อนสารพิษ ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ขั้นตอนนี้จะมีรายละเอียดของการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดและส่งผ่านข้อมูลสเปกตรัม ซึ่งเป็นจุด

เริ่มในการรับค่าทางกายภาพของสารพิษแล้วแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและข้อมูลสเปกตรัม  
 ขั้นตอนที่ 3 การเก็บรวบรวมข้อมูลสเปกตรัม ในขั้นตอนนี้จะแสดงรายละเอียดของการรวบรวม  
 เรียบเรียงและการจัดหมวดหมู่ข้อมูลสเปกตรัมจำแนกตามสารพิษ ค่าความเข้มข้นของสารพิษและ  
 ตัวกลาง ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ข้อมูล เป็นขั้นตอนที่แสดงการพัฒนาแบบจำลองทาง  
 คณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ทำนายค่า  
 ความเข้มข้นของสารพิษ และขั้นตอนที่ 5 การทดสอบหาประสิทธิภาพของแบบจำลองพัฒนาขึ้น  
 ขั้นตอนนี้จะแสดงการใช้ค่าทางสถิติเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับทำนายค่า  
 ความเข้มข้นของสารพิษที่พัฒนาขึ้นว่ามีประสิทธิภาพเพียงพอในการนำไปใช้งานหรือไม่ ทั้งนี้เมื่อ  
 นำค่าความเข้มข้นของสารพิษที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับค่า  
 มาตรฐานปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด (MRL) จะทำให้ทราบได้ว่าสารพิษที่พบตกค้างในพืชผักมี  
 ค่าเกินมาตรฐานหรือไม่

### 3.1 การเตรียมสารพิษและพืชผักสำหรับเป็นตัวอย่างในการปนเปื้อนสารพิษ

สารพิษ 4 ชนิด (CBZ, CPT, DAN, IMP) รวมทั้งตัวกลาง 2 ชนิด (พริก, โปกชะเปร) ถูกกำหนดให้  
 จัดเตรียมค่าความเข้มข้นให้อยู่ในค่าใกล้เคียงค่า MRL ในตารางที่ 1 โดยสารพิษทั้งหมดได้รับการ  
 ปรับแต่งค่าความเข้มข้นตามมาตรฐานห้องปฏิบัติการสำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 2  
 กรมวิชาการเกษตร และตัวกลาง 2 ชนิด (พริก, โปกชะเปร) จัดหาจากพื้นที่การเกษตร ตลาดและ  
 ซูเปอร์มาร์เก็ต ในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก ประเทศไทย ที่ถูกปนเปื้อนด้วย ซึ่งมีการเตรียมสารพิษ  
 มาตรฐานและการเตรียมสารพิษที่ใช้ทดสอบ มีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1.1 การเตรียมสารพิษ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การเตรียมสารพิษมาตรฐาน ใช้สารละลาย (Stock Solution) ความเข้มข้น  
 1,000  $\mu\text{g/ml}$  เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารพิษที่มีความเข้มข้นลดลงไป อายุการใช้งาน 1 ปี  
 จากนั้นเครื่องชั่งที่มีความละเอียดของเครื่องชั่งไม่น้อยกว่า 4 ตำแหน่ง ชั่ง volumetric flask ขนาด  
 25 ml กต tare ตามด้วยการชั่ง primary standard ใน volumetric flask แล้วบันทึกค่าน้ำหนักไว้  
 แล้วเติมตัวทำละลายลงใน volumetric flask ที่ละน้อย พร้อมกับเขย่าให้ primary standard  
 ละลายจนหมด เมื่อ primary standard ละลายหมดแล้ว ให้เติมตัวทำละลาย จนระดับของ  
 สารละลายใกล้ถึงเส้นระบุปริมาตรเล็กน้อย ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 30 วินาที จึงเติมตัวทำละลายที่ละ  
 น้อยจนส่วนที่ต่ำสุดของท้องน้ำ (meniscus) สัมผัสเส้นระบุปริมาตรพอดี ปิดฝาและเขย่าให้

สารละลายผสมกันดี ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 30 วินาที ถ่ายสารพิษลงใน stock bottle ปิดฝาเกลียวให้แน่น พันด้วยพาราฟิล์ม จากนั้นคำนวณความเข้มข้นของสารมาตรฐาน ดังสมการ (3.1)

$$C = \frac{10^3 \cdot M \cdot P}{100 \cdot V} \quad (3.1)$$

กำหนดให้  $C$  คือความเข้มข้นของสารมาตรฐานมีหน่วยเป็น ( $\mu\text{g}/\text{ml}$ ) และ  $M$  คือ น้ำหนักของสารที่ซึ่งมีหน่วยเป็น ( $\text{mg}$ ) และ  $P$  คือ ความบริสุทธิ์ของสารมีหน่วยเป็น (%) และ  $V$  คือปริมาณที่ต้องการมีหน่วยเป็น ( $\text{ml}$ )

2) การผสมสารพิษ ใช้หลอดดูดอัตโนมัติ (auto pipette) ดูดสารละลายมาตรฐาน (Stock Standard) ตามการคำนวณในสมการที่ (3.2)

$$N_1 V_1 = N_2 V_2 \quad (3.2)$$

กำหนดให้  $N_1$  คือความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีหน่วยเป็น ( $\mu\text{g}/\text{ml}$ ) และ  $V_1$  คือปริมาตรของสารตั้งต้นมีหน่วยเป็น ( $\text{ml}$ ) และ  $N_2$  คือความเข้มข้นของสารที่ต้องการมีหน่วยเป็น ( $\mu\text{g}/\text{ml}$ ) และ  $V_2$  คือ ปริมาตรของสารที่ต้องการมีหน่วยเป็น ( $\text{ml}$ ) จากนั้นเติมตัวทำละลายจนถึงขีดปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน ถ่ายสารพิษลงในขวดที่บัสแสง (stock bottle) ปิดฝาเกลียวให้แน่น พันด้วยพาราฟิล์ม

### 3.1.2 การเตรียมพีชผักสำหรับเป็นตัวอย่างในการปนเปื้อนสารพิษ

ตัวอย่างพีชผัก 2 ชนิด (พริกและใบกระเพรา) ที่ใช้ในการทดลองจัดหาจากพื้นที่การเกษตร ตลาดและซูเปอร์มาร์เก็ต ในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก ประเทศไทย จัดเตรียมโดยนำไปล้างด้วยน้ำเปล่าแบบน้ำไหลผ่าน 8 ชั่วโมงเพื่อชะล้างสารเจือปน แล้วปล่อยให้แห้ง ใช้เวลา 8 ชั่วโมง สำหรับการทดลองใช้ตัวอย่างจำนวนชนิดละ 84 ชิ้น รวม 168 ชิ้น จากนั้นแบ่ง 112 ชิ้น สำหรับพัฒนาแบบจำลองอ้างอิง และอีก 56 ชิ้น สำหรับทดสอบแบบจำลองอ้างอิง แล้วปนเปื้อนสารพิษที่ทราบค่าความเข้มข้น จากขั้นตอนการเตรียมสารพิษ โดยตัวอย่าง 1 ชิ้น จะได้รับการปนเปื้อนสารพิษ 1 ชนิด 1 ค่าความเข้มข้น โดยการหยดด้วยสารพิษมาตรฐานทั้ง 4 ชนิด (CBZ, CPT, DAN, IMP) โดยเรียงลำดับตามชื่อสารพิษและค่าความเข้มข้นของสารพิษทั้ง 7 ระดับ (0.05, 0.1, 1, 2, 3, 4, 5mg/l) พร้อมทั้งกำหนดชื่อตัวแปรสำหรับเรียกค่าความเข้มข้นของสารพิษว่า  $\{p_i\}$  โดยที่  $i$  คือดัชนีลำดับของความเข้มข้นของสารพิษ  $i \in \{1, 2, 3, \dots, 7\}$  แล้วปล่อยให้แห้งโดยใช้เวลา 1 ชั่วโมง การจัดกลุ่มตัวอย่างพีชผักมีดังนี้

กลุ่มพัฒนาแบบจำลอง แบ่งออกเป็น 12 กลุ่มย่อย โดยแต่ละกลุ่มย่อย ประกอบด้วยพริก 7 เม็ดและใบกะเพรา 7 ใบ โดยรูปแบบการแบ่งกลุ่มย่อย จะถูกกำกับด้วย ตัวอักษรตามด้วยหมายเลขในแต่ละตัวอย่าง กลุ่มย่อยที่ 1 พริกกำกับด้วย cc00 - cc07 ใบกะเพรกำกับด้วย oc00 - oc07 ส่วนกลุ่มย่อยที่ 2 พริกกำกับด้วย cc08 - cc15 ใบกะเพรกำกับด้วย oc08 - oc15 กลุ่มย่อยที่ 3 พริกกำกับด้วย cc16 - cc20 ใบกะเพรกำกับด้วย oc16 - oc20 กลุ่มย่อยที่ 4 พริกกำกับด้วย cc21 - cc28 ใบกะเพรกำกับด้วย oc21 - oc28 ซึ่งตัวกลางจากกลุ่มย่อยทุกกลุ่มได้รับปนเปื้อนด้วยสารพิษทั้ง 4 ชนิด (CBZ, CPT, DAN, IMP) เรียงลำดับตามชื่อสารพิษและค่าความเข้มข้นของสารพิษ (0.05, 0.1, 1, 2, 3, 4, 5mg/l) และกลุ่มย่อยที่ 5 ถึง 8 และกลุ่มย่อยที่ 9 ถึง 12 ดำเนินการเช่นเดียวกับกลุ่มย่อยที่ 1 ถึง 4

กลุ่มทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น มีกลุ่มย่อย 4 กลุ่ม ดำเนินการเช่นเดียวกับกลุ่มย่อยที่ 1 - 4 ของกลุ่มพัฒนาแบบจำลอง โดยใช้ตัวอักษรกำกับเป็น ov สำหรับใบกะเพรา และ cv สำหรับพริก

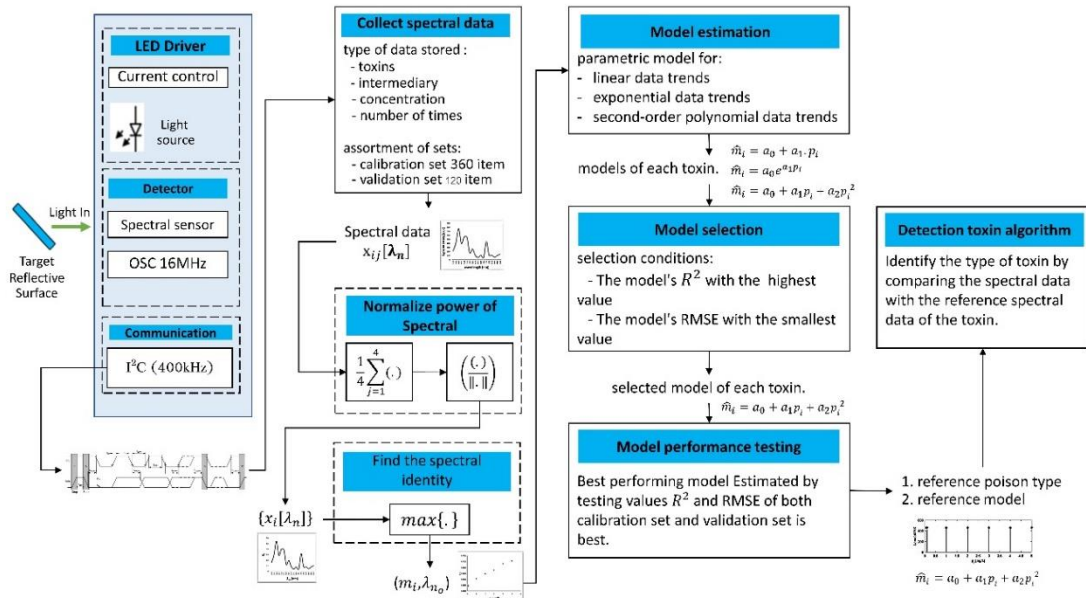
### 3.2 การพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

จากเทคนิคหลากหลายในการตรวจสอบสารพิษตกค้างในพืชผัก ที่จำเป็นต้องทำลายตัวอย่าง และมีขั้นตอนการสกัดสารพิษรวมถึงการทดสอบที่ซับซ้อนโดยใช้เครื่องมือขนาดใหญ่และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก (Sanchez., et al. 2010), (Yan Wang., et al., 2020) รวมถึงค่าใช้จ่ายที่มากกว่า 3,000 บาทต่อการทดสอบ 1 ครั้ง (Central Laboratory (Thailand) Co.,Ltd., n.d.) ดังนั้นเทคนิคการตรวจวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมจึงถูกนำมาใช้ตรวจหาสารพิษที่ตกค้างในพืชผักกันมากขึ้นและพัฒนาเทคนิคนี้ให้สามารถใช้ได้บนอุปกรณ์พกพา เช่น ใช้เครื่อง USB2000 fibre optic spectrometer และระบบที่ออกแบบตรวจหา DAN ที่ตกค้างในแตงกวา (Jamshidi., Et al., 2016) หรือใช้สเปกโตรมิเตอร์แบบพกพาที่พัฒนาจากชุดพัฒนาแอปพลิเคชัน Nanolambda ชื่อ NSP32m-W1 ADK ตรวจหาสารพิษ Indoxacarb, chlorantraniliprole, emamectin-benzoate, CBZ และ Gibberellic acid ที่ตกค้างในผักกาดหอม, ผักกาดเขียว และผักกวางตุ้ง (Viet-Duc., et al. 2022) จะเห็นได้ว่าเทคนิคการตรวจวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมบนอุปกรณ์แบบพกพาเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการตรวจหาสารพิษที่ตกค้างในพืชผัก สามารถลดขั้นตอน ลดขนาดเครื่องมือ ลดเวลา ลดค่าใช้จ่าย สามารถพกพาไปตรวจวัดภายนอกสถานที่ได้ ทั้งนี้ ปัญหาที่ผู้วิจัยได้พบจากอุปกรณ์ตรวจหาสารพิษที่ตกค้างในพืชผักแบบพกพาที่มีการพัฒนากันเป็นลำดับในปัจจุบัน คือด้านราคา กล่าวคืออุปกรณ์ดังกล่าวข้างต้นมีราคาไม่ต่ำกว่า

20,000 บาท แม้ว่าราคาอุปกรณ์ดังกล่าวจะถูกกว่าราคาเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ แต่ยังคงค่อนข้างสูงมากต่อผู้ใช้ทั่วไป

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนากระบวนการและเครื่องมือตรวจวัดสารพิษที่ตกค้างในพืชผัก ที่มีราคาถูกและยังคงคุณสมบัติด้านอื่นของอุปกรณ์ตรวจหาสารพิษที่ตกค้างในพืชผักแบบพกพาอย่างครบถ้วน โดยคณะผู้วิจัยออกแบบขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์วีไอเอส-เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพาสำหรับตรวจหาสารพิษตกค้างบนพืชผัก ประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานหลัก 6 ขั้นตอน ได้แก่ 1) ขั้นตอนการรับค่าความเข้มการสะท้อนแสงด้วยไดรแอดสเปกโตรสโคปิกเซนเซอร์ ชิปเซ็ต (AS7265x SparkFun Electronics, 2023) และคณะผู้วิจัยได้ออกแบบโครงสร้างภายนอกให้มีช่องรับแสงแบบครอบเพื่อป้องกันการรบกวนของแสงภายนอก 2) ขั้นตอนการรวบรวมค่าความเข้มการสะท้อนแสงของทั้ง 18 ช่วงความยาวคลื่นให้เป็นข้อมูลเปกตรัมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ชิปเซ็ต ชิปเซ็ต ESP32-WROVER-B (Espressif Systems (Shanghai) Co., Ltd., 2023) และชุดคำสั่งสำหรับรวบรวมข้อมูลสเปกตรัม (GitHub, Inc., 2023) 3) ขั้นตอนการปรับปรุงข้อมูลสเปกตรัมเป็นขั้นตอนการนำข้อมูลสเปกตรัมมาเฉลี่ยตามจำนวนครั้งที่สแกนตัวกลาง 1 ชั้น แล้วหารด้วยยูคริตเวกเตอร์ (|.|) 4) ขั้นตอนการหาเอกลักษณ์ของข้อมูลสเปกตรัม คณะผู้วิจัยพบว่า ค่าความยาวคลื่นที่พบค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัมของสารพิษแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน จึงดำเนินการจัดเก็บค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัมและค่าความยาวคลื่นที่จุดนี้สำหรับใช้อ้างอิงในการระบุชนิดของสารพิษ สอดคล้องกับรายงานการใช้ค่าสูงสุดของสเปกตรัมสำหรับระบุเอกลักษณ์และตรวจสอบ glyphosate (B. L. Bhaskara., 2006) (Aira, J., et al., 2022) 5) ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย คือ ส่วนย่อยที่ 1 พัฒนาแบบจำลองจากแบบจำลองพีชคณิตเชิงเส้นที่มีแนวโน้มข้อมูลแบบเส้นตรง, แบบเอ็กโปเนนเชียล และแบบโพลิโนเมียลอันดับ 2 ส่วนย่อยที่ 2 คัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากค่า  $R^2$  ที่มีค่าสูงที่สุด และ ค่า  $RMSE$  ที่มีค่าน้อยที่สุด ส่วนย่อยที่ 3 ทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลองที่ได้รับคัดเลือก โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า  $R^2$  และ ค่า  $RMSE$  ของ Calibration set และ Validation set ซึ่งในขั้นตอนนี้ทำให้ทราบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษหรือไม่ 6) ขั้นตอนการแสดงผลการตรวจสอบสารพิษ โดยใช้การเปรียบเทียบข้อมูลสเปกตรัมที่ต้องการตรวจสอบกับข้อมูลสเปกตรัมอ้างอิงชนิดสารพิษสำหรับการระบุชนิดสารพิษกรณีพบค่าความยาวคลื่นที่ค่าสูงสุดของสเปกตรัมตรงกับข้อมูลสเปกตรัมอ้างอิงของสารพิษชนิด

ได้นั้นแสดงถึงการพบสารพิษชนิดนั้นตกค้างในตัวกลางที่สแกน ทั้งนี้ขั้นตอนทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นแสดงดังรูปที่ 4



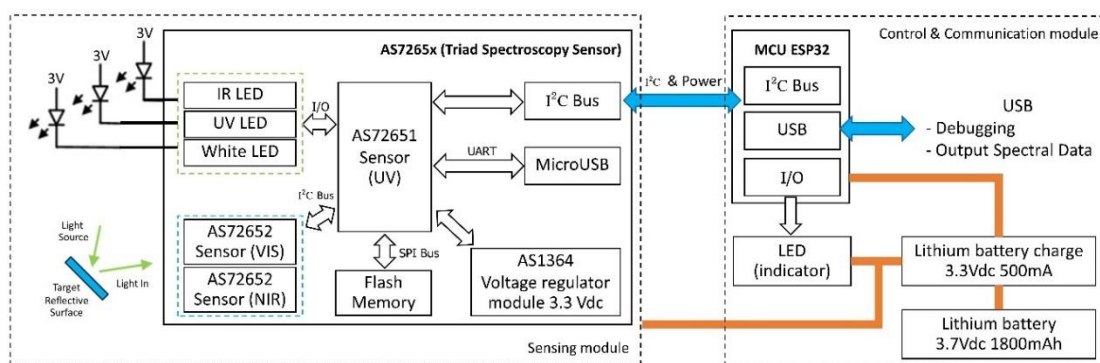
ภาพที่ 4 แสดงขั้นตอนการทำงานของสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพาที่พัฒนาขึ้น

### 3.2.1 การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดและส่งผ่านข้อมูลสเปกตรัม

สเปกโตรมิเตอร์แบบพกพาที่พัฒนาขึ้น ต้องสามารถตอบสนองของขั้นตอนการทำงานโดยรวมได้ คณะผู้วิจัยจึงออกแบบให้มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ 1) ส่วนอินพุท มีรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (reflectance mode) มีช่วงความยาวคลื่น 410 - 940 นาโนเมตร มีความละเอียด 20 นาโนเมตร ภายในบรรจุชิปเซต Triat spectroscopy Sensor AS7265x (SparkFun Electronics., 2023). ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญ คือ หลอดเปล่งแสง (light emitting diode, LED) 5700k white LED, 405 nm UV LED, และ 875 nm IR LED มีตัวกรองสัญญาณแบบเกาส์เซียน (Gaussian Filter) ทำหน้าที่ตัดคลื่นรบกวน มี Electronic Shutter และเซ็นเซอร์รับแสงชนิด Photo Diode จำนวน 18 ตัว ทำให้ได้เส้นสเปกตรัมในที่มีความยาวคลื่น 410, 435, 460, 485, 510, 535, 610, 645, 680, 705, 730, 760, 810, 860, 900, 940 นาโนเมตร 2) ส่วนประมวลผล มีไมโครคอนโทรลเลอร์ชิปเซต ESP32-Wrover-B ทำหน้าที่ควบคุม, เก็บข้อมูล, เก็บชุดคำสั่ง และวิเคราะห์ข้อมูล โดยการส่งผ่านข้อมูลระหว่างส่วนอินพุทและส่วนประมวลผลเป็นแบบ I2C ที่ความถี่นาฬิกา 400 kHz 3) ส่วนแสดงผล ทำหน้าที่แสดงผลการตรวจพบสารพิษ ใช้



การส่งผ่านค่าการตรวจสอบสารพิษไปยังคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยทั้ง 3 ส่วนหลักใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 3.3V ถึง 5V จากแบตเตอรี่ขนาด AA ชนิดลิเทียมไอออนแรงดันไฟฟ้า 3.7V 1,800 มิลลิแอมป์ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 5



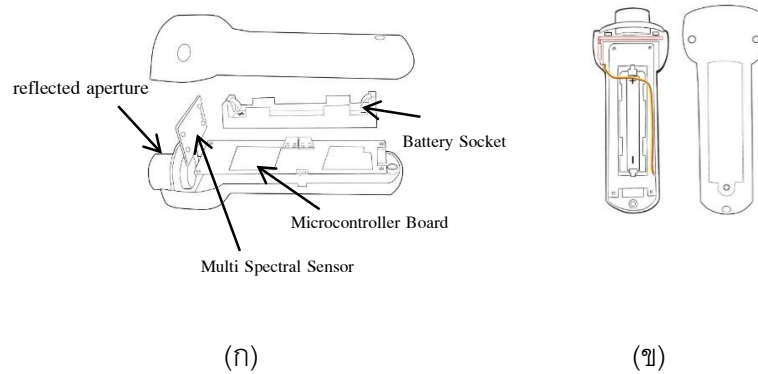
ภาพที่ 5 แสดงการออกแบบและเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา

### 3.2.2 การออกแบบและจัดวางอุปกรณ์

คณะผู้วิจัยออกแบบสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพาให้สามารถบรรจุส่วนประกอบทั้ง 3 ส่วนได้ทั้งหมดอย่างกะทัดรัด จัดวางตำแหน่งเซ็นเซอร์ให้สามารถรับค่าการสะท้อนแสงจากวัตถุ ได้ในขนาด 50 × 50 × 185 มิลลิเมตร น้ำหนักรวม 98 กรัม มีช่องเสียบแบบ USB-C เพื่อการชาร์จประจุให้แบตเตอรี่และส่งผ่านข้อมูลการแสดงผลที่ความเร็วสูงสุด 115,200 Baud ที่ต้องการนำมาแสดงภายนอกอุปกรณ์ แสดงดังภาพที่ 6

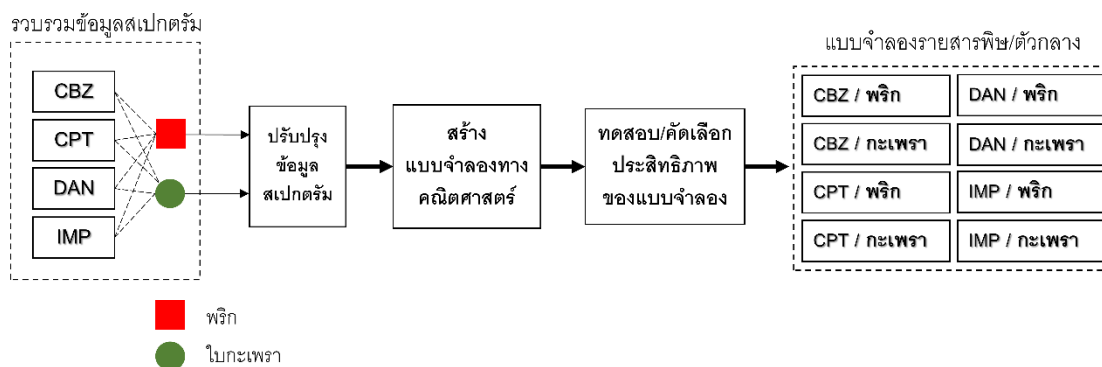
### 3.2.3 รูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเพื่อการทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ

การทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ สามารถทำได้โดยนำข้อมูลสเปกตรัมที่สแกนได้จากสเปกโตรมิเตอร์ มาดำเนินการตามรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัม ซึ่งการดำเนินการดังกล่าวจะประกอบไปด้วย 4 กระบวนการหลัก ได้แก่ 1) การปรับปรุงข้อมูลสเปกตรัมและหาค่าอ้างอิงค่าความเข้มข้นของสารพิษ 2) การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ 3) คัดเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ และ 4) การหาประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยทั้งหมดดำเนินการบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 Woover-B



ภาพที่ 6 แสดงการออกแบบและจัดวางส่วนประกอบของสเปกโตรมิเตอร์ (ก) มุมมองด้านข้าง (ข) มุมมองด้านบน (ค) โครงสร้างภายนอก

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมหลังจากการรวบรวมข้อมูลสเปกตรัม ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การปรับปรุงพลังงานของข้อมูลสเปกตรัม (normalized power) และหาค่าอ้างอิงค่าความเข้มข้นของสารพิษ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ รวมถึงการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้ได้แบบจำลองที่เหมาะสมกับการนำไปทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ สามารถแสดงขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังภาพที่ 7 โดยใน ส่วนแรก สารพิษทั้ง 4 ชนิด ๆ ละ 7 ระดับความเข้มข้นที่ถูกปนเปื้อนบนตัวกลาง 2 ชนิด จะถูกรวบรวมสเปกตรัม โดยอุปกรณ์ตรวจวัดและส่งผ่านข้อมูลสเปกตรัมที่พัฒนาขึ้น จากนั้นจะนำข้อมูลสเปกตรัมเข้ากระบวนการปรับปรุงพลังงานของข้อมูลสเปกตรัม สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ในการทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษที่ตกค้างในตัวอย่างแต่ละชนิดได้



ภาพที่ 7 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเพื่อการทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ

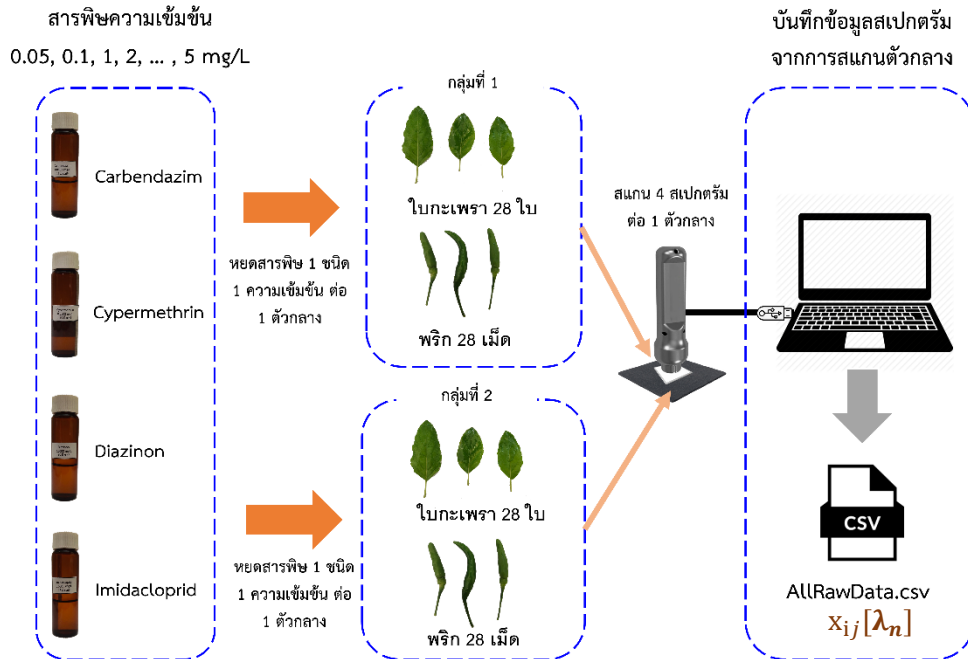
### 3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูลสเปกตรัม

จากข้อดีของสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพาในหลายด้านเช่น การไม่ทำลายตัวอย่าง ส่งผลให้ตรวจสอบซ้ำได้ มีความละเอียดสามารถตรวจสอบสารพิษในปริมาณเล็กน้อยได้ มีความปลอดภัยและรวดเร็วเพราะไม่ต้องใช้สารเคมีในขั้นตอนการ เตรียมตัวอย่างและสกัดสารพิษ ทำให้เทคนิคนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตาม สเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา ที่ต้องใช้งานในภาคสนามมีปัจจัยที่มีผลต่อความผิดพลาดเป็นจำนวนมากที่ส่งผลต่อความแม่นยำและความแม่นยำของการสอบเทียบและการทำนายผล เช่น ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมขณะวัดในแต่ละครั้งไม่เหมือนกัน เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ แสงแดด เป็นต้น ปัจจัยด้านตัวอย่าง (samples) การสุ่มตัวอย่าง ลักษณะตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ที่มีลักษณะไม่เหมือนกัน ปัจจัยด้านการวิเคราะห์ทางเคมี (chemical analysis) การใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ทางเคมีนาน อาจทำให้องค์ประกอบทางเคมีของสารพิษตกค้างมีการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้การนำข้อมูลทางเคมีที่ใช้ในการสอบเทียบมีความแปรปรวนสูง ปัจจัยด้านการสร้างสมการ (calibration model) สมการที่สร้างขึ้นไม่ครอบคลุมข้อมูลทั้งหมด ทำให้การทำนายตัวอย่างในอนาคตมีค่าผิดพลาดมาก การไม่ตัดตัวอย่างที่ไม่เข้ากับตัวอย่างอื่น (outliers) อาจส่งผลให้มีการเลือกสมการที่ไม่เหมาะสม (Monteiro, A., et al., 2017) (Zheng, S., et al., 2019)

เนื่องจากตัวกลางพืชผักอาจมีพื้นผิวที่ไม่เรียบ และสภาพแวดล้อมอื่น เช่น อุณหภูมิ แสงแดด ทำให้อาจส่งผลกระทบต่อการสะท้อนกลับของแสงจากตัวกลางมีความแตกต่างกันในแต่ละครั้ง ดังนั้นจึงเก็บข้อมูลสเปกตรัมจากตัวกลางพืชผักจำนวน 4 ครั้งต่อ 1 ตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส การกำหนดให้สแกน 4 ครั้งต่อ 1 ตัวกลาง สเปกตรัมที่สแกนได้คือค่าความเข้มการสะท้อนแสงเทียบกับค่าความยาวคลื่น ในรูปแบบ  $x_{ij}[\lambda_n]$  ที่แสดงไว้ในตารางที่ 2 โดย  $i$  คือดัชนีที่ระบุความเข้มขั้นที่แตกต่างกัน 7 ระดับ ( $i \in \{1, 2, \dots, 7\}$ ) และ  $j$  คือดัชนีที่ระบุจำนวนครั้งที่สแกนตัวอย่าง ( $j \in \{1, 2, 3, 4\}$ ) และ  $n$  คือดัชนีที่ระบุของความยาวคลื่น และลำดับด้วย  $\lambda_n = \{410, 435, 460, 485, 510, 535, 560, 585, 610, 645, 680, 705, 730, 760, 810, 860, 900, 940\}$  โดยที่ ( $n \in \{1, 2, 3, \dots, 18\}$ ) และค่าความเข้มขั้นของสารพิษ  $\{p_i\} = \{0.05, 0.1, 1, 2, 3, 4, 5\}$  ทั้งนี้รูปแบบการจัดเก็บข้อมูลสเปกตรัมในไฟล์ AllRawData.csv ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 8 โดยมีการจัดเก็บเรียงตามรายชื่อสารพิษ (CBZ, CPT, DAN, IMP) ค่าความเข้มขั้นของสารพิษและครั้งที่สแกน ซึ่งในแต่ละชุดข้อมูล (1 แถวของข้อมูล) ประกอบด้วยค่าความเข้มของการสะท้อนแสงเรียงลำดับตามค่าของแสงตั้งแต่  $\lambda_1$  จนถึง  $\lambda_{18}$  ทั้งนี้รูปแบบการรวบรวมข้อมูลสเปกตรัมตามตารางที่ 3 จะใช้เป็นแม่แบบในการรวบรวมข้อมูลสเปกตรัมของสารพิษชนิดอื่นต่อไป

**ตารางที่ 3** แสดงการรวบรวมข้อมูลสเปกตรัมของสารพิษ 1 ชนิด ทุกค่าความเข้มขั้น

No.	concentration	Spectral data from scans (4 times for 1 toxic concentration)			
$i$	$p_i$ (mg/l)				
1	0.05	$x_{11}[\lambda_n]$	$x_{12}[\lambda_n]$	$x_{13}[\lambda_n]$	$x_{14}[\lambda_n]$
2	0.1	$x_{21}[\lambda_n]$	$x_{22}[\lambda_n]$	$x_{23}[\lambda_n]$	$x_{24}[\lambda_n]$
3	1	$x_{31}[\lambda_n]$	$x_{32}[\lambda_n]$	$x_{33}[\lambda_n]$	$x_{34}[\lambda_n]$
4	2	$x_{41}[\lambda_n]$	$x_{42}[\lambda_n]$	$x_{43}[\lambda_n]$	$x_{44}[\lambda_n]$
5	3	$x_{51}[\lambda_n]$	$x_{52}[\lambda_n]$	$x_{53}[\lambda_n]$	$x_{54}[\lambda_n]$
6	4	$x_{61}[\lambda_n]$	$x_{62}[\lambda_n]$	$x_{63}[\lambda_n]$	$x_{64}[\lambda_n]$
7	5	$x_{71}[\lambda_n]$	$x_{72}[\lambda_n]$	$x_{73}[\lambda_n]$	$x_{74}[\lambda_n]$



ภาพที่ 8 แสดงตัวอย่างการรวบรวมข้อมูลสเปกตรัมสารพิษในแต่ละกลุ่มย่อยของตัวอย่าง

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_{18}$

กลุ่มที่ 1	CBZ	พริก	$p_i$ 0.05 mg/L	ครั้งที่สแกน 1-4
			$p_i$ 0.1 mg/L	
			$p_i$ 5 mg/L	
		กะเพรา	$p_i$ 0.05 mg/L	
			$p_i$ 0.1 mg/L	
			$p_i$ 5 mg/L	
กลุ่มที่ 2	CBZ	CPT	.	.
		DAN	.	.
		IMP	.	.
		CPT	.	.
		IMP	.	.

ภาพที่ 9 แสดงตัวอย่างรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลสเปกตรัมของในแต่ละกลุ่มย่อยในไฟล์

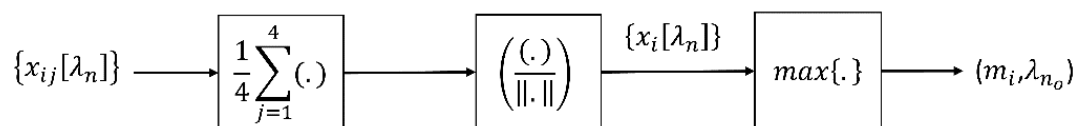
AllRawData.csv

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่รวบรวมได้จากการสแกนสเปกตรัมสารพิษบนตัวกลางพีซีพีค จะถูกนำมาวิเคราะห์ข้อมูลตามรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 การปรับปรุงพลังงานของข้อมูลสเปกตรัม (normalized power) และหาค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัมหรือค่าอ้างอิงค่าความเข้มข้นของสารพิษ

เนื่องจากชุดข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากการสแกนแต่ละตัวอย่าง ๆ ละ 4 ครั้ง อาจมีความคลาดเคลื่อนจากผลที่เกิดจากการกระเจิงของแสง และขนาดของสเปกตรัมอาจมีความแตกต่างกันมาก จึงนำเข้ากระบวนการปรับปรุงพลังงานของข้อมูลสเปกตรัม (normalized power) ซึ่งเป็นการนำชุดสเปกตรัมที่ได้จากการสแกนตัวอย่างจำนวน 4 สเปกตรัมต่อ 1 ขึ้น มาเฉลี่ยด้วยจำนวนครั้งที่สแกน จากนั้นจึงนำข้อมูลสเปกตรัมปรับปรุงสัญญาณแบบ Scaling to unit length คือนำแต่ละค่าของสเปกตรัมหารยูคลิดเวกเตอร์ (Euclidean vector) แล้วหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำไปหาค่าสูงสุดพร้อมค่าความยาวคลื่นของค่าสูงสุดนี้ เพื่อใช้เป็นตัวแทนสเปกตรัมของตัวกลางขึ้นนั้น ๆ ดำเนินการเก็บข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธีการข้างต้นจากตัวกลางทั้งหมด และนำตัวแทนสเปกตรัมของตัวกลางทุกค่าความเข้มข้นไปใช้พัฒนาแบบจำลองทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษต่อไป โดยนิยามค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัมพร้อมค่าช่วงความยาวคลื่น นิยามด้วย  $(m_i, \lambda_{n_o})$  โดย  $\lambda_{n_o} \in \{1, 2, \dots, 18\}$  กระบวนการปรับปรุงได้ผลลัพธ์เป็น  $\{x_i[\lambda_n]\}$  ที่แต่ละระดับความเข้มข้นดัชนี  $i$  จากนั้นหาค่าสูงสุดของสเปกตรัมเหล่านี้ พร้อมค่าช่วงความยาวคลื่น นิยามด้วย  $(m_i, \lambda_{n_o})$  โดย  $\lambda_{n_o} \in \{1, 2, \dots, 18\}$  ซึ่งขั้นตอนรวมถึงวิธีการเฉลี่ย การปรับปรุงและการหาค่าสูงสุดของสเปกตรัมปรากฏตามกระบวนการที่แสดงในภาพที่ 10 โดยค่าสูงสุดของสเปกตรัมจะถูกนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงค่าความเข้มข้นของสารพิษทั้ง 4 ชนิดและบนตัวกลางทั้ง 2 ชนิด ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวจะถูกนำไปใช้กับการสแกนสารพิษบนตัวกลางทั้งหมด



ภาพที่ 10 แสดงการปรับปรุงพลังงานของข้อมูลสเปกตรัมและหาค่าสูงสุดของสเปกตรัม

### 3.4.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ค่าสูงสุดของสเปกตรัม ( $m_i$ ) หรือค่าอ้างอิงค่าความเข้มข้นของสารพิษที่ได้จากกระบวนการปรับปรุงพลังงานของข้อมูลสเปกตรัมจากตัวกลางกลุ่มที่ 1-12 จะถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ ซึ่งมีรายงานพบว่าค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากการใช้เซ็นเซอร์มัลติสเปกตรัม AS7265X สามารถใช้เป็นตัวแทนของสารพิษได้ ดังเช่น ไอร่าและคณะที่ใช้ค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 560 nm ในการตรวจหาและตรวจวัดปริมาณสารไกลโฟเสต (Glyphosate) (Aira, J., et al., 2022) รวมถึงมูสตาฟาและคณะ ที่รายงานการใช้ค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัมจากการใช้เซ็นเซอร์มัลติสเปกตรัม AS7265X ในการตรวจสอบสารไกลโฟเสตด้วยเช่นกัน (Mustafa, M. N. S., et al., 2020) และด้วยพฤติกรรมข้อมูล  $m_i$  ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไม่มากและแกว่งรอบเส้นตรง คณะวิจัยจึงพัฒนาแบบจำลองด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression), การถดถอยแบบไม่เชิงเส้นรูปแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential Regression) และการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression) แล้วทดสอบหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการประมาณการค่า  $m_i$  สอดคล้องกับหวัง (Wang, J., 2016) สถาปน์มาตรฐานและเทคโนโลยีแห่งชาติประเทศสหรัฐอเมริกา (NIST, n.d.) ตู๊กเกอร์และอลัน (Tucker, Alan, 1995) ที่อธิบายแนวโน้มของข้อมูลลักษณะข้างต้นด้วยแบบจำลองดังกล่าว

ทั้งนี้การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ ( $m_i$ ) หรือการหาค่า  $\hat{m}_i$  เริ่มจากการนิยามความเข้มข้นของสารพิษในหน่วย mg/l แต่ระดับด้วย  $p_i$  โดยที่  $1 \leq i \leq 7$  และ  $i$  คือดัชนีความเข้มข้นของสารพิษ 7 ระดับ และกำหนดค่าของ  $\{p_i\} = \{0.05, 0.1, 1, 2, 3, 4, 5\}$  เพื่อนำไปหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการประมาณการค่า  $m_i$  และกำหนด  $\{m_i\}$  ให้เป็นลำดับข้อมูลของ  $m_i$  ทั้งนี้  $\{m_i\}$  มีจำนวน 8 ชุดจำแนกเป็น  $\{m_i\}$  ของสารพิษ 4 ชนิด ๆ ละ 2 แบบ ได้แก่ 1)  $\{m_i\}$  ของ CBZ บนพริกและใบกะเพรา 2)  $\{m_i\}$  ของ CPT บนพริกและใบกะเพรา 3)  $\{m_i\}$  ของ DAN บนพริกและใบกะเพรา 4)  $\{m_i\}$  ของ IMP บนพริกและใบกะเพรา ต่อมานำคู่ข้อมูลในลำดับข้อมูล  $\{(p_i, m_i)\}$  แทนลงในแบบจำลองพีชคณิตทั้งสามแบบ จากนั้นดำเนินการแปลงข้อมูลในแบบจำลองพีชคณิต ซึ่งจากแบบจำลองพีชคณิตทั้งสามแบบสามารถหาแนวโน้มข้อมูลเส้นตรง  $\hat{m}_i$  ที่เป็นเวกเตอร์การประมาณของแนวโน้มข้อมูลเส้นตรงในแบบจำลองพีชคณิตเชิงเส้นจากแบบจำลองพหุนามสำหรับแนวโน้มข้อมูลในแบบเวกเตอร์การประมาณของข้อมูล (Suchart Y., 2022) ซึ่งนิยามว่า

$$\hat{m} = Aa \quad (3.3)$$

โดยที่  $\hat{m}$  คือเวกเตอร์การประมาณของข้อมูล จะเห็นได้ว่าขนาดของเวกเตอร์  $\underline{a}$  จะขึ้นอยู่กับจำนวนพารามิเตอร์ของแบบจำลอง และขนาดของเมตริกข้อมูล  $A$  จะขึ้นอยู่กับทั้งจำนวนข้อมูลและจำนวนพารามิเตอร์ของแบบจำลองพารามิเตอร์ ซึ่งการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในแบบจำลองพีชคณิตทั้งสามแบบ พิจารณาจากค่าความผิดพลาดที่ได้จากการประมาณของข้อมูล ตัวอย่างใน  $e_i$  ของแต่ละดัชนี  $1 \leq i \leq 7$  ได้เป็น  $e_i = m_i - \hat{m}_i$  โดยแสดงรูปแบบเวกเตอร์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ e_7 \end{bmatrix}_{7 \times 1} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ m_7 \end{bmatrix}_{7 \times 1} - \begin{bmatrix} \hat{m}_1 \\ \hat{m}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{m}_7 \end{bmatrix}_{7 \times 1} \quad (3.4)$$

$\underline{e} \qquad \underline{m} \qquad \underline{\hat{m}}$

หรือเขียนในรูปแบบสัมพันธ์กับสมการ (3.4) ได้ว่า

$$\underline{e}(\underline{a}) = \underline{m} - \underline{\hat{m}} = \underline{m} - A\underline{a} \quad (3.5)$$

ค่า  $\underline{e}(\underline{a})$  เป็นเวกเตอร์ความผิดพลาดที่มีขนาด  $7 \times 1$  ซึ่งประกอบด้วย 7 สมาชิก ในการเลือกคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของเวกเตอร์พารามิเตอร์ ของแบบจำลองพีชคณิตในความสัมพันธ์ (3.8) สำหรับดัชนี  $1 \leq i \leq 7$  และสามารถเลือกคำตอบเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ด้วยเทคนิคมินิมัมแอลทูนอร์ม (*minimum  $l_2$  Norm*) ดังแสดงในสมการที่ (3.6)

$$\min_{\underline{a} \in R^{N \times 1}} \|\underline{m} - A\underline{a}\|_2^2 = \|\underline{m} - A\underline{a}^0\|_2^2 \quad (3.6)$$

โดยที่  $\underline{a}$  เวกเตอร์พารามิเตอร์ที่มีขนาด  $N \times 1$  และพารามิเตอร์  $N$  ขึ้นอยู่กับจำนวนแบบจำลอง โดยพารามิเตอร์  $a_0$  และ  $a_1$  สำหรับวิธีการถดถอยเชิงเส้น ( $N = 2$ ) ส่วนพารามิเตอร์  $\ln(a_0)$  และ  $a_1$  สำหรับวิธีการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้นรูปแบบเอ็กโปเนนเชียล ( $N = 2$ ) ส่วน  $a_0$ ,  $a_1$  และ  $a_2$  สำหรับการถดถอยแบบพหุนาม ( $N = 3$ ) และ  $\underline{m}$  คือเวกเตอร์ข้อมูลที่มีขนาด  $M \times 1$  และ  $A$  คือเมตริกข้อมูลที่มีมิติ  $M \times N$  และ  $R^{N \times 1}$  คือเซตของเวกเตอร์จำนวนจริงที่มีขนาด  $N \times 1$  และคำตอบ  $\underline{a}^0$  ถูกหาได้จากสมการปกติ (3.7) และเทคนิค  $l_2$  norm นำมาพิจารณาคำตอบเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด และเขียนเป็นสมการได้ว่า



$$A^T A \underline{a}^0 = A^T \underline{m} \quad (3.7)$$

กรณีดีเทอร์มิแนนท์ของเมตริกข้อมูล ( $A^T A$ ) ที่มีขนาด  $N \times N$  มีค่าที่ไม่ใช่ศูนย์ สามารถหาคำตอบเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดได้ว่า

$$\underline{a}^0 = (A^T A)^{-1} A^T \underline{m} \quad (3.8)$$

หรือ

$$\underline{a}^0 = \text{pinv}(A) \cdot \underline{m} \quad (3.9)$$

ในการหาคำตอบ  $\underline{a}^0$  ของแต่ละแบบจำลอง สามารถหาเมตริกซ์ข้อมูล  $A$  กับเวกเตอร์ข้อมูล  $\underline{m}$  ได้ดังนี้

1) วิธีการถดถอยเชิงเส้น - นิยามผลลัพธ์ของแบบจำลองพีชคณิตเชิงเส้นสำหรับแนวโน้มข้อมูลแบบเส้นตรง ได้ว่า

$$\hat{m}_i = a_0 + a_1 \cdot p_i \quad (3.10)$$

โดยที่  $a_0, a_1$  เป็นสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพีชคณิตซึ่งถูกเลือกให้เหมาะสมที่สุดกับลำดับข้อมูลที่ป้อนให้กับแบบจำลองพารามิตริกสำหรับแนวโน้มข้อมูลแบบเส้นตรง ที่ประมาณค่า  $\hat{m}_i$  กับ  $m_i$  และการประมาณของแนวโน้มข้อมูลเส้นตรงในแบบจำลองพีชคณิตเชิงเส้น จากการแปลงข้อมูลข้อมูลในแบบจำลองสำหรับแนวโน้มข้อมูลเส้นตรง จะได้ว่า

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{m}_1 \\ \hat{m}_2 \\ \vdots \\ \hat{m}_7 \end{bmatrix}}_{\underline{\hat{m}}_{7 \times 1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & p_1 \\ 1 & p_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & p_7 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix}}_{\underline{a}}_{2 \times 1} \quad (3.11)$$

2) วิธีการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้นรูปแบบเอกซ์โพเนนเชียล - นิยามผลลัพธ์ของวิธีการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้นรูปแบบเอกซ์โพเนนเชียล ได้ว่า

$$\hat{m}_i = a_0 e^{a_1 p_i} \quad (3.12)$$

โดยที่  $a_0, a_1$  เป็นสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองพีชคณิตซึ่งถูกเลือกให้เหมาะสมที่สุดกับลำดับข้อมูลที่ป้อนให้กับแบบจำลองพาราเมตริกสำหรับแนวโน้มข้อมูลแบบเอ็กโปเนนเชียล ที่ประมาณค่า  $\hat{m}_i$  กับ  $m_i$  และ การประมาณของแนวโน้มข้อมูลเอ็กโปเนนเชียลในแบบจำลองพีชคณิตเชิงเส้น จากการแปลงข้อมูลในแบบจำลองสำหรับแนวโน้มข้อมูลเส้นตรง (Charles Z., 2020) จะได้ว่า

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \ln(\hat{m}_1) \\ \ln(\hat{m}_2) \\ \vdots \\ \ln(\hat{m}_7) \end{bmatrix}}_{\underline{\hat{m}}}_{7 \times 1} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & p_1 \\ 1 & p_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & p_7 \end{bmatrix}}_A_{7 \times 2} \underbrace{\begin{bmatrix} \ln(a_0) \\ a_1 \end{bmatrix}}_{\underline{a}}_{2 \times 1} \quad (3.13)$$

3) การถดถอยแบบพหุนาม - นิยามผลลัพธ์ของวิธีการถดถอยแบบ พหุนาม ได้ว่า

$$\hat{m}_i = a_0 + a_1 p_i + a_2 p_i^2 \quad (3.14)$$

โดยที่  $a_0, a_1$  และ  $a_2$  เป็นสัมประสิทธิ์ของโพลีโนเมียล ซึ่งถูกเลือกให้เหมาะสมที่สุดกับลำดับข้อมูลที่ป้อนให้กับแบบจำลองพาราเมตริกสำหรับแนวโน้มข้อมูลแบบโพลีโนเมียล ที่ประมาณค่า  $\hat{m}_i$  กับ  $m_i$  และการประมาณของแนวโน้มข้อมูลโพลีโนเมียลในแบบจำลองพีชคณิตเชิงเส้น จากการแปลงข้อมูลในแบบจำลองสำหรับแนวโน้มข้อมูลเส้นตรง จะได้ว่า

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{m}_1 \\ \hat{m}_2 \\ \vdots \\ \hat{m}_7 \end{bmatrix}}_{\underline{\hat{m}}}_{7 \times 1} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & p_1 & p_1^2 \\ 1 & p_2 & p_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & p_7 & p_7^2 \end{bmatrix}}_A_{7 \times 3} \underbrace{\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}}_{\underline{a}}_{3 \times 1} \quad (3.15)$$

### 3.5 การคัดเลือกและทดสอบหาประสิทธิภาพของแบบจำลอง

3.5.1 การคัดเลือกแบบจำลอง แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับแต่ละสารพิษบนตัวกลางต่าง ๆ จะพิจารณาจากค่าความผันแปรของตัวแปรตอบสนองหรือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination:  $R^2$ ) ที่มีค่าสูงที่สุด และค่าผิดพลาดของแบบจำลองในการทำนายข้อมูลเชิงปริมาณ (Root Mean Square Error:  $RMSE$ ) ที่มีค่าน้อยที่สุด โดยที่  $i$  คือดัชนีตัวแทนชุดข้อมูลที่ใช้ทำนายค่าการสะท้อนแสงและกำหนดให้  $N$  คือจำนวนคู่ข้อมูลในลำดับข้อมูล  $\{(p_i, m_i)\}$  กับ  $m_{mean}$  คือค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูล  $\{m_i\}$  จึงสามารถหาค่า  $R^2$  ได้ว่า (Chicco, D., et al., 2021)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (m_i - \hat{m}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (m_i - m_{mean})^2} \quad (3.16)$$

และหาค่า  $RMSE$  ได้ว่า

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - \hat{m}_i)^2} \quad (3.17)$$

3.5.2 การทดสอบแบบจำลอง แบบจำลองอ้างอิงที่พัฒนาขึ้นจะถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพเพื่อให้มั่นใจก่อนการนำไปใช้ทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ โดยมีการทดสอบ 2 แบบ ได้แก่

1) ทดสอบโดยใช้ตัวกลางจากกลุ่มทดสอบแบบจำลอง โดยนำตัวกลางพืชผัก 56 ชิ้น จากกลุ่มทดสอบแบบจำลอง มาเก็บข้อมูลสเปกตรัมจากตัวกลางพืชผัก ปรับปรุงสัญญาณ แล้วหาค่าเฉลี่ย เช่นเดียวกับขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองมาตรฐาน จากนั้นเปรียบเทียบระหว่างผลของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าผิดพลาดของแบบจำลองในการทำนายข้อมูลเชิงปริมาณของกลุ่มพัฒนาแบบจำลองและกลุ่มทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลอง

2) ทดสอบโดยเปรียบเทียบผลการตรวจหาสารพิษตกค้างตัวกลางพืชผักจำนวน 56 ชิ้น จากวิธีวิเคราะห์จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลการตรวจด้วยวิธีโครมาโตกราฟีแบบชั้นบาง (Thin layer chromatography: TLC) ผลจากการเปรียบเทียบนำมาหาค่าความถูกต้อง (% accuracy) และความไวของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ดังสมการที่ 3.18 และสมการ 3.19 ตามลำดับ

$$\% \text{ accuracy} = \frac{T_p + T_n}{T_p + T_n + F_p + F_n} \times 100 \quad (3.18)$$

และ

$$\% \text{ sensitivity} = \frac{T_p}{T_p + F_n} \times 100 \quad (3.19)$$

โดยที่  $T_p$  คือ จำนวนของผลที่ทำนายถูกกรณีตรวจพบสารพิษ (number of true positive) และ  $F_p$  คือ จำนวนของผลที่ทำนายผิดกรณีตรวจพบสารพิษ (number of False positive) และ  $T_n$  คือ จำนวนของผลที่ทำนายถูกกรณีตรวจไม่พบสารพิษ (number of true negative) และ  $F_n$  คือ จำนวนของผลที่ทำนายผิดกรณีตรวจไม่พบสารพิษ number of false negative โดยประสิทธิภาพของการตรวจหาสารพิษ พิจารณาจากค่าความถูกต้องและค่าความไวที่มีค่าเข้าใกล้ 100



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

คณะวิจัยสามารถพัฒนาเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่แสง ตร่วจหาสารพิษ 4 ชนิด (CBZ, CPT, DAN และ IMP) ที่ตกค้างในพริกและกะเพรา โดยมีรายละเอียดจำแนกเป็น 5 ผลงาน ได้แก่ ผลงานที่ 1 ผลการเตรียมสารพิษและพืชผักสำหรับเป็นตัวอย่างในการปนเปื้อนสารพิษ ในผลงานนี้จะได้เห็นสารพิษและพืชผักที่ปนเปื้อนสารพิษครบทุกสารพิษและทุกค่าความเข้มข้น ผลงานที่ 2 ผลการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ในผลงานนี้แสดงให้เห็นเครื่องมือตรวจวัดความเข้มข้นของสารพิษที่ประกอบไปด้วยฮาร์ดแวร์ และวิธีวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัม พร้อมทั้งแสดงราคาค่าใช้จ่ายสำหรับพัฒนาอุปกรณ์ชิ้นนี้ ผลงานที่ 3 ในผลงานนี้จะแสดงให้เห็นวิธีการสแกนสเปกตรัมโดยอุปกรณ์ตรวจวัดและส่งผ่านข้อมูลสเปกตรัมที่พัฒนาขึ้น พร้อมรูปแบบการจัดเก็บสเปกตรัมในแฟ้มข้อมูล และยังสามารถนำข้อมูลสเปกตรัมมาพล็อตกราฟให้เห็นความสัมพันธ์หรือความแตกต่างของข้อมูลสเปกตรัมแต่ละสารพิษ ผลงานที่ 4 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม ในผลงานนี้จะได้เห็นกราฟของข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับปรุงพลังงานแล้ววิเคราะห์ต่อว่าโดยใช้ค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัมในการแยกแยะข้อมูลสเปกตรัมของสารพิษชนิดต่าง ๆ พร้อมทั้งแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสัมประสิทธิ์สำหรับใช้ทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ รวมถึงการคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมด้วย ผลงานที่ 5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในผลงานนี้จะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากผลงานที่ 4 ว่ามีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษหรือไม่

#### 4.1 ผลการเตรียมสารพิษและพืชผักสำหรับเป็นตัวอย่างในการปนเปื้อนสารพิษ

##### 4.1.1 ผลการเตรียมสารพิษ

สารพิษที่ได้ปรับแต่งความเข้มข้นตามมาตรฐานห้องปฏิบัติการสำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 2 กรมวิชาการเกษตร ถูกจัดเตรียมให้พร้อมสำหรับการทดลอง โดยบรรจุใส่ขวดที่บับแสงสีน้ำตาล ปริมาตรบรรจุขวดละ 10 ml ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 7 ระดับ ได้แก่ 0.05 mg/l, 0.1 mg/l, 1 mg/l, 2 mg/l, 3mg/l, 4 mg/l, 5 mg/l ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 11 สารพิษมาตรฐานแต่ละชนิดที่บรรจุในขวดทั้ง 7 ขวด มีการปะฉลากระบุชนิดของสารพิษ

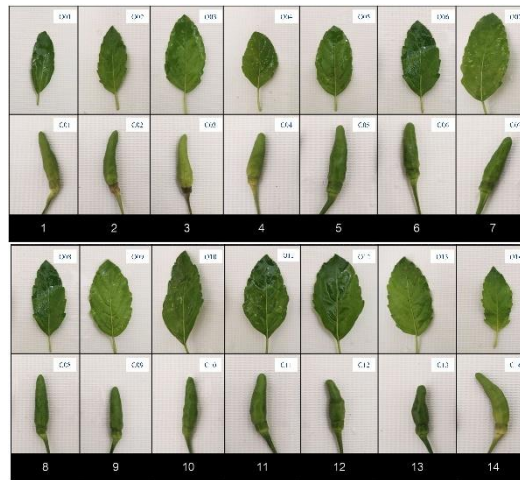
มาตรฐาน และค่าความเข้มข้นของสารพิษไว้ที่ข้างขวดทุกขวด เพื่อป้องกันความผิดพลาดเรื่อง ชนิดและค่าความเข้มข้นของสารพิษมาตรฐานในการทดลอง ซึ่ง CBZ ทั้งหมด 7 ระดับความเข้มข้น แสดงดังภาพที่ 11 (ก) ส่วน CPT แสดงดังภาพที่ 11 (ข) ส่วน DAN แสดงดังภาพที่ 11 (ค) และ IMP แสดงดังภาพที่ 11 (ง)



ภาพที่ 11 แสดงสารพิษที่ใช้ในงานวิจัยระดับความเข้มข้น 0.05, 0.1, 1, 2, 3, 4, 5 mg/l ตามลำดับ บรรจุขวดละ 10 ml (ก) CBZ (ข) CPT (ค) DAN (ง) IMP

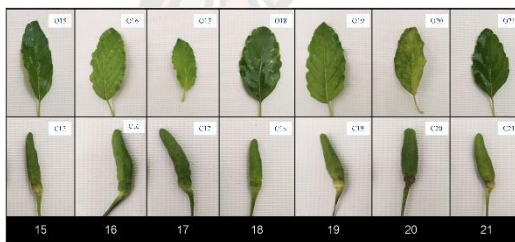
#### 4.1.2 ผลการเตรียมพีชผักสำหรับเป็นตัวอย่างในการปนเปื้อนสารพิษ

ตัวอย่างในการทดลองมีจำนวน 2 ชนิดได้แก่พริกและใบกะเพรา จะถูกทำให้ปนเปื้อนด้วยสารพิษมาตรฐานที่ถูกเตรียมไว้ โดยการแบ่งกลุ่มย่อยเพื่อปนเปื้อนสารพิษ 4 ชนิดทั้ง 7 ความเข้มข้น แสดงไว้ดังภาพที่ 12

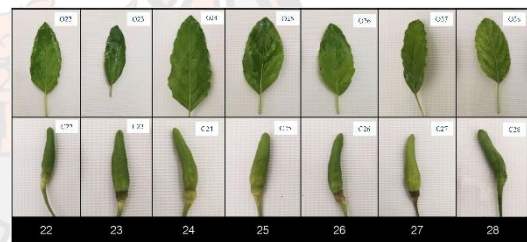


(ก)

(ข)



(ค)



(ง)

**ภาพที่ 12** แสดงการแบ่งกลุ่มย่อยของตัวกลางพืชผักที่ถูกปนเปื้อนสารพิษ กลุ่มที่ 1 - 4 ตามลำดับ (ก) สารคาร์เบนดาร์ซิม (ข) สารไซเปอร์เมทริน (ค) สารไดอะซินอน (ง) สารอิมิดาครอพริด

จากภาพที่ 12 ที่แสดงตัวกลางพืชผักของกลุ่มย่อยที่ 1 - 4 ที่ได้รับการปนเปื้อนสารพิษทั้ง 4 ชนิด ตามลำดับความเข้มข้นแล้ว หลังระยะเวลาผ่านไปจำนวน 1 ชั่วโมง ลักษณะทางกายภาพของตัวกลางไม่แตกต่างจากก่อนการปนเปื้อนสารพิษอย่างมีนัยยะสำคัญ

#### 4.2 ผลการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยที่คณะวิจัยพัฒนาขึ้น หรือที่คณะวิจัยเรียกว่า สเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา แสดงดังภาพที่ 13



(ก)



(ข)



(ค)

**ภาพที่ 13** แสดงอุปกรณ์ตรวจวัดและส่งผ่านข้อมูลสเปกตรัม (ก) แสดงส่วนประกอบภายใน (ข) แสดงมุมมองด้านล่างให้เห็นช่องรับข้อมูลสเปกตรัม (ค) แสดงโครงสร้างภายนอกของอุปกรณ์

โดยภาพที่ 13 (ก) แสดงชิ้นส่วนภายในอุปกรณ์ ประกอบด้วยส่วนแรก มัลติสเปกตรัมเซนเซอร์ AS7265x สำหรับแปลงค่าทางกายภาพเป็นข้อมูลสเปกตรัม ส่วนที่สอง ชิพ ESP32-WROVER-B สำหรับเรียงเรียงข้อมูลสเปกตรัมและเชื่อมต่อข้อมูลกับเซนเซอร์และคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และส่วนที่สามคือแบตเตอรี่ชนิด Lithium Ion มีค่าแรงดันไฟฟ้า 3.7 โวลท์ และมีความจุ 1,800 mAh. ส่วนภาพ 13 (ข) แสดงมุมมองด้านล่างให้เห็นการจัดวางตำแหน่งของเซนเซอร์ที่ตั้งฉากกับทุกตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัด และภาพที่ 13 (ค) แสดงโครงสร้างภายนอกของอุปกรณ์ที่สร้างจาก 3D printer ยี่ห้อ Flashforce รุ่น Finder3 ทั้งนี้ชิ้นส่วนทั้งหมดที่ประกอบเป็นอุปกรณ์ที่แสดงในภาพที่ 4.3 มีค่าใช้จ่ายที่ใช้เป็นค่าวัสดุในการพัฒนาอุปกรณ์รวมทั้งสิ้นจำนวน 4,395 บาท (สี่พันสามร้อยเก้าสิบบาทถ้วน) และแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4 โดยแสดงรายการของส่วนประกอบของอุปกรณ์ตรวจวัดและส่งผ่านข้อมูลสเปกตรัมที่พัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุจำนวน 4 ชิ้น ได้แก่ มัลติสเปกตรัมเซนเซอร์ ราคา 3,450 บาท ไมโครคอนโทรลเลอร์ ราคา 395 บาท แบตเตอรี่ ราคา 60 บาท และโครงภายนอกอุปกรณ์ ราคา 490 บาท ซึ่งวัสดุทั้ง 4 ชิ้น มีราคารวมกัน จำนวน 4,395 บาท (สี่พันสามร้อยเก้าสิบบาทถ้วน) และเมื่อเทียบสเปกโตรมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้น กับอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด (ตารางที่ 5) พบว่ามีคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกัน คณะวิจัยพบว่าสเปกโตรมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมีราคาถูกลงกว่าอุปกรณ์ในท้องตลาด 5 เท่า ถึง 48 เท่า



**ตารางที่ 4** แสดงรายการและราคาวัสดุที่ใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์

Material	Component	Total cost (baht)	Source of Materials
AS7265x	Spectral sensor	3,450	<a href="https://sparkfun.com/">https://sparkfun.com/</a>
ESP32-WROVER-B	Microcontroller	395	<a href="https://www.arduitronics.com/">https://www.arduitronics.com/</a>
Battery	Li-Ion(1800mAh)	60	<a href="https://www.aliexpress.com/">https://www.aliexpress.com/</a>
Case	Enclosure	490	Knowledge Centric Co., Ltd.
		<b>4,395</b>	

**ตารางที่ 5** ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติ Portable VIS-NIR Spectrometer ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดกับคณะวิจัยพัฒนาขึ้น

Brand/Model	HOPOOCOLOR OHSP350S	Lisun LMS-6000SF	Texus Instrument DLPNIRNANOEVIM	Torchbearer T21B7U10034FMPD	This research
Cost	THB 208,404.00	THB 84,890.14	USD \$999.00	THB 20,006.64	THB 4,395
Light source	Include	Include	Include	Include	Include
Detector	CCD	CCD	InGaAs	CCD	photodiode
Wavelength	350-950nm	350-950nm	900-1,700 nm	340-1000nm	410 - 940nm
FWHM	2 nm	0.2 nm	10 nm	5nm	20 nm
Processing	inside	inside	inside / PC	PC	inside
Display	5 Inches LCD	5 inch LCD	PC	PC	LED light
Size	138.5*81*23mm	135*80*23mm	36*58*62mm	53*27*24mm	145*50*50mm
Weight	430g	430g	84g	20	98g

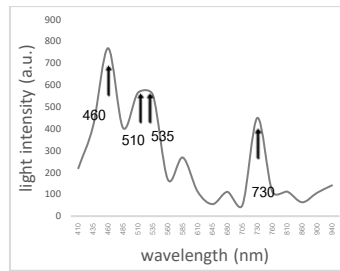
### 4.3 ผลการเก็บรวบรวมข้อมูลสเปกตรัม

รูปแบบการเก็บรวบรวมข้อมูลสเปกตรัม โดยสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพาที่พัฒนาขึ้น แสดงดังภาพที่ 14 โดยในการสแกนข้อมูลสเปกตรัมสารพิษทั้ง 4 ครั้งของการสแกน จะวางในตำแหน่งที่แตกต่างกัน

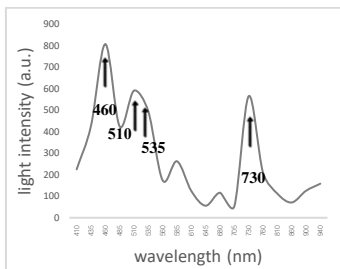


**ภาพที่ 14** แสดงการสแกนข้อมูลสเปกตรัมของสารพิษบนตัวกลางชนิดใบกะเพรา

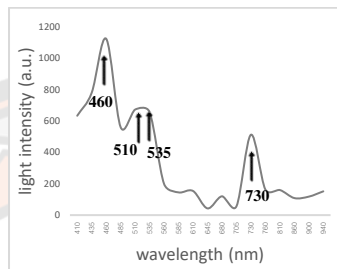
ข้อมูลสเปกตรัมที่รวบรวมได้ของสารพิษทั้ง 4 ชนิด (CBZ, CPT, DAN, IMP) ที่ปนเปื้อนบนตัวกลางพริกและใบกะเพรา คณะวิจัยพบว่าข้อมูลสเปกตรัมของแต่ละสารพิษ มียอดคลื่นที่สเปกตรัมเดียวกัน ซึ่งลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นทั้งหมด 7 ความเข้มข้นของสารพิษ (0.05 mg/l, 0.1 mg/l, 1 mg/l, 2 mg/l, 3 mg/l, 4 mg/l และ 5 mg/l) และทั้ง 2 ชนิดของตัวกลาง (พริก ใบกะเพรา) ที่ถูกปนเปื้อน โดยแสดงการเปรียบเทียบลักษณะข้อมูลสเปกตรัมของ CBZ ทุกระดับความเข้มข้นบนพริก ดังภาพที่ 15 ซึ่งคณะผู้วิจัยพบว่าข้อมูลสเปกตรัมของ CBZ ของทั้ง 7 ความเข้มข้น มีรูปร่างที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ มีค่าสูงสุดของสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 460 nm มีการกลับตัวของข้อมูลสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 510 nm, 535 nm และ 730 nm โดยที่ความเข้มข้น 0.05 mg/l, 0.1 mg/l และ 1 mg/l ภาพที่ 15 (ก) – (ค) พบจุดกลับตัวต่างจากความเข้มข้นอื่นที่เป็นลักษณะฐานกว้างที่ความยาวคลื่นขีดกันคือ 510 nm และ 535 nm ส่วนความเข้มข้น 2 mg/l และ 4 mg/l พบจุดกลับตัวที่ 535 nm และความเข้มข้น 3 mg/l และ 5 mg/l พบจุดกลับตัวที่ 510 nm และคณะผู้วิจัยยังพบว่าค่าความเข้มการสะท้อนแสงสูงสุดของแต่ละความเข้มข้นของ CBZ มีค่าแตกต่างกันและเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของสารพิษ



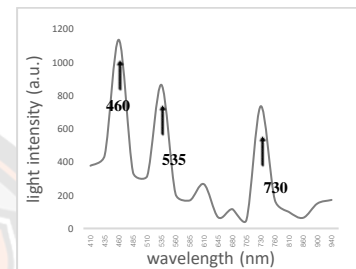
(ก)



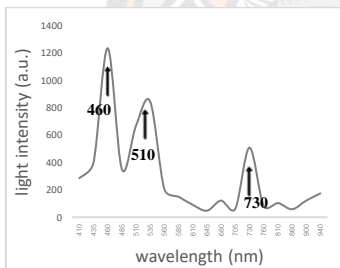
(ข)



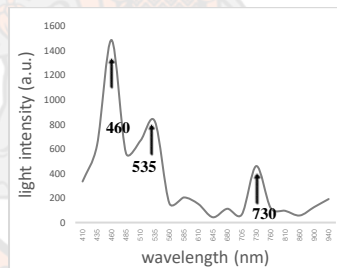
(ค)



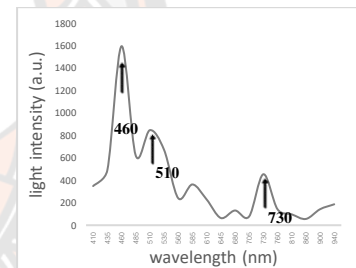
(ง)



(จ)



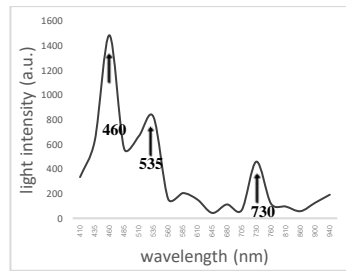
(ฉ)



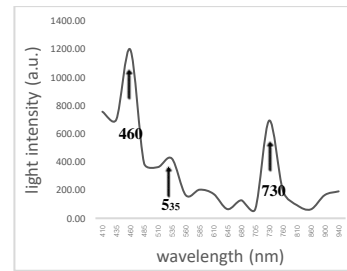
(ช)

ภาพที่ 15 แสดงข้อมูลสเปกตรัมของ CBZ ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ บนตัวกลางชนิดพริก  
 (ก) 0.05 mg/l (ข) 0.1 mg/l (ค) 1 mg/l (ง) 2 mg/l (จ) 3 mg/l (ฉ) 4 mg/l  
 (ช) 5 mg/l

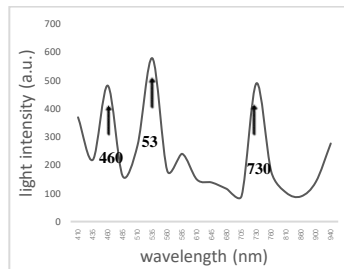
และแสดงการเปรียบเทียบกับลักษณะข้อมูลสเปกตรัมของทุกสารพิษ ความเข้มข้น 1 mg/l ที่ปนเปื้อน  
 บนพริกและใบกะเพรา ดังภาพที่ 16



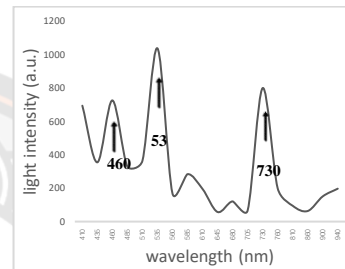
(ก)



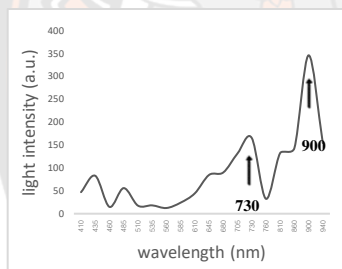
(ข)



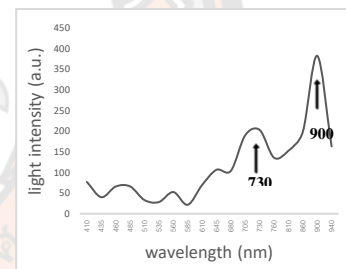
(ค)



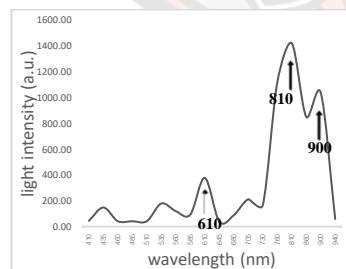
(ง)



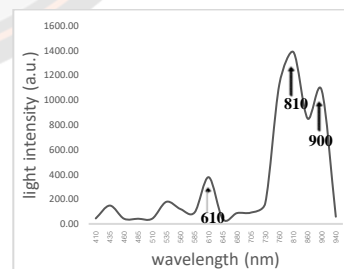
(จ)



(ฉ)



(ช)



(ฌ)

ภาพที่ 16 แสดงข้อมูลสเปกตรัมของสารพิษที่ระดับความเข้มข้น 1 mg/l (ก) CBZ บนพริก (ข) CBZ บนใบกะเพรา (ค) CPT บนพริก (ง) CPT บนใบกะเพรา (จ) DAN บนพริก (ฉ) DAN บนกะเพรา (ช) IMP บนพริก (ฌ) IMP บนใบกะเพรา

โดยความเข้มของการสะท้อนแสงของทั้ง 4 สารพิษบนพริกและใบกะเพรามีค่าไม่แตกต่างกันมาก และอยู่ในช่วงคลื่นเดียวกัน ซึ่งซาปีและคณะพบว่าคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ในพืชผักสามารถส่งผลกระทบต่อค่าความเข้มของการสะท้อนแสง (Sabri., et al. 2019) และกายดีและคณะพบว่าสารคลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll a) และสารคลอโรฟิลล์ บี (Chlorophyll b) มียอดคลื่นของสเปกตรัมอยู่ในช่วง 400 nm ถึง 500 nm และช่วง 600 nm ถึง 700 nm (Guidi., et al. 2017) จึงทำให้ช่วงสเปกตรัมดังกล่าวอาจได้รับผลกระทบและเกิดค่าความเข้มของการสะท้อนแสงที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้จากภาพที่ 16 (ก) – (ข) ที่แสดงข้อมูลสเปกตรัมของ CBZ ที่ระดับความเข้มข้น 0.05 mg/l, 0.1 mg/l, 1 mg/l, 2 mg/l, 3 mg/l, 4 mg/l และ 5 mg/l ตามลำดับ บนตัวกลางชนิดพริก พบว่าค่าความเข้มแสงของแต่ละความเข้มข้นของสารพิษมีขอบเขตที่แตกต่างกันมาก และในช่วงความเข้มข้นของสารพิษที่น้อย (0.05 mg/l – 1 mg/l) ลักษณะยอดคลื่นที่ความยาวคลื่น 510 nm และ 535 nm มีค่าใกล้เคียงกันเป็นผลให้ยอดคลื่นในความยาวคลื่นช่วงนี้มีฐานกว้าง ซึ่งอาจเกิดจากลักษณะรูปร่างของตัวกลาง และอาจส่งผลกระทบต่อทางเลือกตัวแทนสเปกตรัมสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ คณะวิจัยจึงจะใช้กระบวนการปรับปรุงพลังงานของข้อมูลสเปกตรัมเพื่อลดอิทธิพลของปัจจัยข้างต้น ซึ่งผลของการปรับปรุงพลังงานของข้อมูลสเปกตรัมที่จะทำให้สามารถหาตัวแทนของข้อมูลสเปกตรัมและนำไปหาความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของสารพิษได้ ทั้งนี้ภาพที่ 16 (ก) ที่แสดงข้อมูลสเปกตรัมของ CBZ ที่ปนเปื้อนบนตัวกลางพริกและใบกะเพรตามลำดับ พบยอดคลื่นชัดเจนที่สเปกตรัม 460 nm, 535 nm และ 730 nm และสูงสุดที่สเปกตรัม 460 nm สอดคล้องกับ ลูและคณะที่ตรวจพบยอดคลื่นของ CBZ ที่ช่วงสเปกตรัม 400 nm - 550 nm และช่วงสเปกตรัม 600 nm - 800 nm (Lu., et al. 2021) ภาพที่ 16 (ค) และ (ง) แสดงข้อมูลสเปกตรัมของ CPT ที่ปนเปื้อนบนพริกและใบกะเพรตามลำดับ พบยอดคลื่นชัดเจนที่สเปกตรัม 460 nm, 535 nm และ 730 nm และสูงสุดที่สเปกตรัม 535 nm สอดคล้องกับ มานีและคณะที่ใช้เครื่อง UV –Vis Spectrophotometer (JASCO, V-770) ตรวจพบยอดคลื่นของ CPT ที่ช่วงสเปกตรัม 400 nm - 550 nm (Mane., et al. 2020) ในขณะที่ ยูและคณะ ใช้อุปกรณ์ miniature fiber optic spectrograph และเครื่องมือที่เกี่ยวข้องตรวจพบยอดคลื่นของ CPT ที่ช่วงสเปกตรัม 700 nm - 1,000 nm (Yu, G., et al. 2022) ภาพที่ 16 (จ) และ (ข) แสดงข้อมูลสเปกตรัมของ DAN ที่ปนเปื้อนบนพริกและใบกะเพรตามลำดับ พบยอดคลื่นชัดเจนที่สเปกตรัม 730 nm และ 900 nm และสูงสุดที่สเปกตรัม 900 nm สอดคล้องกับ จามชิดิและคณะที่ใช้เครื่อง USB2000 spectrometer (Oceanoptics Inc., Dunedin, FL, USA) ตรวจพบยอดคลื่นของ DAN ที่ช่วงสเปกตรัม 450 nm ถึง 550 nm และช่วงสเปกตรัม 850 nm - 1,000 nm (Jamshidi., et al.

2016) ภาพที่ 16 (ซ) และ (ฅ) แสดงข้อมูลสเปกตรัมของ IMP ที่ปนเปื้อนบนบนพริกและใบกะเพรา ตามลำดับ พบยอดคลื่นชัดเจนที่สเปกตรัม 610 nm, 810 nm และ 900 nm และสูงสุดที่สเปกตรัม 810 nm สอดคล้องกับ เกาและคณะที่ตรวจพบยอดคลื่นของ IMP ที่ช่วงสเปกตรัม 500 – 650 nm และช่วงสเปกตรัม 700 nm - 1,200 nm (Guo., et al. 2021)

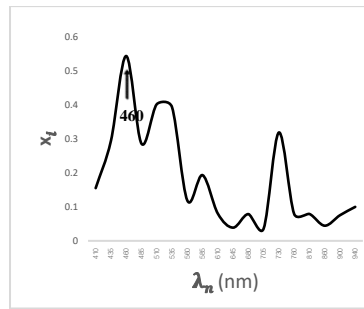
#### 4.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

##### 4.4.1 ผลการปรับปรุงพลังงานของข้อมูลสเปกตรัม

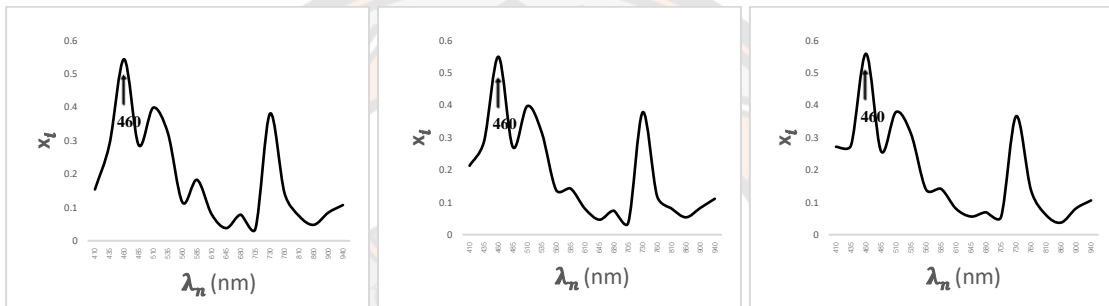
ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากการสแกนสเปกตรัม ที่ค่ายอดคลื่นของสารพิษในแต่ละความเข้มข้นมีขอบเขตที่แตกต่างกันมาก และยอดคลื่นในบางความยาวคลื่นมีลักษณะฐานกว้าง(ภาพที่ 15) และค่ายอดคลื่นของตัวกลางต่างชนิด มีความแตกต่างกันอย่างมาก (ภาพที่ 16) ด้วยปัจจัยดังกล่าวทำให้ยากต่อการพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารพิษและสเปกตรัม การปรับปรุงพลังงานของข้อมูลสเปกตรัมด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์แบบ Scaling to unit length คือนำแต่ละค่าของสเปกตรัมหารยูคลิดเวกเตอร์ (Euclidean vector) จึงช่วยให้การพิจารณาดังกล่าวมีความเป็นไปได้ ซึ่งจากการแสดงผลการปรับปรุงพลังงานของข้อมูลสเปกตรัมของ CBZ ทุกระดับความเข้มข้นบนอะคริลิกดังแสดงในภาพที่ 17 เห็นได้ว่า ลักษณะข้อมูลสเปกตรัมอยู่ในมาตราส่วนเดียวกัน ทำให้พิจารณายอดคลื่นของข้อมูลสเปกตรัมและระบุความแตกต่างของค่าความเข้มข้นของสารพิษได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

##### 4.4.2 ผลการหาค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัมหรือค่าอ้างอิงค่าความเข้มข้นของสารพิษ

สำหรับการวิเคราะห์ที่ให้ความมั่นใจ คณะวิจัยได้นำข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับปรุงพลังงานของข้อมูลสเปกตรัมและหาค่าสูงสุดของชุดข้อมูลสเปกตรัม หรือค่าอ้างอิงค่าความเข้มข้นของสารพิษ ซึ่งค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัม ( $m_i$ ) และค่าช่องความยาวคลื่น ( $\lambda_{n_0}$ ) ดังแสดงในตารางที่ 6



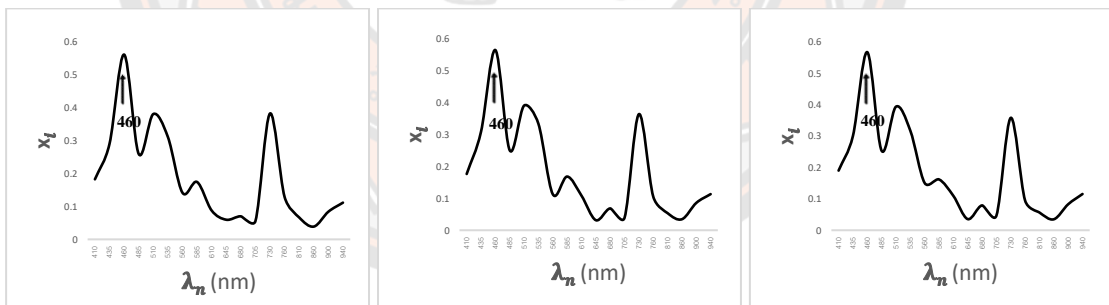
(ก)



(ค)

(ค)

(ง)



(จ)

(ฉ)

(ช)

**ภาพที่ 17** แสดงข้อมูลสเปกตรัมของ CBZ ที่ค่าความเข้มข้น 7 ระดับที่ปนเปื้อนบนพริก  
 (ก) 0.05 mg/l (ข) 0.1 mg/l (ค) 1 mg/l (ง) 2 mg/l (จ) 3 mg/l (ฉ) 4 mg/l  
 (ช) 5 mg/l

**ตารางที่ 6** แสดงผลของค่าสูงสุดของชุดข้อมูลเปกตรัมและค่าช่องความยาวคลื่นของค่าสูงสุดของชุดข้อมูลเปกตรัม

ชนิดของพืชผัก	$p_i$ (mg/l)	$m_i$				$\lambda_{n_0}(\lambda)$			
		CBZ	CPT	DAN	IMP	CBZ	CPT	DAN	IMP
พริก	0.05	0.5111	0.4933	0.6539	0.6015	460	535	900	810
	0.1	0.5115	0.4987	0.6559	0.6025	460	535	900	810
	1	0.5560	0.5534	0.6850	0.6129	460	535	900	810
	2	0.6212	0.5970	0.7096	0.6261	460	535	900	810
	3	0.6661	0.6278	0.7227	0.6347	460	535	900	810
	4	0.6946	0.6815	0.7288	0.6404	460	535	900	810
ใบกะเพรา	5	0.7129	0.7059	0.7383	0.6395	460	535	900	810
	0.05	0.4702	0.4759	0.5916	0.5758	460	535	900	810
	0.1	0.4727	0.4791	0.5931	0.5794	460	535	900	810
	1	0.5426	0.5080	0.6148	0.6020	460	535	900	810
	2	0.5850	0.5296	0.6370	0.6284	460	535	900	810
	3	0.6280	0.5622	0.6548	0.6451	460	535	900	810
	4	0.6558	0.5845	0.6623	0.6563	460	535	900	810
	5	0.6559	0.6028	0.6729	0.6605	460	535	900	810

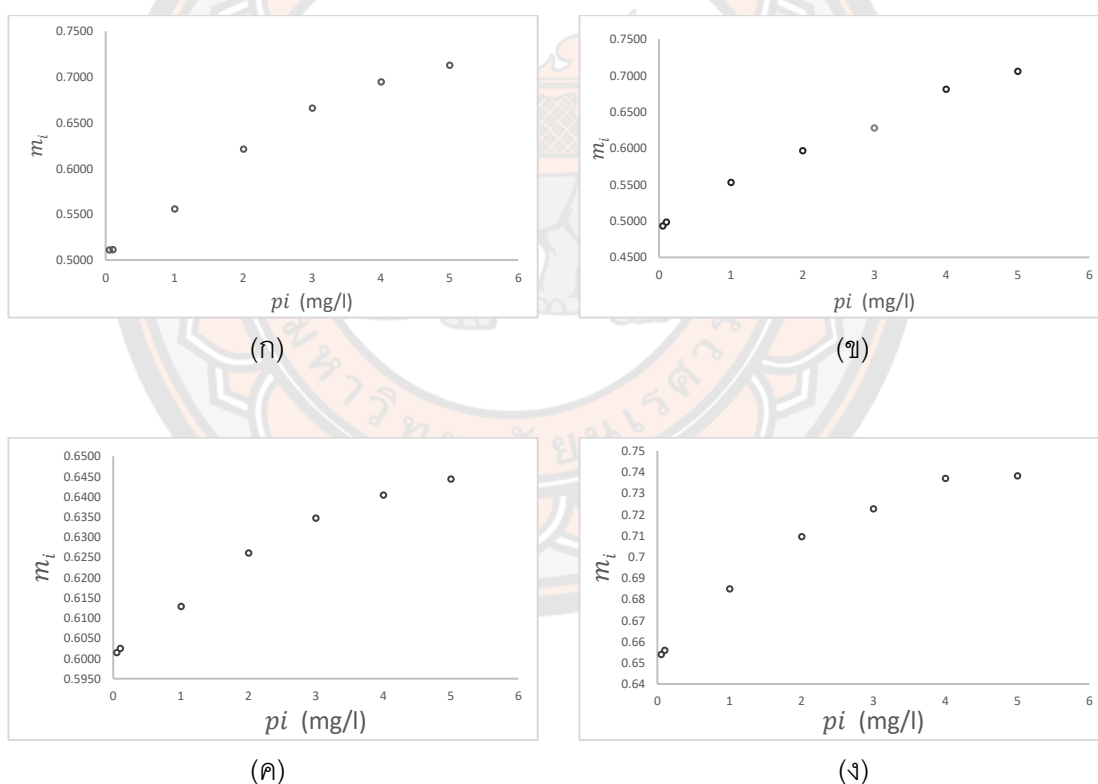
จากการพิจารณาค่าสูงสุดของข้อมูลเปกตรัมและค่าช่องความยาวคลื่นของ ค่าสูงสุดของชุดข้อมูลเปกตรัม ตามตารางที่ 6 เห็นได้ว่าคณะวิจัยสามารถนำค่าสูงสุดของข้อมูลเปกตรัม ( $m_i$ ) มาใช้เป็นตัวแทนของสารพิษทั้ง 4 ชนิด (CBZ, CPT, DAN, IMP) ในทุกค่าความเข้มข้นของสารพิษและทุกชนิดของตัวกลาง (พริก, ใบกะเพรา) การระบุชนิดสารพิษดำเนินการโดยใช้การเปรียบเทียบข้อมูลเปกตรัมที่ต้องการตรวจสอบกับข้อมูลเปกตรัมอ้างอิงชนิดสารพิษสำหรับการระบุชนิดสารพิษ เนื่องจากคณะผู้วิจัยได้ค้นพบว่าที่ค่าความยาวคลื่นที่ค่าสูงสุดของข้อมูลเปกตรัมของสารพิษแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ ดังนั้นกรณีที่ค่าความยาวคลื่นที่ค่าสูงสุดของข้อมูลเปกตรัมตรงกับข้อมูลเปกตรัมอ้างอิงของสารพิษชนิดใด นั้นแสดงถึงการพบสารพิษชนิดนั้นตกค้างในตัวกลางที่สแกน (ภาพที่ 18) ซึ่งวิธีการสอดคล้องกับไอราและ



คณะที่ใช้ค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัมที่ค่าความยาวคลื่น 560 nm ในการระบุชนิดและค่าความเข้มข้นของ glyphosate (Aira, J., et al., 2022)

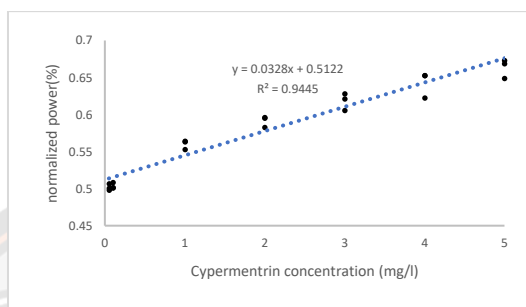
#### 4.4.3 ผลการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษดำเนินการโดยนำข้อมูลสเปกตรัมของตัวกลางกลุ่มพัฒนาแบบจำลองสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษ มาหาความสัมพันธ์ของค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัม ( $m_i$ ) กับค่าความเข้มข้นของสารพิษมาตรฐานของแต่ละสารพิษ ( $p_i$ ) แล้วสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตามกระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า  $m_i$  และ  $p_i$  ของสารพิษแต่ละชนิด ดังแสดงในรูปที่ 18

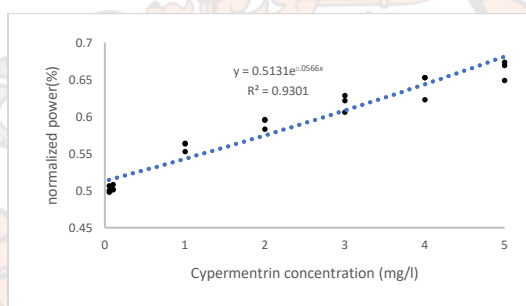


ภาพที่ 18 แสดงแนวโน้มข้อมูลความสัมพันธ์ค่าสูงสุดของข้อมูลสเปกตรัม ( $m_i$ ) กับค่าความเข้มข้นของสารพิษ ( $p_i$ ) ของแต่ละสารพิษ (ก) CBZ (ข) CPT (ค) DAN (ง) IMP

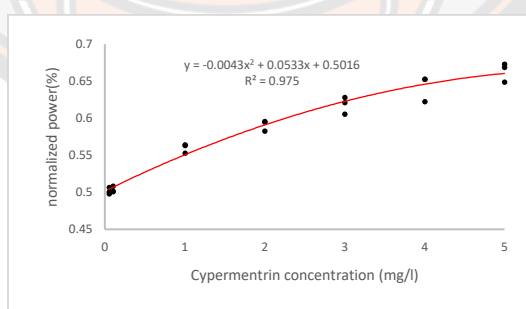
พบว่าพฤติกรรมข้อมูลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไม่มาก และแกว่งรอบเส้นตรง คณะวิจัยจึงพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression), การถดถอยแบบไม่เชิงเส้นรูปแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential Regression) และการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression) โดยแสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่หาได้ในตารางที่ 7



(ก)



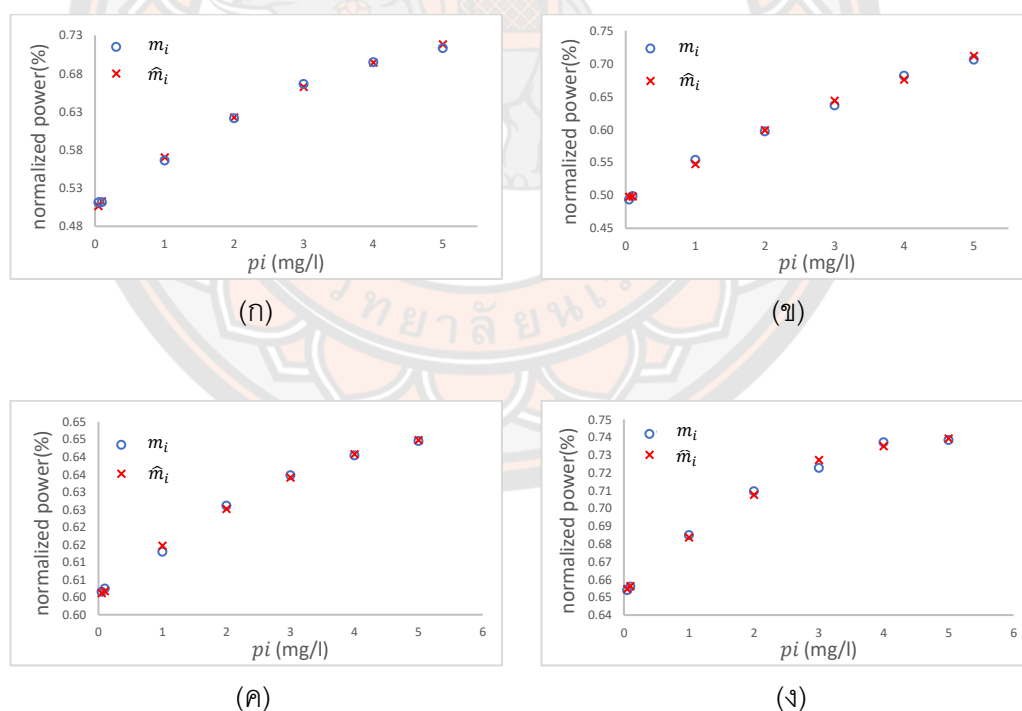
(ข)



(ค)

ภาพที่ 19 แสดงกราฟแบบจำลองข้างอิงที่พัฒนาขึ้นของสารไซเปอร์เมทรินบนตัวกลางพริกจากวิธี ( ก ) linear regression ( ข ) Exponential Regression ( ค ) Polynomial regression

และจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษทั้ง 4 ชนิด พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นให้ค่าการทำนายที่ดี โดยมีค่า  $R^2$  ใกล้เคียงค่า 1 และ  $RMSE$  ใกล้เคียงค่า 0 ในทุกสารพิษและทุกชนิดตัวกลาง และเมื่อพิจารณาความแม่นยำในการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น ด้วยค่าทางสถิติ  $R^2$  และ  $RMSE$  ที่แสดงในตารางที่ 7 พบว่าทุกสารพิษและทุกตัวกลางที่ใช้ทดสอบ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีการถดถอยแบบพหุนาม ให้ค่า  $R^2$  มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่น และมากกว่า 0.98 ซึ่งวิลเลียมและคณะระบุว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพที่จะนำไปใช้ได้ (Williams., et at, 2019) และ ส่วนค่า  $RMSE$  ให้ค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น (ภาพที่ 18) ดังนั้นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีการถดถอยแบบพหุนามเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับการทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษทั้ง 4 ชนิด (CBZ, CPT, DAN, IMP) บนตัวอย่างพริกและใบกะเพรา ทั้งนี้ค่าจากการทำนายค่าอ้างอิงความเข้มข้นของสารพิษของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น ( $\hat{m}_i$ ) แสดงดังตารางที่ 7 และแสดงการเปรียบเทียบค่า  $m_i$  และค่า  $\hat{m}_i$  ของตัวกลางชนิดพริกใน ภาพที่ 19



ภาพที่ 20 แสดงการเปรียบเทียบค่าอ้างอิงความเข้มข้นของสารพิษและค่าจากการทำนายความเข้มข้นของสารพิษจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (ก) CBZ (ข) CPT (ค) DAN (ง) IMP

ตารางที่ 7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์และค่าทางสถิติสำหรับพิจารณาประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สารพิษ มาตรฐาน	ตัวกลาง ทดลอง	แบบจำลอง	ค่าสัมประสิทธิ์			$R^2$	RMSE
			$a_0$	$a_1$	$a_2$		
CBZ	พริก	เส้นตรง	0.516	0.044	-	0.970	0.014
		เอ็กโปเนนเชียล	0.518	0.072	-	0.958	0.017
		โพลีโนเมียลอันดับ2	0.505	0.070	-0.006	<b>0.998</b>	<b>0.004</b>
	ใบกะเพรา	เส้นตรง	0.485	0.041	-	0.918	0.018
		เอ็กโปเนนเชียล	0.486	0.073	-	0.922	0.022
		โพลีโนเมียลอันดับ2	0.468	0.076	-0.007	<b>0.996</b>	<b>0.005</b>
CPT	พริก	เส้นตรง	0.032	0.512	-	0.944	0.009
		เอ็กโปเนนเชียล	0.513	0.056	-	0.930	0.012
		โพลีโนเมียลอันดับ2	0.501	0.053	-0.043	<b>0.975</b>	<b>0.005</b>
	ใบกะเพรา	เส้นตรง	0.479	0.026	-	0.993	0.004
		เอ็กโปเนนเชียล	0.480	0.049	-	0.988	0.005
		โพลีโนเมียลอันดับ2	0.475	0.033	-0.002	<b>0.997</b>	<b>0.003</b>
DAN	พริก	เส้นตรง	0.661	0.018	-	0.930	0.009
		เอ็กโปเนนเชียล	0.666	0.026	-	0.923	0.009
		โพลีโนเมียลอันดับ2	0.653	0.035	-0.004	<b>0.996</b>	<b>0.002</b>
	ใบกะเพรา	เส้นตรง	0.597	0.016	-	0.945	0.007
		เอ็กโปเนนเชียล	0.597	0.026	-	0.939	0.007
		โพลีโนเมียลอันดับ2	0.590	0.030	-0.003	<b>0.997</b>	<b>0.002</b>
IMP	พริก	เส้นตรง	0.604	0.009	-	0.965	0.003
		เอ็กโปเนนเชียล	0.604	0.015	-	0.963	0.003
		โพลีโนเมียลอันดับ2	0.601	0.015	-0.001	<b>0.997</b>	<b>0.009</b>
	ใบกะเพรา	เส้นตรง	0.582	0.018	-	0.947	0.008
		เอ็กโปเนนเชียล	0.582	0.029	-	0.941	0.008
		โพลีโนเมียลอันดับ2	0.575	0.033	-0.003	<b>0.997</b>	<b>0.002</b>

**ตารางที่ 8** แสดงการเปรียบเทียบค่าอ้างอิงความเข้มข้นของสารพิษมาตรฐานชนิด CBZ กับค่าที่ทำนายจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น

สารพิษ	ชนิดพืชผัก	$p_i(mg/L)$	$m_i$	$\hat{m}_i$
CBZ	พริก	0.05	0.5112	0.5065
		0.1	0.5116	0.5125
		1	0.5659	0.5702
		2	0.6213	0.6223
		3	0.6661	0.6622
	ใบกะเพรา	4	0.6947	0.6941
		5	0.7129	0.7180
		0.05	0.4702	0.4716
		0.1	0.4727	0.4762
		1	0.5426	0.5336
	2	0.5850	0.5925	
	3	0.6280	0.6297	
	4	0.6558	0.6528	
	5	0.6633	0.6660	

จากค่าอ้างอิงความเข้มข้นของสารพิษมาตรฐานชนิด CBZ กับค่าที่ทำนายจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น ที่แสดงในตารางที่ 8 เห็นได้ว่าในทุกความเข้มข้น มีผลต่างของค่า  $m_i$  และค่า  $\hat{m}_i$  เพียงเล็กน้อย และเนื่องจากค่าผลต่างนี้เป็นส่วนสำคัญในการคำนวณค่า  $R^2$  และ  $RMSE$  กล่าวคือหากผลต่างมีค่าน้อย ค่า  $R^2$  จะมีค่าเข้าใกล้ 1 และค่า  $RMSE$  จะมีค่าเข้าใกล้ 0 ลักษณะดังกล่าวนี้จึงส่งผลให้ค่า  $R^2$  และ  $RMSE$  ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น มีค่าเป็นไปตามที่แสดงในตารางที่ 7 และภาพที่ 20 (ก) แสดงการเปรียบเทียบค่า  $m_i$  ของ CBZ บนตัวกลางชนิดพริกกับ  $\hat{m}_i$  เห็นได้ว่าค่า  $m_i$  มีการเปลี่ยนค่าที่เพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มข้น 1 mg/l, 3 mg/l และ 5 mg/l จากภาพ 20 (ข) แสดงการเปรียบเทียบค่า  $m_i$  ของ CPT บนตัวกลางชนิดพริกกับ  $\hat{m}_i$  เห็นได้ว่าค่า  $m_i$  มีการเปลี่ยนค่าที่เพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มข้น 1 mg/l, 3 mg/l, 4 mg/l และ 5 mg/l จากภาพ 20 (ค) แสดงการเปรียบเทียบค่า  $m_i$  ของ DAN บนตัวกลางชนิดพริกกับ  $\hat{m}_i$  เห็นได้ว่าค่า  $m_i$  มีการเปลี่ยนค่าที่เพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มข้น 1 mg/l และ 4 mg/l จากภาพที่ 20 (ง) แสดงการเปรียบเทียบค่า  $m_i$  ของ IMP บนตัวกลางชนิดพริกกับ  $\hat{m}_i$  เห็นได้ว่าค่า  $m_i$  มีการเปลี่ยนค่าที่เพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มข้น 3 mg/l และ 5 mg/l ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวของทั้ง 4 ภาพ ที่มีค่า  $m_i$  ที่เพิ่มขึ้นในอัตราที่ไม่เท่ากันไม่ต่ำกว่า 2 จุด ดังนั้นแบบจำลองพีชคณิตที่พัฒนาจากวิธีการถดถอยแบบพหุ

นามอันดับ 2 จึงมีลักษณะลู่เข้ากับข้อมูลดังกล่าวได้ดีกว่าแบบจำลองพีชคณิตที่พัฒนาจากวิธีการถดถอยเชิงเส้น และวิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบเอ็กโปเนนเชียล

#### 4.5 ผลการคัดเลือกและทดสอบหาประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.5.1 ผลการคัดเลือกแบบจำลอง คณะวิจัยคัดเลือกแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีการถดถอยแบบพหุนามอันดับ 2 ให้เป็นแบบจำลองสำหรับนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และทำนายความเข้มข้นของสารพิษตกค้างในตัวกลางพริกและใบกะเพรา ตามรายงานการพิจารณาค่า  $R^2$  และ  $RMSE$  จากตารางที่ 8

##### 4.5.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลอง

1) ผลการวิเคราะห์เพื่อตรวจหาสารพิษตกค้างในตัวกลางพริกและใบกะเพราด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับผลการตรวจด้วยวิธีโครมาโตกราฟีแบบชั้นบาง จำนวน 56 ชิ้น แสดงดังตารางที่ 9

**ตารางที่ 9** แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจหาสารพิษตกค้างในตัวกลางพริกและใบกะเพราด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบผลการตรวจด้วยวิธีโครมาโตกราฟีแบบชั้นบาง

ผลการตรวจหาด้วย แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น	ผลการตรวจหาด้วยวิธีโครมาโต กราฟีแบบชั้นบาง		
	ตรวจพบ	ตรวจไม่พบ	รวม
ตรวจพบ	3	2	5
ตรวจไม่พบ	1	50	51
รวม	4	52	56

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจหาสารพิษตกค้างในตัวกลางพริกและใบกะเพราด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับผลการตรวจด้วยวิธีโครมาโตกราฟีแบบชั้นบาง จำนวน 56 ชิ้น พบว่ามีค่าความถูกต้อง 94.64% และค่าความไว 75%

2) เมื่อนำค่าทางสถิติ ( $R^2$ ,  $RMSE$ ) ของกลุ่มตัวกลางสำหรับใช้ทดสอบแบบจำลอง มาเปรียบเทียบกับค่าทางสถิติของแบบจำลองของกลุ่มตัวกลางสำหรับพัฒนาแบบจำลอง ที่แสดงดังตารางที่ 10

**ตารางที่ 10** แสดงการทดสอบประสิทธิภาพการตรวจหาสารพิษตกค้างในตัวกลางพริกและใบกะเพราด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

สารพิษ	ชนิดตัวกลาง	แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น		แบบจำลองสำหรับทดสอบ	
		$R^2$	$RMEC$	$R^2$	$RMSE$
CBZ	พริก	0.998	0.004	0.997	0.001
	ใบกะเพรา	0.996	0.007	0.996	0.001
CPT	พริก	0.975	0.005	0.995	0.021
	ใบกะเพรา	0.997	0.003	0.998	0.002
DAN	พริก	0.996	0.002	0.998	0.001
	ใบกะเพรา	0.997	0.002	0.998	0.001
IMP	พริก	0.997	0.009	0.997	0.002
	ใบกะเพรา	0.997	0.002	0.997	0.002

จากข้อมูลตามตารางที่ 10 พบว่าความสัมพันธ์ของค่า  $R^2$  และค่า  $RMSE$  ของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น กับแบบจำลองสำหรับทดสอบประสิทธิภาพ พบว่าค่า  $R^2$  ของข้อมูลสเปกตรัมของทั้ง 2 กลุ่มตัวกลาง มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.995 – 0.998 และค่า  $RMSE$  มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.001 – 0.021

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### สรุปผลการวิจัย

คณะวิจัยดำเนินการศึกษาและสามารถพัฒนาเครื่องมือสำหรับตรวจหาสารพิษตกค้างในพืชผัก ที่ประกอบไปด้วยสเปกโตรมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้น และรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมที่สามารถประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปที่มีความยาวคลื่น 410 nm, 435 nm, 460 nm, 485 nm, 510 nm, 535 nm, 560 nm, 585 nm, 610 nm, 645 nm, 680 nm, 705 nm, 730 nm, 760 nm, 810 nm, 860 nm, 900 nm, 940 nm และทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษบนพืชผักได้ดังนี้

1) ทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษคาร์เบนดาซิม (Carbendazim) ที่ปนเปื้อนบนพริกและใบกะเพราได้ โดยตรวจพบค่าสเปกตรัมสูงสุดที่มีความยาวคลื่น 460 nm มีค่า  $R^2$  และ  $RMSE$  เท่ากับ 0.998 และ 0.004 สำหรับพริก และ  $R^2$  และ  $RMSE$  เท่ากับ 0.996 และ 0.005 สำหรับใบกะเพรา

2) ทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษไซเปอร์เมทริน (Cypermethrin) ที่ปนเปื้อนบนพริกและใบกะเพราได้ โดยตรวจพบค่าสเปกตรัมสูงสุดที่มีความยาวคลื่น 535 nm มีค่า  $R^2$  และ  $RMSE$  เท่ากับ 0.996 และ 0.005 สำหรับพริก และ  $R^2$  และ  $RMSE$  เท่ากับ 0.997 และ 0.003 สำหรับใบกะเพรา

3) ทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษไดอะซินอน (Diazinon) ที่ปนเปื้อนบนพริกและใบกะเพราได้ โดยตรวจพบค่าสเปกตรัมสูงสุดที่มีความยาวคลื่น 900 nm มีค่า  $R^2$  และ  $RMSE$  เท่ากับ 0.996 และ 0.002 สำหรับพริก และ  $R^2$  และ  $RMSE$  เท่ากับ 0.997 และ 0.002 สำหรับใบกะเพรา

4) ทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษอิมิดาคลอริพริด (Imidacloprid) ที่ปนเปื้อนบนพริกและใบกะเพราได้ โดยตรวจพบค่าสเปกตรัมสูงสุดที่มีความยาวคลื่น 810 nm มีค่า  $R^2$  และ  $RMSE$  เท่ากับ 0.997 และ 0.009 สำหรับพริก และ  $R^2$  และ  $RMSE$  เท่ากับ 0.997 และ 0.002 สำหรับใบกะเพรา

การตรวจหาสารพิษตกค้างในพืชผัก มีค่าความถูกต้อง 94.64% และค่าความไว 75% ในการตรวจหาสารพิษตกค้างในตัวกลางพริกและใบกะเพรา เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจด้วยวิธีโครมาโตกราฟีแบบชั้นบาง และสเปกโตรมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้น มีค่าใช้จ่ายในการออกแบบและ



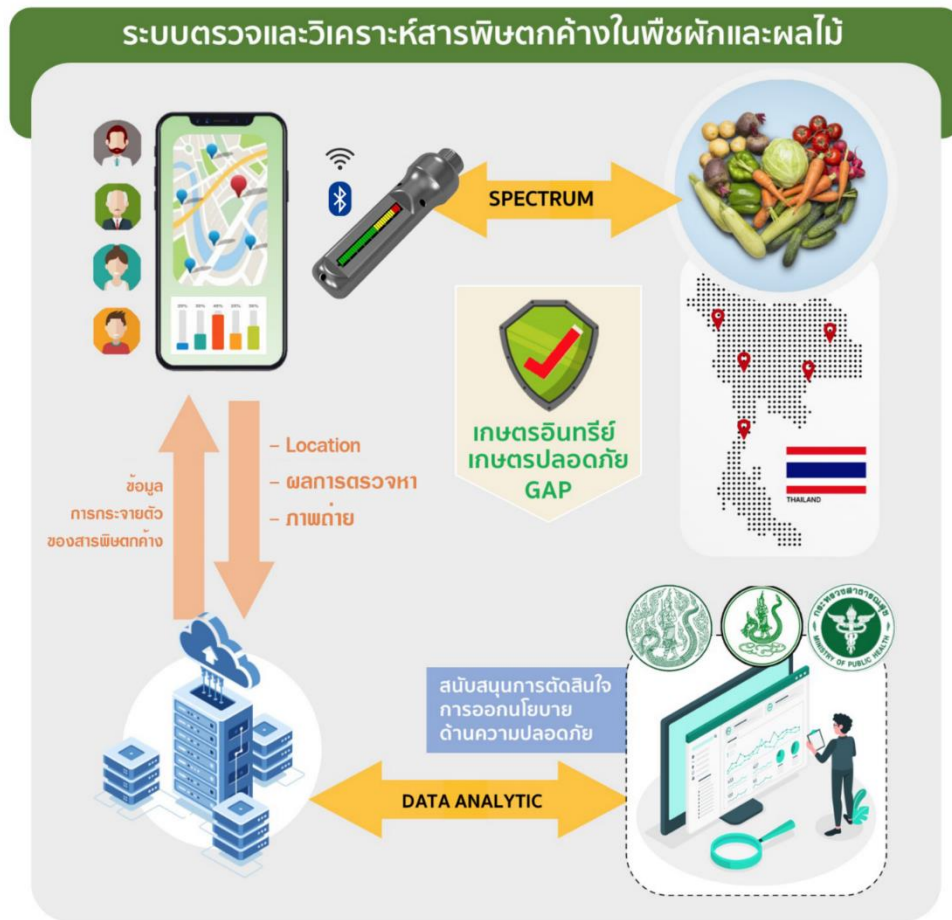
พัฒนาจำนวนทั้งสิ้น 4,395 บาท (สี่พันสามร้อยเก้าสิบบาทถ้วน) และมีราคาถูกกว่า 5 – 45 เท่า มีเทียบกับอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ซึ่งคุณลักษณะและการทำงานใกล้เคียงกัน

### อภิปรายผล

คณะวิจัยออกแบบ พัฒนา สอบเทียบ และตรวจสอบการทำงานของสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์พกพาราคาประหยัดที่ใช้วิธีการเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีช่วงความยาวคลื่นวิสิเบิลถึงเนียร์อินฟราเรด (Visible – Near Infrared Spectroscopy: VIS-NIRs) ซึ่งปรับแต่งเพื่อตรวจสอบคาร์เบนดาซิม ไสเปอร์เมทริน ไดอะซินอนและอิมิดาคลอร์พริดที่ตกค้างในพริกและใบกะเพรา ด้วยการออกแบบที่กะทัดรัด จึงสามารถใช้ได้สะดวกทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนามได้ ช่วยลดขั้นตอนและค่าใช้จ่ายในการทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษทั้ง 4 ชนิดที่ปนเปื้อนบนพริกและใบกะเพรา พร้อมกันนี้ยังสามารถใช้เป็นอุปกรณ์หลักในระบบตรวจวิเคราะห์สารพิษตกค้างในพืชผักและผลไม้ (ภาพที่ 21) เพื่อบริหารจัดการปัญหาและผลกระทบที่เกิดจากสารพิษตกค้างในพืชผักและผลไม้ ซึ่งจากค่าทางสถิติสำหรับทดสอบความแม่นยำและหาประสิทธิภาพของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ที่มีความใกล้เคียงกันและ  $R^2$  และ  $RMSE$  มีค่าใกล้เคียง 1 และ 0 ตามลำดับ ทำให้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษคาร์เบนดาซิม (Carbendazim), ไสเปอร์เมทริน (Cypermethrin), ไดอะซินอน (Diazinon) และอิมิดาคลอร์พริด (Imidacloprid) ที่ปนเปื้อนบนพริกและใบกะเพราได้ และจากการวิเคราะห์แถบคลื่นความถี่แสงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเครื่องมือสำหรับทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษคาร์เบนดาซิม (Carbendazim), ไสเปอร์เมทริน (Cypermethrin), ไดอะซินอน (Diazinon) และอิมิดาคลอร์พริด (Imidacloprid) ที่ปนเปื้อนบนพริกและใบกะเพราได้

### ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มการทำนายค่าความเข้มข้นของสารพิษและพืชผักชนิดอื่น
2. ศึกษาเพิ่มเติมในการระบุพิกัดบนแผนที่โลกของการสแกนข้อมูลสเปกตรัมสารพิษ
3. ศึกษาเพิ่มเติมในการนำผลของคณะวิจัย และพิกัดของการสแกนข้อมูลสเปกตรัมสารพิษไปจัดเก็บ วิเคราะห์และประมวลผลบนคลาวด์ (Cloud) เพื่อการบริหารจัดการสารพิษที่ตกค้างบนพืชผักอย่างเป็นระบบ ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 แสดงรูปแบบการใช้สเปกโตรมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเป็นอุปกรณ์หลักในระบบตรวจและวิเคราะห์สารพิษตกค้างในพืชผักและผลไม้

ภาพที่ 21 เป็นระบบตรวจและวิเคราะห์สารพิษตกค้างในพืชผักและผลไม้ที่คณะวิจัยได้ออกแบบสำหรับบริหารจัดการสารพิษที่ตกค้างบนพืชผักอย่างเป็นระบบ โดยประกอบไปด้วยนวัตกรรมการตรวจสอบสารพิษตกค้างด้วยสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา ราคาถูก ผู้ใช้สามารถนำไปใช้งานตรวจสอบสารพิษตกค้างได้ทั่วไป จากนั้นผลจากการตรวจสอบ รวมถึงพิกัดและภาพถ่ายจะถูกส่งไปวิเคราะห์และประมวลผลยังคราวน์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์และประมวลผลจะถูกส่งกลับไปยังผู้ใช้และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยผู้ใช้จะทราบข้อมูลการกระจายตัวของสารพิษตกค้าง รับรู้ความเสี่ยงในพื้นที่ของผู้ใช้ ในส่วนของหน่วยงานสามารถนำผลลัพธ์ประกอบการตัดสินใจในการบริหารจัดการปัญหาสารพิษตกค้างในผักผลไม้ได้อย่างเป็นปัจจุบัน และเป็นระบบเสริมสร้างสุขภาวะที่ดีของประชาชนและสิ่งแวดล้อมที่ปลอดภัยจากสารพิษกำจัดศัตรูพืช

กรมวิชาการเกษตร. (2563). คลังเอกสารความรู้. 10 มกราคม 2564. [ออนไลน์].

<https://www.doa.go.th/share/attachment.php?aid=1252>

กรมวิชาการเกษตร. (2563). ฐานข้อมูลพรรณพืชและเชื้อพันธุกรรมพืช. 10 มกราคม 2564.

[ออนไลน์]. <http://doaplant.doa.go.th/GardFront/GardGenInfoDetail/76>

กรมวิชาการเกษตร. (2566). สรุปข้อมูลวัตถุอันตราย. 11 มกราคม 2566. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

[https://www.doa.go.th/ard/?page\\_id=386](https://www.doa.go.th/ard/?page_id=386)

กรมวิชาการเกษตร. (2562). GAP DOA Online. 7 ธันวาคม 2562. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<http://gap.doa.go.th/>

กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม. (n.d.). เกณฑ์ราคากลางและคุณลักษณะพื้นฐานการ  
จัดหาอุปกรณ์และระบบคอมพิวเตอร์ฉบับเดือนธันวาคม 2564. 10 มกราคม 2565.

[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.mdes.go.th/service>

เครือข่ายเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช. (2563). ผลการเฝ้าระวังสารพิษตกค้างในผักผลไม้ ปี  
2563. 7 ธันวาคม 2565. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [https://thaipan.org/wp-](https://thaipan.org/wp-content/uploads/2020/12/thaipan_press_4-12-2563-last.pdf)

[content/uploads/2020/12/thaipan\\_press\\_4-12-2563-last.pdf](https://thaipan.org/wp-content/uploads/2020/12/thaipan_press_4-12-2563-last.pdf)

บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด | Central Laboratory (Thailand) Co.,Ltd.

(n.d.). <https://www.centallabthai.com/>

ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่องอาหารที่มีสารพิษตกค้าง พ.ศ. 2560. (2560, 18 สิงหาคม).

ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 134 ตอนพิเศษ 228 ง. หน้า 8-10

ปาริชาติ เทียนจุมพล พิเชษฐ์ น้อยมณี วรณวรารักษ์ พัฒนะโพธิ์ สวงนศักดิ์ ธนาพรพูนพงษ์ และวรินทร มณีวรรณ. 2554. การตรวจหาสารกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผักบางชนิดด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. รายงานฉบับสมบูรณ์. ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว, สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา, กรุงเทพฯ. 53 หน้า.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2562). เนื้อที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตรรายจังหวัด ปี พ.ศ. 2562. 10 มกราคม 2566. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/socio/LandUtilization2562.pdf>

สำนักงานหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ. (2562). เปิดข้อมูลผู้ป่วยบัตรทอง ปี 62 พบผู้ป่วยพิษสารเคมีกว่า 3 พันราย. 7 ธันวาคม 2562. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <https://www.nhso.go.th/frontend/NewsInformationDetail.aspx?newsid=MjU0OA==>

สำนักสารนิเทศ สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข. (2562). องค์การเภสัชกรรมห่วงใย ใส่ใจสุขภาพ ห่วงไกลภัยจากสารเคมี ผลิตภัณฑ์ทดสอบสารเคมีกำจัดแมลง เพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค. 6 มกราคม 2563. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <https://pr.moph.go.th/?url=pr/detail/2/02/133913>

สำนักมาตรฐานห้องปฏิบัติการ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข. (2562). ชุดทดสอบ GPO-TM KIT. 6 มกราคม 2563. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://blqs.dmsc.moph.go.th/assets/qsd/PPTGPOTMKIT.pdf>

Aira, J., Olivares, T., & Delicado, F. M. (2022). SpectroGLY: A Low-Cost IoT-Based Ecosystem for the Detection of Glyphosate Residues in Waters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1–10. <https://doi.org/10.1109/tim.2022.3196947>

Ali, S., Ullah, M. W., Sajjad, A., Shakeel, Q., & Hussain, A. R. (2021). Environmental and Health Effects of Pesticide Residues. In Sustainable agriculture reviews (pp. 311–336). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54719-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54719-6_8)

ams-OSRAM AG. AS7265x Smart Spectral Sensor (2563). 2 มกราคม 2563. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://ams.com/as7265x>

Armenta, S., Garrigues, S., & De La Guardia, M. (2007). Partial least squares-near infrared determination of pesticides in commercial formulations. *Vibrational Spectroscopy*, 44(2), 273–278. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2006.12.005>

Aykas, D. P., & Menevseoglu, A. (2021). A rapid method to detect green pea and peanut adulteration in pistachio by using portable FT-MIR and FT-NIR spectroscopy combined with chemometrics. *Food Control*, 121, 107670. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107670>

Bahareh Jamshidi, Ezeddin Mohajerani, Jamshid Jamshidi, Developing a Vis/NIR spectroscopic system for fast and non-destructive pesticide residue monitoring in agricultural product, *Measurement*, Volume 89, 2016, Pages 1-6, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.03.069>.

B. L. Bhaskara and P. Nagaraja, "Direct sensitive spectrophotometric determination of glyphosate by using ninhydrin as a chromogenic reagent in formulations and environmental water samples", *Helvetica Chim. Acta*, vol. 89, no. 11, pp. 2686-2693, Nov. 2006.

- Bodian, E. H. T., Sarr, I., Sambou, S., Mendy, A., Gueye, C., Diop, C., Diagne, I., Thiaré, D. D., Diaw, P. A., Gaye-Seye, M. D., & Coly, A. (2017). Spectrophotometric Method for the Determination of Carbendazim in Orange Juice Samples Marketed in Senegal. *Chemical Science International Journal*, 21(1), 1–7. <https://doi.org/10.9734/csji/2017/37770>
- Boedeker, W., Watts, M., Clausing, P., & Marquez, E. (2020). The global distribution of acute unintentional pesticide poisoning: estimations based on a systematic review. *BMC Public Health*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12889-020-09939-0>
- Brunet, D., T. Woignier, M. Lesueur-Jannoyer, R. Achard, L. Rangon and B.G. Barthe. 2009. Determination of soil content in chlordecone (organochlorine pesticide) using near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Environmental Pollution* 157: 3120-3125.
- Cao, J., Wang, M., Yu, H., She, Y., Cao, Z., Ye, J., El-Aty, A. M. A., Hacimuftuoglu, A., Wang, J., & Lao, S. (2020). An Overview on the Mechanisms and Applications of Enzyme Inhibition-Based Methods for Determination of Organophosphate and Carbamate Pesticides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(28), 7298–7315. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c01962>
- Charles Zaiontz. Exponential Linear Regression | Real Statistics Using Excel. 2020. Real Statistics Using Excel. <https://real-statistics.com/regression/exponential-regression-models/exponential-regression/>
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ. Computer science*, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>

Cecilie Hermansen, Trine Norgaard, Lis Wollesen de Jonge, Per Moldrup, Karin Müller, Maria Knadel, Predicting glyphosate sorption across New Zealand pastoral soils using basic soil properties or Vis–NIR spectroscopy, *Geoderma*, Volume 360, 2020, 114009, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114009>.

Chen, Y., Fang, S., Tian, Y., Du, Y., Ma, Y., Zeng, S., Gu, C., Jiang, T., & Zhou, J. (2020). In Situ Recyclable Surface-Enhanced Raman Scattering-Based Detection of Multicomponent Pesticide Residues on Fruits and Vegetables by the Flower-like MoS<sub>2</sub>@Ag Hybrid Substrate. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(12), 14386–14399. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b22725>

Chu, S., Hurst, George Samuel, Stoner, John Oliver and Graybeal, Jack D. (N.D.). spectroscopy. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/spectroscopy>

Chu, Y., Tong, Z., Dong, X., Sun, M., Gao, T., Duan, J., & Wang, M. L. (2020). Simultaneous determination of 98 pesticide residues in strawberries using UPLC-MS/MS and GC-MS/MS. *Microchemical Journal*, 156, 104975. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104975>

CODEXALIMENTARIUS FAO-WHO. (2023). Pesticides index. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/dbs/pestres/pesticides/en/>

Da Rocha Duailibe Monteiro, A., Feital, T., & Pinto, J. C. (2017). Statistical Aspects of Near-Infrared Spectroscopy for the Characterization of Errors and Model Building. *Applied Spectroscopy*, 71(7), 1665–1676. <https://doi.org/10.1177/0003702817704587>

EU Pesticides Database. (2023). Food Safety.  
[https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database\\_en](https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en)

Fu, X., Wang, X., & Rao, X. (2017). An LED-based spectrally tuneable light source for visible and near-infrared spectroscopy analysis: A case study for sugar content estimation of citrus. *Biosystems Engineering*, 163, 87–93.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.08.022>

Getz, M. E. (1963). The determination of organophosphate pesticides and their residues by paper chromatography. In *Springer eBooks* (pp. 9–25).  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8374-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8374-5_2)

Gerage, J., Meira, A. C. H., & Da Silva, M. V. (2017). Food and nutrition security: pesticide residues in food. *Nutrire*, 42(1). <https://doi.org/10.1186/s41110-016-0028-4>

GitHub, Inc. (2023). SparkFun Spectral in the the Arduino library.  
[https://github.com/sparkfun/SparkFun\\_AS7265x\\_Arduino\\_Library](https://github.com/sparkfun/SparkFun_AS7265x_Arduino_Library)

Guidi, L., Tattini, M., & Landi, M. (2017). How Does Chloroplast Protect Chlorophyll Against Excessive Light? *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/67887>

Guo, Y., Guo, S., Li, J., Wang, E., & Dong, S. (2011). Cyclodextrin–graphene hybrid nanosheets as enhanced sensing platform for ultrasensitive determination of carbendazim. *Talanta*, 84(1), 60–64. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.12.007>



Hamamatsu Photonics K.K (n.d.), Infrared LED L14096-0085G, 11 มกราคม 2566. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/ssd/l14096-0085gl\\_kled1077e.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/l14096-0085gl_kled1077e.pdf)

Isaksson, T. (1988, September 1). The Effect of Multiplicative Scatter Correction (MSC) and Linearity Improvement in NIR Spectroscopy. <https://opg.optica.org/as/abstract.cfm?URI=as-42-7-1273>

Jamshidi, B., Mohajerani, E., Jamshidi, J., Minaei, S., & Sharifi, A. R. (2015b). Non-destructive detection of pesticide residues in cucumber using visible/near-infrared spectroscopy. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 32(6), 857–863. <https://doi.org/10.1080/19440049.2015.1031192>

Jamshidi, B. (2017). Non-destructive safety assessment of agricultural products using Vis/NIR spectroscopy. *Nir News*, 28(1), 4–8. <https://doi.org/10.1177/0960336016687519>

Janghel, E. K., Rai, J. K., Rai, M. K., & Gupta, V. K. (2007). A new sensitive spectrophotometric determination of cypermethrin insecticide in environmental and biological samples. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 18(3), 590–594. <https://doi.org/10.1590/s0103-50532007000300015>

Jeremiah Justus, Kapil Dev, Om Dubey, & Atul Kumar Mittal. (2022). Detecting Cypermethrin Pesticide as Analyte by Capillary Action on Adsorbent Phase of Silica Gel G by Thin Layer Chromatography: A Reinstated Method for Complex and Costly techniques. *Indian Journal of Forensic Medicine & Toxicology*, 16(4), 261–268. <https://doi.org/10.37506/ijfmt.v16i4.18598>

- Kowalska, G., Pankiewicz, U., & Kowalski, R. A. (2020). Estimation of Pesticide Residues in Selected Products of Plant Origin from Poland with the Use of the HPLC-MS/MS Technique. *Agriculture*, 10(6), 192. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060192>
- Leong, W., Teh, S., Hossain, M. M., Nadarajaw, T., Zabidi-Hussin, Z. a. M. H., Chin, S., Lai, K., & Lim, S. H. (2020). Application, monitoring and adverse effects in pesticide use: The importance of reinforcement of Good Agricultural Practices (GAPs). *Journal of Environmental Management*, 260, 109987. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109987>
- Li, X., He, X., Dong, Y., Jia, L., & He, Q. (2016). Analysis of N-nitrosodiethylamine by ion 244 chromatography coupled with UV photolysis pretreatment. *Journal of Food and Drug Analysis*, 24(2), 311–315. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2015.10.006>
- Li, Y., Sun, Y., Jiang, J. et al. Spectroscopic determination of leaf chlorophyll content and color for genetic selection on *Sassafras tzumu*. *Plant Methods* 15, 73 (2019). <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0458-0>
- Liu SH, Zhang XG, Zhou Q, Sun SQ. [Determination of geographical origins of Chinese medical herbs by NIR and pattern recognition]. *Guang pu xue yu Guang pu fen xi = Guang pu*. 2006 Apr;26(4):629-632. PMID: 16836125.
- Lu, Y., Li, X., Li, W., Shen, T., He, Z., Zhang, M., Zhang, H., Sun, Y., & Liu, F. (2021). Detection of chlorpyrifos and carbendazim residues in the cabbage using visible/near-infrared spectroscopy combined with chemometrics. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 257, 119759. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119759>

- Liu, Z., Yu, S., Xu, S., Zhao, B., & Xu, W. (2017). Ultrasensitive Detection of Capsaicin in Oil for Fast Identification of Illegal Cooking Oil by SERRS. *ACS Omega*, 2(11), 8401–8406. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b01457>
- Luo, L., Dong, L., Huang, Q., Ma, S., Fantke, P., Li, J., Jiang, J., Fitzgerald, M., Yang, J. J., Jia, Z., Zhang, J., Wang, H., Dai, Y., Zhu, G., Xing, Z., Liang, Y., Li, M., Wei, G., Song, J., . . . Chen, S. (2021). Detection and risk assessments of multi-pesticides in 1771 cultivated herbal medicines by LC/MS-MS and GC/MS-MS. *Chemosphere*, 262, 127477. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127477>
- Lapcharoensuk, R., Fhaykamta, C., Anurak, W., Chadwut, W., & Sitorus, A. (2023). Nondestructive Detection of Pesticide Residue (Chlorpyrifos) on Bok Choi (*Brassica rapa* subsp. *Chinensis*) Using a Portable NIR Spectrometer Coupled with a Machine Learning Approach. *Foods*, 12(5), 955. <https://doi.org/10.3390/foods12050955>
- Maleki, M., Mouazen, A. M., Ramon, H., & De Baerdemaeker, J. (2007). Multiplicative Scatter Correction during On-line Measurement with Near Infrared Spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 96(3), 427–433. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.11.014>
- Mane, P. C., Shinde, M., Varma, S., Chaudhari, B. P., Fatehmulla, A., Shahabuddin, M., Amalnerkar, D., Aldhafiri, A., & Chaudhari, R. D. (2020). Highly sensitive label-free bio-interfacial colorimetric sensor based on silk fibroin-gold nanocomposite for facile detection of chlorpyrifos pesticide. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61130-y>

- Mirghafouri, M., Abbasi-Moayed, S., Ghasemi, F., & Hormozi-Nezhad, M. R. (2020). Nanoplasmonic sensor array for the detection and discrimination of pesticide residues in citrus fruits. *Analytical Methods*, 12(48), 5877–5884. <https://doi.org/10.1039/d0ay02039g>
- Mohite, J., Sawant, S., Borah, K., & Pappula, S. (2019). Temporal Detection of Pesticide Residues in Tea Leaves Using Hyperspectral Sensing. <https://doi.org/10.1109/igarss.2019.8898500>
- Mustafa, M. N. S., Shattri, B. M., et al., (2020). "Calibration and testing a low-cost spectrometer for ground measurement Mustafa", *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 9, no. 9, Sep. 2020.
- Narendaran, S. T., Meyyanathan, S. N., & Babu, B. R. S. (2020). Review of pesticide residue analysis in fruits and vegetables. Pre-treatment, extraction and detection techniques. *Food Research International*, 133, 109141. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109141>
- National Center for Biotechnology Information (2023). PubChem Compound Summary for CID 2912, Cypermethrin. Retrieved January 19, 2023 from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cypermethrin>.
- National Center for Biotechnology Information (2023). PubChem Compound Summary for CID 25429, Carbendazim. Retrieved April 19, 2023 from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Carbendazim>.

- Nazarloo, A., Sharabiani, V. R., Abbaspour-Gilandeh, Y., Chayjan, R. A., & Szymanek, M. (2021). Evaluation of Different Models for Non-Destructive Detection of Tomato Pesticide Residues Based on Near-Infrared Spectroscopy. *Sensors*, 21(9), 3032. <https://doi.org/10.3390/s21093032>
- Noguera, M. Á. D., Millan, B., & Andújar, J. M. (2022). New, Low-Cost, Hand-Held Multispectral Device for In-Field Fruit-Ripening Assessment. *Agriculture*, 13(1), 4. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010004>
- Ozaki, Y., Huck, C. (2021). Introduction. In: Ozaki, Y., Huck, C., Tsuchikawa, S., Engelsens, S.B. (eds) *Near-Infrared Spectroscopy*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-8648-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8648-4_1)
- Ouattara, J.P.N., Pigeon, O. & Spanoghe, P. Validation of a multi-residue method to determine deltamethrin and alpha-cypermethrin in mosquito nets by gas chromatography with electron capture detection (GC- $\mu$ ECD). *Parasites Vectors* 6, 77 (2013). <https://doi.org/10.1186/1756-3305-6-77>
- Oyugi, A. M., Adongo, J. O., Mudalungu, C. M., & Kibet, J. K. (2023). GC/EI-MS and UV-Vis analysis of pesticide residues in cultivated *Catha edulis* Forsk (Khat) from selected farms in Meru County, Kenya. *European Journal of Chemistry*, 14(1), 72–79. <https://doi.org/10.5155/eurjchem.14.1.72-79.2371>
- Pasquini, C.. (2003). Near Infrared Spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 14(J. Braz. Chem. Soc., 2003 14(2)), 198–219. doi: 10.1590/S0103-50532003000200006

- Pheakdey Yun, Maturada Jinorose & Sakamon Devahastin (2023): Rapid smartphone-based assays for pesticides inspection in foods: current status, limitations, and future directions, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, DOI:10.1080/10408398.2023.216689
- Philippe, V., Neveen, A., Marwa, A., & Basel, A. A. (2021). Occurrence of pesticide residues in fruits and vegetables for the Eastern Mediterranean Region and potential impact on public health. *Food Control*, 119, 107457. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107457>
- Prieto N, Pawluczyk O, Dugan MER, Aalhus JL. A Review of the Principles and Applications of Near-Infrared Spectroscopy to Characterize Meat, Fat, and Meat Products. *Applied Spectroscopy*. 2017;71(7):1403-1426. doi:10.1177/0003702817709299
- Raziq, A., Kidakova, A., Boroznjak, R., Reut, J., Öpik, A., & Syritski, V. (2021). Development of a portable MIP-based electrochemical sensor for detection of SARS-CoV-2 antigen. *Biosensors and Bioelectronics*, 178, 113029. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113029>
- Rihan, H. Z., Aldarkazali, M., Mohamed, S. J., McMulkin, N. B., Jbara, M. H., & Fuller, M. (2020). A Novel New Light Recipe Significantly Increases the Growth and Yield of Sweet Basil (*Ocimum basilicum*) Grown in a Plant Factory System. *Agronomy*, 10(7), 934. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070934>
- Rohinee M. Misal, Ratnadeep R. Deshmukh. Application of Near-Infrared Spectrometer in Agro-Food Analysis: A Review. *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887), Volume 141, No.7, May 2016

- Sabri, M. F. M., Endut, R., Rashidi, C. B. M., Laili, A. R., Aljunid, S. A., & Ali, N. (2019). Analysis of Near-infrared (NIR) spectroscopy for chlorophyll prediction in oil palm leaves. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 8(2), 506–513. <https://doi.org/10.11591/eei.v8i2.1412>
- Saddam Heydarov, Musa Aydin, Cagri Faydaci, Suha Tuna, Sadullah Ozturk, Low-cost VIS/NIR range hand-held and portable photospectrometer and evaluation of machine learning algorithms for classification performance, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Volume 37, 2023, 101302, ISSN 2215-0986, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101302>.
- Sankom, A., Mahakarnchanakul, W., Rittiron, R., Sajjaanantakul, T., & Thongket, T. (2021). Detection of Profenofos in Chinese Kale, Cabbage, and Chili Spur Pepper Using Fourier Transform Near-Infrared and Fourier Transform Mid-Infrared Spectroscopies. *ACS Omega*, 6 ( 4 0 ) , 2 6 4 0 4 – 2 6 4 1 5 . <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03674>
- Sánchez, M. L. Z., Flores-Rojas, K., Guerrero, J. M., Garrido-Varo, A., & Pérez-Marín, D. (2010). Measurement of pesticide residues in peppers by near-infrared reflectance spectroscopy. *Pest Management Science*, 66(6), 580–586. <https://doi.org/10.1002/ps.1910>
- Sari, M., Nasution, I. S., & Zulfahrizal, Z. (2019). Prediksi Kadar Air Gabah Menggunakan Near Infrared Reflectance Spectroscopy dengan Metode Principal Component Regression (Pre-treatment Multiplicative Scatter Correction, Second Derivative dan De-trending). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*. <https://doi.org/10.17969/jimfp.v4i1.9830>

Shimadzu Corporation (n.d.), Detectors, 11 มกราคม 2566. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<https://www.shimadzu.com/an/service-support/technical-support/analysis-basics/fundamentals-uv/detectors.html#3>

SparkFun Electronics. (2023). Spectral Triad (AS7 2 6 5 x) Hookup Guide -

[https://learn.sparkfun.com/tutorials/spectral-triad-as7-2-6-5-x-hookup-guide?\\_ga=2.62173996.1230007171.1681279560-1984982252.1679913874#as7265x-arduino-library-overview](https://learn.sparkfun.com/tutorials/spectral-triad-as7-2-6-5-x-hookup-guide?_ga=2.62173996.1230007171.1681279560-1984982252.1679913874#as7265x-arduino-library-overview)

Siamak Faridani (2023). Principal Component Analysis (PCA) in MATLAB

(<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24322-principal-component-analysis-pca-in-matlab>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved May 14, 2023.

Sohn, S., Ramesh, M., Oh, Y., Zaukuu, J. Z., Kang, H., Ryu, T., Cho, W., Cho, Y., Shin, E., & Cho, B. (2021). An Overview of Near Infrared Spectroscopy and Its Applications in the Detection of Genetically Modified Organisms. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(18), 9940. <https://doi.org/10.3390/ijms22189940>

Soltani Nazarloo, A., Rasooli Sharabiani, V., Abbaspour Gilandeh, Y., Taghinezhad, E., Szymanek, M., & Sprawka, M. (2021). Feasibility of using VIS/NIR spectroscopy and multivariate analysis for pesticide residue detection in tomatoes. *Processes*, 9(2), 196. <https://doi.org/10.3390/pr9020196>

Suchart Y. Lecture Notes for “Chapter II : linear Algebic model”, Department of Electrical and Computer Engineering, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand, 2022.



Sulistyo, S. B., Sudarmaji, A., Kuncoro, P. H., & Haryanti, P. (2023). Design and performance test of portable spectrometer using AS7265x multispectral sensor for detection of adulterated cane sugar in granulated coconut sugar. AIP Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1063/5.0106942>

Su-Yan Wang, Xin-Chi Shi, Feng-Quan Liu, and Pedro Laborda. Journal of Agricultural and Food Chemistry 2020 68 (43), 11880-11894. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c04225

The 2014 European Union Report on Pesticide Residues in Food. (2016). EFSA Journal, 14(10), e04611. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4611>

The National Institute of Standards and Technology : NIST (n.d.). Fitting Polynomial Models.

10 เมษายน 2565. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/ppc/section4/ppc431.htm>

The Plant List (2013). Version 1.1. Published on the Internet; <http://www.theplantlist.org/> (accessed 1st January).

Tucker, Alan, "Introduction to Linear Algebra: Models, Methods, and Theory" (1995). Department of Applied Mathematics & Statistics Faculty Books. 1 . <https://commons.library.stonybrook.edu/ams-books/1>

Umapathi, R., Ghoreishian, S. M., Sonwal, S., Rani, G. M., & Yu, J. S. (2021). Portable electrochemical sensing methodologies for on-site detection of pesticide residues in fruits and vegetables. Coordination Chemistry Reviews, 453, 214305 . <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214305>

- Viet-Duc Ngo., Le-Tuan-Anh Hoang., Van-Cong Pham., Van-Hieu Ngo., Phuong-Ha Tran. Estimation of Pesticide Residues on Leafy Vegetables Using a Developed Handheld Spectrometer. (2021d). *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12(6), 8163–8173. <https://doi.org/10.33263/briac126.81638173>
- Walsh, Kerry & Blasco, Jose & Zude-Sasse, M. & Sun, Xudong. (2020). Visible-NIR 'point' spectroscopy in postharvest fruit and vegetable assessment: The science behind three decades of commercial use. *Postharvest Biology and Technology*. 168. 111246. [10.1016/j.postharvbio.2020.111246](https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111246).
- Wang, J., Chiou, J., & Müller, H. (2016). Functional Data Analysis. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 3(1), 257–295. <https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-041715-033624>
- WILLIAMS, P., Antoniszyn, J., & Manley, M. (2019). *Near Infrared Technology: Getting the best out of light* (1st ed.). African Sun Media. <http://www.jstor.org/stable/j.ctv1nzfzcd>
- Xue, L., Cai, J., Li, J., & Liu, M. (2012). Application of Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm to Determine Dichlorvos Residue on the Surface of Navel Orange with Vis-NIR Spectroscopy. *Procedia Engineering*, 29, 4124–4128. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.631>
- Yang, N., Wang, P., Xue, C. C., Sun, J., Mao, H., & Oppong, P. K. (2018). A portable detection method for organophosphorus and carbamates pesticide residues based on multilayer paper chip. *Journal of Food Process Engineering*, 41(8), e12867. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12867>

- Ye, W., Yan, T., Zhang, C., Duan, L., Chen, W., Song, H., Zhang, Y., Xu, W., & Gao, P. (2022). Detection of Pesticide Residue Level in Grape Using Hyperspectral Imaging with Machine Learning. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(11), 1609. <https://doi.org/10.3390/foods11111609>
- Yu, G., Benxue, M., Chen, J., Li, X., Li, Y., & Li, C. (2021). Nondestructive identification of pesticide residues on the Hami melon surface using deep feature fusion by Vis/NIR spectroscopy and 1D-CNN. *Journal of Food Process Engineering*, 44(1). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13602>
- Yu, G., Benxue, M., Li, H., Hu, Y., & Li, Y. (2022). Discrimination of Pesticide Residue Levels on the Hami Melon Surface Using Multiscale Convolution. *Foods*, 11(23), 3881. <https://doi.org/10.3390/foods11233881>
- Yu, G., Ma, B., Li, H., Hu, Y., & Li, Y. (2022). Discrimination of Pesticide Residue Levels on the Hami Melon Surface Using Multiscale Convolution. *Foods*, 11(23), 3881. <https://doi.org/10.3390/foods11233881>
- Wang, H., Yuan, C., Hu, W., & Sun, C. (2012). Supervised class-specific dictionary learning for sparse modeling in action recognition. *Pattern Recognition*, 45(11), 3902–3911. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2012.04.024>
- Zheng, S., Xie, L., & Ying, Y. (2019). Factors influencing near infrared spectroscopy analysis of agro-products: a review. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 6(2), 105. <https://doi.org/10.15302/j-fase-2019255>

Zhang, C., & Su, J. (2014). Application of near infrared spectroscopy to the analysis and fast quality assessment of traditional Chinese medicinal products. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 4 ( 3 ) , 1 8 2 –1 9 2 .  
<https://doi.org/10.1016/j.apsb.2014.04.001>

Zhu, S., Zhang, J., Chao, M., Xu, X., Song, P., Zhang, J., & Huang, Z. (2019). A Rapid and Highly Efficient Method for the Identification of Soybean Seed Varieties: Hyperspectral Images Combined with Transfer Learning. *Molecules*, 25(1), 152.  
<https://doi.org/10.3390/molecules25010152>

Zikankuba, V. L., Mwanyika, G. O., Ntwenya, J. E., & James, A. (2019). Pesticide regulations and their malpractice implications on food and environment safety. *Cogent Food & Agriculture*, 5 ( 1 ) , 1 6 0 1 5 4 4 .  
<https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1601544>

