

การหาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์
ด้วยเทคนิคการดูดกลืนพลังงาน ในย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด

**DETECTION OF NITRATE AND NITRITE IN HYDROPONICS
CHINESE KALE'S LEAVES USING NEAR INFRARED
SPECTROSCOPY**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร

คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-AI-M-053-213

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DETECTION OF NITRATE AND NITRITE IN HYDROPONICS
CHINESE KALE'S LEAVES USING NEAR INFRARED
SPECTROSCOPY**



NAPANUTT SASOMSUB

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN FOOD SCIENCE
FACULTY OF AGRO-INDUSTRY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2014-AI-M-053-213



COPYRIGHT 2014

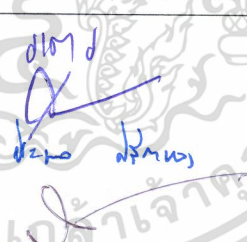
AGRO – INDUSTRY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะอุตสาหกรรมเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การหาปริมาณไนเตรท และไนไตรท์ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ด้วยเทคนิคการ
ดูดกลืนพลังงานแสงในย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด
DETECTION OF NITRATE AND NITRITE IN HYDROPONICS CHINESE
KALE'S LEAVES USING NEAR INFRARED SPECTROSCOPY

ชื่อนักศึกษา นางสาวณัฏฐ์ สะสมทรัพย์
รหัสประจำตัว 54680302
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิทยาศาสตรการอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.ระจิตร สุวพานิช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.ระจิตร สุวพานิช รศ.ดร.สนธิสุข ชีระชัยชยดี ผศ.ดร.ประมวถ ศรีกาหลง รศ.ดร.ระติพร หาเรือนกิจ	

วัน / เดือน / ปีที่สอบ 7 กรกฎาคม 2557 เวลา 14.00 น. เป็นต้นไป
สถานที่สอบ ณ ห้อง A 302 อาคารเจ้าคุณทหาร

คณะอุตสาหกรรมเกษตรรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ ปันศิริโรดม)

คณบดีคณะอุตสาหกรรมเกษตร

วันที่ 13 เดือน ๗ พ.ศ. ๒๕๕๗

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนพลังงานในย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด
นักศึกษา	นางสาวณภณัฐ สะสมทรัพย์
รหัสประจำตัว	54680302
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์การอาหาร
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ระจิตร สุวพานิช

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ของใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์แบบไม่ทำลาย โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานในย่านใกล้อินฟราเรด เพื่อสร้างสมการทำนายปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ของใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ และเปรียบเทียบความแม่นยำของเทคนิคการดูดกลืนพลังงานในย่านใกล้อินฟราเรดกับวิธีวิเคราะห์ทางเคมี ทำการสุมใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์มาวัดสเปกตรัมโดยวัดในช่วงความยาวคลื่น 800 – 2,500 nm และนำใบผักคะน้ามาวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ด้วยเทคนิค HPLC สร้างสมการถดถอยเชิงเส้นด้วยเทคนิค Partial least square regression (PLSR) พบว่าสมการที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายปริมาณไนเตรทและไนไตรท์มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) เท่ากับ -0.1723 และ 1,757.24 ตามลำดับ ค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนาย (RMSEP) เท่ากับ -0.0813 ppm และ 0.0556 ppm ตามลำดับ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการดูดกลืนพลังงานย่านใกล้อินฟราเรดไม่สามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ของใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์แบบไม่ทำลายได้

คำสำคัญ : ไนเตรท, ไนไตรท์, เทคนิคการดูดกลืนแสงแสงย่านใกล้อินฟราเรด, ผักคะน้า, ไฮโดรโปนิคส์, HPLC, NIRs

Thesis title Detection of Nitrate and Nitrite in Hydroponics Chinese Kale's Leaves Using
Near Infrared Spectroscopy

Student Miss. Napanutt Sasomsub

Student ID 54680302

Degree Master of science

Program Food science

Year 2014

Thesis advisor Dr. Rachit Suwapanich

ABSTRACT

Non – destructive determination of nitrate and nitrite in hydroponic Chinese kale's leaves using near infrared spectroscopy (NIRs). The calibration equations to predict nitrate and nitrite content in hydroponic Chinese kale's leaves were developed and compared the precision of NIRs to the reference of standard chemical analysis data. Each hydroponic Chinese kale's leaves were random and measured the spectrum by NIRs, wavelength range from 800 – 2,500 nm. Chinese kale's leaves were analyzed nitrate and nitrite content by HPLC technique. Partial least square regression (PLSR) was used to develop nitrate and nitrite content calibration equations. The correlation coefficients (R) were -0.1723 and 1,757.24 respectively. Root mean squared error of prediction (RMSEP) were -0.0813 ppm and 0.0556 ppm respectively. Results showed that NIRs cannot be used to predict the quantity of nitrate and nitrite in hydroponic Chinese kale's leaves.

Keywords: Nitrate, Nitrite, Near Infrared Spectroscopy, Chinese kale, Hydroponics, HPLC, NIRs

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จขึ้นได้ด้วยความกรุณาของท่านอาจารย์สาขาวิทยาศาสตร์การอาหารทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร.ระจิตร สุวพานิช ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาจนกระทั่งการทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณครอบครัว โดยเฉพาะคุณแม่ (นางวันทนา สะสมทรัพย์) ซึ่งทำงานที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำและให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณบริษัท ไชแอนติฟิค โพรโมชัน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง HPLC และ NIRs และขอขอบคุณพนักงานห้องปฏิบัติการเคมี แผนกเครื่องมือวิเคราะห์ บริษัท ไชแอนติฟิค โพรโมชัน ทุกคนที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง HPLC ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์แก่นิสิต นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป และหากมีข้อความใดหรือเนื้อหาตอนหนึ่งตอนใดผิดพลาดไปเนื่องจากการพิมพ์หรือด้วยเหตุใดก็ตามผู้จัดทำยินดีรับการติชมจากผู้อ่านด้วยใจจริง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VIII
สัญลักษณ์คำย่อและอักษรย่อ.....	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near infrared spectroscopy หรือ NIRs).....	4
2.2 วิธีการสร้างสมการ (Calibration equation).....	9
2.3 วิธีการทดสอบสมการ (Validation test).....	11
2.4 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสมการ.....	12
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้เทคนิค NIRs.....	13
2.6 การประยุกต์ใช้ NIRs ในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร.....	14
2.7 ไนเตรท และไนไตรท์.....	19
2.8 คะน้ำ.....	24
2.9 ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการของผัก.....	25
2.10 การปลูกพืชไร่ดิน.....	26
2.11 ความแตกต่างระหว่างการปลูกพืชบนดินตามธรรมชาติกับปลูก พืชไฮโดรโปนิกส์.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	28
3.2 วิธีการทดลอง.....	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาปริมาณ ไนเตรท และไนไตรท์ ด้วยเทคนิค HPLC.....	34
4.2 การหา Linearity ของสารมาตรฐาน ไนเตรทและไนไตรท์ด้วยเทคนิค HPLC.....	36
4.3 การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี (Method Validation).....	37
4.4 การหาค่า LOD และ LOQ (Limit of detection และ Limit of quantitation).....	40
4.5 การวิเคราะห์ปริมาณ ไนเตรทและไนไตรท์ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์.....	40
4.6 การสร้างสมการในการทำนายปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในใบผักคะน้า ไฮโดรโปนิคส์จากข้อมูลสเปกตรัมโดยใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงาน ในย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด.....	43
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	54
บรรณานุกรม.....	54
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	61
ภาคผนวก ข.....	64
ประวัติผู้วิจัย.....	84

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	การแบ่งช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด.....	5
ตารางที่ 2.2	เกณฑ์การพิจารณาค่า R และ R ²	13
ตารางที่ 2.3	ข้อมูลผลกระทบต่อร่างกายจากสารอาหารในปริมาณสูง.....	20
ตารางที่ 2.4	ปริมาณ Methemoglobin ในร่างกายและลักษณะอาการของโรค Methemoglobinemia.....	23
ตารางที่ 2.5	คุณค่าทางโภชนาการต่อน้ำหนักสด 100 กรัม ของคะน้า.....	26
ตารางที่ 2.6	ปริมาณของไนเตรทในพืชผักตามข้อบังคับของสหภาพยุโรป (European Commodity, EU) ปี พ.ศ. 2536.....	29
ตารางที่ 4.1	ค่า Accuracy และ Precision ของเทคนิค HPLC ด้วยสารมาตรฐานไนเตรท (Within day หรือ Repeatability).....	39
ตารางที่ 4.2	ค่า Accuracy และ Precision ของเทคนิค HPLC ด้วยสารมาตรฐานไนเตรท (Between day หรือ Reproducibility).....	40
ตารางที่ 4.3	ค่า Accuracy และ Precision ของเทคนิค HPLC ด้วยสารมาตรฐานไนไตรท์ (Within day หรือ Repeatability).....	41
ตารางที่ 4.4	ค่า Accuracy และ Precision ของเทคนิค HPLC ด้วยสารมาตรฐานไนไตรท์ (Between day หรือ Reproducibility).....	41
ตารางที่ 4.5	ค่า LOD และ LOQ ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์.....	42
ตารางที่ 4.6	แสดงค่า % Recovery และค่า % RSD ของไนเตรทและไนไตรท์เมื่อ Spike สารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ลงในตัวอย่างใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์.....	43
ตารางที่ 4.7	แสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบ สมการของการทำนายปริมาณไนเตรทในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์.....	47
ตารางที่ 4.8	แสดงความแม่นยำในสร้างสมการในการทำนายปริมาณไนเตรทด้วยวิธี ปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ จำนวน 21 วิธี.....	49
ตารางที่ 4.9	แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ของการทำนายปริมาณไนเตรท.....	49
ตารางที่ 4.10	แสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบ สมการของการทำนายปริมาณไนไตรท์ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 4.11	แสดงความแม่นยำในสร้างสมการในการทำนายปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธี ปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ จำนวน 21 วิธี.....	53
ตารางที่ 4.12	แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ของการทำนายปริมาณไนโตรเจน.....	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2.1	การส่องผ่าน (Transmission).....	5
รูปที่ 2.2	การสะท้อน (Reflection).....	6
รูปที่ 2.3	การส่องผ่านและสะท้อน (Transflection).....	6
รูปที่ 2.4	การส่องแบบ Interaction	6
รูปที่ 2.5	ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัม NIRs.....	7
รูปที่ 2.6	วัฏจักรไนโตรเจน.....	21
รูปที่ 2.7	ผลของสารไนเตรทและไนไตรท์ต่อฮีโมโกลบิน.....	22
รูปที่ 2.8	ลักษณะสีของเลือดเมื่อมีปริมาณ Methemoglobin ในร่างกายต่าง ๆ กัน.....	24
รูปที่ 3.1	แสดงการวัดสเปกตรัมไบฟลักเคน้ำไฮโดรโปนิกส์ด้วยเครื่อง FT - NIR spectrophotometer.....	33
รูปที่ 3.2	แสดงตำแหน่งการวัดสเปกตรัมฟลักเคน้ำไฮโดรโปนิกส์ด้วย เครื่อง FT - NIR spectrophotometer.....	34
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการสกัดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ไนเตรทและไนไตรท์ ด้วยเทคนิค HPLC	34
รูปที่ 4.1	HPLC Chromatogram ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ ความเข้มข้น 100 ppm เมื่อใช้อัตราส่วน Mobile phase A:B เท่ากับ 100:0 (a), 90:10 (b), 80:20 (c) และ 70:30 (d).....	36
รูปที่ 4.2	HPLC Chromatogram ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ ความเข้มข้น 100 ppm เมื่อใช้อัตราส่วน Mobile phase A:B เท่ากับ 60:40 (a), 50:50 (b) และ 0:100 (c).....	37
รูปที่ 4.3	Linearity ของสารมาตรฐานไนเตรทความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm.....	38
รูปที่ 4.4	Linearity ของสารมาตรฐานไนไตรท์ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ppm.....	38
รูปที่ 4.5	HPLC Chromatogram ของตัวอย่างไบฟลักเคน้ำไฮโดรโปนิกส์.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.6	HPLC Chromatogram ของตัวอย่างใบฝักคะน้ำไฮโดรโปนิคส์ที่ Spike สารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ความเข้มข้น 10 ppm..... 43
รูปที่ 4.7	แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานเฉลี่ยของใบฝักคะน้ำไฮโดรโปนิคส์จำนวน 300 ตัวอย่าง..... 45
รูปที่ 4.8	แสดงลักษณะของข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยเทคนิคต่าง ๆ 46
รูปที่ 4.9	แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานเฉลี่ยของกลุ่มใบฝักคะน้ำไฮโดรโปนิคส์ที่ใช้ในการทำนายปริมาณไนเตรท..... 48
รูปที่ 4.10	แสดงผลการทำนายปริมาณไนเตรทในใบฝักคะน้ำไฮโดรโปนิคส์..... 50
รูปที่ 4.11	แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานเฉลี่ยของกลุ่มใบฝักคะน้ำไฮโดรโปนิคส์ที่ใช้ในการทำนายปริมาณไนไตรท์..... 52
รูปที่ 4.12	แสดงผลการทำนายปริมาณไนไตรท์ในใบฝักคะน้ำไฮโดรโปนิคส์..... 54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
NIRs	Near infrared spectroscopy
PLSR	Partial least square regression
R	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)
N	Number of sample
F	Factors
Smoothing	Savitzky - Golay smoothing
1 st derivative	Savitzky - Golay first derivative
2 nd derivative	Savitzky - Golay second derivative
MSC	Multiplicative scatter correction pretreatment
SNV	Standard normal variate transformation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินหรือไฮโดรโปนิคส์ เป็นวิธีการที่พัฒนาขึ้นในประเทศพัฒนาซึ่งมี ปัญหาพื้นที่ทำการเกษตรลดลงเนื่องจากการเจริญเติบโตของชุมชน หรือพื้นที่ที่มีอยู่ไม่เหมาะสม ต่อการทำการเกษตร เป็นวิธีที่ไม่ใช้ดินเป็นวัสดุปลูกแต่พืชจะเจริญเติบโต โดยได้รับธาตุอาหาร จากสารละลายธาตุอาหาร การปลูกพืชโดยวิธีนี้จึงสามารถทำได้ในทุกพื้นที่แม้จะไม่มีที่ดินสำหรับ ปลูกพืชหรือพื้นที่ดินที่มีอยู่ไม่สามารถใช้ปลูกพืชได้ ปัจจุบันไฮโดรโปนิคส์เป็นวิธีการปลูกพืช ที่ใช้แพร่หลายในประเทศต่าง ๆ เช่น ใต้หวัน ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย นิวซีแลนด์ อิสราเอล และประเทศต่าง ๆ ในทวีปยุโรป สำหรับประเทศไทยมีการปลูกพืชด้วยวิธีนี้เป็น เิงพาณิชย์ไม่นานและยังไม่แพร่หลายมาก เนื่องจากเข้าใจกันโดยทั่วไปว่าการปลูกพืชด้วยวิธีนี้เป็น วิธีที่ต้องลงทุนสูงและมีวิธีการที่ยุ่งยากซับซ้อน ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงประกอบกับปัญหา ขาดแคลนพื้นที่ทำการเกษตรยังไม่รุนแรงนัก ยังมีพื้นที่ทำเกษตรกรรมมากมาย สามารถปลูกพืช ด้วยวิธีปกติได้เพียงพอกับความต้องการ จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการอื่นมาทดแทน อย่างไรก็ดีเมื่อมีการตื่นตัวเรื่องการผลิตผักปลอดภัยจากสารพิษในระยะ 5 ปีที่ผ่านมา ได้มีการ ปลูกพืชโดยวิธีไฮโดรโปนิคส์เป็นการค้าเพื่อผลิตพืชผักที่มีคุณภาพในปริมาณที่แน่นอน สสนองความต้องการของซูเปอร์มาร์เก็ต ตลาดพืชผักปลอดภัยจากสารพิษ การปลูกพืชทดแทนพืช นำเข้า และปลูกเพื่อการส่งออก (ฐานความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการท่องเที่ยว, 2551)

การปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ ให้ได้ผลดีนั้น เกษตรกรจำเป็นต้องมีความชำนาญ ในการดูแลและจัดการระบบ เพราะนอกจากปัญหาภายนอกอย่างวัสดุปลูกบางชนิดไม่ย่อยสลาย ซึ่งส่งผลต่อระบบโดยรวมแล้ว ปัญหาเฉพาะที่เกิดขึ้นกับผักที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ คือ ปริมาณไนเตรทที่สะสมอยู่ในใบผักมีปริมาณสูง เนื่องจากปุ๋ยไนโตรเจนของผักไฮโดรโปนิคส์อยู่ ในรูปไนเตรททั้งหมดหรือเกือบทั้งหมด ส่วนผักที่ปลูกในดินได้รับปุ๋ยในรูปอื่นด้วย เช่น ปุ๋ยแอมโมเนียม ยูเรีย และสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบ รวมทั้งผักที่ปลูกในที่ รมครีมนั้นจะมีอัตราการสังเคราะห์แสงน้อยทำให้ไนเตรทไม่ได้ถูกนำไปใช้จึงสะสมอยู่ที่ใบผัก การสะสมไนเตรทนี้ถ้าไปสะสมอยู่ในร่างกายคนมาก ๆ จะจับตัวกับออกซิเจนในเม็ดเลือด (ฮีโมโกลบิน) และส่วนหนึ่งยังเปลี่ยนรูปเป็นสารที่ชื่อว่า ไนโตรซามีน ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (กิตติ, 2554)

เมื่อมองดูจากลักษณะภายนอกไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าผักไฮโดรโปนิคส์นี้มีการสะสมของไนเตรตตกค้างในปริมาณมากเกินกว่าที่ได้กำหนดไว้หรือไม่ ทำให้ผู้บริโภคบางส่วนไม่ให้ความเชื่อถือในผักปลอดสารพิษที่ได้จากการปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์เท่าที่ควร รวมทั้งการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรตโดยวิธีวิเคราะห์แบบมาตรฐาน AOAC เป็นวิธีที่ทำลายตัวอย่างและใช้ระยะเวลาในการตรวจวิเคราะห์ ถ้าผู้บริโภคได้บริโภคผักที่มีการปริมาณไนเตรตสะสมอยู่สูงจะมีแนวโน้มที่สามารถก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ จากภาวะความเสี่ยงดังกล่าวรวมทั้งความเข้าใจที่ว่าต้องใช้เงินลงทุนสูงจึงส่งผลให้การปลูกพืชไร้ดินแบบไฮโดรโปนิคส์ไม่ได้รับความสนใจจากเกษตรกรเท่าที่ควร ทำให้มีปริมาณผลผลิตน้อยไม่เพียงพอต่อความต้องการของกลุ่มผู้บริโภคที่ให้ความสนใจในการเลือกบริโภคผักปลอดสารพิษ รวมทั้งสายการบิน โรงแรม ภัตตาคารและตลาดส่งออก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแหล่งตลาดที่มีความแน่นอนและต้องการผลผลิตอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งผลผลิตจากการปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโปนิคส์นี้อาจทดแทนผลผลิตที่ต้องนำเข้าตามความต้องการของตลาดดังกล่าวได้ ดังนั้นถ้าสามารถวิเคราะห์และคัดแยกผักไฮโดรโปนิคส์ที่มีไนเตรตตกค้างได้สูงกว่าที่กำหนด จะทำให้สามารถแบ่งระดับคุณภาพและแก้ปัญหาการบริโภคผักที่มีสารไนเตรตตกค้างในปริมาณที่สูงเกินกว่าที่กำหนดไว้ได้ และจะส่งผลให้ผักไฮโดรโปนิคส์เป็นที่ยอมรับของตลาดมากขึ้นซึ่งอาจลดปริมาณการนำเข้าผักจากต่างประเทศที่มีราคาแพงได้ รวมทั้งทำให้เกิดความน่าเชื่อถือของผู้บริโภคอีกด้วย

เทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด (Near Infrared Spectroscopy: NIRs) จะช่วยวิเคราะห์ปริมาณไนเตรตตกค้างในผักไฮโดรโปนิคส์โดยการใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงย่านความยาวคลื่นสั้นแบบทะลุผ่านสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ พิสูจน์และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสารซึ่งอาจอยู่ในสถานะของแข็งหรือของเหลวก็ได้ โดยอาศัยหลักการสั่น (Vibration) ของโมเลกุลและดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เทคนิค NIRs เป็นวิธีวิเคราะห์ตัวอย่างโดยไม่ทำลายตัวอย่าง สามารถทำนายค่าได้รวดเร็วและแม่นยำ ประหยัดเวลา ประหยัดค่าใช้จ่ายและลดต้นทุนในการใช้สารเคมี ช่วยตรวจสอบ คัดแยกผักไฮโดรโปนิคส์ที่มีปริมาณไนเตรตตกค้างสูงเกินกว่าที่กำหนด ทำให้เกิดการคัดแยกผักไฮโดรโปนิคส์แบบไม่ทำลายให้เป็นที่น่าพึงพอใจของผู้บริโภคและตลาดส่งออก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสร้างสมการที่ใช้ในการทำนายปริมาณไนเตรตและไนไตรท์ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์โดยใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานในย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด
- 1.2.2 เพื่อให้ได้ข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรตและไนไตรท์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการสร้างสมการเพื่อทำนายปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ซึ่งผลิตโดยฝ่ายเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย จังหวัดปทุมธานี ด้วยเทคนิคการดูดกลืนพลังงานในช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสร้างสมการที่ทำนายปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ได้โดยที่ไม่ทำลายตัวอย่าง เพื่อสร้างความมั่นใจให้แก่ผู้บริโภค ส่งผลดีต่อการลดจำนวนการนำเข้าผักปลอดสารพิษที่มีราคาแพงจากต่างประเทศของประเทศไทย นอกจากนี้ยังได้ผลงานทางวิชาการที่สามารถตีพิมพ์เพื่อเผยแพร่เป็นความรู้ให้แก่บุคคลทั่วไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near infrared spectroscopy หรือ NIRs)

2.1.1 หลักพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้

เมื่อปี ค.ศ.1800 Sir William Herschel ได้ศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ให้ความร้อน (Heating effect) ในช่วงต่าง ๆ ของสเปกตรัม โดยค้นพบ Heating effect สูงสุดในแถบแสงที่อยู่ถัดไปจากแสงสีแดง (Red end) แต่ไม่สามารถมองเห็นสเปกตรัม (Spectrum) ได้ จึงเรียกช่วงรังสีที่ค้นพบว่ารังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) การค้นพบครั้งนี้ถือเป็นการค้นพบที่ยิ่งใหญ่ เพราะรังสีอินฟราเรดประกอบไปด้วยสามช่วงความยาวคลื่นสำคัญ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่างกัน หนึ่งในนั้น คือ ช่วงรังสีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near infrared spectroscopy, NIRs) โดยอาศัยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนในโมเลกุลของตัวอย่าง วิธีนี้ถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดผลิตภัณฑ์ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ตั้งแต่การตรวจสอบวัตถุดิบไปจนถึงการตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เมื่อฉายแสงในช่วงความยาวคลื่น NIRs ลงไปบนตัวอย่าง แสงที่มีพลังงานเพียงพอจะถูกดูดกลืนและกระตุ้นให้เกิดการสั่นของโมเลกุลใน Functional groups ต่าง ๆ (สุมาพร, 2545)

แสงใกล้อินฟราเรด (Near infrared) เป็นคลื่นแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 780 – 2,500 นาโนเมตร เมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ สารเกิดการดูดกลืนแสงในช่วง Near infrared ทำให้โมเลกุลของสารเกิดการสั่นที่มีความถี่สูง ในการสั่นของพันธะต่าง ๆ จะเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกันไปซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละหมู่ฟังก์ชัน ดังนั้นเมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นตรงกับพันธะในโมเลกุลจะเกิดการสั่นและดูดกลืนรังสีไว้ทำให้มีพลังงานมากกว่าปกติ จากเดิมที่โมเลกุลอยู่ในสภาวะพื้น (Ground vibration level) เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจะอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited vibration level) อย่างไรก็ตามเมื่อโมเลกุลกลับสู่สภาวะพื้นก็จะปล่อยพลังงานที่รับเพิ่มเข้าไปออกมาในรูปพลังงานความร้อน ปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสงเป็นไปตามกฎของเบียร์ - แลมเบิร์ต (Beer – Lambert) พลังงานของคลื่นแสงเมื่อผ่านเข้าไปในตัวอย่างจะถูกดูดกลืนไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง ความเข้มข้นของแสงที่ผ่านออกมาโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีนั้น (Osborne และคณะ, 1993)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงคลื่นย่าน Near infrared spectroscopy หรือ NIRs สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังแสดงในตารางที่ 2.1 คือ

ตารางที่ 2.1 การแบ่งช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด

ช่วงคลื่น	ช่วงความยาวคลื่น (nm)	Wavenumber (cm ⁻¹)
Region I	800 – 1100	12500 – 9000
Region II	1200 – 1800	8500 – 5500
Region III	1800 – 2500	5500 – 4000

ที่มา: นิพนธ์ (2545)

Region I

มีชื่อเรียกกันว่า “รังสีเนียร์อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น” (Short wavelength NIR, SWNIR) หรือ “Herschel region” จะพบโอเวอร์โทนที่สองและสาม (2nd and 3rd overtones) และการสั่นรวม (Combination mode) สำหรับการสั่นแบบยืด (Stretching vibration) ของหมู่ฟังก์ชัน X-H, X=C, O, N

Region II

จะพบโอเวอร์โทนที่หนึ่งและการสั่นรวมหลากหลายแบบในการสั่นแบบยืด (Stretching vibration) ของ X-H

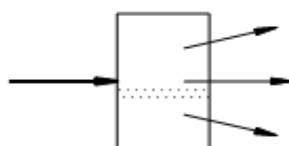
Region III

ส่วนมากจะปรากฏการสั่นรวม (Combination mode)

2.1.2 รูปแบบที่วัดดูมีปฏิกิริยาต่อแสงเนียร์อินฟราเรด (NIRs)

เมื่อเครื่อง NIRs ปล่อยแสงผ่านลงมาตัวอย่างจะเกิดการกระทำกับกับสารได้หลายแบบ ดังนั้นควรมีการจัดการวางตัวอย่างในการใช้เทคนิค NIRs เพื่อให้ได้สเปกตรัมที่สัมพันธ์กับปริมาณค่าทางเคมีที่สนใจ ได้แก่ (ศุมาพร, 2545)

2.1.2.1 Transmission เป็นการวัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมาในด้านตรงข้ามกับด้านที่แสงตกกระทบ ดังรูปที่ 2.1

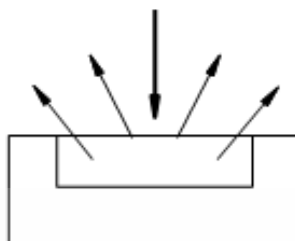


รูปที่ 2.1 การส่องผ่าน (Transmission)

ที่มา : ศุมาพร (2545)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 Reflection แสงตกกระทบพื้นที่ผิวของตัวอย่างวัดปริมาณแสงที่สะท้อนออกมา โดยรวมถึงแสงที่สะท้อนจากเนื้อตัวอย่างส่วนที่ใกล้ผิวตัวอย่างได้อีกด้วย ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การสะท้อน (Reflection)

ที่มา : สุมาพร (2545)

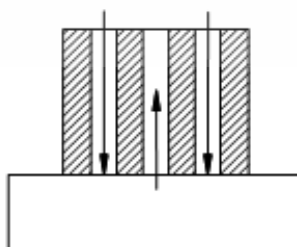
2.1.2.3 Transflection แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบตัวอย่างผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบแผ่นเซรามิก ทอง หรืออะลูมิเนียมในชั้นใต้สุดแล้วสะท้อนกลับมายัง Detector ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การส่องผ่านและสะท้อน (Transflection)

ที่มา : สุมาพร (2545)

2.1.2.4 Interaction ใช้ในกรณี Fiber optics probe แสงจากแหล่งกำเนิดย่าน NIRs ส่องผ่านมายังตัวอย่างในวงแหวนด้านนอก แล้วแสงที่สะท้อนออกมาจากเนื้อตัวอย่างถูกส่งไปยัง Detector บริเวณส่วนกลาง Fiber optics probe ดังรูปที่ 2.4



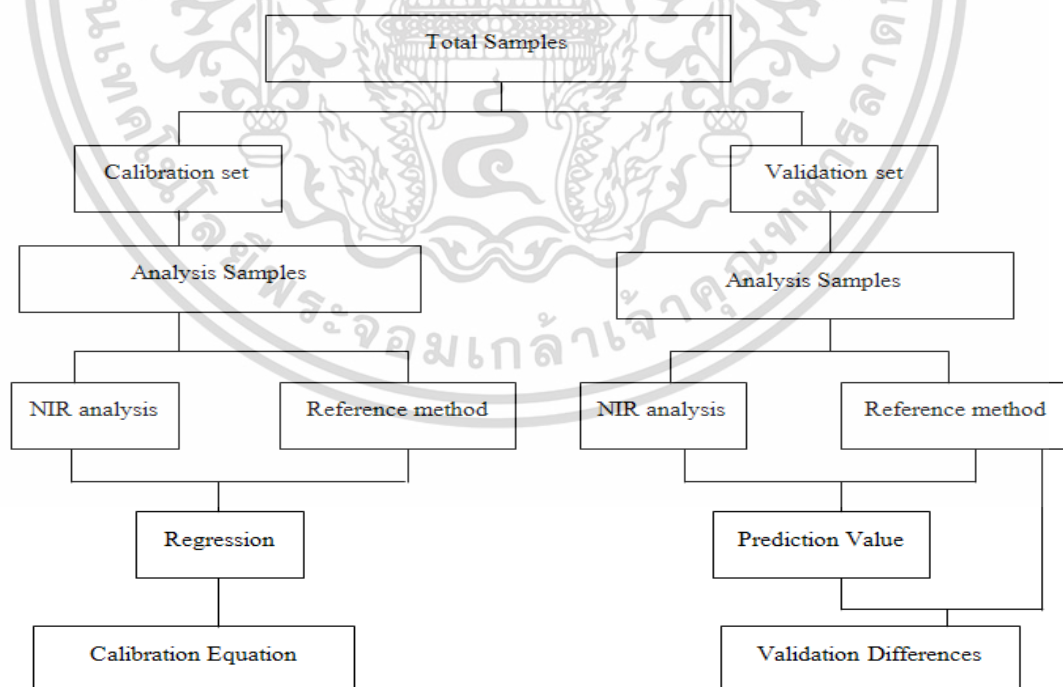
รูปที่ 2.4 การส่องแบบ Interaction

ที่มา : สุมาพร (2545)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูล Near infrared spectra (NIRs)

การดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม NIRs แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งประกอบไปด้วย ขั้นตอน 2 ขั้นตอนหลักเป็นอย่างน้อย คือ ขั้นตอนการสร้างสมการที่ใช้ทำนาย (Calibration set) และขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้นมา (Validation set) ในการสร้างสมการที่ใช้ทำนายก็เพื่อให้ได้สมการมาตรฐานที่ใช้ในการทำนายค่าคุณลักษณะคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทราบ ต่อจากนั้นต้องมีการนำสมการมาตรฐานที่ได้จากการทำ Calibration มาตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของสมการมาตรฐานในการทำนายค่าคุณภาพ ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกว่าการทำ Validation เพื่อทดสอบสมการที่ได้ว่ามีความแม่นยำหรือไม่ เมื่อได้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือแล้ว จึงนำสมการที่ได้ไปใช้ทำนายค่าคุณลักษณะที่ต้องการศึกษาจากสเปกตรัม NIRs ที่ทำการวัดมาได้ โดยกลุ่มตัวอย่างที่ดีจะต้องมีจำนวนตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์อย่างพอเพียงทั้งตัวอย่างในปัจจุบัน และตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ในอนาคต โดยเฉพาะปริมาณองค์ประกอบทางเคมีจะต้องมีค่าครอบคลุมปริมาณทั้งต่ำสุดและสูงสุดของตัวอย่าง โดยมีการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) ที่ถูกต้องเพียงพอและเป็นตัวแทนที่ของประชากร การสุ่มตัวอย่างถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการที่จะได้สมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ดี ทำให้ค่าผิดพลาดที่ได้จากการทดลองลดลง (Hruschka, 2001) นอกจากนี้ควรพิจารณาวิธีวิเคราะห์ทางเคมีซึ่งควรเป็นวิธีที่เป็นมาตรฐานและมีความแม่นยำเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องเนื่องจากส่งผลต่อสมการที่สร้างขึ้นต่อไป (Kawano, 2002)



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัม NIRs

ที่มา: Kawano และคณะ (1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การปรับแต่งข้อมูลก่อนการวิเคราะห์

ปัจจัยที่มีผลต่อสเปกตรัมของตัวอย่าง ได้แก่ ความชื้น และขนาดอนุภาค (Particle size) ซึ่งจะทำให้สเปกตรัมที่ได้มีความแตกต่างกันอันเนื่องมาจากสภาพกระเจิงแสง และความแตกต่างที่เป็นผลมาจากความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ต้องการวัดซึ่งอาจทำให้เกิดความแตกต่างในผลเชิงบวก (Additive scattering) สเปกตรัมเพิ่มขึ้นตามตลอดช่วงความยาวคลื่นหรือผลเชิงคูณ (Multiplicative scattering) สเปกตรัมเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสูงขึ้น นอกจากนี้สเปกตรัมที่ได้จากการดูดกลืนแสงในย่านใกล้อินฟราเรด เป็นสเปกตรัมที่มีการเหลื่อมซ้อนทับกันอยู่ (Overlapping band) ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงนำไปปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ก่อนเพื่อลดความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง วิธีที่นิยมใช้ มี 2 วิธี คือ

2.1.4.1 วิธีอนุพันธ์ (Derivative)

เป็นการหาความชันของเส้นสเปกตรัม เพื่อแก้ปัญหาฟีกที่มีฐานกว้าง (Broad peak) เนื่องจากการซ้อนทับกันของฟีก (Overlapping) และอิทธิพลจากการยกตัวของเส้นสเปกตรัม (Baseline shift) ที่เกิดจากการกระเจิงแสง (Scattering light) เมื่อแสงตกกระทบที่ตัวอย่างทำให้แสงเปลี่ยนทิศทาง ซึ่งมีผลต่อการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากขนาดของตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ การอัดตัว และการกระจายตัวของตัวอย่างภายในเซลล์บรรจุที่แตกต่างกัน รวมทั้งความชื้นภายในตัวอย่างที่แตกต่างกันด้วย (William และ Norris, 2001)

2.1.4.1.1 First derivative เป็นการหาความชันของสเปกตรัมซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นที่ตลอดช่วงความยาวคลื่นหรือการเลื่อนตัวของสเปกตรัมแกน Y เนื่องจากอิทธิพลของความชื้น และขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน การทำ First derivative ทำให้การแปลความหมายยาก ดังนั้นจึงนิยมใช้ Second derivative มากกว่า First derivative

2.1.4.1.2 Second derivative การใช้ Second derivative จะเป็นการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัม สเปกตรัมที่ได้จะมีรูปร่างที่แตกต่างจากสเปกตรัมเริ่มต้น การหาการเปลี่ยนแปลงของความชันสามารถแยกจุดยอดที่เหลื่อมซ้อนกันอยู่ สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี Second derivative ที่ได้จะมีจุดยอดที่เป็นบวกในด้านซ้ายและด้านขวา ส่วนจุดยอดตรงกลางจะอยู่ตรงด้านข้ามที่มีค่ามากที่สุดและตรงกับจุดยอดเริ่มต้น การคำนวณการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัมสามารถแยกจุดยอดของสเปกตรัมที่เหลื่อมซ้อนกันของสเปกตรัมเริ่มต้นได้ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Second derivative จึงเป็นที่นิยมมากกว่าวิธี First derivative

2.1.4.2 Multiplicative scatter correction (MSC)

สเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืนย่านแสง NIRs แบบ Diffuse reflectance และแบบ Transmission มักจะเกิดการกระเจิงแสง (Scatter light) ดังนั้น ได้มีการใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า MSC มาปรับแต่งสเปกตรัม เป็นการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสเปกตรัมเพื่อลดอิทธิพลของการกระเจิงของแสง ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการลดค่าผิดพลาด Barnes และคณะ (1989) ใช้ NIRs แบบวัดการสะท้อนกลับของแสง เพื่อหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดพืช โดยแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี MSC พบว่ามีค่าผิดพลาดของสมการต่ำกว่าสมการของสเปกตรัมดั้งเดิม (Original spectrum)

2.1.4.3 วิธี Smoothing

เป็นการหาค่าเฉลี่ยคลื่น โดยมีการแทนค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความยาวคลื่นด้วยค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีจุดศูนย์กลางในช่วงความยาวคลื่นตรงกับจุดที่ถูกแทนที่ ต่อจากนั้นเลื่อนช่วงไปหนึ่งความยาวคลื่นแล้วคำนวณซ้ำจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ซึ่งสามารถลดปัญหาของสัญญาณรบกวนต่อค่าการดูดกลืนแสง โดยจะได้สเปกตรัมที่มีลักษณะเหมือนสเปกตรัมดั้งเดิมแต่จะเรียบสม่ำเสมอมากกว่า (Siesler และคณะ 2002)

2.2 วิธีการสร้างสมการ (Calibration equation)

สมการ Calibration ประกอบไปด้วยตัวแปร 2 ชนิด คือ ตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) การหาตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรตามเป็นสิ่งสำคัญของการสร้างสมการ Calibration ซึ่งแบ่งได้ 2 วิธีหลัก คือ

2.2.1 Wavelength selection

เป็นการเลือกความยาวคลื่นเฉพาะซึ่งเป็นตัวแปรอิสระให้มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรตามนั้น โดยการพิจารณาจากข้อมูลทางสถิติ ดังนี้

2.2.1.1 Simple linear regression (SLR)

เป็นการสร้างสมการที่ประกอบด้วยตัวแปรสองชนิดที่มีความสัมพันธ์กัน คือ ตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) SLR เป็นการเลือกพิจารณาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างที่ความยาวคลื่นเพียงความยาวคลื่นเดียว (Single wavelength) การวิเคราะห์ห่องค์ประกอบทางเคมีด้วย NIRs เป็นไปไม่ได้ที่จะใช้ความยาวคลื่นใด ความยาวคลื่นหนึ่งในการหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้ เนื่องจากตัวอย่าง ประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิดด้วยกัน ดังนั้นจึงต้องใช้ข้อมูลจากหลายความยาวคลื่น (Multiple wavelengths) เพื่อทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของผลผลิต (ศุมาพร, 2545) สมการ SLR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Y = b_0 + b_1X$$

- เมื่อ $Y =$ ค่าองค์ประกอบทางเคมี
 $X =$ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นตำแหน่งเดียว
 $b_0 =$ ค่าคงที่ ณ จุดตัดแกน Y เมื่อ X มีค่าเท่ากับศูนย์
 $b_1 =$ ค่าคงที่การถดถอย

2.2.1.2 Multiple linear regression (MLR)

เป็นวิธีการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่นำตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) มากกว่าหนึ่งตัวมาใช้ในการประมาณค่าตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) การนำเทคนิค MLR มาใช้ในการวิเคราะห์ผลมีข้อดีมากกว่าวิธี SLR หลายประการ เช่น สมการที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้กับตัวอย่างที่มีองค์ประกอบซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตามการสร้างสมการด้วยวิธี MLR มีข้อเสีย คือ การคัดเลือกตัวแปรอิสระหรือค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลทางเคมีต้องใช้เวลาจำนวนมากของตัวแปรอิสระหรือจำนวนของความยาวคลื่นที่นำมาใช้ในการสมการจะถูกกำจัดโดยจำนวนของตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบ ต้องมีตัวอย่างจำนวนมากเพื่อให้สมการที่สร้างขึ้นมีความถูกต้องและแม่นยำ การคัดเลือกตัวแปรอิสระหรือความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดมาสร้างสมการอาจได้ข้อมูลที่ไม่ครอบคลุมมากพอ ทำให้ค่าที่ทำนายได้จากวิธีนี้มีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่แท้จริง (Osborne และคณะ, 1993) สมการ MLR สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 \dots + b_nX_n$$

- เมื่อ $X_1, X_2, \dots, X_n =$ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น n ตำแหน่ง
 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n =$ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ความยาวคลื่น n ตำแหน่ง

2.2.2 Full spectrum method

การที่จะพิจารณาเลือกความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่าองค์ประกอบที่ศึกษานั้นค่อนข้างทำได้ยาก เกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย การใช้ข้อมูลสเปกตรัมทั้งหมดหรือในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจจะช่วยให้สมการ Calibration ที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น Full spectrum method เป็นการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม จากความยาวคลื่นทั้งหมดในสเปกตรัม (Full spectrum) มาสร้างสมการโดยทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (X) และสร้างตัวแปรกลุ่มใหม่ขึ้นมา วิธีการสถิติที่นิยมใช้ได้แก่ 2 วิธี คือ Principle component regression (PCR) และ Partial least square regression (PLSR) ทั้งสองวิธีนี้ต้องใช้ในการสร้างตัวแปรใหม่ที่เรียกว่า Factor หรือองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.1 Principle component regression (PCR)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดจำนวนของตัวแปรอิสระ ในกรณีที่ตัวแปรอิสระมีจำนวนมาก การลดจำนวนของตัวแปร คือ แบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่ เรียกว่า Factor หรือองค์ประกอบ Factor ที่สร้างขึ้นก็คือผลรวมของค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นที่น้ำหนักแตกต่างกัน Factor แรกจะถูกสร้างขึ้นมาให้สามารถอธิบายความแปรปรวนที่เหลือ ซึ่งจะทำให้ Factor แต่ละ Factor แทบไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการวิเคราะห์ด้วย PCR เมื่อทำการหา Factor เรียบร้อยแล้ว นำ Factor ที่ได้มาทำ Regression กับค่าทางเคมีโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ก็จะได้ค่า Calibration coefficient

2.2.2.2 Partial least square regression (PLSR)

วิธีจะคล้ายคลึงกับ PCR แต่จะต่างกันตรงที่วิธี PCR กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมจะเป็นอิสระจากกระบวนการทำสมการถดถอยของสมการ Calibration ซึ่งใน PLSR ทั้งสองกระบวนการจะถูกเชื่อมโยงเข้าไว้ด้วยกัน โดยมีการนำค่าองค์ประกอบทางเคมีมาคิดรวมข้อมูลและเกี่ยวข้องกับการประเมินค่าทางเคมี ทำให้ Factor ที่ได้จากวิธี PLSR สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลและเกี่ยวข้องกับการประเมินค่าทางเคมีในเวลาเดียวกันสมการ Calibration ที่ได้จากวิธี PLSR จึงประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น Saranwong (2003) ได้ศึกษาการพัฒนาสมการที่ใช้ในการทำนายค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solid) และค่าน้ำหนักเนื้อแห้ง (Dry matter) ของมะม่วงด้วยวิธี PLSR กับ MLR ในการสร้างสมการทำนายพบว่าวิธี PLSR ให้ค่าผิดพลาดของสมการทำนายของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่ำกว่าวิธี MLR แต่สำหรับสมการทำนายค่าน้ำหนักเนื้อแห้งด้วยวิธี PLSR กับ MLR ที่สร้างขึ้นให้ค่าไม่แตกต่างกัน

2.3 วิธีการทดสอบสมการ (Validation test)

เมื่อได้สมการ Calibration แล้วจะต้องนำสมการที่ได้มาทดสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพของสมการว่าสามารถใช้ในการประเมินค่าได้แม่นยำมากน้อยเพียงใด วิธีที่นิยมใช้ในเทคนิค NIRs มี 2 วิธี คือ

2.3.1 Full cross validation

วิธีนี้การทดสอบในลักษณะนี้เป็นการทดสอบภายใน (Internal validation) มีวิธีทดสอบดังนี้ คือ

ตอนที่ 1 ตัดตัวอย่างที่ 1 ออกไปจากกลุ่ม Calibration แล้วนำตัวอย่างที่เหลือมาสร้างสมการ Calibration เมื่อได้สมการ Calibration แล้วก็นำมาประเมินค่าตัวอย่างที่ 1 ที่ตัดไปก่อนหน้านี้

ตอนที่ 2 ตัดตัวอย่างที่ 2 ออกไป นำตัวอย่างที่ 1 กลับเข้ามาในกลุ่ม Calibration ร่วมกับตัวอย่างอื่น ๆ ที่เหลือเพื่อสร้างสมการ Calibration เมื่อได้สมการ Calibration นำมาประเมินค่าของตัวอย่างที่ 2 ทำซ้ำอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งประเมินค่าตัวอย่างครบทุกตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างแต่ละตัวจะถูกตัดออก 1 ครั้งเท่านั้น

การทดสอบภายใน (Internal validation) จะวัดผลโดยการดูค่า RMSECV (Root mean square error of cross validation) เป็นการวัดค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการประเมินโดยใช้สมการ Calibration กับค่าที่วิเคราะห์ได้ (Measured value or true value) ให้ค่าที่ยอมรับได้ การใช้วิธี Full cross validation มักใช้กับวิธีการวิเคราะห์โดยวิธี PLSR ไม่นิยมใช้กับวิธีการวิเคราะห์โดยวิธี MLR

2.3.2 การทดสอบผลการประเมิน (Prediction testing)

เป็นการทดสอบโดยนำกลุ่มตัวอย่างชุดใหม่ (External validation) มาประเมินค่าจากสมการ Calibration ที่ได้โดยตัวอย่างชุดใหม่ที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีวิธีการเตรียมตัวอย่าง การวัดสเปกตรัมสถานะในการทดลอง รวมไปถึงการแปลงข้อมูลสเปกตรัมต้องเหมือนกับกลุ่ม Calibration ข้อควรระวัง คือ ตัวอย่างในกลุ่มใหม่จะต้องมีค่าที่ต้องการประเมินอยู่ในช่วงของกลุ่ม Calibration การทดสอบลักษณะนี้ มีวิธีการ คือ นำตัวอย่างกลุ่มใหม่มาวิเคราะห์หาค่าที่ต้องการ เช่น ค่าโปรตีน โดยใช้วิธีการแบบ Reference methods แทนด้วยข้อมูลชุด X และนำไปวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIRs แล้วนำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการ Calibration แทนด้วยข้อมูลชุด Y นำผลที่ได้จากทั้งสองวิธีมาพิจารณาเปรียบเทียบโดยมีค่าทางสถิติที่ใช้วัดคือ SEP (Standard error of prediction) หรือ RMSEP (Root mean square error of prediction) และ bias ซึ่งค่าสถิติเหล่านี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของสมการ Calibration ถ้าผลการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับผลที่อ้างอิงและให้ค่าทางสถิติที่ดีแสดงว่าสมการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีนั้นยอมรับได้ และสามารถนำไปใช้ทำนายปริมาณตัวอย่างต่อไปได้อย่างถูกต้อง (อนุพันธ์, 2545)

2.4 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสมการ

2.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient; R) คือค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) หากค่าที่คำนวณได้มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1 หมายความว่า สมการที่สร้างขึ้น สามารถนำมาใช้ในการอธิบายค่าทำนาย ที่เกิดจากอิทธิพลของตัวแปรอิสระ (X) กับค่าแปรตาม (Y) ที่มีความสัมพันธ์กันมาก

2.4.2 ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มสร้างสมการ (Standard error of calibration; SEC) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงสมการที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการทำนายต่อไปได้ดีหรือไม่ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย

2.4.3 ค่าผิดพลาดมาตรฐานในกลุ่มทดสอบสมการ (Standard error of prediction; SEP) คือ ค่าที่บอกถึงการนำเอาสมการที่สร้างขึ้น มาทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากเครื่อง NIRs มีความแม่นยำสูงหรือต่ำ ซึ่งถ้าค่าที่คำนวณได้มีค่าน้อย หมายความว่าสมการที่สร้างขึ้น มีความแม่นยำสูง

2.4.4 ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิงกับค่าที่ได้จาก NIRs (Average of difference between actual value and NIR value; bias) คือ ค่าเฉลี่ยของการทำนายข้อมูลของ ตัวแปรตาม (Y) และค่าเฉลี่ยข้อมูลของตัวแปรอิสระ (X) มีความแตกต่างกันหรือไม่ ค่าที่คำนวณได้ ควรมีค่าน้อย

2.4.5 อัตราส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่ม Validation set ต่อค่า SEP (Ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP; RPD) ค่าจากที่คำนวณได้มีค่าสูง หมายถึง ค่าผิดพลาดมาตรฐานที่ทำนายได้จาก NIRs มีค่าน้อยกว่าค่าผิดพลาดมาตรฐานที่ได้จาก วิเคราะห์จริง

ตารางที่ 2.2 เกณฑ์การพิจารณาค่า R และ R²

Value of R	Value of R ²	Interpretation
Up to ± 0.5	5 Up to 0.25	Not usable in NIRs calibration
$\pm 0.51 - 0.70$	0.26 - 0.49	Poor correlation, research the reasons
$\pm 0.71 - 0.80$	0.50 - 0.64	Rough screening
$\pm 0.81 - 0.90$	0.66 - 0.81	Screening and approximate calibration
$\pm 0.91 - 0.95$	0.83 - 0.90	Usable with caution for most applications, including research
$\pm 0.96 - 0.98$	0.92 - 0.96	Usable in most applications, including quality assurance
$\pm 0.99 >$	0.98 >	Usable in any application

ที่มา: Williams (2007)

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้เทคนิค NIRs

2.5.1 ขนาดของอนุภาค

ขนาดของอนุภาคเป็นแหล่งของความผิดพลาดที่สำคัญ เพราะขนาดของตัวอย่างมีความสัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติขององค์ประกอบของสาร โดยตัวอย่างขนาดเล็กสามารถสะท้อนแสงได้ดีกว่าตัวอย่างขนาดใหญ่ ดังนั้น ค่าการดูดกลืนแสงของเส้นสเปกตรัมตัวอย่างขนาดเล็กจึงมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างขนาดใหญ่ (Osborne และคณะ, 1993) ขนาดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคยังขึ้นอยู่กับเตรียมตัวอย่างอีกด้วย เพราะจะทำให้การวัดค่าองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน จึงควรใช้การเตรียมตัวอย่างแบบเดียวกันทุกครั้งที่ทำกรวัดและควรให้มีขนาดใกล้เคียงกัน

2.5.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของตัวอย่างระหว่างการวัดโดยใช้ NIRs อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการวัด องค์ประกอบทางเคมี Guyer และคณะ (2006) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในพริกหยวก พบว่าเมื่อ อุณหภูมิของตัวอย่างที่ -5 องศาเซลเซียส ความแน่นเนื้อที่วัดได้จะสูงกว่าการใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส แต่เมื่อวัดค่าความแน่นเนื้อของตัวอย่างที่ 45 องศาเซลเซียส ความแน่นเนื้อที่วัดได้จะต่ำกว่าค่าจริง 0.5% ทำการแก้ไขโดยควบคุมอุณหภูมิของห้องทดลองให้คงที่

2.5.3 ความชื้น

เป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการอ่านค่าองค์ประกอบทางเคมี ความชื้น อาจสูญเสียไปได้จากการเตรียมตัวอย่างและการเก็บตัวอย่าง Greensill และ Walsh, (2000) ได้ศึกษา ความแปรปรวนของความชื้นในลูกพลัม พบว่าลูกพลัมที่มีความชื้นสูงจะทำให้การอ่านค่าผิดไปจาก ค่าจริงมาก

2.6 การประยุกต์ใช้ NIRs ในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร

การใช้ประโยชน์ทางด้านเทคนิค NIRs ค่อนข้างจะแพร่หลายมากขึ้น ส่วนมากจะนำมาใช้ ในอุตสาหกรรมเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร เพราะเป็นการตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบและ ผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการตรวจสอบคุณภาพของผลไม้ ซึ่งมีงานวิจัยจาก ต่างประเทศมากมายที่วิจัยเกี่ยวกับการใช้เทคนิค NIRs ตรวจสอบคุณภาพของผลไม้ เช่น

พัลลภ และคณะ (2544) ศึกษาการตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุดโดยใช้เทคนิค การดูคลื่นแสงย่านใกล้อินฟราเรด พบว่าสามารถแยกผลมังคุดที่มีลักษณะเนื้อแก้วออกจากมังคุด ปกติได้ และได้สมการทำนายค่าความแน่นเนื้อของผลมังคุดโดยมีค่า $R = 0.92$, $SEE = 0.879$, $SEP = 1.016$ และ $Bias = 3.905 \times 10^{-15}$ และได้สมการทำนายค่า Degree of Elasticity โดย มีค่า $R = 0.92$, $SEE = 0.077$, $SEP = 0.076$ และ $Bias = 3.706 \times 10^{-16}$ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เทคนิคการดูคลื่นแสงย่านใกล้อินฟราเรดมีความเป็นไปได้ที่จะใช้คัดแยกมังคุดเนื้อแก้วออกจาก มังคุดปกติ ทำนายค่าความแน่นเนื้อและค่า Degree of Elasticity ของผลมังคุดได้

พัชรารัตน์ และเอกชัย (2545) ศึกษาการตรวจสอบคุณภาพเนื้อสัมผัสของมะม่วงพันธุ์ น้ำดอกไม้โดยใช้เทคนิคการดูคลื่นแสงย่านใกล้อินฟราเรด ที่ช่วงความยาวคลื่นที่ 800 – 2,500 nm โดยใช้วิธี MLR และตรวจวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดของมะม่วงพันธุ์ น้ำดอกไม้ในช่วงความยาวคลื่นที่ 800 – 2,500 nm โดยใช้วิธี PLS พบว่าสมการทำนายคุณภาพเนื้อ สัมผัสซึ่งวัดได้จากค่า Energy Absorption ในช่วงความยาวคลื่นที่มีค่าการดูดกลืนแสงดีที่สุด คือ

1,178 – 2,420 nm มีค่า $R = 0.813$, $SEE = 0.021$, $SEP = 0.255$ และ $Bias = -1.32 \times 10^{-6}$ และสมการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเปิดใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้และและปริมาณกรดซึ่งมีในช่วงความยาวคลื่นที่มีค่าการดูดกลืนแสงดีที่สุด คือ 880 – 1,800 nm มีค่า R = 0.894 และ 0.906, SEE = 0.792 และ 0.336, SEP = 1.119 และ 0.623 และ Bias = -0.06 และ -0.273 ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ทำนายคุณภาพเนื้อสัมผัสปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้

อาทิตย์ (2549) ศึกษาการตรวจสอบคุณภาพภายในผลแก้วมังกรพันธุ์เบอร์ 100 ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด ที่ช่วงความยาวคลื่น 1,100 – 2,500 nm พบว่าสามารถทำนายค่าปริมาณกรดและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในผลแก้วมังกร ให้ผลการทำนายค่อนข้างแม่นยำ โดยการทำให้ค่าความแม่นยำเพิ่มขึ้นต้องอาศัย การเลือกช่วงความยาวคลื่น การนำค่าทางเคมีและสเปกตรัมมาเฉลี่ยในหนึ่งผลแล้วสร้างสมการด้วยวิธี PLS และการใช้ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงค่าความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับเปลือกมาหารตลอดความยาวคลื่นแล้วสร้างสมการด้วยวิธี PLS จะช่วยให้สมการทำนายค่าปริมาณกรดมีความแม่นยำมากขึ้น

จิตตรา (2552) ศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง โดยใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด ที่ช่วงความยาวคลื่นที่ 600 – 1,100 nm โดยก่อนทำข้อมูลชุด Calibration จะใช้เทคนิค PCA เพื่อตรวจสอบข้อมูลที่ผิดปกติจากกลุ่ม จากนั้นสร้างโมเดลด้วยวิธี PLSR สร้างสมการทำนายหมู่องค์ประกอบของน้ำมันหอมระเหย พบว่าสมการทำนายหมู่องค์ประกอบของน้ำมันหอมระเหยชนิด Beta – phellandrene ที่สเปกตรัมเดิม (Original spectra) และชนิด Nootkatone ที่ปรับสเปกตรัมด้วยวิธี Full MSC มีค่า R = 0.89 และ 0.82 ตามลำดับ และมีค่า SEP = 0.39 และ 0.11%w/w ตามลำดับ และค่า Bias = 0.39 และ 0.01%w/w ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ทำนายหมู่องค์ประกอบของน้ำมันหอมระเหยชนิด Beta – phellandrene และชนิด Nootkatone จากเปลือกส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

จรรยาพงศ์ (2552) ศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งด้วยการใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด ในช่วงความยาวคลื่นที่ 633 – 961 nm โดยตรวจวัดสเปกตรัมจากผิวส้มโอและเนื้อส้มโอ รวมทั้งทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้โดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดในห้องปฏิบัติการ จากการสังเกตสเปกตรัมที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของส้มโอ พบว่าสเปกตรัมของผิวส้มโอมีความยาวคลื่นที่มีการดูดซับคลื่นมากที่สุดที่ 970 nm ส่วนสเปกตรัมของเนื้อส้มโอมีความยาวคลื่นที่มีการดูดซับคลื่นมากที่สุดที่ 680 และ 970 nm จากผลการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอพบว่าการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวโดยการวัดสเปกตรัมที่ผิวส้มโอที่ความยาวคลื่น 633 – 961 nm ได้ผลการคัดแยกดีกว่าช่วงความยาวคลื่น 400 – 700 nm ส่วนสมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มีค่า R = 0.87 และ SEP = 0.35

และ Bias = 0.051 ดังนั้นเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดนี้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้ในการคัดแยกอายุการเก็บเกี่ยวของส้มโอและทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของ ส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง

ศุภกิจ (2552) ใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด ในช่วงความยาวคลื่นที่ 1,100 – 2,500 nm ในการทำนายองค์ประกอบของน้ำผึ้งและแบ่งกลุ่มน้ำผึ้งที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐาน โดยวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำตาลฟรุกโตส กลูโคส และซูโครส ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และความชื้นของน้ำผึ้ง โดยก่อนทำชุดข้อมูล Calibration ได้ใช้วิธี PCA เพื่อตรวจสอบข้อมูลที่ผิดปกติจากกลุ่ม จากนั้นสร้างโมเดลด้วยวิธี PLSR พบว่าสมการทำนายปริมาณน้ำตาลฟรุกโตสที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี 1st derivative มีค่า R = 0.851, SEP = 7.69% และ Bias = 0.031% สมการทำนายปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี 1st derivative มีค่า R = 0.807, SEP = 6.15% และ Bias = 0.47% สมการทำนายปริมาณน้ำตาลซูโครสปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี 2nd derivative มีค่า R = 0.937, SEP = 4.07% และ Bias = 0.28% สมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี 2nd derivative มีค่า R = 0.965, SEP = 0.57%Brix และ Bias = -0.23%Brix สมการทำนายความชื้นปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี MSC มีค่า R = 0.979, SEP = 0.47% และ Bias = 0.11% ส่วนการแบ่งกลุ่มของน้ำผึ้งจะใช้วิธี PLS - DA และ SIMCA ในการแบ่งกลุ่มน้ำผึ้งที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐาน พบว่าวิธี PLS - DA สามารถแบ่งกลุ่มน้ำผึ้งที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐานได้ถูกต้องกว่าวิธีแบบ SIMCA ซึ่งค่าการแบ่งกลุ่มนั้นพบว่าโมเดลของน้ำผึ้งที่ได้มาตรฐานจะทำนายตัวเองได้ถูกต้อง 92.3% และทำนายกลุ่มอื่นได้ถูกต้อง 100% ส่วนโมเดลของน้ำผึ้งที่ไม่ได้มาตรฐานจะทำนายตัวเองได้ถูกต้อง 100% และทำนายอีกกลุ่มหนึ่งได้ถูกต้อง 92.3% ซึ่งการทำนายโดยรวมมีความถูกต้อง 95.8% จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ทำนายองค์ประกอบของน้ำผึ้งและแบ่งกลุ่มน้ำผึ้งที่ได้มาตรฐานและไม่ได้มาตรฐาน

ปาริชาติ และคณะ (2553) ศึกษาอิทธิพลของตำแหน่งบนผลมะม่วงในการวัดสเปกตรัมเพื่อประเมินคุณภาพด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด ทำการวัดสเปกตรัมของผลมะม่วงที่ตำแหน่งไหล่ แก้ม และปลายผล ที่ความยาวคลื่น 700 – 1,100 nm พบว่าสเปกตรัมของผลมะม่วงพบพีคที่ชัดเจนที่ความยาวคลื่น 978 nm คือ แถบการดูดกลืนแสงของน้ำ ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำในผลมะม่วงที่ตำแหน่งแก้มทั้งผลดิบมีค่าเท่ากับ 1.16 ซึ่งมีค่าสูงกว่าตำแหน่งไหล่และปลายผลซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.03 และ 1.02 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปรของค่าการดูดกลืนแสงของน้ำที่ตำแหน่งแก้มของผลมะม่วงดิบมีค่าเท่ากับ 6.9 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่ตำแหน่งไหล่และปลายผลซึ่งมีค่าเท่ากับ 14.6 และ 16.7 ตามลำดับ จากผลการทดลองสรุปได้ว่าตำแหน่งของผลมะม่วงมีอิทธิพลต่อความแปรปรวนของสเปกตรัม ซึ่งสัมพันธ์กับความแม่นยำในการประเมินคุณภาพมะม่วงด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด

อาทิตย์ และคณะ (2553ก.) ศึกษาการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของผลล่องกองด้วยการใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดในช่วงคลื่นสั้น โดยการใช้วิธีทฤษฎีอนุพันธ์อันดับ 2nd derivative มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) ดีที่สุด และมีค่า RMSEC ต่ำที่สุด คือ 0.935 และ 0.396 จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดในช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่านมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของผลล่องกองแบบไม่ทำลายได้อย่างแม่นยำ

อาทิตย์ และคณะ (2553ข.) ศึกษาการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดทั้งหมดของส้มโอตัดแต่งด้วยการใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดในช่วงคลื่นสั้นในช่วงความยาวคลื่น 400 – 1,028 nm พบว่าสมการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มีค่า R = 0.835, SEP = 0.383 และ Bias = -0.0054 และสมการทำนายปริมาณกรดทั้งหมดมีค่า R = 0.687, SEP = 0.063 และ Bias = -0.0003 จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคแสงย่านใกล้อินฟราเรดในช่วงคลื่นสั้นมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และปริมาณกรดทั้งหมดของส้มโอตัดแต่ง

สนธิสุข และคณะ (2554) ศึกษาการคัดแยกมังคุดเปลือกแข็งโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดแบบทะลุผ่าน พบว่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุดในการคัดแยกคือ 717 nm และได้ผลวิเคราะห์ความถูกต้องในการคัดแยกด้วยวิธี Leave – one – out cross validation จากสมการคัดแยกกลุ่ม Fisher เท่ากับ 80.8% ซึ่งกล่าวได้ว่าการใช้เทคนิคการวิเคราะห์พหุตัวแปรมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการทำนายมังคุดเปลือกแข็ง

Villareal และคณะ (1994) ได้วิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสของข้าวด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด แบบ Transmittance mode ที่ช่วงความยาวคลื่นที่ 800 – 1,050 nm เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการทำนายปริมาณอะไมโลสของข้าวกล้องและข้าวสาร วิเคราะห์ผลด้วยวิธี PLSR โดยสมการทำนายปริมาณอะไมโลสของข้าวกล้องและข้าวสารมีค่า R = 0.87 และ 0.98 จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าการทำนายปริมาณอะไมโลสด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด แบบ Transmittance mode ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี

Delwiche และคณะ (1996) ศึกษาปริมาณอะไมโลสของข้าวขาวเต็มเมล็ดด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด แบบ Reflectance mode ที่ช่วงความยาวคลื่นที่ 1,110 – 1,800 nm วิเคราะห์ผลด้วยวิธี PLS พบว่าสมการทำนายปริมาณอะไมโลสมีค่า R = 0.887, SEP = 1.33% จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดแบบ Reflectance mode มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ทำนายปริมาณอะไมโลสของข้าวขาวเต็มเมล็ด

Bao และคณะ (2001) ได้วิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสของข้าวที่ปลูกในประเทศจีนด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด แบบ Reflectance mode ในช่วงความยาวคลื่นที่ 400 – 2,500 nm วิเคราะห์ผลด้วยวิธี PLS พบว่าสมการทำนายปริมาณอะไมโลสมีค่า $R = 0.960$, $SEP = 1.39\%$ และ $Bias = -0.17\%$ ผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดแบบ Reflectance mode มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ทำนายปริมาณอะไมโลสของข้าวที่ปลูกในประเทศจีน

Manuela และคณะ (2002) ทำนายการปริมาณน้ำตาลของผล Grapefruit ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ คือ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด ในช่วงความยาวคลื่นที่ 1,100 – 1,500 nm แบบ Reflectance mode และวิเคราะห์สเปกตรัมที่วัดได้ด้วยวิธี PLS และใช้โปรแกรม พบว่าสมการทำนายปริมาณน้ำตาลซูโครส มีค่า $R = 0.65$, $SEC = 0.8$ และ $SECV = 1.2$ ส่วนสมการทำนายปริมาณน้ำตาลกลูโคส มีค่า $R = 0.84$, $SEC = 0.6$ และ $SECV = 0.9$ และสมการทำนายปริมาณน้ำตาลฟรุกโตส มีค่า $R = 0.74$, $SEC = 0.8$ และ $SECV = 1.1$ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ทำนายปริมาณน้ำตาลของผล Grapefruit ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ

Shao และคณะ (2007) ได้นำเทคนิค Vis – NIRs มาใช้เพื่อประเมินคุณภาพภายในของมะเขือเทศ ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และค่าความเป็นกรดต่างแบบไม่ทำลายในช่วงความยาวคลื่น 400 – 2,350 nm พบว่าสมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มีค่า $R = 0.90$ และ $SEP = 0.19$ และสมการทำนายค่าความเป็นกรดต่างมีค่า $R = 0.83$ และ $SEP = 0.09$ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิค Vis – NIRs มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และค่าความเป็นกรดต่างของมะเขือเทศ

Liu และคณะ (2008) ได้นำเทคนิค Vis – NIRs มาใช้ทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และความแน่นเนื้อของผลลูกแพร์แบบไม่ทำลาย ในช่วงความยาวคลื่น 350 – 1,800 nm พบว่าการปรับสเปกตรัมแบบ 2nd derivative มีค่า R ที่ดีที่สุด และมีค่า RMSEP ที่ต่ำที่สุดของสมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 0.912 และ 0.662 ตามลำดับ และค่า R ที่ดีที่สุดและค่า RMSEP ที่ต่ำที่สุดของสมการทำนายค่าความแน่นเนื้อเท่ากับ 0.854 และ 1.232 ตามลำดับ จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าเทคนิค Vis – NIRs สามารถทำนายได้ถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยไม่ทำลายคุณภาพภายในของลูกแพร์

Guoqiang และคณะ (2009) ได้นำเทคนิค Vis/NIRs มาใช้ทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และความแน่นเนื้อในผลแอปเปิ้ลฟูจิ โดยใช้ช่วงความยาวคลื่นที่ 650 – 920 nm ในขั้นตอนการทำ Calibration เกิดจุด Peak ที่ไม่ชัดเจน แก้ไขโดยวิธี PLS และปรับแต่งเส้นสเปกตรัมด้วยวิธี Second derivative พบว่าสมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มีค่า $R = 0.9532$ และ $SEP = 0.3838$ และสมการทำนายค่าความแน่นเนื้อมีค่า $R = 0.8136$ และ $SEP = 0.5344$ จากผลการ

ทดลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิค Vis – NIRs มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และค่าความแน่นเนื้อในผลแอปเปิ้ลฟูจิ

2.7 ไนเตรท และไนไตรท์

ไนเตรทและไนไตรท์เป็นสารที่นิยมใช้เป็นสารกันเสียในอาหารสำเร็จรูปประเภทเนื้อสัตว์ และเป็นส่วนประกอบของปุ๋ยซึ่งใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับการเจริญเติบโตของพืช หากใช้ในปริมาณมากและต่อเนื่องจะมีผลให้เกิดการสะสมในเนื้อเยื่อพืชโดยเฉพาะในผักที่รับประทานใบ ดังนั้นจึงมักพบไนเตรทและไนไตรท์ปริมาณสูงในผักบางชนิด เช่น ผักโขม (Spinach) บล็อกโคลี (Broccoli) และผักกาดหัว (White radish) (Yau, 2008) แม้ไนเตรทและไนไตรท์จะเป็นสารปกติที่พืชสมควรได้รับอยู่แล้ว แต่ถ้าผักไฮโดรโปนิกส์ได้รับสารอาหารปริมาณมากและต่อเนื่องเกินไป อาจทำให้มีปริมาณสารอาหารต่าง ๆ สะสมอยู่มากจนทำให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลผลกระทบต่อการร่างกายจากสารอาหารไนโตรเจนในปริมาณสูง

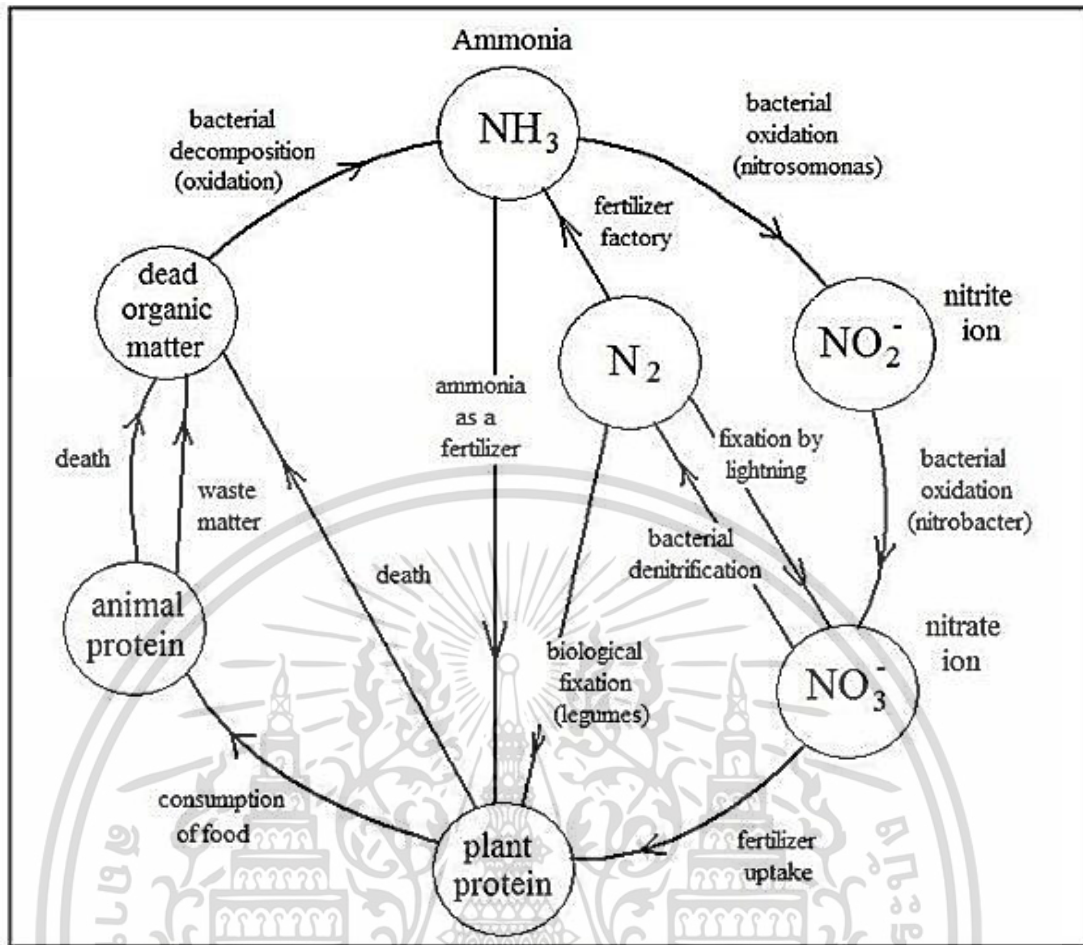
ธาตุอาหาร	ผลกระทบของสารอาหารต่อร่างกาย
ไนโตรเจน	เกลือไนเตรท และเกลือไนไตรท์ จะเป็นสารตั้งต้นของไนโตรซามีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งในตับ ในระบบทางเดินอาหาร
ฟอสฟอรัส	ทำให้เกิด Hyperparathyroidism และ Resorption ของกระดูก
แคลเซียม	ทำให้ท้องผูก อัตราเสี่ยงต่อการเป็นโรคนิ้วสูงขึ้น
แมกนีเซียม	ถ้าได้ไม่ดึจะพบ Hypermagnesemia
เหล็ก	เกิดภาวะ Hemochromatosis ทำลายเนื้อเยื่อที่เก็บสะสมเหล็ก เช่น ตับ
สังกะสี	เกิดภาวะขาดทองแดง เนื่องจากสังกะสีจะไปกระตุ้นเซลล์ลำไส้สร้าง Intestinal binding จับกับทองแดง

ที่มา : พนมพร (2545)

สารที่ควรจะต้องให้ความสำคัญคือ เกลือไนเตรทและเกลือไนไตรท์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยเคมีไนเตรท และแคลเซียมไนเตรทในพืชผักต่าง ๆ ยิ่งมีการใช้ปุ๋ยพวกไนเตรทเพิ่มขึ้น ก็จะมีผลทำให้มีสารไนเตรทและไนไตรท์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหลักของพืชที่ช่วยในการเจริญของลำต้นและใบพืช ดังนั้นจึงพบไนเตรทและไนไตรท์มากในพืชที่บริโภคใบและหัว โดยเฉพาะระยะที่พืชผักถูกเก็บไว้เพื่อรอการบริโภคสารไนเตรทจะเปลี่ยนเป็นสารไนไตรท์โดยแบคทีเรีย (รูปที่ 2.6) ซึ่งผักบางชนิดอาจมีไนไตรท์สูงถึง 3.6 กรัมต่อผัก

แห้ง 1 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 วัฏจักรไนโตรเจน

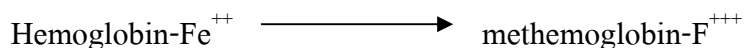
ที่มา : Harlan (2010)

2.7.1 อันตรายและความเป็นพิษของไนเตรทและไนไตรท์

สำหรับเด็กความเป็นพิษของไนเตรทและไนไตรท์เกิดจากเม็ดเลือดแดงของเด็กไม่มีเอ็นไซม์ เอ็นเอตีเอช เมทฮีโมโกลบินรีดักเตส (NADH - methemoglobin reductase) ซึ่งเปลี่ยน Methemoglobin (Ferric, Fe⁺³) กลับเป็น Hemoglobin (Ferrous, Fe⁺²) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อเด็กรับประทานอาหารที่ปนเปื้อนไนเตรทเข้าไป แบคทีเรียในลำไส้จะเปลี่ยนไนเตรทเป็นไนไตรท์ซึ่งสามารถดูดซึมได้และสร้าง Methemoglobin (ปนิธานและวินัย, ม.ป.ป.) เนื่องจาก Hemoglobin ถูกออกซิไดซ์ด้วยไนไตรท์เป็นเมทฮีโมโกลบินได้ดีและง่ายกว่า ดังนั้นการสะสมของ Methemoglobin จึงทำให้เด็กมีอาการขาดออกซิเจน ปวดศีรษะ หายใจหอบ หัวใจเต้นแรง และเร็วกว่าปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนเตรท/ไนไตรท์



NADH-methemoglobin reductase

รูปที่ 2.7 ผลของสารไนเตรทและไนไตรท์ต่อฮีโมโกลบิน

ที่มา : พนมพร (2545)

เกลือไนไตรท์รวมตัวกับสารอะมีน (Amines) เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าไนโตรซามีน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาได้ดีในสภาพความเป็นกรดสูงในกระเพาะอาหาร สารพิษไนโตรซามีนสามารถถูกดูดซึมไปทั่วร่างกาย และก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า เกลือไนเตรทเป็นสารตั้งต้นของสารก่อมะเร็ง สารไนโตรซามีนมี 4 ชนิดที่ได้รับการพิสูจน์ว่าเป็นสารก่อมะเร็งคือ ไดเมทิลไนโตรซามีน (Dimethylnitrosamine) ทำให้เกิดมะเร็งตับ ไดเอทิลไนโตรซามีน (Diethylnitrosamine) ทำให้เกิดมะเร็งในหลอดอาหารและตับ เมทิลเบนซิลไนโตรซามีน (Methylbenzyl nitrosamine) และเมทิลเฟนิลไนโตรซามีน (Methylphenyl nitrosamine) ทำให้เกิดมะเร็งหลอดอาหาร ทั้งหมดนี้เป็นสมมติฐานของการรับประกันถึงความปลอดภัยของผักไฮโดรโปนิคส์เท่าที่ตรวจสอบได้ (พนมพร, 2545)

ธรรมศักดิ์และคณะ (2545) ได้รายงานการสำรวจเบื้องต้นปริมาณไนเตรทตกค้างในผักกาดหอมสายพันธุ์ต่างประเทศที่ปลูกโดยไม่ใช้ดิน โดยเก็บตัวอย่างผักกาดหอมชนิดต่าง ๆ ในตลาดกรุงเทพฯ พบว่าผักกาดหอมมีการตกค้างของสารไนเตรทเกินค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ตามข้อกำหนดของสหภาพยุโรป (>2500 mg/Kg FW ในช่วงเดือนพฤษภาคม-ตุลาคม และ <3000 mg/Kg FW ในช่วงเดือนพฤศจิกายน - เมษายน) จำนวนร้อยละ 27, 81 และ 81 สำหรับตัวอย่างที่เก็บในฤดูฝน ฤดูหนาว และฤดูร้อนตามลำดับ และชนิดของผักที่พบว่าการสะสมของไนเตรทสูงกว่าผักชนิดอื่น ได้แก่ Red coral, Butter head, Ice berg ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค เช่น ร่างกายค่อย ๆ อ่อนแอและก่อให้เกิดมะเร็ง หรือร่างกายของผู้บริโภคบางรายเกิดอาการขาดออกซิเจนอย่างเฉียบพลัน

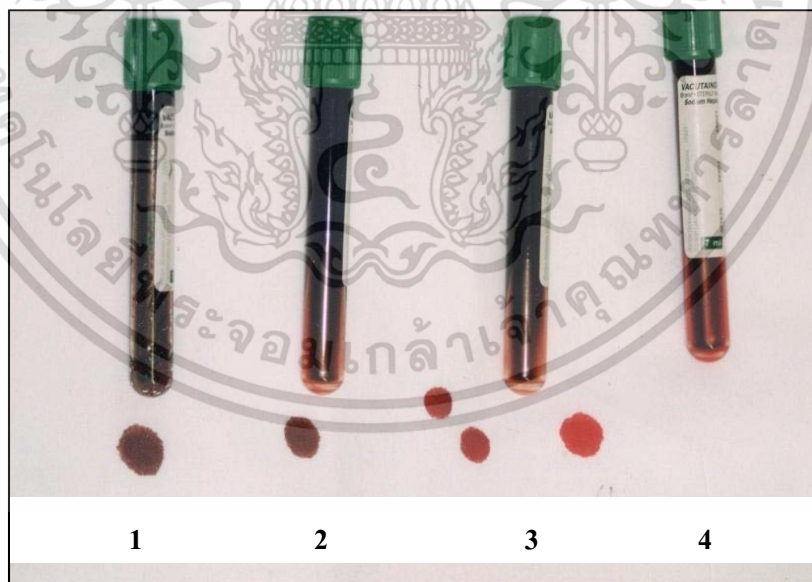
ไนเตรทที่สะสมในผักอาจถูกรีดิวส์ให้กลายเป็นไนไตรท์ซึ่งเป็นสาเหตุของโรค Methemoglobinemia และยังสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นไนโตรซามีนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งได้ในภายหลัง (มนูญ, 2544)

โรค Methemoglobinemia เป็นภาวะที่เม็ดเลือดแดงของร่างกายลดความสามารถในการขนส่งออกซิเจนลง เกิดจากการมี Methemoglobin มากกว่าปกติ คือ ไม่เกิน 3% ทำให้ Hemoglobin ไม่สามารถจับหรือปล่อยออกซิเจนได้ตามปกติ ความรุนแรงของอาการจะขึ้นกับปริมาณ Methemoglobin โดยอาจไม่มีอาการของโรค หรือผิวหนังหรือเยื่อเมือกสีคล้ำลง อ่อนแรง หายใจหอบเหนื่อย หน้ามืด และอาจเสียชีวิตได้ อาการของโรคที่เกิดขึ้นตามปริมาณ Methemoglobin ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งมีลักษณะสีของเลือดดังแสดงในรูปที่ 2.8

ตารางที่ 2.4 ปริมาณ Methemoglobin ในร่างกายและลักษณะอาการของโรค Methemoglobinemia

ปริมาณ Methemoglobinemia (%)	ลักษณะและอาการที่เกิดขึ้น
0 – 3	ไม่มีอาการ
3 – 15	สีผิวซีด เทา หรือคล้ำ
15 – 20	ริมฝีปากเขียว (Central cyanosis) เลือดมีสี Chocolate brown
20 – 25	ปวดศีรษะ หอบเหนื่อย วิงเวียน/เป็นลม อ่อนแรง ใจสั่น เจ็บแน่นหน้าอก
50 – 70	จังหวะการเต้นของหัวใจผิดปกติ ชัก หมดสติ
มากกว่า 70	ผู้ป่วยอาจเสียชีวิตได้

ที่มา : ชิตินา และคณะ (2554)



รูปที่ 2.8 ลักษณะสีของเลือดเมื่อมีปริมาณ Methemoglobin ในร่างกายต่าง ๆ กัน

1 และ 2 คือ มีปริมาณ Methemoglobin ในร่างกาย 70%

3 คือ มีปริมาณ Methemoglobin ในร่างกาย 20%

4 คือ มีปริมาณ Methemoglobin ในร่างกายในระดับปกติ

ที่มา : ชิตินา และคณะ (2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรทและไนโตรท์

เทคนิคการตรวจวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทและไนโตรท์ที่มีหลายวิธี ได้แก่

2.7.2.1 Spectrophotometry เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารโดยใช้หลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 – 1,000 nm ของสารเคมีนั้น ได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic compound) สารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) หรือสารอนินทรีย์ (Inorganic compound) โดยนำสารตัวอย่างใส่ในเซลล์ควอร์ตซ์ (Quart) แล้ววางในบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดแสง สารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีหรือแสงบางส่วนไว้ แสงที่ไม่ดูดกลืนจะผ่านออกมายังเครื่องวัดแสง (Photomultiplier tube) เครื่องวัดแสงจะทำการวัดปริมาณแสงที่ออกมา โดยการหักล้างกับปริมาณของแสงก่อนดูดกลืน จากนั้นจะทำการประมวลผลเป็น Curve หรือสเปกตรัมซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์, 2557)

พัชราภรณ์ และคณะ (2552) รายงานการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทในผักคะน้าและผักกาดหอมด้วยเทคนิค Spectrophotometry ด้วยวิธี Brucine method (AOAC, 2000) และวิธี Salicylic (Cataldo และคณะ, 1975) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 nm เมื่อเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีพบว่าสามารถใช้วิเคราะห์ปริมาณไนเตรทในตัวอย่างพืชได้โดยไม่มี ความแตกต่างทางสถิติ แต่วิธี Salicylic อาจไม่เหมาะสมสำหรับใช้วิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทในตัวอย่างพืชที่มีปริมาณไนเตรทน้อย

2.7.2.2 High Performance Liquid Chromatography (HPLC) มีหลักการแยกสารคือ ของเหลวความดันสูงจะสร้างแรงพา (Impelling force) ดันสารต่าง ๆ ในสารตัวอย่างผ่านไปบนตัวกลางที่ไม่เคลื่อนที่หรือเคลื่อนที่ได้เล็กน้อย เรียกว่า เฟสนิ่ง (Stationary phase) ซึ่งเฟสนิ่งจะสร้างแรงหน่วง (Retention force) ต่อสารชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่าง ประจุ ความจำเพาะ การดูดซับ การละลาย ดังนั้นความแตกต่างกันของแรงหน่วง จึงทำให้โมเลกุลของสารแต่ละชนิดเคลื่อนที่ออกมาจากคอลัมน์ที่บรรจุเฟสนิ่งในเวลาหน่วง (Retention time) ที่แตกต่างกัน (ชูชาติ, ม.ป.ป.)

Sarah และคณะ (2005) ศึกษาการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทและไนโตรท์ในอาหารสำหรับเด็กทารกที่มีส่วนประกอบของผักและผลไม้ด้วยเทคนิค Ion chromatography พบว่ามีค่าเฉลี่ย % Recovery ของไนเตรทระหว่าง 87 – 104% และมีค่าเฉลี่ย % Recovery ของไนโตรท์ระหว่าง 91 – 104% ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์การยอมรับ และพบว่าปริมาณไนเตรทและไนโตรท์ของอาหารสำหรับเด็กทารกมีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์กำหนด

แต่เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทและไนไตรต์ดังกล่าวเป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีการใช้สารเคมีที่มีอันตรายและมีราคาแพง ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์นาน รวมทั้งเป็นวิธีวิเคราะห์ที่ต้องทำลายตัวอย่าง ดังนั้นเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด ซึ่งเป็นเทคนิคการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย ใช้ง่าย รวดเร็ว แม่นยำ เชื่อถือได้ สามารถตรวจสอบได้ในสายการผลิต ไม่ต้องการใช้สารเคมีหรือใช้น้อย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถวัดองค์ประกอบหรือสมบัติต่าง ๆ ของผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร ในเชิงปริมาณได้ง่ายขึ้นและเป็นวิธีไม่ทำลายตัวอย่าง จึงเป็นเทคนิควิเคราะห์อีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ (ปานมนัส, 2556)

2.8 คะน้า

กะน้ามีชื่อสามัญว่า Chinese kale มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Brassica oleracea* L. var *alboglabra* คะน้าจัดอยู่ในกลุ่มผักใบเขียวที่มีคุณค่าทางโภชนาการและสารต้านอนุมูลอิสระสูงสุด (ตารางที่ 2.5) จากการศึกษาในประชากรจำนวนมาก พบว่าการรับประทานอาหารที่มีผักใบเขียว เช่น คะน้า เป็นประจำจะลดความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งในส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งมะเร็งลำไส้ใหญ่ ปาก กระเพาะอาหาร ปอด และเต้านม นอกจากนี้กะน้ายังมีแคลเซียมชนิดที่ถูกดูดซึมในร่างกายได้ดี อยู่มาก ต่างจากแคลเซียมในปวยเล้งและนมวัวที่เป็นสารประกอบออกซาเลต ซึ่งที่ยากต่อการดูดซึมเข้าร่างกาย (พงษ์ศักดิ์, 2547)

ตารางที่ 2.5 คุณค่าทางโภชนาการต่อน้ำหนักสด 100 กรัม ของกะน้า

สารอาหาร	ปริมาณ
ไขมัน (กรัม)	0.45
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	6.8
ไฟเบอร์ (กรัม)	1.2
โปรตีน (กรัม)	2.85
แคลเซียม (กรัม)	237.5
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	58
เหล็ก (มิลลิกรัม)	2.0
วิตามินบี 1 (มิลลิกรัม)	0.10
วิตามินบี 2 (มิลลิกรัม)	0.13
วิตามินซี (มิลลิกรัม)	93
วิตามินอี (มิลลิกรัม)	24
เบต้าแคโรทีน (RE)*	186.92

หมายเหตุ: * คือ RE หมายถึง Retinal Equivalent

ที่มา: ยุวดีและคณะ (2541); ระพีพรรณ (2544)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณค่าทางโภชนาการของผัก

คุณภาพของผักซึ่งรวมถึงคุณค่าทางอาหารหลังการเก็บเกี่ยวนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับพันธุกรรมแล้วยังขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในระหว่างการปลูก ได้แก่ อุณหภูมิ แสง และธาตุอาหาร (Beverly และคณะ, 1993; Salunkhe และคณะ, 1991)

2.9.1 แสง เป็นปัจจัยหลักในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช จึงส่งผลต่อการเจริญเติบโตและสารอาหารของผักโดยปกติการสะสมวิตามินซีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณแสงที่เพิ่มขึ้น (Weston และ Brath, 1997) เพราะการเพิ่มแสงเป็นการส่งเสริมการสังเคราะห์แสงจึงทำให้มีการสะสมน้ำตาลเพิ่มขึ้น (Schreiner และคณะ, 2002) และพืชจะนำน้ำตาลที่ได้จากการสังเคราะห์แสงมาสังเคราะห์วิตามินซี (Lee และ Kader, 2000) ดังนั้นในสภาพที่มีความเข้มแสงต่ำส่งผลให้มีวิตามินซีในผักและผลไม้ต่ำ (Nagy และ Wardowski, 1988; Shewfelt, 1990)

2.9.2 อุณหภูมิ เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อกระบวนการต่าง ๆ ของสรีรวิทยาของพืช เช่น การสังเคราะห์แสงและการหายใจ ส่งผลให้ผักที่ได้รับอุณหภูมิสูงระหว่างการเจริญเติบโตจะเก็บเกี่ยวได้เร็วและยังมีผลต่อมวลชีวภาพของพืช (สัมฤทธิ์, 2544)

รศ.สุคนธ์ (2547) รายงานว่าคะน้าที่ปลูกในช่วงฤดูร้อนมีปริมาณไนเตรทสะสมสูงกว่าคะน้าที่ปลูกในฤดูฝนและฤดูหนาว สอดคล้องกับสุภาพร (2547) ที่รายงานว่าต้นคะน้าที่ปลูกในฤดูร้อนมีธาตุอาหารสะสมมากที่สุด รองลงมา คือ คะน้าที่ปลูกในฤดูหนาว และฤดูฝน ตามลำดับ

2.9.3 ธาตุอาหาร มีความสำคัญโดยตรงต่อพืช เพราะพืชจำเป็นต้องนำธาตุอาหารมาใช้ในการเจริญเติบโตและสังเคราะห์สารอาหารต่าง ๆ ธาตุอาหารที่จัดเป็นธาตุหลักและมีอิทธิพลมากต่อองค์ประกอบทางเคมีในผัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม เป็นต้น

Sorenson (1984) และ Muller และ Hippe (1987) รายงานว่าปริมาณวิตามินซีในใบของกะหล่ำดอก ผักสลัด และปวยเล้งแปรผกผันกับปริมาณไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น

Mozafar (1996) รายงานว่าการลดปริมาณไนโตรเจนก่อนเก็บเกี่ยวจะเพิ่มการสะสมปริมาณวิตามินซีในผักสลัด สอดคล้องกับนันท์ (2549) ที่รายงานว่าการงดการให้สารละลายธาตุอาหารก่อนการเก็บเกี่ยว 1 - 2 วัน เพื่อลดความเข้มข้นของอนุมูลไนเตรท (NO_3^-) ทำให้ผักนั้นมีวิตามินซีเพิ่มขึ้น

Babik และคณะ (1996) รายงานว่าการเพิ่มปุ๋ยไนโตรเจนจาก 100 เพิ่มขึ้นเป็น 200 กิโลกรัมต่อเฮกตาร์ในการปลูก Brussels sprouts จะทำให้น้ำหนักแห้ง วิตามินซี และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เพิ่มขึ้น แต่ถ้าให้ระดับไนโตรเจนมากกว่า 200 กิโลกรัมต่อเฮกตาร์จะทำให้ปริมาณวิตามินซี และ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดลดลง ในขณะที่ปริมาณคลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Babik และ Elkner (2002) ที่รายงานว่าการเพิ่มปุ๋ยไนโตรเจนจาก 100 – 400 กิโล

กรัมต่อเฮกตาร์ให้กับบล็อกลีพบว่าการให้ไนโตรเจนมากกว่า 200 กิโลกรัมต่อเฮกตาร์ทำให้ปริมาณวิตามินซีลดลง

Xiao-feng และคณะ (2007) รายงานว่าการปลูกผักกาดหอมที่ให้โพแทสเซียมมากกว่า 4 มิลลิโมลต่อลิตรจะทำให้น้ำหนักแห้งลดลง และการเพิ่มระดับความเข้มข้นของโพแทสเซียมทำให้ปริมาณไนเตรทลดลงในขณะที่ปริมาณวิตามินซีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

Chewya (1984) และ Elkner และ Kaniszewski (1995) รายงานว่าการให้ปริมาณไนโตรเจนสูงทำให้ปริมาณเส้นใยในกะน้าและกะหล่ำปลีเพิ่มขึ้น แต่บางรายงานกลับพบว่าการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนกลับทำให้ปริมาณเส้นใยลดลง (Sorenson, 1984)

2.10 การปลูกพืชไร้ดิน (Soiless Culture)

การปลูกพืชไร้ดิน หมายถึง วิธีการปลูกพืชโดยไม่ต้องใช้ดิน แต่จะใช้วัสดุอื่น ๆ แทน เช่น การปลูกพืชให้รากลอยอยู่ในอากาศ การปลูกพืชในสารละลาย หรือการปลูกพืชในวัสดุปลูก เช่น ทราย แกลบ และวัสดุอื่น ๆ โดยให้สารละลายธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตแก่รากโดยตรง ในปริมาณที่เหมาะสมทดแทนธาตุอาหารที่มีอยู่ในดิน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการปลูกในสวนที่เกี่ยวข้องกับดิน เช่น ดินที่มีคุณภาพต่ำ มีความเค็มสูงหรือมีโรคราบด อีกทั้งการปลูกพืชไร้ดินนี้ยังสามารถควบคุมคุณภาพและปริมาณของผลผลิตให้ได้ตามต้องการ

2.11 ความแตกต่างระหว่างการปลูกพืชบนดินตามธรรมชาติกับปลูกพืชไฮโดรโปนิคส์

ปกติแล้วพืชจะเจริญเติบโตได้ดินนั้นต้องมีปัจจัยสำหรับเจริญเติบโตที่เหมาะสม คือ แสง น้ำ ธาตุอาหาร อุณหภูมิ ความเป็นกรดด่าง (pH) ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ การปลูกพืชบนดินแม้จะมีธาตุอาหารและอากาศอันเป็นปัจจัยที่พืชต้องการแต่ก็มักพบข้อเสีย เช่น ดินมีคุณภาพที่ไม่แน่นอนแตกต่างกันไปตามสภาพ เช่น โครงสร้างของดิน ปริมาณธาตุอาหารหรือความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ค่าความเป็นกรดด่างไม่เหมาะสม ปัญหาเหล่านี้ทำให้ได้ผลผลิตและคุณภาพที่ไม่สม่ำเสมอ

การปลูกพืชไฮโดรโปนิคส์ พืชจะได้รับสารละลายที่มีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ทันทีเพราะ มีการปรับค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และความเป็นกรดด่าง (pH) ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการไปใช้ประโยชน์ของพืชอยู่ตลอดเวลา

พืชที่ปลูกอาจมีสารอาหารบางอย่างสะสมจนถึงขีดที่อาจจะเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค สหภาพยุโรป (European Union, EU) ได้ตั้งข้อบังคับของปริมาณสูงสุดของไนเตรท (Nitrate) ที่สะสมไว้ ณ พืชผัก ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ปริมาณของไนเตรทในพืชผักตามข้อบังคับของสหภาพยุโรป (European Union, EU)
ปี พ.ศ. 2536

พันธุ์พืช	ปริมาณไนเตรท (ม.ก. ไนเตรท/ก.ก. น้ำหนักสด)	
	พฤษภาคม-ตุลาคม	พฤศจิกายน-เมษายน
1. ผักกาดหอม (Lambs lettuce) (<i>Valerianella locusta</i> L.) (<i>Valerianella olitola</i> Poit)	2,500 (ใหม่)	3,000
2. ผักกาดฝอยก้านแข็ง (Endive) (<i>Cichorium endivia</i> L.)	2,500	3,000
3. หัวผักกาดแดง (Radish and small Radish) (<i>Raphanus sativus</i> L.)		3,000
4. หัวบีท (Beetroot) (<i>Beta vulgaris</i> L. var. esculenta)		3,000 (เดิม 3,500)
5. ก้านฉ่ายขาวและเขียว (White celery and green celery) (<i>Apium graveolens</i> L.)		4,000 (ก้านฉ่ายเขียวลดลงจาก 5,000)
6. มันฝรั่ง (Potatoes) (<i>Solanum tuberosum</i> L.)		2,000 (ใหม่)

ที่มา : ราเชนทร์ และคณะ (2548)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุดิบและอุปกรณ์

3.1.1.1 ผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ ปลูกโดยฝ่ายเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย 35 หมู่ 3 ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี

3.1.1.2 เครื่อง HPLC (Agilent Hewlett Packard series 1100)

3.1.1.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง (Pioneer)

3.1.1.4 เครื่องวัดค่าความเป็นกรดด่าง (METTLER TOLEDO series MP220)

3.1.1.5 C₁₈ HPLC column (VertiSep UPS 4.6 × 250 mm, 5µm, Vertical Chromatography Co.,Ltd.)

3.1.1.6 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (MEMMERT)

3.1.1.7 อุปกรณ์เครื่องแก้วต่าง ๆ

3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 Tetrabutyl ammonium hydrogen sulfate (AR grade ยี่ห้อ Merck)

3.1.2.2 n-octylamine (AR grade ยี่ห้อ Merck)

3.1.2.3 Methanol (HPLC grade)

3.1.2.4 Orthophosphoric acid 85% (AR grade ยี่ห้อ Merck)

3.1.2.5 Ammonia solution 25% (AR grade ยี่ห้อ Merck)

3.1.2.6 Sodium nitrate (AR grade ยี่ห้อ Merck)

3.1.2.7 Sodium nitrite (AR grade ยี่ห้อ Merck)

3.1.2.8 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.1.3 การวัดสเปกตรัม

3.1.3.1 เครื่อง FT - Near infrared spectroscopy (NIRs) (Q – Interline, Agriquant, Denmark)

3.1.3.2 โปรแกรม Unscrambler® version 9.7 (Camo,Oslo, Norway)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ด้วยเทคนิค HPLC

ทำการทดลองพัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์จากวิธีของ Knauer (2007) เพื่อให้ได้สภาวะที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยศึกษาจากปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

3.2.1.1 ปัจจัยคงที่ได้แก่ Mobile phase A (5 mM tetrabutyl ammonium hydrogen sulfate, pH 6.5), Mobile phase B (0.05 M n-octylamine, pH 4.0), pH 7.0, นีดสารละลายมาตรฐานที่ถูกกรองผ่าน syringe filter 0.2 μm ปริมาตร 25 μl , ความเร็วของอัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่ 1.0 มิลลิลิตร/นาที, คอลัมน์ C_{18} HPLC, อุณหภูมิคอลัมน์ 25 องศาเซลเซียส และความยาวคลื่น 210 nm

3.2.1.2 ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนระหว่าง mobile phase A:B เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 และ 0:100

เลือกอัตราส่วนของเฟสเคลื่อนที่ที่สามารถแยก Peak ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ที่มีค่า Retention time (RT) ต่างกันภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน เพื่อนำไปใช้ในการทดลองหาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ตัวอย่างต่อไป

3.2.2 การหา Linearity ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์

3.2.2.1 เตรียมสารมาตรฐานไนเตรทความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm โดยเตรียมจากสารมาตรฐานไนเตรทความเข้มข้น 1,000 ppm จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทด้วยเทคนิค HPLC ที่ได้ศึกษาแล้ว จากข้อที่ 3.2.1

3.2.2.2 เตรียมสารมาตรฐานไนไตรท์ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ppm โดยเตรียมจากสารมาตรฐานไนไตรท์ความเข้มข้น 1,000 ppm จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณไนไตรท์ด้วยเทคนิค HPLC ที่ได้ศึกษาแล้ว จากข้อที่ 3.2.1

3.2.3 การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี (Method Validation)

3.2.3.1 การหาค่า Accuracy และ Precision ของ สารมาตรฐานไนเตรท
เตรียมสารมาตรฐานไนเตรทความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm นำไปวิเคราะห์หาไนเตรทด้วยเครื่อง HPLC ในสภาวะที่ศึกษาแล้ว จากข้อที่ 3.2.1

3.2.3.2 การหาค่า Accuracy และ Precision ของสารมาตรฐานไนไตรท์
เตรียมสารมาตรฐานไนไตรท์ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ppm นำไปวิเคราะห์หาไนไตรท์ด้วยเครื่อง HPLC ในสภาวะที่ศึกษาแล้ว จากข้อที่ 3.2.1

3.2.4 การหาค่า LOD และ LOQ (Limit of detection และ Limit of quantitation)

3.2.4.1 เตรียมสารมาตรฐานในเตรทความเข้มข้น 1 ppm จำนวน 7 ซ้ำ นำไปวิเคราะห์โดยเครื่อง HPLC ในสถานะที่ได้ศึกษาไว้ จากข้อที่ 3.2.1

3.2.4.2 เตรียมสารมาตรฐานในเตรทความเข้มข้น 0.1 ppm จำนวน 7 ซ้ำ นำไปวิเคราะห์โดยเครื่อง HPLC ในสถานะที่ได้ศึกษาไว้ จากข้อที่ 3.2.1

3.2.5 การทดลองเพื่อทำนายปริมาณในเตรทและในเตรทในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์

3.2.5.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างโดยการซื้อผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ที่มีสายพันธุ์เดียวกัน มีขนาด รูปร่าง สีและน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน โดยคัดเลือกผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ที่อยู่ในช่วงที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ ไม่แก่หรืออ่อนจนเกินไป ผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ที่เก็บเกี่ยวได้ให้ใส่ในภาชนะกล่องโฟม ทำการขนส่งโดยทางรถยนต์มายังห้องปฏิบัติการเคมี แผนกเครื่องมือวิเคราะห์ บริษัทไซแอนติฟิค โพรโมชัน จำกัด นำผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์เก็บรักษาไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 วันก่อนนำมาทดลอง

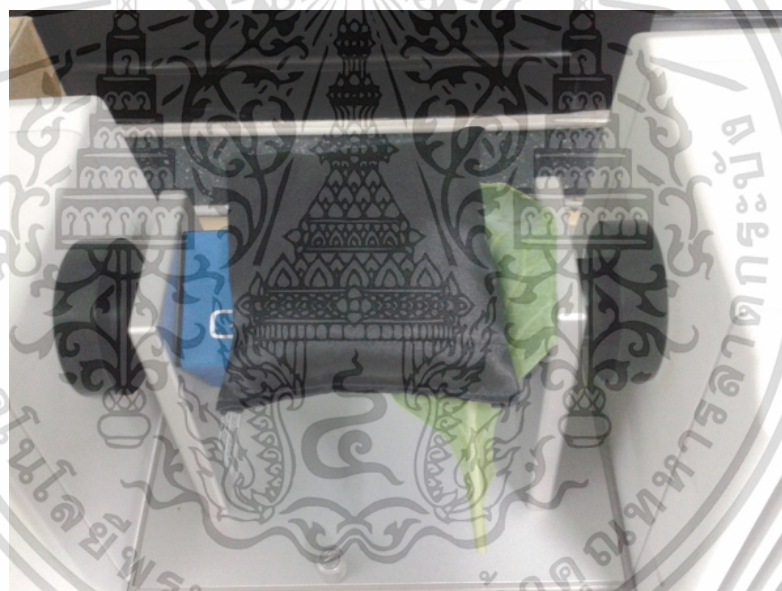
จากนั้นนำตัวอย่างทั้งหมดมาทำการปรับอุณหภูมิก่อนการวัดด้วยการเก็บไว้ในห้องปรับอากาศที่รักษาอุณหภูมิห้องที่ระดับ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 - 3 ชั่วโมง ก่อนทำการวัดด้วยเครื่อง FT - NIR spectrophotometer เพื่อป้องกันผลกระทบอันเนื่องมาจากอุณหภูมิระหว่างการวัด

3.2.5.2 การวัดด้วย FT - NIR spectrophotometer

นำตัวอย่างผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์แต่ละต้นมาทำการวัดการดูดกลืนพลังงานด้วยเครื่อง FT - NIR spectrophotometer ช่วงความยาวคลื่น 800 - 2,500 nm โดยคัดเลือกใบแก่ที่มีขนาดใหญ่ของต้นจำนวน 2 ใบ และวัดที่ตำแหน่งใบของผักคะน้าทั้งหมด 4 ตำแหน่ง โดยแบ่งใบคะน้าออกเป็น 4 ส่วน และเลือกวัดบริเวณกึ่งกลางใบของแต่ละส่วน (รูปที่ 3.1 และ 3.2) หลังจากนั้นตัดแยกส่วนลำต้น ใบและราก ออกจากกัน ชั่งน้ำหนักสดส่วนใบ ส่วนลำต้นและรากทิ้งไป จากนั้นหั่นตัวอย่างให้ละเอียดแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากันดีในถุงพลาสติก สุ่มตัวอย่างผักคะน้าประมาณ 30 กรัมเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณในเตรทและในเตรทที่มีอยู่ (Shin-shou Chou และคณะ, 2003)



(a)



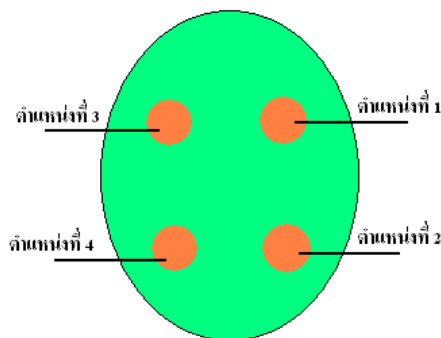
(b)

รูปที่ 3.1 แสดงการวัดสเปกตรัมใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ด้วยเครื่อง FT - NIR spectrophotometer

(a) การเลือกตำแหน่งก่อนทำการวัดสเปกตรัมผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์

(b) ระหว่างการวัดสเปกตรัมผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งการวัดสเปกตรัมผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ด้วยเครื่อง FT - NIR spectrophotometer

3.2.6 การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทและไนโตรที่ไนโบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์

นำอัตราส่วนของเฟสเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในขั้นตอนที่ 3.2.1 – 3.2.4 มาใช้สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทและไนโตรที่ไนตัวอย่างโบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ โดยสกัดสารละลายจากตัวอย่างด้วยวิธีของ Shin-shou Chou และคณะ (2003) ดังนี้

ตัดและสับโบผักคะน้าจนละเอียด ชั่งน้ำหนัก 1 g

เติมน้ำ DI ปริมาตร 50 mL ใน Volumetric flask ขนาด 100 mL

แช่ใน Water bath อุณหภูมิ 80°C 20 นาที

เขย่าและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ปรับปริมาตรเป็น 100 mL ด้วยน้ำ DI

กรองด้วย Syringe filter ขนาด 0.20 μm

นำสารสกัดที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสกัดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ไนเตรทและไนโตรด้วยเทคนิค HPLC

ที่มา : ดัดแปลงจาก Shin-shou Chou และคณะ (2003)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 การสร้างสมการในการทำนายปริมาณไนเตรทและไนโตรเจนในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิกส์

3.2.7.1 กำหนดตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ โดยให้ตัวแปรตาม คือ ปริมาณไนเตรทและไนโตรเจน ส่วนตัวแปรอิสระ คือ ข้อมูลสเปกตรัม

3.2.7.2 แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มสำหรับการสร้างสมการ (Calibration set) จำนวน 200 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มสำหรับการทดสอบสมการ (Prediction set) จำนวน 100 ตัวอย่าง โดยแต่ละกลุ่มมีการกระจายตัวของข้อมูลเท่า ๆ กัน โดยแบ่งเป็นกลุ่ม Calibration จำนวน 70% และแบ่งเป็นกลุ่ม Prediction จำนวน 30%

3.2.7.3 นำข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยที่ได้ของแต่ละกลุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการทำการ Pretreatment ข้อมูลสเปกตรัม ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ และสร้างสมการในการทำนาย โดยใช้วิธี Partial least squares regression (PLSR) เลือกสมการที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด จากการพิจารณาที่ ค่า R (Coefficient of correlation) ให้มีค่าสูงสุด, RMSECV ต้องมีค่าต่ำที่สุด และพิจารณาจาก Factor ที่มีค่าต่ำสุดด้วย

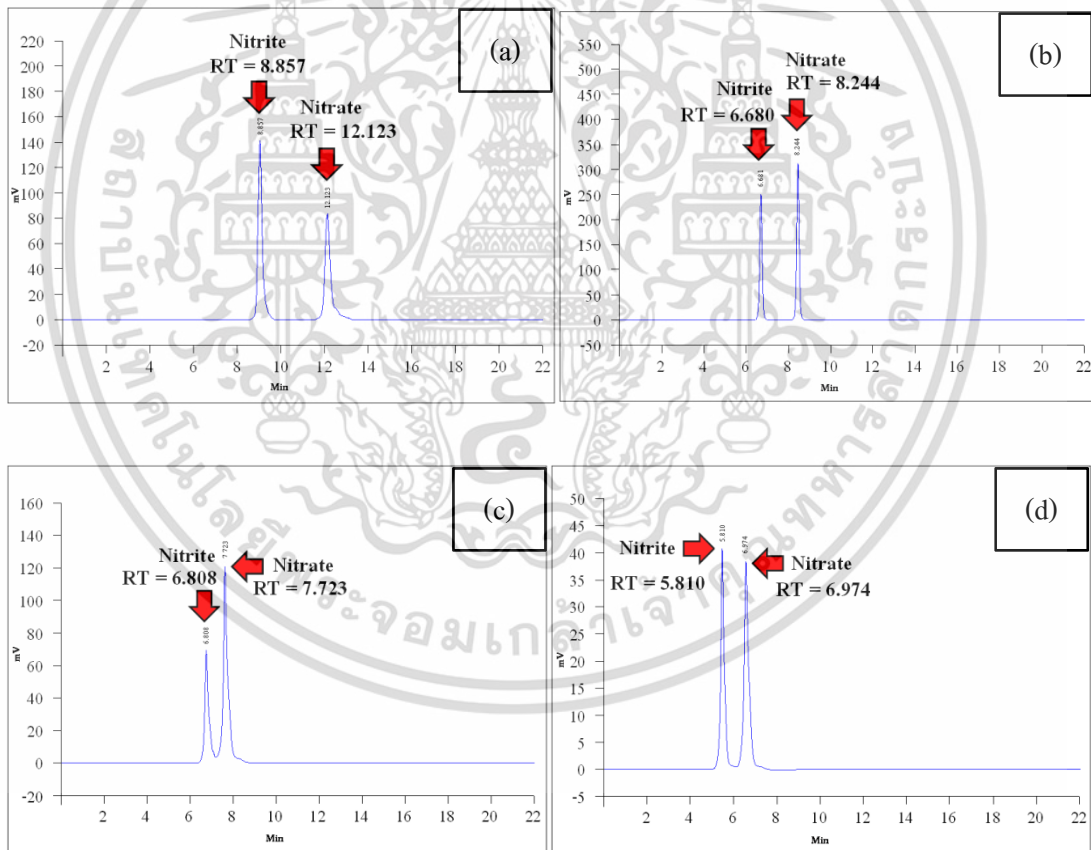
3.2.7.4 จากข้อมูลกลุ่ม Calibration เมื่อได้สมการ Calibration ให้นำสมการที่ได้ไปใช้ในการทำนายคุณภาพของตัวอย่าง ในกลุ่ม Prediction set เพื่อดูความแม่นยำของสมการ โดยใช้โปรแกรม Unscrambler® version 9.7

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

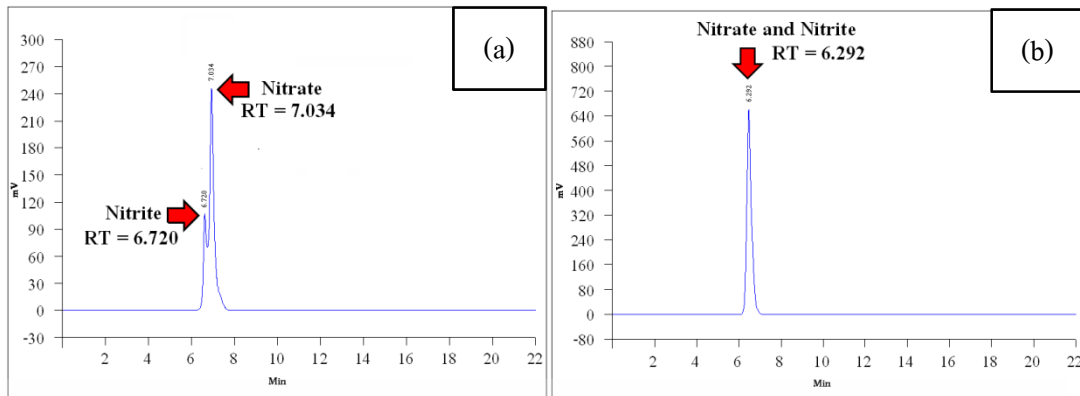
4.1 สภาวะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ด้วยเทคนิค HPLC

การทดลองพัฒนาวิธีวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ไนเตรทและไนไตรท์ด้วยเทคนิค HPLC จากวิธีของ Knauer (2007) เพื่อให้ได้สภาวะที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยศึกษาจากปัจจัยคือ อัตราส่วนระหว่าง mobile phase A:B เท่ากับ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50 และ 0:100 ได้ผลการทดลอง ดังนี้



รูปที่ 4.1 HPLC Chromatogram ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ความเข้มข้น 100 ppm เมื่อใช้อัตราส่วน Mobile phase A:B เท่ากับ 100:0 (a), 90:10 (b), 80:20 (c) และ 70:30 (d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

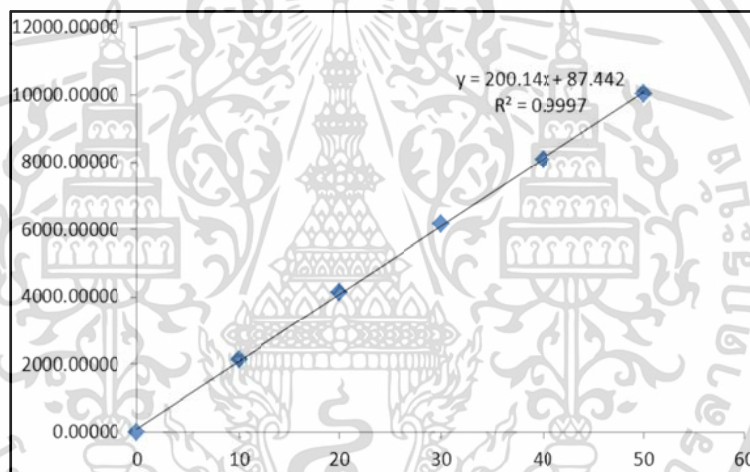


รูปที่ 4.2 HPLC Chromatogram ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ความเข้มข้น 100 ppm เมื่อใช้อัตราส่วน Mobile phase A:B เท่ากับ 60:40 (a), 50:50 (b) และ 0:100 (c)

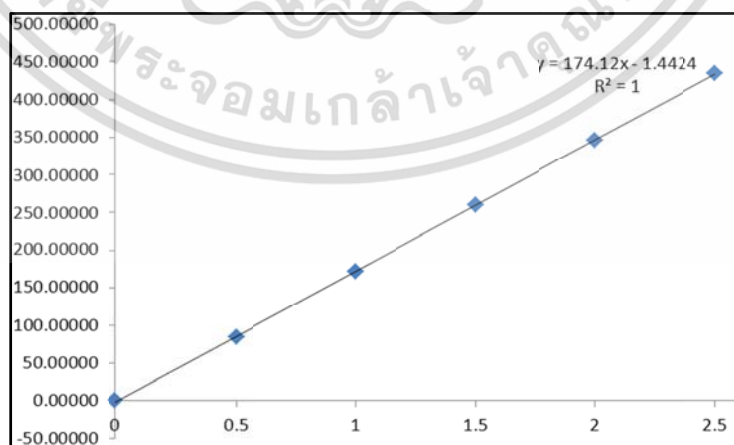
จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ไนเตรทและไนไตรท์ด้วยเทคนิค HPLC พบว่าอัตราส่วนของ mobile phase A:B ที่เหมาะสม เท่ากับ 90:10 เนื่องจากมีลักษณะ Peak ที่มีความเหมาะสม คือ แบบเกาส์เซียน จะได้ Peak ที่มีลักษณะสมมาตร ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ใช้บ่งบอกประสิทธิภาพของการแยกสาร และต้องสามารถแยกสารต่างชนิดกันออกจากกันได้อย่างชัดเจน (ชูชาติ, ม.ป.ป.) จากผลการวิจัยพบว่าสามารถเมื่อใช้อัตราส่วนของ mobile phase A:B เท่ากับ 90:10 จะสามารถแยก Peak ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ที่ RT เท่ากับ 8.244 และ 6.680 นาที ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.1 (b)

4.2 การหา Linearity ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ด้วยเทคนิค HPLC

จากการวิเคราะห์และคำนวณค่า Linearity ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ด้วยเทคนิค HPLC โดยฉีดสารมาตรฐานไนเตรทที่ระดับความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm และสารมาตรฐานไนไตรท์ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ppm ความเข้มข้นละ 3 ชั่วโมง นำค่าพื้นที่ Peak และค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐานไปสร้างกราฟมาตรฐาน หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) เพื่อศึกษาความเป็นเส้นตรง (Linearity) พบว่าค่า Linearity ของสารมาตรฐานไนเตรทได้ค่า $R^2 = 0.9997$ ส่วนค่า Linearity ของสารมาตรฐานไนไตรท์ได้ค่า $R^2 = 1$ ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ($R^2 \geq 0.995$) จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว แสดงว่าความเข้มข้น ของสารมาตรฐานไนเตรทในช่วงความเข้มข้น 10 - 50 ppm และความเข้มข้นของสารมาตรฐานไนไตรท์ในช่วงความเข้มข้น 0.5 - 2.5 ppm มีความเหมาะสมในการใช้เป็นกราฟมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 Linearity ของสารมาตรฐานไนเตรทความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm



รูปที่ 4.4 Linearity ของสารมาตรฐานไนไตรท์ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ppm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี (Method Validation)

4.3.1 การหาค่า Accuracy และ Precision ของเทคนิค HPLC ด้วยสารมาตรฐานไนเตรท

จากการวิเคราะห์และคำนวณเพื่อหาค่าความถูกต้องและแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC โดยใช้สารมาตรฐานไนเตรทที่ระดับความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm พบว่าเมื่อทำการวิเคราะห์แบบ within day จะมีค่า %Recovery อยู่ในช่วง 99.39 - 102.40% และมีค่า %RSD อยู่ในช่วง 0 - 0.88% ตามลำดับ และเมื่อทำการวิเคราะห์แบบ between day พบว่ามีค่า %Recovery อยู่ในช่วง 100.82 - 105.13% และมีค่า %RSD อยู่ในช่วง 0.31 - 0.85% ตามลำดับ โดยค่า %Recovery และ %RSD ทั้งการวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบ มีค่าอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ตามมาตรฐาน AOAC PEER (Rutendo, 2009)

ตารางที่ 4.1 ค่า Accuracy และ Precision ของเทคนิค HPLC ด้วยสารมาตรฐานไนเตรท (within day หรือ repeatability)

Rep.	ความเข้มข้นของสารมาตรฐานไนเตรท (ppm)				
	10	20	30	40	50
1	10.24	20.24	30.80	40.01	49.70
2	10.24	20.24	30.26	40.01	49.67
3	10.24	20.24	30.80	40.01	49.70
4	10.24	20.24	30.26	40.01	49.69
5	10.24	20.24	30.53	40.01	49.70
6	10.24	20.24	30.26	40.01	49.70
7	10.24	20.24	30.80	40.01	49.70
X	10.24	20.24	30.53	40.01	49.69
%Recovery	102.40	101.20	101.77	100.03	99.39
%RSD	0	0	0.88	0	0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่า Accuracy และ Precision ของเทคนิค HPLC ด้วยสารมาตรฐานไนเตรท (between day หรือ reproducibility)

วันที่	ความเข้มข้นของสารมาตรฐานไนเตรท (ppm)				
	10	20	30	40	50
1	10.52	20.34	30.31	40.54	50.33
2	10.49	20.31	30.29	40.46	50.90
3	10.47	20.25	30.69	40.48	50.82
4	10.52	20.09	30.68	40.66	50.26
5	10.53	20.13	30.14	40.37	50.39
6	10.50	20.24	30.09	40.75	50.06
7	10.57	20.01	30.65	40.54	50.11
X	10.51	20.19	30.41	40.58	50.41
%Recovery	105.13	100.97	101.36	101.46	100.82
%RSD	0.31	0.61	0.85	0.37	0.65

4.3.2 การหาค่า Accuracy และ Precision ของเทคนิค HPLC ด้วยสารมาตรฐานไนเตรท

จากการวิเคราะห์และคำนวณเพื่อหาค่าความถูกต้องและแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค HPLC โดยใช้สารมาตรฐานไนเตรทที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ppm พบว่าเมื่อทำการวิเคราะห์แบบ within day จะมีค่า %Recovery อยู่ในช่วง 98.0 – 99.90% และมีค่า % RSD อยู่ในช่วง 0 – 0.38% ตามลำดับ และเมื่อทำการวิเคราะห์แบบ between day พบว่ามีค่า %Recovery อยู่ในช่วง 99.84 – 103.76% และมีค่า % RSD อยู่ในช่วง 0.74 – 2.35% ตามลำดับ โดยค่า %Recovery และ %RSD ทั้งการวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบ มีค่าอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ตามมาตรฐาน AOAC PEER (Rutendo, 2009)

ตารางที่ 4.3 ค่า Accuracy และ Precision ของเทคนิค HPLC ด้วยสารมาตรฐาน ไนไตรท์ (within day หรือ repeatability)

Rep.	ความเข้มข้นของสารมาตรฐานไนไตรท์ (ppm)				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
1	0.49	1.0	1.50	2.0	2.50
2	0.49	1.0	1.50	2.0	2.50
3	0.49	1.0	1.50	2.0	2.50
4	0.49	0.99	1.50	1.99	2.50
5	0.49	1.0	1.50	2.0	2.50
6	0.49	1.0	1.49	1.99	2.49
7	0.49	1.0	1.50	1.99	2.49
\bar{X}	0.49	1.0	1.50	2.0	2.50
%Recovery	98.0	99.86	99.90	99.79	99.89
%RSD	0	0.38	0.25	0.27	0.20

ตารางที่ 4.4 ค่า Accuracy และ Precision ของเทคนิค HPLC ด้วยสารมาตรฐาน ไนไตรท์ (between day หรือ reproducibility)

วันที่	ความเข้มข้นของสารมาตรฐานไนไตรท์ (ppm)				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
1	0.51	0.98	1.57	1.98	2.56
2	0.52	1.03	1.52	2.05	2.54
3	0.51	0.98	1.52	2.0	2.52
4	0.52	1.02	1.54	2.02	2.56
5	0.53	1.03	1.52	2.0	2.52
6	0.51	0.97	1.51	2.0	2.56
7	0.53	0.99	1.57	2.01	2.54
\bar{X}	0.52	2.0	1.53	2.01	2.54
%Recovery	103.76	99.84	102.27	100.55	101.72
%RSD	1.86	2.35	1.54	1.14	0.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

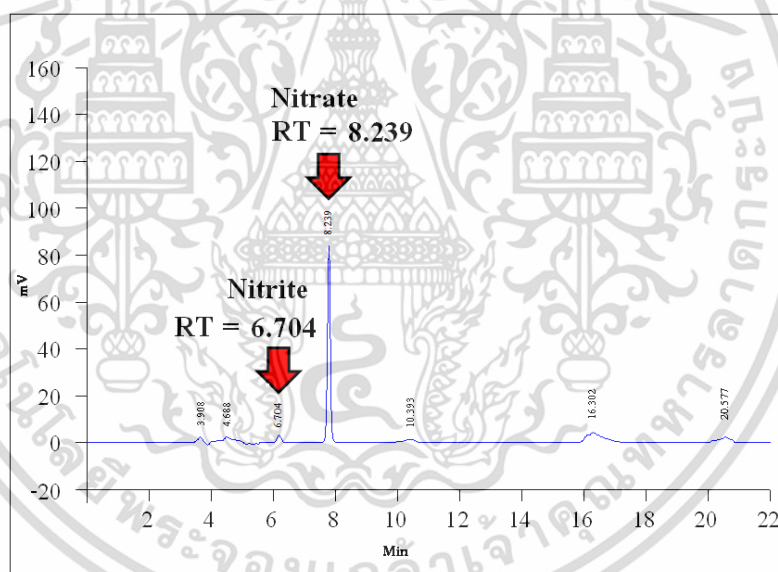
4.4 การหาค่า LOD และ LOQ (Limit of detection และ Limit of quantitation)

จากค่า LOD ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ที่ได้แสดงว่าปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ที่ต่ำที่สุดที่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 0.11 และ 0.13 ppm ตามลำดับ และจากค่า LOQ ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ที่ได้แสดงว่าปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ที่ต่ำที่สุดที่สามารถวิเคราะห์และแสดงผลเป็นตัวเลขได้มีค่าเท่ากับ 0.13 และ 0.19 ppm ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ค่า LOD และ LOQ ของสารมาตรฐานไนเตรท และไนไตรท์

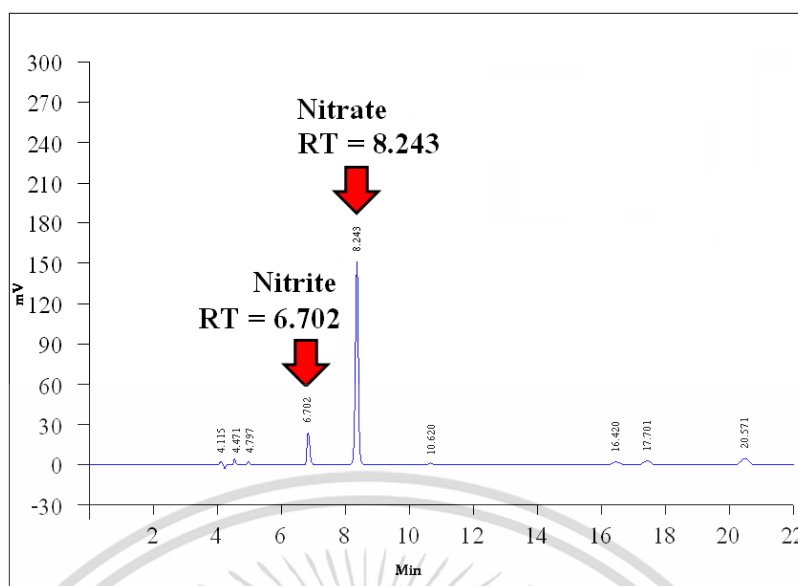
สารมาตรฐาน	LOD (ppm)	LOQ (ppm)
Nitrate 0.1 ppm	0.11	0.13
Nitrite 0.1 ppm	0.13	0.19

4.5 การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์



รูปที่ 4.5 HPLC Chromatogram ของตัวอย่างใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ได้ผล Chromatogram ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อเทียบค่า RT Chromatogram ของตัวอย่างกับ RT ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ดังรูปที่ 4.1 (b) พบว่าไนเตรทมีค่า RT เท่ากับ 8.239 นาทีซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า RT ของสารมาตรฐานส่วนไนไตรท์มีค่า RT ของเท่ากับ 6.704 นาที ซึ่งใกล้เคียงกับค่า RT ของสารมาตรฐานเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.6 HPLC Chromatogram ของตัวอย่างใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ที่ Spike สารมาตรฐาน ไนเตรทและไนไตรท์ความเข้มข้น 10 ppm

เนื่องจากในผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4.5 มีปริมาณไนไตรท์ในตัวอย่างน้อยมาก ผู้ทดลองจึง Spike สารมาตรฐานไนไตรท์และไนเตรท ความเข้มข้น 10 ppm ลงไปในสารสกัดตัวอย่างเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ พบว่าเมื่อ Spike สารมาตรฐานลงในสารสกัดตัวอย่างจะพบ Peak ของไนเตรทที่ค่า RT เท่ากับ 8.243 นาที และพบ Peak ของไนไตรท์ที่ค่า RT เท่ากับ 6.702 นาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า RT ของสารมาตรฐานดังรูปที่ 4.1 (b) โดยพบว่า Peak ของสารไนเตรทและไนไตรท์ที่วิเคราะห์ได้ซึ่งได้ทำการ Spike สารมาตรฐานลงไปในนั้นมีค่าความสูงของ Peak เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจากการทดลองนี้ทำให้สามารถยืนยันได้ว่า Peak ที่พบในรูปที่ 4.5 ที่ค่า RT เท่ากับ 6.704 และ 8.239 นาทีเป็นสารไนไตรท์และไนเตรทในตัวอย่างใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์จริง

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า % Recovery และค่า % RSD ของไนเตรทและไนไตรท์เมื่อ Spike สารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ลงในตัวอย่างใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์

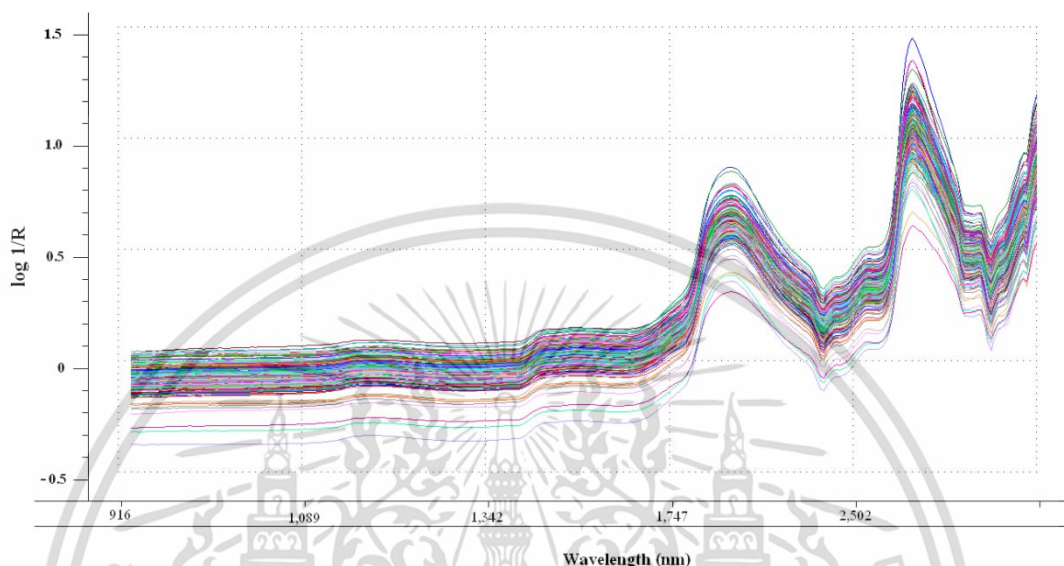
ชื่อสาร	% Recovery	% RSD
Nitrate	99.95	0.035
Nitrite	99.51	1.22

เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากตารางที่ 4.6 พบว่าค่า %Recovery และ ค่า % RSD ของสารไนเตรทและไนไตรท์ในตัวอย่างใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์มีค่าไม่เกินเกณฑ์กำหนดตาม AOAC PEER (Rutendo, 2009) คือ 80 – 110% และ 7.3% และ 11% ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในตัวอย่างใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ด้วยเทคนิค HPLC นี้มีความถูกต้องและแม่นยำสูง

จากผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ที่ปลูกโดยฝ่ายเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย มีค่าอยู่ในช่วง 610.29 – 1,623.70 ppm และ 0.20 – 0.50 ppm ตามลำดับ (ตารางภาคผนวกที่ ข.1) แสดงว่าตัวอย่างมีความปลอดภัยต่อการบริโภคเนื่องจากปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ไม่เกินเกณฑ์กำหนด (ค่า ADI ของไนเตรทเท่ากับ 3.7 mg/kg b.w./day, ค่า ADI ของไนไตรท์เท่ากับ 0.07 mg/kg b.w./day) (Dich และคณะ 1996) เนื่องจากก่อนการเก็บเกี่ยวผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ได้มีการลดความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารและให้น้ำประปาแทนสารละลายธาตุอาหารก่อนการเก็บเกี่ยวส่งผลทำให้ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์มีปริมาณลดลง และมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค

นฤมล และคณะ (2554) ศึกษาการตรวจวัดปริมาณไนเตรทในผักกาดหอมพันธุ์ Green oak ที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ พบว่าการให้น้ำแทนสารละลายธาตุอาหารก่อนการเก็บเกี่ยว 2 – 3 วัน จะทำให้ปริมาณไนเตรทลดลงประมาณ 60 – 65% ของค่าที่ได้จากต้นที่เก็บเกี่ยวจากสารละลายธาตุอาหารทันที สอดคล้องกับงานวิจัยของดิเรก (2547) ซึ่งได้รายงานไว้ถึงการจัดการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเพื่อลดปริมาณไนเตรทตกค้างในพืช สามารถทำได้โดยลดความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารที่ใช้ปลูกในสัปดาห์สุดท้าย และให้น้ำประปาแทนสารละลายธาตุอาหารก่อนการเก็บเกี่ยว 1 – 2 วัน นอกจากนี้ควรให้พืชได้รับแสงอย่างเต็มที่ก่อนการเก็บเกี่ยว 1 สัปดาห์ เนื่องจากเอนไซม์ไนเตรตรีดักเตส (Nitrate reductase) จะถูกกระตุ้นให้ทำงานด้วยแสงแดด ทำให้ไนเตรทเปลี่ยนเป็นไนไตรท์และแอมโมเนียก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นอินทรีย์สารเพื่อสังเคราะห์เป็นกรดอะมิโนและโปรตีนในที่สุด และในสารละลายธาตุอาหารควรมีธาตุโมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) ด้วย เนื่องจากเป็นธาตุที่กระตุ้นในการทำงานของเอนไซม์ไนเตรตรีดักเตส

4.6 การสร้างสมการในการทำนายปริมาณไนเตรทและไนโตรที่ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ จากข้อมูลสเปกตรัมโดยใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานในย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด

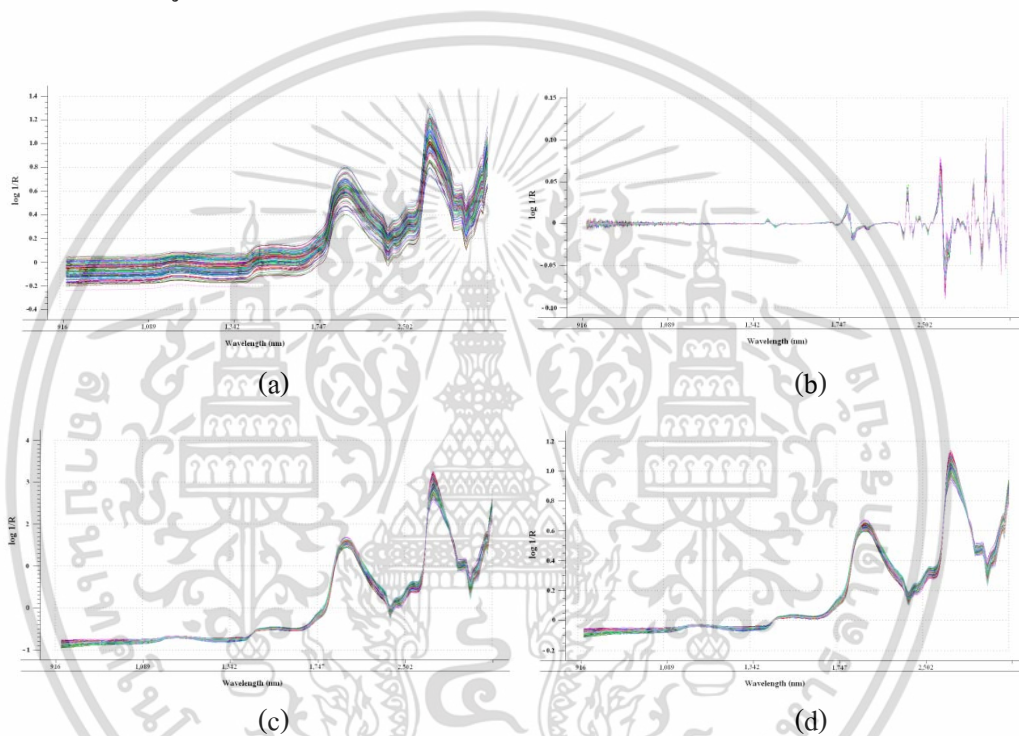


รูปที่ 4.7 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานเฉลี่ยของใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์จำนวน 300 ตัวอย่าง

ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากการวัดใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ในทุกชุดการทดลองด้วยเทคนิคการดูดกลืนพลังงานในย่านใกล้อินฟราเรด ในช่วงความยาวคลื่นที่ 800 – 2,500 nm แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยแกน Y แสดงค่าการดูดกลืนพลังงาน ($\log 1/R$) และแกน X แสดงความยาวคลื่นในหน่วยนาโนเมตร ลักษณะของข้อมูลสเปกตรัมที่ได้มีค่าการดูดกลืนที่สูง (Peak) และครอบคลุมช่วงกว้าง (Board band) ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1,869 - 2,139 nm และช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1,365 – 1,667 nm ซึ่งเป็นช่วงค่าการดูดกลืนที่ซ้อนทับกัน (Overlap) ของน้ำและองค์ประกอบคาร์โบไฮเดรต (First overtone ของหมู่ OH) และองค์ประกอบไนโตรเจน (Second overtone ของหมู่ NH) ในช่วงคลื่น NIRs (วิชัย, 2555)

ลักษณะการซ้อนทับกัน (Overlap) ของการดูดกลืนแสงที่ได้ทำให้ข้อมูลสเปกตรัมไม่สามารถบอกรายละเอียดข้อมูลสมบัติทางเคมีของใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ได้ ดังนั้นการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัม (Pretreatment) ก่อนนำไปหาความสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ (Reference value) จึงมีความสำคัญ

สมการทำนายปริมาณไนเตรทและไนโตรเจนในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์สร้างจากสเปกตรัมของใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์จำนวนหลายสเปกตรัมซึ่งมีความแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อน (Error) ของสมการทำนายจึงจำเป็นต้องแยกข้อมูลที่มีความแตกต่างจากข้อมูลส่วนใหญ่่ออกเสียก่อน (Outliers) จากนั้นจึงนำข้อมูลสเปกตรัมที่เหลืออยู่มาแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ข้อมูลสเปกตรัมที่ใช้ในการสร้างสมการ (Calibration set) และข้อมูลที่ใช้ในการทวนสอบสมการ (Validation set) ในอัตราส่วน 3:1 ตามลำดับ ข้อมูลสเปกตรัมจะถูกนำมาปรับแต่งด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ได้แก่ Savitzky – Golay Smoothing, Savitzky – Golay 2nd derivative, SNV และ MSC ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะของข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยเทคนิคต่าง ๆ

- (a) Savitzky – Golay Smoothing
- (b) Savitzky – Golay 2nd derivative
- (c) Standard normal variate (SNV)
- (d) Multiplicative scatter correction (MSC)

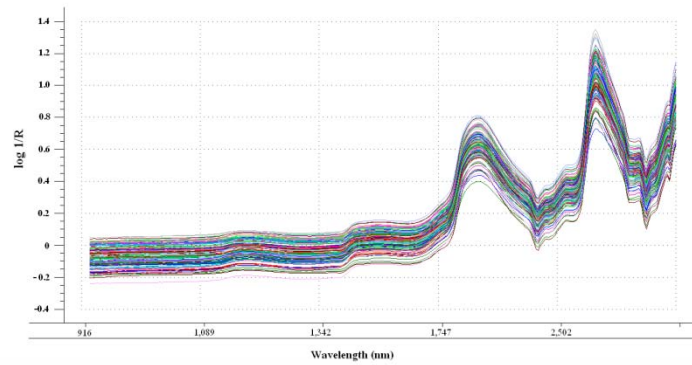
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 ปริมาณไนเตรทไนโบผักคะน้ำไฮโดรโปนิกส์

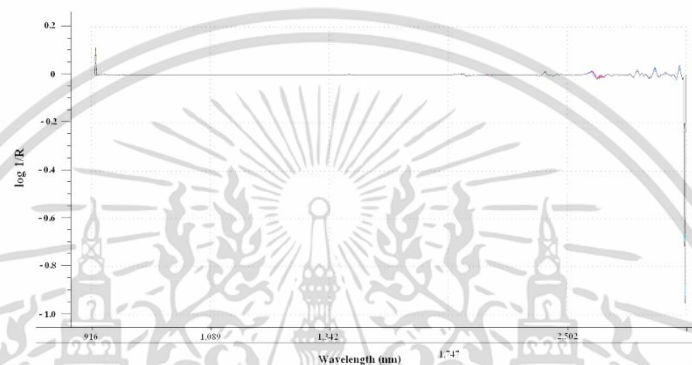
การสร้างสมการในการทำนายปริมาณไนเตรทไนโบผักคะน้ำไฮโดรโปนิกส์ ทำโดยการเก็บข้อมูลไนโบผักคะน้ำไฮโดรโปนิกส์ จำนวน 300 ตัวอย่าง นำมาวิเคราะห์โดยแบ่งไนโบผักคะน้ำไฮโดรโปนิกส์ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการโมเดล (Calibration set) จำนวน 200 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ (Prediction set) จำนวน 100 ตัวอย่าง วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง NIRs ในช่วงความยาวคลื่น 800 – 2,500 nm (ดังแสดงในรูปที่ 4.7) แล้ววิเคราะห์หาปริมาณไนเตรท หลังจากนั้นสร้างสมการในการทำนายไนเตรทโดยคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัม NIRs กับปริมาณไนเตรทโดยใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Partial least squares regression (PLSR) และเปรียบเทียบแบบ Cross - validation ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ Unscambler (version 9.7, CAMO AS, Trondheim, Norway) โดยกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการโมเดลจะต้องมีค่าปริมาณไนเตรทสูงที่สุดและต่ำที่สุดในกลุ่มนี้ จากการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทไนโบผักคะน้ำไฮโดรโปนิกส์พบว่ามีปริมาณไนเตรทสูงที่สุดเท่ากับ 1,623.70 ppm และปริมาณไนเตรทต่ำที่สุดเท่ากับ 610.3 ppm ซึ่งตารางที่ 4.7 แสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายปริมาณไนเตรท

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายปริมาณไนเตรทไนโบผักคะน้ำไฮโดรโปนิกส์

Items	Calibration set	Prediction set
number of sample	200	100
unit	ppm	ppm
range	610.3 – 1,623.7	615.4 – 1,553.6
mean	1,042.89	1,039.38
standard deviation (SD)	233.43	226.58
wavelength	800 – 2,500 nm	800 – 2,500 nm



(a)



(b)

รูปที่ 4.9 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานเฉลี่ยของกลุ่มไบฟักคะน้ำไฮโดรโปนิคส์ที่ใช้ในการทำนายปริมาณไนเตรท

(a) ค่าการดูดกลืนพลังงานเฉลี่ยแบบ Original spectra

(b) ค่าการดูดกลืนพลังงานเฉลี่ยด้วยวิธี MSC (Full) ร่วมกับ Smoothing และ 2nd derivative

จากรูปที่ 4.9 (a) แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานเฉลี่ยแบบ Original spectra ของกลุ่มไบฟักคะน้ำไฮโดรโปนิคส์ที่ใช้ในการทำนายปริมาณไนเตรทช่วงความยาวคลื่น 800 – 2,500 เมื่อได้ทำการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.8 และพบว่าการสร้างสมการด้วยวิธี MSC (Full) ร่วมกับ Smoothing และ 2nd derivative ใน Cross-validation ให้ผลดีที่สุด ดังรูปที่ 4.9 (b) จึงนำข้อมูลสเปกตรัมดังกล่าวมาสร้างสมการการทำนายปริมาณไนเตรทโดยใช้วิธี Partial least squares regression (PLSR) ซึ่งได้ผลดังนี้ คือ $R = 0.3075$ และ $RMSEC = 189.3712$ ppm หลังจากนั้นนำโมเดลสมการที่สร้างได้ไปทดสอบในกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ พบว่าได้ค่า $R = -0.1723$ และ $RMSEP = 1,757.24$ ppm ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

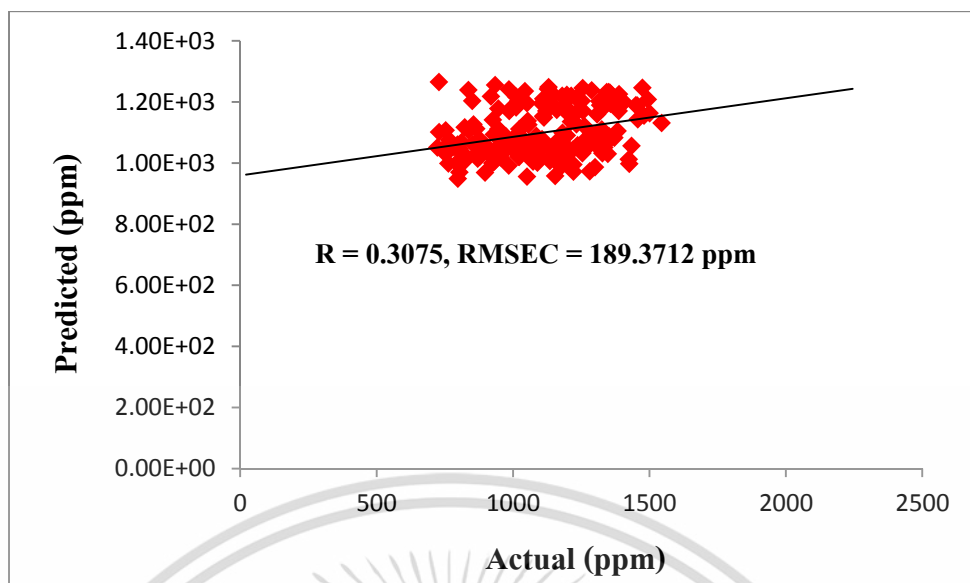
ตารางที่ 4.8 แสดงความแม่นยำในสร้างสมการในการทำนายปริมาณไนเตรทด้วยวิธีปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ จำนวน 21 วิธี

Spectral Pretreatments	N	F	R	RMSECV (ppm)
Original	200	7	0.1907	198.4194
Smoothing	200	9	0.2792	192.7861
1 st derivative	200	4	0.2322	194.8620
2 nd derivative	200	3	0.2672	192.5398
MSC (full)	200	7	0.2492	195.2928
MSC (Common offset)	200	9	0.2558	194.9219
MSC (Common amplification)	200	6	0.2284	195.6617
Mean	200	9	0.2486	195.4899
SNV	200	5	0.2239	195.1938
Smoothing + 1 st derivative	200	5	0.2678	192.4554
Smoothing + 2 nd derivative	200	5	0.2505	194.1091
MSC (full) + Smoothing + 1 st derivative	200	2	0.2394	192.5380
MSC (Common offset) + Smoothing + 1 st derivative	200	4	0.2609	192.4087
MSC (Common amplification) + Smoothing + 1 st derivative	200	5	0.2876	191.2881
MSC (full) + Smoothing + 2 nd derivative	200	4	0.3075	189.3712
MSC (Common offset) + Smoothing + 2 nd derivative	200	5	0.2520	193.7675
MSC (Common amplification) + Smoothing + 2 nd derivative	200	6	0.2612	194.2391
mean + Smoothing + 1 st derivative	200	5	0.2633	192.7462
mean + Smoothing + 2 nd derivative	200	4	0.2483	193.5654
SNV+ Smoothing + 1 st derivative	200	2	0.2316	192.9630
SNV+ Smoothing + 2 nd derivative	200	4	0.2908	190.7635

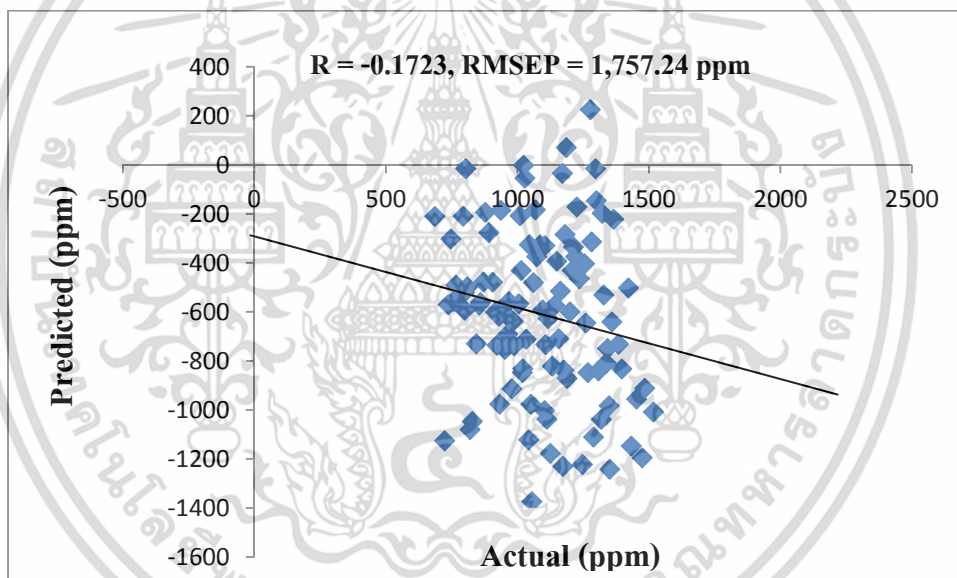
ตารางที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ของการทำนายปริมาณไนเตรท

Model	Pretreatment	F	N	R	RMSEC (ppm)	RMSEP (ppm)
Calibration set	Original	4	200	0.3075	189.3712	-
Prediction set	Original	4	100	-0.1723	-	1,757.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 4.10 แสดงผลการทำนายปริมาณไนเตรทในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์

(a) กลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ

(b) กลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

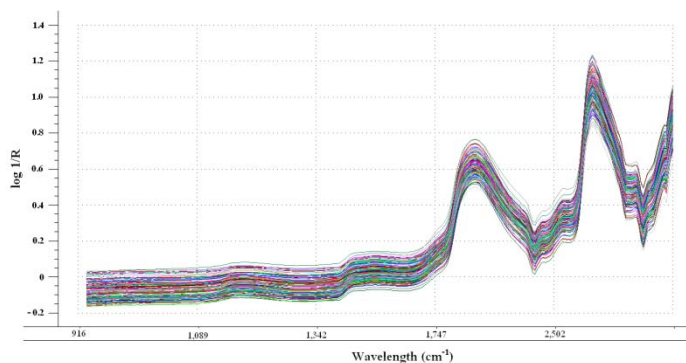
รูปที่ 4.10 (a) แสดงผลการทำนายปริมาณไนเตรทในกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและรูปที่ 4.10 (b) แสดงผลการทำนายปริมาณไนเตรทในกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ จากรูปพบว่าข้อมูลทั้ง 2 ชุด (Calibration set และ Validation set) มีการกระจายตัวที่ไม่สัมพันธ์กับเส้น Target line (เส้นที่ทำมุม 45°) บ่งบอกถึงการผลทำนายไม่แม่นยำเนื่องจากข้อมูลมีความสัมพันธ์กันน้อย (Williams, 2007)

4.6.2 ปริมาณไนเตรทในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์

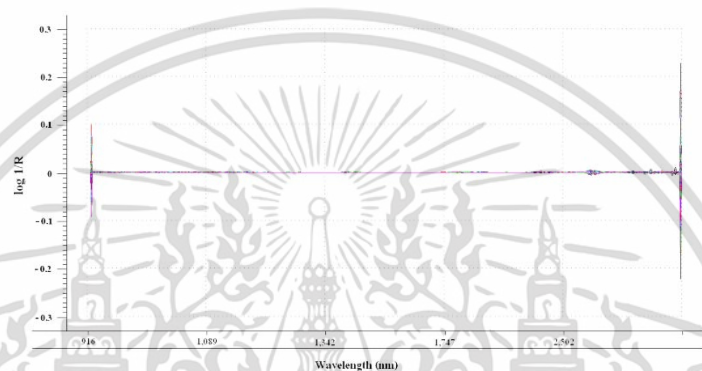
การสร้างสมการในการทำนายปริมาณไนเตรทในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ ทำโดยการเก็บข้อมูลใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ จำนวน 300 ตัวอย่าง นำมาวิเคราะห์โดยแบ่งใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการโมเดล (Calibration set) จำนวน 200 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ (Prediction set) จำนวน 100 ตัวอย่าง วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง NIRs ในช่วงความยาวคลื่น 800 – 2,500 nm แล้ววิเคราะห์หาปริมาณไนเตรท หลังจากนั้นสร้างสมการในการทำนายไนเตรทโดยคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัม NIRs กับปริมาณไนเตรทโดยใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Partial least squares regression (PLSR) และเปรียบเทียบแบบ Cross - validation ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ Unscambler (version 9.7, CAMO AS, Trondheim, Norway) โดยกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการโมเดลจะต้องมีค่าปริมาณไนเตรทสูงสุดและต่ำสุดอยู่ในกลุ่มนี้ ซึ่งตารางที่ 4.10 จะแสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายปริมาณไนเตรท

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายปริมาณไนเตรทในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์

Items	The calibration set	The prediction set
number of sample	200	100
unit	ppm	ppm
range	0.20 – 0.49	0.20 – 0.49
mean	0.35	0.35
standard deviation (SD)	0.04	0.04
wavelength	800 – 2,500 nm	800 – 2,500 nm



(a)



(b)

รูปที่ 4.11 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานเฉลี่ยของกลุ่มไบฟักอะน้ำไฮโดร โปนิคส์ที่ใช้ในการทำนายปริมาณไนโตรเจน

(a) ค่าการดูดกลืนพลังงานเฉลี่ยแบบ Original spectra

(b) ค่าการดูดกลืนพลังงานเฉลี่ยด้วยวิธี Center and scale (Mean center) ร่วมกับ Smoothing และ 2nd derivative

จากรูปที่ 4.11 (a) เป็นภาพการแสดงค่าการดูดกลืนพลังงานเฉลี่ยแบบ Original spectra ช่วงความยาวคลื่น 800 – 2,500 nm เมื่อได้ทำการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.11 และพบว่าการสร้างสมการด้วยวิธี Center and scale (Mean center) ร่วมกับ Smoothing และ 2nd derivative ดังรูปที่ 4.11 (b) ใน Cross - validation ให้ผลดีที่สุด จึงนำข้อมูลสเปกตรัมดังกล่าวมาสร้างสมการการทำนายไนโตรเจนโดยใช้วิธี Partial least squares regression (PLSR) ซึ่งได้ผลดังนี้ คือ $R = 0.0146$ และ $RMSEC = 0.0409$ ppm และนำโมเดลสมการที่สร้างได้ไปทดสอบในกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการพบว่าได้ค่า $R = -0.0813$ และ $RMSEP = 0.0556$ ppm ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

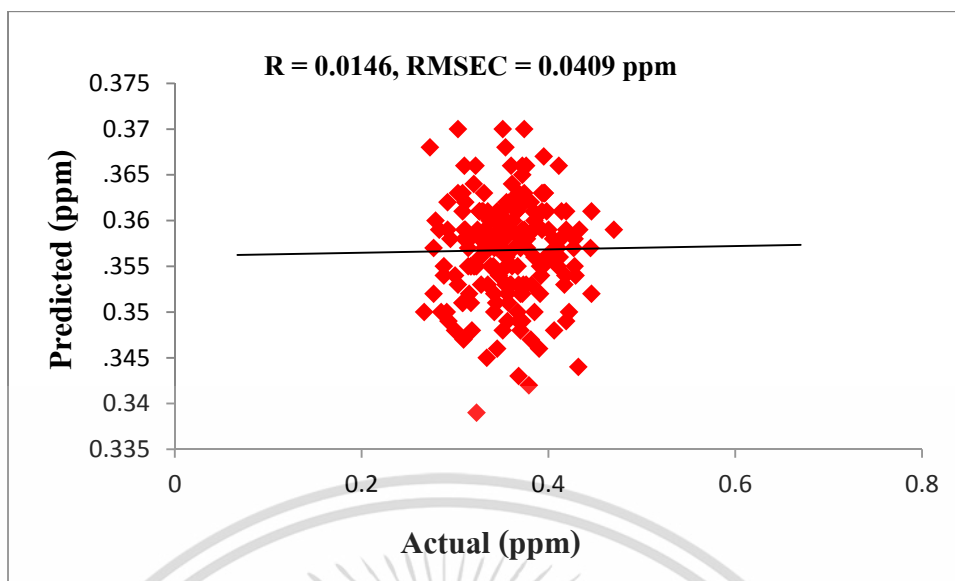
ตารางที่ 4.11 แสดงความแม่นยำในสร้างสมการในการทำนายปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธีปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ จำนวน 21 วิธี

Spectral Pretreatments	N	F	R	RMSECV (ppm)
Original	200	2	-0.0157	0.0411
Smoothing	200	1	-0.1182	0.0411
1 st derivative	200	1	-0.1698	0.0412
2 nd derivative	200	1	-0.2150	0.0417
MSC (full)	200	1	-0.0205	0.0408
MSC (Common offset)	200	1	-0.0047	0.0409
MSC (Common amplification)	200	1	-0.0799	0.0409
Mean	200	1	-0.0946	0.0412
SNV	200	1	-0.0080	0.0408
Smoothing + 1 st derivative	200	3	-0.0284	0.0413
Smoothing + 2 nd derivative	200	2	-0.0307	0.0412
MSC (full) + Smoothing + 1 st derivative	200	1	-0.0729	0.0411
MSC (Common offset) + Smoothing + 1 st derivative	200	1	-0.1281	0.0413
MSC (Common amplification) + Smoothing + 1 st derivative	200	2	-0.0709	0.0414
MSC (full) + Smoothing + 2 nd derivative	200	2	-0.0038	0.0410
MSC (Common offset) + Smoothing + 2 nd derivative	200	2	-0.0009	0.0410
MSC (Common amplification) + Smoothing + 2 nd derivative	200	1	-0.1180	0.0410
mean + Smoothing + 1 st derivative	200	3	-0.0721	0.0416
mean + Smoothing + 2 nd derivative	200	2	0.0146	0.0409
SNV+ Smoothing + 1 st derivative	200	1	-0.0736	0.0411
SNV+ Smoothing + 2 nd derivative	200	2	0.0016	0.0409

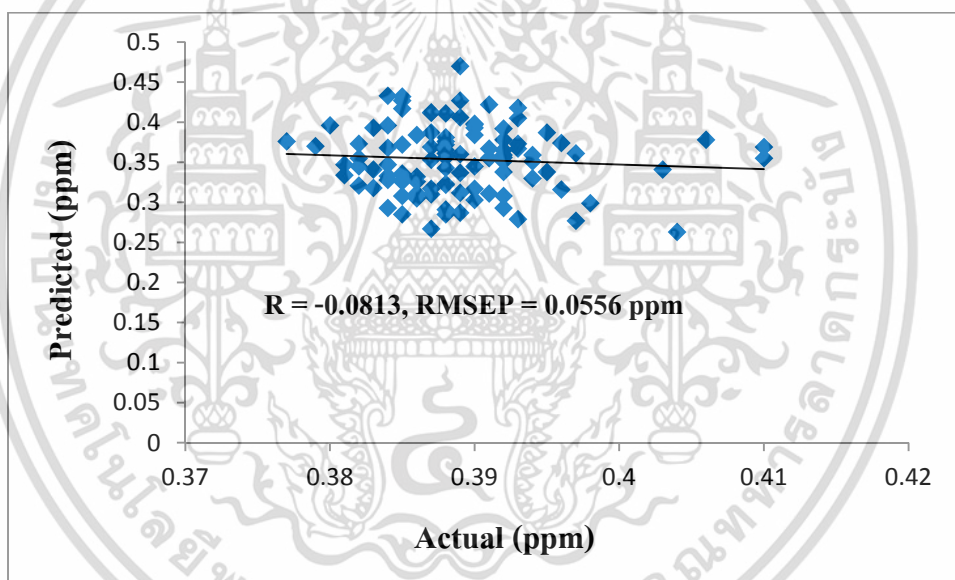
ตารางที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ของการทำนายปริมาณไนโตรเจน

Model	Pretreatment	F	N	R	RMSEC (ppm)	RMSEP (ppm)
Calibration set	Original	2	200	0.0146	0.0409	-
Prediction set	Original	1	100	-0.0813	-	0.0556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 4.12 แสดงผลการทำนายปริมาณไนโตรเจนในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์

(a) กลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ

(b) กลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ

จากรูปที่ 4.12 (a) แสดงผลการทำนายปริมาณไนโตรเจนในกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ และรูปที่ 4.12 (b) แสดงผลการทำนายปริมาณไนโตรเจนในกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ จากรูปพบว่าข้อมูลทั้ง 2 ชุด (Calibration set และ Validation set) มีการกระจายตัวที่ไม่สัมพันธ์กับเส้น Target line (เส้นที่ทำมุม 45°) บ่งบอกถึงการผลทำนายไม่แม่นยำเนื่องจากข้อมูลมีความสัมพันธ์กัน

น้อย (Williams, 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สถานะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ของใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ด้วยเทคนิค HPLC คือ อัตราส่วนระหว่าง Mobile phase A (5 mM tetrabutyl ammonium hydrogen sulfate, pH 6.5) และ Mobile phase B (0.05 M n-octylamine, pH 4.0) คือ 90:10 สามารถแยก Peak ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ที่ RT เท่ากับ 8.679 และ 6.684 นาที ตามลำดับ ค่า Linearity ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ได้ค่า $R^2 = 0.9997$ และ 1 ตามลำดับ เมื่อทำการตรวจสอบการใช้ได้ของวิธีโดยหาค่า Accuracy และ Precision ของเทคนิค HPLC โดยใช้สารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ พบว่ามีค่า %Recovery และ %RSD อยู่ในเกณฑ์การยอมรับค่า LOD ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์มีค่าเท่ากับ 0.11 และ 0.13 ppm ตามลำดับ และค่า LOQ ของสารมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์มีค่าเท่ากับ 0.13 และ 0.19 ppm ตามลำดับ และสามารถวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ที่ปลูกโดยฝ่ายเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยมีค่าอยู่ในช่วง 610.29 – 1,623.70 ppm และ 0.22 – 0.50 ppm ตามลำดับ

การประยุกต์ใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด ในช่วงความยาวคลื่น 800 – 2,500 nm ในการตรวจสอบและทำนายปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ของใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ไม่สามารถใช้ผลวิเคราะห์ในการทำนายได้ เนื่องจากข้อมูลที่ใช้สร้างสมการทำนายปริมาณไนเตรทและไนไตรท์มีความสัมพันธ์ของข้อมูลน้อยซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำและประสิทธิภาพในการทำนาย โดยให้ค่า R เท่ากับ -0.1723 และ 1,757.24 ตามลำดับ ค่า RMSEP เท่ากับ -0.0813 ppm และ 0.0556 ppm จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการดูดกลืนพลังงานในย่านใกล้อินฟราเรดไม่สามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ของใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์แบบไม่ทำลายได้

ข้อเสนอแนะ

จากผลการสร้างสมการทำนายปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนพลังงานในย่านใกล้อินฟราเรดที่ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ อาจเนื่องจากปริมาณสารที่วิเคราะห์ในตัวอย่างมีน้อยมากในระดับ ppm รวมทั้งเครื่องมือและวิธีที่ใช้ในการวัดการดูดกลืนพลังงานอาจไม่เหมาะสมซึ่งส่งผลให้ผลการวิจัยผิดพลาด

บรรณานุกรม

- กิตติ บุญเลิศนิรันดร์. 2554. ผลของการพรางแสงต่อผลผลิตและปริมาณไนเตรตตกค้างในผักกาดหอมบัตเตอร์เฮดที่ปลูกโดยไม่ใช้ดิน. สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตพระนครศรีอยุธยา.
- จิตตรา ค้วงช้าง. 2552. การศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวและอายุการเก็บรักษาต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- จรรยาพงศ์ เทียมประทีป. 2552. การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งโดยใช้วิธีแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. ม.ป.ป. โครมาโทกราฟีเหลวความดันสูง (High pressure liquid chromatography). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://home.kku.ac.th/chuare/12/HPLC.pdf> (14 พฤษภาคม 2557).
- ฐานความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการท่องเที่ยว จังหวัดฉะเชิงเทรา. 2551. การปลูกพืชไร้ดิน (Soilless Culture) ด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ (Hydroponics). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.chachoengsao.most.go.th/index.php?option=com_content&task=view&id=250&Itemid=1 (22 กรกฎาคม 2554).
- ดิเรก ทองอร่าม. 2547. การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน. หลักการการจัดการผลิตและเทคโนโลยีการผลิตเชิงธุรกิจในประเทศไทย, พิมพ์ครั้งที่ 2, ชรรมรัชการพิมพ์, ราชบุรี, 724 น.
- ชิตีมา แสงจันทร์, ไชยพร ยุกเซ็น และ รพีพร โรจน์แสงเรือง. 2554. ภาวะออกซิเจนในเลือดต่ำจาก Methemoglobinemia. ภาควิชาเวชศาสตร์ฉุกเฉิน คณะแพทยศาสตร์ โรงพยาบาลรามาธิบดี.
- ธรรมศักดิ์ ทองเกตุ อัญชนีย์ อุทัยพัฒนาชีพ และ วุฒิพงษ์ พิมพ์โครต. 2545. การสำรวจเบื้องต้นปริมาณสารไนเตรตตกค้างในผักกาดหอมปลูกโดยไม่ใช้ดินในฤดูกาลต่าง ๆ. รายงานการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 40 หน้า 67-73. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นฤมล วชิรปัทมา, ศิรินทรา น่วมอินทร์, วีรวัฒน์ รอดคุ้ม และเยาวพา จิระเกียรติกุล. 2554. การวิเคราะห์ไนเตรตในผักไฮโดรโปนิกส์โดย Capillary Electrophoresis. ว.วิท. ปีที่ 19 ฉบับที่ 4 ต.ค. – ธ.ค. 54.
- นิพนธ์ ดังคนานุรักษ์. 2545. หลักพื้นฐานเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. การอบรมเชิงปฏิบัติการ การควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ:39 – 66.
- นันทินี ทองคงเหยา. 2549. อิทธิพลของสัดส่วนระหว่างไนเตรทและแอมโมเนียมและระดับความเข้มข้นไนโตรเจนในสารละลายธาตุอาหารที่มีต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพของผักกบ่งจีน. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ปณิธาน กวางวโรภาส และ วินัย วนานุกูล. ม.ป.ป. Methemoglobinemia. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.errama.com/system/spaw2/uploads/files/Methemoglobinemia.pdf> (14 พฤษภาคม 2557).
- ปาริชาติ เทียนจุมพล, วิชชา สะอาดสุด และ Guy Self. 2553. อิทธิพลของตำแหน่งมะม่วงต่อการประเมินคุณภาพด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. ว. วิท. กษ. 41 : 1 (พิเศษ): 409 - 412.
- ปานมนัส ศิริสมบูรณ์. 2556. เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลผลิตเกษตรและอาหาร. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.foodnetworksolution.com> (8 พฤษภาคม 2557).
- พัชรภรณ์ บุตรวงษ์ และเอกชัย ขอบพบสุข. 2545. การตรวจสอบคุณภาพเนื้อสัมผัสและรสชาติของมะม่วงส่งออกด้วยวิธี NIR Spectroscopy. ปรินญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- พัชรภรณ์ ภูไพบูลย์, ศิริวัลย์ สร้อยกล่อม และวาสนา บัวงาม. 2552. การวิเคราะห์การสะสมไนเตรทในผักสด. การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47 : 289 – 298.
- พัลลภ ทองเนียม, ไพลิน ชัยตรี และสาวตรี นิลทุ่ย. 2544. การตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุดโดยวิธีการไม่ทำลายด้วยวิธี NIR Spectroscopy. ปรินญาณีพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

- พงษ์ศักดิ์ น้อยพยัคฆ์. 2547. **คู่มือดูแลสุขภาพด้วยสุดยอดธาตุอาหาร**. ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ.
- พนมพร ถนอมทรัพย์. 2545. **ความปลอดภัย “ภัย” ของผักไร้ดิน (Hydroponics)**. โลกสิ่งแวดล้อม มีนาคม-เมษายน 2545.
- มนูญ ศิริบุษย์. 2544. **การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน ผู้การปฏิบัติในประเทศไทย**. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, ปัตตานี. 90 น.
- ยุวดี จอมพิทักษ์, ทรงชัย สิมะโรจน์, พรชัย สิมะโรจน์, ธวัชชัย สิมะโรจน์ และมยุรี ภิรมย์โสภา. 2541. **ผัก อาหารมีพลัง**. รุ่งแสงการพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- ระพีพรรณ ใจภักดี. 2544. **ผักใบ**. สำนักพิมพ์แสงแดดเพื่อเด็ก, กรุงเทพฯ.
- รสสุคนธ์ ทองศรีอัน. 2547. **ปริมาณไนโตรเจน และไนเตรทในผักคะน้าอินทรีย์ ผักคะน้าที่ปลอดภัยจากสารพิษ และคะน้าเคมี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาพืชวิทยาทางอาหารและโภชนาการ. มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพฯ.
- ราเชนทร์ วิสุทธิแพทย์, สยาม สีนสวัสดิ์, ศิริธรรม สิงห์โต และประธาน โพธิสวัสดิ์. 2548. **เทคโนโลยีการปลูกพืชไร้ดิน (Soiless Culture)**. ฝ่ายเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กรุงเทพฯ.
- วิชัย หลุทัยธนาสันต์. 2555. **เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม**. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ศุมาพร เกษมสำราญ. 2545. **ขั้นตอนการสร้างสมการประเมินค่าทางเคมีและการทดสอบสมการในเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด**. หน้า 131-151. ใน : วารุณี ชนะแพทย์, อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุลและชงชัย สุวรรณสิขณน์, (ผู้รวบรวม), การควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. 27-28 พฤษภาคม 2545. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร.
- ศุภกิจ หอวิมานพร. 2552. **การศึกษาองค์ประกอบของน้ำผึ้งที่ได้มาตรฐานโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์. 2557. **การวิเคราะห์ทางสเปกโตรสโกปี**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.kmitl.ac.th/sisc>. (8 พฤษภาคม 2557)
- สนธิสุข ชีระชัยชยุติ, อนุพันธ์ เทิดวงศ์วรกุล, วารุณี ชนะแพทย์ และขนิษฐา แสงแก้ว. 2554. **ความเป็นไปได้ในการคัดแยกผลมังคุดเปลือกแข็งแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคการวิเคราะห์พหุตัวแปร**. ว. วิทย. กษ. 42 : 1 (พิเศษ): 143 – 146.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัมฤทธิ์ เพื่อองจันทร์. 2544. **สรีรวิทยาการพัฒนารากพืช**. โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา, กรุงเทพฯ.
- สุภาพร เรื่องวิทยาโชติ. 2547. **การพรางแสงตาข่ายสีขาว สีฟ้า และสีเขียวที่ส่งผลต่อการตอบสนองต่อแสงของใบ และการเจริญเติบโตของคะน้า**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน, นครปฐม.
- อนุพันธ์ เทอดดวงสุวรรณกุล. 2545. **การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์**. การอบรมเชิงปฏิบัติการ การควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค NIRs เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. 27 - 28 พฤศจิกายน 2545. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์เกษตรฯ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 67 - 98 หน้า.
- อาทิตย์ พวงสมบัติ. 2549. **การตรวจสอบคุณภาพภายในผลแก้วมังกรด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อาทิตย์ จันทร์หิรัญ, วารุณี ษณะแพสย์, สุมาพร เกษมสำราญ และจิราพร อนุสรณ์วงศ์ชัย. 2553ก. **การตรวจสอบค่าความหวานของผลลองกองด้วยเครื่องวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านใกล้อินฟราเรด**. ว. วิทย์. กษ. 41(3/1)(พิเศษ): 29 – 32.
- อาทิตย์ พวงสมบัติ, ศิวลักษณ์ ปลูกวิรัตน์ และอนุพันธ์ เทอดดวงสุวรรณกุล. 2553ข. **การศึกษาการวิเคราะห์คุณภาพแบบไม่ทำลายด้วยเครื่อง Vis/Nir Spectrometer**. ว. วิทย์. กษ. 41 : 1 (พิเศษ): 397 – 400.
- AOAC. 2000. **Official Method of the analysis 32nd ed** Association of official analytical chemists.
- Babik I. and Elkner K. 2002. **The effect of nitrogen fertilization and irrigation on yield and quality of broccoli**. Acta Hort. 571: 33-43.
- Babik I., Rumpel J. and Elkner K. 1996. **The influence of nitrogen fertilization on yield, quality and senescence of Brussels sprouts**. Acta Hort. 407:353 – 359.
- Bao J.S., Cai Y.Z. and Corke H. 2001. **Prediction of Rice Starch Quality Parameters by Near – Infrared Reflectance Spectroscopy**. J. of Food Sci. 66(7): 936 – 939.
- Beverly R.B., Latimer J.G. and Smittle D.A.. 1993. **Preharvest physiological and culture effects on postharvest quality**, pp. 73-98 In R.L. Shewfelt and S.E. Prussia (eds.). Postharvest handling: A system approach. Acad., New York.
- Branes, R.J., Dhanoa, M.S. and Lister, S.J. 1989. **Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra**. Appl. Spectrosc. 43(5): 772-777.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Cataldo DA, Haroon LE, Schrader LE and Youngs VL. 1975. **Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid.** Communications in Soil Science and Plant Analysis 6, 71 – 80.
- Chewya J.A. 1984. **Yield and quality of kale as affected by N-side dressing, spacing and supplementary irrigation.** Acta Hort. 163: 295 – 301.
- Delwiche S.R., Mckenzie K.S. and Webb B.D. 1996. **Quality Characteristics in Rice by Near – Infrared Reflectance Analysis of Whole – Grain Milled Samples.** Cereal Chem. 73(2): 257 -263.
- Dich J., Järvinen R., Knekt P. and Penttilä P.L. (1996) **Dietary intakes of nitrate, nitrite and NDMA in the Finnish Mobile Clinic Health Examination Survey.** Food Addit. Contam., 13, 541–552.
- Elkner K. and Kaniszewski S. 1995. **Effect of drip irrigation and mulching on quality of tomato fruits.** Acta Hort. 379: 175 – 180.
- Greensill C.V. and Walsh K.B. 2000. **Optimization of instrument precision and wavelength resolution for the performance of NIR calibrations of sucrose in a water - cellulose matrix.** Appl. Spectrosc. Vol. 54(3) : 426-430.
- Guoqiang F., Jianwen Z., Ran D. and Gao L. 2009. **Determination of soluble solids and firmness of apples by Vis/NIR transmittance.** J. of Food Eng. 93(4): 416-420.
- Guyer D.E., Ariana D., Shrestha B. and Lu R.F. 2006. **Opto - electronic determination of Insect presence in fruit.** In : Portland, OR, Proceedings of the ASAE, Paper number 066061.
- Hruschka W. R. 2001. Data Analysis: **Wavelength Selection Methods.** In: P.C. Williams, and K. H. Nortis, (eds.), Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries. 2nd ed. American Association of Cereal Chemists, Inc. St. Paul, Minnesota, USA. 39-58.
- Kawano S., Abe H. and Iwamoto M. 1995. **Development of a calibration equation with temperature compensation for determination the Brix value in intact peaches.** J. of NIRs. 3: 211-218.
- Kawano S. 2002. **Sampling and sample presentation.** pp. 115-124. In: Siesler, H.W., Ozaki, Y., Kawata, S. and Heise, H.M.(eds.), Near-Infrared Spectroscopy: Principle, Instrument, Application. WILEY-VCH Verlag GmbH. Germany.

- Knauer. 2007. **Determination of Nitrite and Nitrate in Friut Juices by UV Detection. Application Note.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.knauer.net> (17 พฤษภาคม 2555).
- Lee S. and Kader A. 2000. **Preharvest and postharvest factor influencing vitamin C content of horticultural crop.** Postharvest Biol. Technol. 20: 207-220.
- Liu Y., Chen X. and Ouyang A. 2008. **Nondestructive determination of pear internal quality indices by visible and near-infrared spectrometry.** LWT- Food Sci. and Tech. 41(9): 1720 -1725.
- Manuela Zude, Wemer B. Herppich, Huating Dou and Willium M. Miller. 2002. **Non – destructive Prediction of Grapefruit Sensitivity to Chilling Injury.** The Society for Engineering in agricultural, food and biological system, Paper Number : 026187.
- Mozafar A. 1996. **Decreasing the nitrate and increasing the vitamin c contents in spinach by a nitrogen deprivation method.** Plant Foods Hum. Nutr. 49: 155 - 162.
- Muller K. and Hippe J. 1987. **Influences of differences in nutrition on important quality characteristics of some agricultural crops.** Plant Soil. 100: 35 - 45.
- Nagy S. and Wardowski W.F. 1988. **Effect of agricultural practices, handling and storage on fruits,** p.73-100. *In* E. Karmas and R.S. Harris (eds). Nutritional Evaluation of Food Processing. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Osborne B.G., Fearn T. and Hindle P.H. 1993. **Practical NIR spectroscopy with Application in Food and Beverage Analysis.** Longman Scientific & Technical: 1-7.
- Rutendo K. 2009. **Validation of analytical methods.** Training workshop: Assessment of Interchangeable Multisource Medicines, Kenya.
- Salunkhe D.K., Bolin H.R. and Reddy N.R. 1991. Preharvest factors on postharvest yield and quality, vol. 1, p. 7-44. *In* Storage, Processing, and Nutritional Quality of Fruits and Vegetables. CRC Press, Boca Raton.
- Sarah E. McMullen, John A. Casanova, Lois K. Gross and Frank J. Schenck. 2005. **Ion Chromatographic Determination of Nitrate and Nitrite in Vegetable and Fruit Baby Food.** J.1 of AOAC Vol. 88, No.6, p. 1793 – 1796.
- Saranwong S. 2003. **Nondestructive determination of harvesting maturity of mango for fresh consuming by near infrared spectroscopy.** Ph. D. thesis. Chiang Mai University, Chiang Mai. 179 pp.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Schreiner M.S., Huyskens-Keil S., Peters P., Schonhof I., Krumbein A. and Widell S. 2002. **Seasonal climate effect on root color and compounds of red radish.** J. Sci. Food Agric. 82(11): 1325-1333.
- Siesler H.W., Ozaki Y. and Kawata S. 2002. **Near-Infrared Spectroscopy.** WILEYVCH Verlag GmbH, Federal Republic, Germany. 348 pp.
- Shin-shou Chou, Jen-chien Chung and Deng-fwu Hwang. 2003. **A High Performance Liquid Chromatography Method for Determining Nitrate and Nitrite Levels in Vegetables.** J. Food and Drug Anal. Vol. 11, No. 3, p. 233-238.
- Shao Y., He Y., Gomez A.H., Pereir A.G. and Qiu. Z. 2007. **Visible/near infrared spectrometric technique for nondestructive assessment of tomato 'Heatwave(Lycopersicumesculentum) quality characteristics.** J. of Food Eng. 81 : 672 - 678.
- Shewfelt R.L. 1990. **Quality of fruits and vegetables.** Food Technol. 44(6), 99 – 106.
- Sorenson J.N. 1984. **Dietary fiber and ascorbic acid in white cabbage as affected by fertilization.** Acta Hort. 163: 221-230.
- Villareal C.P., de la Cruz N.M. and Juliano B.O. 1994. **Rice amylase analysis by near – infrared transmittance spectroscopy.** Cereal Chem. 71:292 – 296.
- Weston, L.A. and Brath M.M. 1997. **Preharvest factors affecting postharvest quality of vegetable.** Hort. Sci. 32(5):812-816.
- Williams P.C. and Norris K.H. 2001. **Implementation of Near – Infrared Technology.** pp. 145-170. In: P.C. Williams, and K. H. Norris, (eds.), Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries. 2nd ed. American Association of Cereal Chemists, Inc. Sy. Paul, Minnesota, USA.
- Williams P.C. 2007. **Application of Near-Infrared Spectroscopy (NIRs) in the Agricultural and Food Industries.** July 4th, 2007. Kasetsart University, Bangkok, Thailand. 26 pp.
- Yau, J. 2008. **Nitrate in food.** Center for Food Safety, 25th Issue, Hong Kong.
- Xiao-feng, Y., Zhi-long B. and Jia-lin X. 2007. **Effect of potassium supply on the growth, photosynthetic characteristic and quality of lettuce.** Acta Hort. 761: 471-476.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

1. การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ด้วยเทคนิค HPLC (Knauer, 2007)

1.1 การเตรียมสารเคมี

1.1.1 สารละลายมาตรฐานไนเตรทเข้มข้น (Stock nitrate solution)

ละลาย Sodium nitrate ปริมาณ 1.3709 กรัม ในน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น (สารละลายไนเตรทเข้มข้นนี้มีความเข้มข้นของไนเตรท 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร)

1.1.2 สารละลายมาตรฐานไนไตรท์เข้มข้น (Stock nitrite solution)

ละลาย Sodium nitrite ปริมาณ 0.15 กรัม ในน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น (สารละลายไนไตรท์เข้มข้นนี้มีความเข้มข้นของไนไตรท์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร)

1.1.3 สารละลายมาตรฐานไนเตรท (Standard nitrate solution)

ปิเปตสารละลายมาตรฐานไนเตรทเข้มข้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงใน Volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น (สารละลายมาตรฐานไนเตรทมีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร)

1.1.4 สารละลายมาตรฐานไนไตรท์ (Standard nitrite solution)

ปิเปตสารละลายมาตรฐานไนไตรท์เข้มข้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงใน Volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น (สารละลายมาตรฐานไนไตรท์มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

1.1.5 สารละลาย 5 mM Tetrabutyl ammonium hydrogen sulfate, pH 6.5

ละลาย Tetrabutyl ammonium hydrogen sulfate ปริมาณ 0.6977 กรัม ในน้ำ Deionized จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำ Deionized แล้วปรับ pH ของสารละลายด้วยสารละลาย Ammonia solution 25% จนกระทั่งสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 6.5

1.1.6 สารละลาย 0.05 M n-octylamine, pH 4.0

ปิเปตสารละลาย n-octylamine ปริมาตร 1.6528 มิลลิลิตร ใส่ลงใน Volumetric flask ขนาด 1 ลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วย Methanol แล้วปรับ pH ของสารละลายด้วยสารละลาย Ortho – phosphoric acid 85% จนกระทั่งสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 7.0

1.1.7 สารละลายผสมระหว่าง 5 mM tetrabutyl ammonium hydrogen sulfate, pH 6.5 และ 0.05 M n-octylamine, pH 4.0 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 90:10

ผสมสารละลาย 5 mM Tetrabutyl ammonium hydrogen sulfate, pH 6.5 ปริมาตร 900 มิลลิลิตร กับสารละลาย 0.05 M n-octylamine, pH 4.0 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในปิเปกเกอร์ขนาด 2 ลิตร จากนั้นปรับ pH ของสารละลายผสมด้วยสารละลาย Ammonia solution 25% จนกระทั่งสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 7.0 จากนั้นนำไปกรองผ่าน Membrane filter ขนาด 0.45 μm

1.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานไนเตรท

ปิเปตสารละลายมาตรฐานไนเตรทความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ใน Volumetric flask ขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นและเขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายไนเตรทที่มีความเข้มข้น 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำไปทำการทดลองเช่นเดียวกับตัวอย่าง ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้กราฟ (Area) และความเข้มข้นของไนเตรท

1.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานไนไตรท์

ปิเปตสารละลายมาตรฐานไนไตรท์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0, 0.5, 1, 1.5, 2, และ 2.5 มิลลิลิตร ใส่ใน Volumetric flask ขนาด 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นและเขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายไนไตรท์ที่มีความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 1.5, 2, และ 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วนำไปทำการทดลองเช่นเดียวกับตัวอย่าง ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้กราฟ (Area) และความเข้มข้นของไนไตรท์

1.3 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทไนไตรท์ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์

1.3.1 ตัดและ Homogenized ใบผักคะน้าชั่งน้ำหนัก 1 กรัม

1.3.2 เติมน้ำ Deionized ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใน Volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร

1.3.3 แช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

1.3.4 เขย่าและทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

1.3.5 ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำ Deionized

1.3.6 กรองด้วย Syringe filter ขนาด 0.20 μm

1.3.7 นำสารสกัดที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC โดยมีอัตราส่วนระหว่าง Mobile phase A (5 mM tetrabutyl ammonium hydrogen sulfate, pH 6.5) และ Mobile phase B (0.05 M n-octylamine, pH 4.0) คือ 90:10 นิดสารละลายมาตรฐานที่ถูกกรองผ่าน Syringe filter ขนาด 0.2 μm ปริมาตร 25 μl ความเร็วของอัตราการไหลของ Mobile phase เท่ากับ 1.0 มิลลิลิตร/นาที คอลัมน์ C_{18} HPLC อุณหภูมิคอลัมน์ 25 องศาเซลเซียส และความยาวคลื่น 210 nm

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
1	610.2884	0.0610	0.0432	2.0018×10^{-1}	2.0018×10^{-5}	1.1458×10^{-1}
2	615.4224	0.0615	0.8187	2.0069×10^{-1}	2.0069×10^{-5}	3.8564×10^{-2}
3	645.6417	0.0646	0.0648	2.0124×10^{-1}	2.0124×10^{-5}	8.7109×10^{-2}
4	649.6394	0.0650	0.0253	2.0162×10^{-1}	2.0162×10^{-5}	6.5971×10^{-2}
5	655.6724	0.0656	0.0370	2.0210×10^{-1}	2.0210×10^{-5}	1.2310×10^{-1}
6	657.8276	0.0658	0.0251	2.0246×10^{-1}	2.0246×10^{-5}	1.1019×10^{-2}
7	669.3337	0.0669	0.0396	2.0303×10^{-1}	2.0303×10^{-5}	2.1971×10^{-1}
8	680.6109	0.0681	0.0471	2.0455×10^{-1}	2.0455×10^{-5}	3.2178×10^{-1}
9	681.2813	0.0681	0.0306	2.0523×10^{-1}	2.0523×10^{-5}	1.3993×10^{-1}
10	685.6409	0.0686	0.0213	2.0580×10^{-1}	2.0580×10^{-5}	1.1927×10^{-1}
11	685.5395	0.0686	0.0216	2.0706×10^{-1}	2.0706×10^{-5}	1.7856×10^{-1}
12	689.4158	0.0689	0.0518	2.0755×10^{-1}	2.0755×10^{-5}	3.7807×10^{-2}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
13	691.4286	0.0691	0.0614	2.0828×10^{-1}	2.0828×10^{-5}	4.9668×10^{-2}
14	698.5354	0.0699	0.0450	2.0962×10^{-1}	2.0962×10^{-5}	9.3611×10^{-2}
15	700.5742	0.0701	0.0248	2.1051×10^{-1}	2.1051×10^{-5}	1.1422×10^{-1}
16	704.3072	0.0704	0.0411	2.1126×10^{-1}	2.1126×10^{-5}	2.4580×10^{-1}
17	711.4234	0.0711	0.0629	2.1221×10^{-1}	2.1221×10^{-5}	1.4477×10^{-1}
18	715.6994	0.0716	0.0568	2.1301×10^{-1}	2.1301×10^{-5}	8.0127×10^{-2}
19	716.2461	0.0716	0.0143	2.1375×10^{-1}	2.1375×10^{-5}	1.2936×10^{-1}
20	725.3690	0.0725	0.0224	2.1454×10^{-1}	2.1454×10^{-5}	1.8269×10^{-1}
21	726.6816	0.0727	0.0375	2.1527×10^{-1}	2.1527×10^{-5}	8.1102×10^{-2}
22	731.2640	0.0731	0.0347	2.1606×10^{-1}	2.1606×10^{-5}	5.6690×10^{-2}
23	736.4809	0.0736	0.0425	2.1715×10^{-1}	2.1715×10^{-5}	2.8545×10^{-1}
24	736.5649	0.0737	0.0412	2.1799×10^{-1}	2.1799×10^{-5}	1.0913×10^{-1}
25	737.1839	0.0737	0.0218	2.1830×10^{-1}	2.1830×10^{-5}	4.9031×10^{-2}
26	741.2306	0.0741	0.0063	2.1999×10^{-1}	2.1999×10^{-5}	4.2386×10^{-1}
27	748.2540	0.0748	0.0240	2.2102×10^{-1}	2.2102×10^{-5}	1.9967×10^{-1}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
28	750.4397	0.0750	0.0580	2.2266×10^{-1}	2.2266×10^{-5}	3.3206×10^{-1}
29	753.7923	0.0754	0.0195	2.2487×10^{-1}	2.2487×10^{-5}	7.4153×10^{-2}
30	755.3471	0.0755	0.0462	2.2662×10^{-1}	2.2662×10^{-5}	1.9519×10^{-1}
31	758.4400	0.0758	0.0549	2.2748×10^{-1}	2.2748×10^{-5}	2.1430×10^{-1}
32	762.5424	0.0763	0.0471	2.2828×10^{-1}	2.2828×10^{-5}	7.9640×10^{-2}
33	767.3682	0.0767	0.0132	2.2883×10^{-1}	2.2883×10^{-5}	1.0512×10^{-1}
34	768.2199	0.0768	0.0150	2.2960×10^{-1}	2.2960×10^{-5}	1.6916×10^{-1}
35	776.5818	0.0777	0.0590	2.3046×10^{-1}	2.3046×10^{-5}	2.3024×10^{-1}
36	778.4781	0.0778	0.0554	2.3233×10^{-1}	2.3233×10^{-5}	9.6738×10^{-2}
37	792.4274	0.0792	0.0445	2.3293×10^{-1}	2.3293×10^{-5}	6.9694×10^{-2}
38	800.2469	0.0800	0.0272	2.3362×10^{-1}	2.3362×10^{-5}	3.8113×10^{-2}
39	806.5157	0.0807	0.0526	2.3510×10^{-1}	2.3510×10^{-5}	1.3023×10^{-1}
40	807.2802	0.0807	0.0262	2.3569×10^{-1}	2.3569×10^{-5}	7.8089×10^{-2}
41	812.4452	0.0812	0.0273	2.3662×10^{-1}	2.3662×10^{-5}	3.7789×10^{-2}
42	1174.6877	0.0815	0.0071	2.3785×10^{-1}	2.3785×10^{-5}	1.8026×10^{-2}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
43	815.7503	0.0816	0.0362	2.3837×10^{-1}	2.3837×10^{-5}	3.3323×10^{-2}
44	815.4475	0.0815	0.0372	2.3893×10^{-1}	2.3893×10^{-5}	8.8543×10^{-2}
45	823.3608	0.0823	0.0285	2.3946×10^{-1}	2.3946×10^{-5}	1.5730×10^{-1}
46	824.3761	0.0824	0.0209	2.4102×10^{-1}	2.4102×10^{-5}	3.5763×10^{-1}
47	825.8565	0.0826	0.0018	2.4225×10^{-1}	2.4225×10^{-5}	1.5842×10^{-1}
48	826.5901	0.0827	0.0513	2.4256×10^{-1}	2.4256×10^{-5}	5.2187×10^{-2}
49	829.7015	0.0830	0.0253	2.4359×10^{-1}	2.4359×10^{-5}	7.3951×10^{-2}
50	831.6118	0.0832	0.0416	2.4415×10^{-1}	2.4415×10^{-5}	8.9954×10^{-2}
51	834.3267	0.0834	0.0319	2.4466×10^{-1}	2.4466×10^{-5}	1.0238×10^{-1}
52	834.5196	0.0835	0.0161	2.4604×10^{-1}	2.4604×10^{-5}	2.1882×10^{-1}
53	837.4446	0.0837	0.0408	2.4723×10^{-1}	2.4723×10^{-5}	1.5130×10^{-1}
54	843.4700	0.0843	0.0062	2.4815×10^{-1}	2.4815×10^{-5}	1.3625×10^{-1}
55	843.5122	0.0844	0.0481	2.4857×10^{-1}	2.4857×10^{-5}	5.3617×10^{-2}
56	845.3349	0.0845	0.0213	2.4925×10^{-1}	2.4925×10^{-5}	7.0540×10^{-2}
57	846.4830	0.0846	0.0351	2.4990×10^{-1}	2.4990×10^{-5}	3.5602×10^{-2}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
58	846.4200	0.0846	0.0259	2.5029×10^{-1}	2.5029×10^{-5}	7.5916×10^{-2}
59	851.4750	0.0851	0.0317	2.5286×10^{-1}	2.5286×10^{-5}	2.6876×10^{-1}
60	853.2279	0.0853	0.0083	2.5395×10^{-1}	2.5395×10^{-5}	1.9221×10^{-1}
61	853.4694	0.0853	0.0304	2.5495×10^{-1}	2.5495×10^{-5}	9.4204×10^{-2}
62	855.5237	0.0856	0.0373	2.5570×10^{-1}	2.5570×10^{-5}	1.8558×10^{-1}
63	857.6212	0.0858	0.0373	2.5701×10^{-1}	2.5701×10^{-5}	2.4279×10^{-1}
64	860.7168	0.0861	0.0372	2.5869×10^{-1}	2.5869×10^{-5}	1.4866×10^{-1}
65	865.5251	0.0866	0.0433	2.5973×10^{-1}	2.5973×10^{-5}	9.5989×10^{-2}
66	867.6732	0.0868	0.0382	2.6156×10^{-1}	2.6156×10^{-5}	2.7955×10^{-1}
67	871.6686	0.0872	0.0443	2.6278×10^{-1}	2.6278×10^{-5}	1.8491×10^{-1}
68	872.3032	0.0872	0.0192	2.6342×10^{-1}	2.6342×10^{-5}	6.5526×10^{-2}
69	874.5276	0.0875	0.0327	2.6462×10^{-1}	2.6462×10^{-5}	3.5838×10^{-1}
70	878.7358	0.0879	0.0261	2.6646×10^{-1}	2.6646×10^{-5}	1.1691×10^{-1}
71	879.3162	0.0879	0.0271	2.6820×10^{-1}	2.6820×10^{-5}	4.0390×10^{-1}
72	883.6415	0.0884	0.0346	2.6940×10^{-1}	2.6940×10^{-5}	9.0856×10^{-2}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
73	885.4963	0.0885	0.0131	2.7035×10^{-1}	2.7035×10^{-5}	2.0949×10^{-1}
74	886.4428	0.0886	0.0446	2.7244×10^{-1}	2.7244×10^{-5}	1.2657×10^{-1}
75	888.5236	0.0889	0.0415	2.7301×10^{-1}	2.7301×10^{-5}	9.9157×10^{-2}
76	890.4961	0.0890	0.0442	2.7431×10^{-1}	2.7431×10^{-5}	1.2593×10^{-1}
77	892.6180	0.0893	0.0197	2.7508×10^{-1}	2.7508×10^{-5}	6.6059×10^{-2}
78	893.4431	0.0893	0.0342	2.7615×10^{-1}	2.7615×10^{-5}	1.5364×10^{-1}
79	897.3735	0.0897	0.0158	2.7714×10^{-1}	2.7714×10^{-5}	4.7224×10^{-2}
80	904.3655	0.0904	0.0215	2.7813×10^{-1}	2.7813×10^{-5}	1.2318×10^{-1}
81	905.3621	0.0905	0.0437	2.7931×10^{-1}	2.7931×10^{-5}	2.4521×10^{-1}
82	906.3892	0.0906	0.0259	2.8078×10^{-1}	2.8078×10^{-5}	8.6866×10^{-2}
83	907.4893	0.0907	0.0512	2.8145×10^{-1}	2.8145×10^{-5}	1.7086×10^{-1}
84	907.4198	0.0907	0.0433	2.8218×10^{-1}	2.8218×10^{-5}	1.0923×10^{-2}
85	909.7933	0.0910	0.0099	2.8324×10^{-1}	2.8324×10^{-5}	1.7412×10^{-1}
86	915.5061	0.0916	0.0237	2.8417×10^{-1}	2.8417×10^{-5}	1.0123×10^{-1}
87	918.4225	0.0918	0.0303	2.8518×10^{-1}	2.8518×10^{-5}	1.1307×10^{-1}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
88	923.3212	0.0923	0.0202	2.8554×10^{-1}	2.8554×10^{-5}	1.8101×10^{-2}
89	926.1009	0.0926	0.0018	2.8631×10^{-1}	2.8631×10^{-5}	1.1401×10^{-1}
90	926.8102	0.0927	0.0169	2.8716×10^{-1}	2.8716×10^{-5}	1.3814×10^{-1}
91	927.3796	0.0927	0.0150	2.8809×10^{-1}	2.8809×10^{-5}	1.2453×10^{-1}
92	931.4983	0.0931	0.0339	2.9026×10^{-1}	2.9026×10^{-5}	2.6517×10^{-1}
93	938.4709	0.0938	0.0292	2.9107×10^{-1}	2.9107×10^{-5}	1.0700×10^{-1}
94	940.5898	0.0941	0.0241	2.9235×10^{-1}	2.9235×10^{-5}	1.4951×10^{-1}
95	942.3730	0.0942	0.0340	2.9317×10^{-1}	2.9317×10^{-5}	8.6369×10^{-2}
96	955.7205	0.0956	0.0221	2.9454×10^{-1}	2.9454×10^{-5}	1.2969×10^{-1}
97	956.4403	0.0956	0.0365	2.9589×10^{-1}	2.9589×10^{-5}	1.8634×10^{-1}
98	957.4938	0.0957	0.0310	2.9711×10^{-1}	2.9711×10^{-5}	2.6955×10^{-1}
99	962.4084	0.0962	0.0112	2.9923×10^{-1}	2.9923×10^{-5}	1.9941×10^{-1}
100	965.5023	0.0966	0.0111	3.0026×10^{-1}	3.0026×10^{-5}	2.9751×10^{-1}
101	965.4720	0.0965	0.0106	3.0227×10^{-1}	3.0227×10^{-5}	2.3069×10^{-1}
102	967.5101	0.0968	0.0097	3.0293×10^{-1}	3.0293×10^{-5}	3.4828×10^{-2}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
103	970.6452	0.0971	0.0200	3.0374×10^{-1}	3.0374×10^{-5}	9.9533×10^{-2}
104	971.4795	0.0971	0.0083	3.0446×10^{-1}	3.0446×10^{-5}	5.0060×10^{-2}
105	974.4088	0.0974	0.0180	3.0483×10^{-1}	3.0483×10^{-5}	5.1507×10^{-2}
106	976.7515	0.0977	0.0291	3.0550×10^{-1}	3.0550×10^{-5}	5.7818×10^{-2}
107	980.3863	0.0980	0.0211	3.0702×10^{-1}	3.0702×10^{-5}	5.4624×10^{-2}
108	985.6536	0.0986	0.0338	3.0747×10^{-1}	3.0747×10^{-5}	4.7527×10^{-2}
109	989.5585	0.0990	0.0238	3.0802×10^{-1}	3.0802×10^{-5}	2.2639×10^{-2}
110	992.4304	0.0992	0.0237	3.0916×10^{-1}	3.0916×10^{-5}	2.2947×10^{-1}
111	993.2644	0.0993	0.0152	3.1037×10^{-1}	3.1037×10^{-5}	1.2804×10^{-1}
112	996.4731	0.0996	0.0293	3.1107×10^{-1}	3.1107×10^{-5}	1.0183×10^{-1}
113	996.9181	0.0997	0.0093	3.1178×10^{-1}	3.1178×10^{-5}	4.1319×10^{-2}
114	999.7707	0.1000	0.0263	3.1263×10^{-1}	3.1263×10^{-5}	6.8704×10^{-2}
115	1001.5070	0.1002	0.0155	3.1355×10^{-1}	3.1355×10^{-5}	1.1605×10^{-1}
116	1004.6553	0.1005	0.0403	3.1499×10^{-1}	3.1499×10^{-5}	1.5640×10^{-1}
117	1008.5959	0.1009	0.0432	3.1581×10^{-1}	3.1581×10^{-5}	1.1127×10^{-1}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
118	1009.5932	0.1010	0.0120	3.1652×10^{-1}	3.1652×10^{-5}	5.3020×10^{-2}
119	1011.6636	0.1012	0.0101	3.1705×10^{-1}	3.1705×10^{-5}	1.0619×10^{-1}
120	1014.7523	0.1015	0.0065	3.1753×10^{-1}	3.1753×10^{-5}	2.4096×10^{-2}
121	1017.4917	0.1017	0.0320	3.1816×10^{-1}	3.1816×10^{-5}	2.5472×10^1
122	1017.7951	0.1018	0.0168	3.1987×10^{-1}	3.1987×10^{-5}	1.7209×10^1
123	1019.3854	0.1019	0.0301	3.2121×10^{-1}	3.2121×10^{-5}	1.0445×10^1
124	1021.5979	0.1022	0.0221	3.2227×10^{-1}	3.2227×10^{-5}	1.2997×10^1
125	1021.6844	0.1022	0.0247	3.2311×10^{-1}	3.2311×10^{-5}	8.2132×10^{-2}
126	1024.4436	0.1024	0.0229	3.2397×10^{-1}	3.2397×10^{-5}	5.2159×10^{-2}
127	1032.7191	0.1033	0.0221	3.2425×10^{-1}	3.2425×10^{-5}	2.6142×10^{-2}
128	1038.4892	0.1038	0.0311	3.2590×10^{-1}	3.2590×10^{-5}	8.4953×10^{-2}
129	1042.4151	0.1042	0.0343	3.2651×10^{-1}	3.2651×10^{-5}	1.0978×10^1
130	1046.3472	0.1046	0.0215	3.2743×10^{-1}	3.2743×10^{-5}	5.2842×10^{-2}
131	1050.5289	0.1051	0.0299	3.2829×10^{-1}	3.2829×10^{-5}	4.2461×10^{-2}
132	1059.6062	0.1060	0.0371	3.2966×10^{-1}	3.2966×10^{-5}	2.6308×10^1

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
133	1061.1928	0.1061	0.0088	3.3070×10^{-1}	3.3070×10^{-5}	1.0935×10^{-1}
134	1064.3491	0.1064	0.0172	3.3144×10^{-1}	3.3144×10^{-5}	4.8755×10^{-2}
135	1066.4679	0.1066	0.0208	3.3258×10^{-1}	3.3258×10^{-5}	7.5503×10^{-2}
136	1069.4720	0.1069	0.0247	3.3340×10^{-1}	3.3340×10^{-5}	4.7268×10^{-2}
137	1070.3744	0.1070	0.0203	3.3398×10^{-1}	3.3398×10^{-5}	3.3375×10^{-2}
138	1072.3663	0.1072	0.0416	3.3462×10^{-1}	3.3462×10^{-5}	2.2837×10^{-2}
139	1076.2796	0.1076	0.0307	3.3593×10^{-1}	3.3593×10^{-5}	1.4976×10^{-1}
140	1077.6694	0.1078	0.0202	3.3688×10^{-1}	3.3688×10^{-5}	6.2538×10^{-2}
141	1077.5287	0.1078	0.0366	3.3750×10^{-1}	3.3750×10^{-5}	1.5906×10^{-1}
142	1078.2389	0.1078	0.0176	3.4022×10^{-1}	3.4022×10^{-5}	3.1977×10^{-1}
143	1078.6063	0.1079	0.0162	3.4154×10^{-1}	3.4154×10^{-5}	1.5920×10^{-1}
144	1083.6733	0.1084	0.0217	3.4267×10^{-1}	3.4267×10^{-5}	1.5312×10^{-1}
145	1087.6899	0.1088	0.0008	3.4383×10^{-1}	3.4383×10^{-5}	1.7712×10^{-1}
146	1091.5394	0.1092	0.0317	3.4511×10^{-1}	3.4511×10^{-5}	2.7586×10^{-2}
147	1096.5536	0.1097	0.0074	3.4623×10^{-1}	3.4623×10^{-5}	2.1560×10^{-1}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
148	1101.5417	0.1102	0.0202	3.4813×10^{-1}	3.4813×10^{-5}	2.7256×10^{-1}
149	1101.7189	0.1102	0.0163	3.5020×10^{-1}	3.5020×10^{-5}	2.9094×10^{-2}
150	1103.3855	0.1103	0.0271	3.5110×10^{-1}	3.5110×10^{-5}	1.3836×10^{-1}
151	1103.5267	0.1104	0.0100	3.5225×10^{-1}	3.5225×10^{-5}	7.3956×10^{-2}
152	1105.5849	0.1106	0.0199	3.5307×10^{-1}	3.5307×10^{-5}	7.6727×10^{-2}
153	1108.5905	0.1109	0.0187	3.5372×10^{-1}	3.5372×10^{-5}	8.2759×10^{-2}
154	1111.5232	0.1112	0.0307	3.5456×10^{-1}	3.5456×10^{-5}	6.8265×10^{-2}
155	1114.3256	0.1114	0.0271	3.5516×10^{-1}	3.5516×10^{-5}	3.8742×10^{-2}
156	1120.3398	0.1120	0.0278	3.5556×10^{-1}	3.5556×10^{-5}	8.1455×10^{-2}
157	1126.7091	0.1127	0.0146	3.5623×10^{-1}	3.5623×10^{-5}	6.7748×10^{-2}
158	1126.3560	0.1126	0.0322	3.5696×10^{-1}	3.5696×10^{-5}	2.4159×10^{-1}
159	1127.2549	0.1127	0.0131	3.5802×10^{-1}	3.5802×10^{-5}	1.5634×10^{-2}
160	1134.7963	0.1135	0.0159	3.5897×10^{-1}	3.5897×10^{-5}	1.2195×10^{-1}
161	1142.6863	0.1143	0.0159	3.5951×10^{-1}	3.5951×10^{-5}	6.1897×10^{-2}
162	1151.4483	0.1151	0.0284	3.6039×10^{-1}	3.6039×10^{-5}	1.6300×10^{-1}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
163	1151.5321	0.1152	0.0357	3.6134×10^{-1}	3.6134×10^{-5}	3.7290×10^{-2}
164	1152.3734	0.1152	0.0266	3.6164×10^{-1}	3.6164×10^{-5}	2.6047×10^{-2}
165	1155.4654	0.1155	0.0059	3.6223×10^{-1}	3.6223×10^{-5}	4.0098×10^{-2}
166	1161.6720	0.1162	0.0126	3.6338×10^{-1}	3.6338×10^{-5}	2.6694×10^{-1}
167	1165.6231	0.1166	0.0226	3.6497×10^{-1}	3.6497×10^{-5}	1.4955×10^{-1}
168	1174.4804	0.1174	0.0243	3.6649×10^{-1}	3.6649×10^{-5}	2.2836×10^{-2}
169	1177.2029	0.1177	0.0109	3.6682×10^{-1}	3.6682×10^{-5}	4.8810×10^{-2}
170	1182.3705	0.1182	0.0118	3.6778×10^{-1}	3.6778×10^{-5}	7.1110×10^{-2}
171	1184.5344	0.1185	0.0265	3.6961×10^{-1}	3.6961×10^{-5}	2.8307×10^{-1}
172	1187.6041	0.1188	0.0132	3.7070×10^{-1}	3.7070×10^{-5}	1.0667×10^{-1}
173	1188.6763	0.1189	0.0332	3.7148×10^{-1}	3.7148×10^{-5}	7.0427×10^{-2}
174	1189.3608	0.1189	0.0087	3.7189×10^{-1}	3.7189×10^{-5}	2.2369×10^{-2}
175	1192.3605	0.1192	0.0044	3.7238×10^{-1}	3.7238×10^{-5}	3.0274×10^{-2}
176	1196.4296	0.1196	0.0185	3.7299×10^{-1}	3.7299×10^{-5}	2.6235×10^{-2}
177	1196.4251	0.1196	0.0284	3.7400×10^{-1}	3.7400×10^{-5}	9.1158×10^{-2}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
178	1198.5584	0.1199	0.0287	3.7647×10^{-1}	3.7647×10^{-5}	1.5115×10^{-1}
179	1199.4229	0.1199	0.0250	3.7703×10^{-1}	3.7703×10^{-5}	1.0844×10^{-2}
180	1201.7962	0.1202	0.0131	3.7888×10^{-1}	3.7888×10^{-5}	1.3421×10^{-1}
181	1222.4319	0.1222	0.0163	3.8112×10^{-1}	3.8112×10^{-5}	6.5157×10^{-2}
182	1223.3288	0.1223	0.0278	3.8199×10^{-1}	3.8199×10^{-5}	4.4796×10^{-2}
183	1227.4654	0.1227	0.0180	3.8328×10^{-1}	3.8328×10^{-5}	9.9894×10^{-2}
184	1230.4433	0.1230	0.0329	3.8386×10^{-1}	3.8386×10^{-5}	5.4939×10^{-2}
185	1230.7619	0.1231	0.0283	3.8446×10^{-1}	3.8446×10^{-5}	2.3507×10^{-2}
186	1229.4100	0.1229	0.1444	3.8531×10^{-1}	3.8531×10^{-5}	3.7919×10^{-2}
187	1245.9130	0.1246	0.0042	3.8621×10^{-1}	3.8621×10^{-5}	5.6875×10^{-2}
188	1249.2632	0.1249	0.0203	3.8658×10^{-1}	3.8658×10^{-5}	2.9061×10^{-2}
189	1250.5642	0.1251	0.0339	3.8720×10^{-1}	3.8720×10^{-5}	6.3330×10^{-2}
190	1251.2637	0.1251	0.0146	3.8801×10^{-1}	3.8801×10^{-5}	1.2386×10^{-1}
191	1251.5335	0.1252	0.0260	3.8908×10^{-1}	3.8908×10^{-5}	1.3750×10^{-1}
192	1252.4404	0.1252	0.0318	3.9016×10^{-1}	3.9016×10^{-5}	5.0134×10^{-2}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
193	1259.5633	0.1260	0.0227	3.9069×10^{-1}	3.9069×10^{-5}	4.7731×10^{-2}
194	1262.7395	0.1263	0.0238	3.9090×10^{-1}	3.9090×10^{-5}	1.3686×10^{-2}
195	1264.4402	0.1264	0.0048	3.9146×10^{-1}	3.9146×10^{-5}	9.6760×10^{-2}
196	1266.6382	0.1267	0.0301	3.9242×10^{-1}	3.9242×10^{-5}	7.0672×10^{-2}
197	1266.5143	0.1267	0.0324	3.9308×10^{-1}	3.9308×10^{-5}	8.8517×10^{-2}
198	1266.3291	0.1266	0.0179	3.9382×10^{-1}	3.9382×10^{-5}	7.8037×10^{-2}
199	1266.4541	0.1266	0.0306	3.9426×10^{-1}	3.9426×10^{-5}	3.0514×10^{-2}
200	1271.7440	0.1272	0.0269	3.9501×10^{-1}	3.9501×10^{-5}	9.2867×10^{-2}
201	1284.6883	0.1285	0.0127	3.9558×10^{-1}	3.9558×10^{-5}	1.0205×10^{-2}
202	1285.6997	0.1286	0.0228	3.9660×10^{-1}	3.9660×10^{-5}	1.2899×10^{-1}
203	1294.2946	0.1294	0.0130	3.9814×10^{-1}	3.9814×10^{-5}	3.0376×10^{-2}
204	1294.3002	0.1294	0.0197	3.9865×10^{-1}	3.9865×10^{-5}	1.1272×10^{-1}
205	1303.4337	0.1303	0.0180	3.9972×10^{-1}	3.9972×10^{-5}	4.5967×10^{-2}
206	1313.3962	0.1313	0.0369	4.0234×10^{-1}	4.0234×10^{-5}	2.6551×10^{-2}
207	1319.6564	0.1320	0.0219	4.0352×10^{-1}	4.0352×10^{-5}	2.0489×10^{-1}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
208	1319.3226	0.1319	0.0300	4.0555×10^{-1}	4.0555×10^{-5}	1.3389×10^{-1}
209	1321.4488	0.1321	0.0345	4.0632×10^{-1}	4.0632×10^{-5}	1.1003×10^{-2}
210	1321.5942	0.1322	0.0127	4.0668×10^{-1}	4.0668×10^{-5}	3.6599×10^{-2}
211	1335.6278	0.1336	0.0239	4.0711×10^{-1}	4.0711×10^{-5}	5.0483×10^{-2}
212	1335.1765	0.1335	0.0096	4.0807×10^{-1}	4.0807×10^{-5}	1.5108×10^{-1}
213	1339.5905	0.1340	0.0211	4.0943×10^{-1}	4.0943×10^{-5}	1.7658×10^{-1}
214	1339.2746	0.1339	0.0277	4.1100×10^{-1}	4.1100×10^{-5}	1.9080×10^{-1}
215	1341.3214	0.1341	0.0154	4.1191×10^{-1}	4.1191×10^{-5}	2.4468×10^{-2}
216	1342.0480	0.1342	0.0606	4.1254×10^{-1}	4.1254×10^{-5}	1.6699×10^{-1}
217	1344.4205	0.1344	0.0146	4.1341×10^{-1}	4.1341×10^{-5}	1.4594×10^{-2}
218	1344.5817	0.1345	0.0161	4.1379×10^{-1}	4.1379×10^{-5}	8.3029×10^{-2}
219	1349.3481	0.1349	0.0140	4.1467×10^{-1}	4.1467×10^{-5}	5.7270×10^{-2}
220	1352.4664	0.1352	0.0290	4.1592×10^{-1}	4.1592×10^{-5}	3.0874×10^{-2}
221	1352.2914	0.1352	0.0118	4.1714×10^{-1}	4.1714×10^{-5}	8.3176×10^{-2}
222	1354.3526	0.1354	0.0162	4.1788×10^{-1}	4.1788×10^{-5}	6.5795×10^{-2}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
223	1354.3055	0.1354	0.0161	4.1911×10^{-1}	4.1911×10^{-5}	7.6786×10^{-2}
224	1363.4507	0.1363	0.0202	4.1995×10^{-1}	4.1995×10^{-5}	6.9614×10^{-2}
225	1363.6815	0.1364	0.0218	4.2103×10^{-1}	4.2103×10^{-5}	9.1443×10^{-2}
226	1364.3760	0.1364	0.0119	4.2195×10^{-1}	4.2195×10^{-5}	3.1422×10^{-2}
227	1364.3255	0.1364	0.0140	4.2235×10^{-1}	4.2235×10^{-5}	2.8988×10^{-2}
228	1364.7209	0.1365	0.0177	4.2358×10^{-1}	4.2358×10^{-5}	1.9950×10^{-1}
229	1366.2036	0.1366	0.0146	4.2454×10^{-1}	4.2454×10^{-5}	7.0497×10^{-2}
230	1366.8252	0.1367	0.0114	4.2573×10^{-1}	4.2573×10^{-5}	6.5077×10^{-2}
231	1372.6959	0.1373	0.0090	4.2651×10^{-1}	4.2651×10^{-5}	3.4766×10^{-2}
232	1372.6350	0.1373	0.0093	4.2698×10^{-1}	4.2698×10^{-5}	2.4656×10^{-2}
233	1381.8383	0.1382	0.0086	4.2730×10^{-1}	4.2730×10^{-5}	1.5347×10^{-2}
234	1381.6351	0.1382	0.0229	4.2763×10^{-1}	4.2763×10^{-5}	2.4174×10^{-2}
235	1390.6501	0.1391	0.0192	4.2845×10^{-1}	4.2845×10^{-5}	1.4096×10^{-2}
236	1390.5497	0.1391	0.0216	4.3021×10^{-1}	4.3021×10^{-5}	1.4705×10^{-1}
237	1390.4166	0.1390	0.0102	4.3131×10^{-1}	4.3131×10^{-5}	8.4730×10^{-2}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
238	1392.3909	0.1392	0.0212	4.3207×10^{-1}	4.3207×10^{-5}	5.8352×10^{-2}
239	1392.6326	0.1393	0.0136	4.3274×10^{-1}	4.3274×10^{-5}	5.7902×10^{-2}
240	1393.6342	0.1394	0.0250	4.3360×10^{-1}	4.3360×10^{-5}	4.0360×10^{-2}
241	1393.6016	0.1394	0.0303	4.3479×10^{-1}	4.3479×10^{-5}	2.0956×10^{-1}
242	1394.5502	0.1395	0.0244	4.3617×10^{-1}	4.3617×10^{-5}	2.0092×10^{-2}
243	1394.5868	0.1395	0.0257	4.3689×10^{-1}	4.3689×10^{-5}	6.6848×10^{-2}
244	1394.4179	0.1394	0.0133	4.3949×10^{-1}	4.3949×10^{-5}	7.9948×10^{-2}
245	1395.4663	0.1395	0.0000	4.4046×10^{-1}	4.4046×10^{-5}	3.8346×10^{-2}
246	1395.3191	0.1395	0.0321	4.4095×10^{-1}	4.4095×10^{-5}	4.5229×10^{-2}
247	1399.4887	0.1399	0.0006	4.4145×10^{-1}	4.4145×10^{-5}	4.1578×10^{-2}
248	1399.2438	0.1399	0.0156	4.4245×10^{-1}	4.4245×10^{-5}	5.3068×10^{-2}
249	1399.3696	0.1399	0.0070	4.4326×10^{-1}	4.4326×10^{-5}	7.8608×10^{-2}
250	1400.3249	0.1400	0.0133	4.4442×10^{-1}	4.4442×10^{-5}	1.1673×10^{-1}
251	1400.2831	0.1400	0.0075	4.4516×10^{-1}	4.4516×10^{-5}	6.8905×10^{-2}
252	1400.3276	0.1400	0.0091	4.4579×10^{-1}	4.4579×10^{-5}	6.6843×10^{-2}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
253	1403.5603	0.1404	0.0349	4.4631×10^{-1}	4.4631×10^{-5}	3.4640×10^{-2}
254	1403.7573	0.1404	0.0220	4.4705×10^{-1}	4.4705×10^{-5}	1.0633×10^{-1}
255	1403.6737	0.1404	0.0191	4.4790×10^{-1}	4.4790×10^{-5}	2.5513×10^{-2}
256	1403.9128	0.1404	0.0055	4.4884×10^{-1}	4.4884×10^{-5}	1.5269×10^{-1}
257	1403.3925	0.1403	0.0190	4.4970×10^{-1}	4.4970×10^{-5}	8.0088×10^{-3}
258	1407.3809	0.1407	0.0229	4.5037×10^{-1}	4.5037×10^{-5}	3.7984×10^{-2}
259	1407.1471	0.1407	0.0077	4.5255×10^{-1}	4.5255×10^{-5}	2.3761×10^{-1}
260	1415.3032	0.1415	0.0252	4.5495×10^{-1}	4.5495×10^{-5}	2.7934×10^{-1}
261	1415.5055	0.1416	0.0315	4.5661×10^{-1}	4.5661×10^{-5}	3.0428×10^{-2}
262	1416.7119	0.1417	0.0091	4.5717×10^{-1}	4.5717×10^{-5}	8.8787×10^{-2}
263	1418.5310	0.1419	0.0296	4.5796×10^{-1}	4.5796×10^{-5}	4.2619×10^{-2}
264	1422.7772	0.1423	0.0156	4.5866×10^{-1}	4.5866×10^{-5}	7.6954×10^{-3}
265	1422.4225	0.1422	0.0132	4.5939×10^{-1}	4.5939×10^{-5}	1.4059×10^{-1}
266	1431.3560	0.1431	0.0210	4.6057×10^{-1}	4.6057×10^{-5}	4.7003×10^{-2}
267	1431.7256	0.1432	0.0068	4.6111×10^{-1}	4.6111×10^{-5}	5.8081×10^{-2}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
268	1437.3706	0.1437	0.0201	4.6175×10^{-1}	4.6175×10^{-5}	1.3839×10^{-1}
269	1439.4063	0.1439	0.0280	4.6360×10^{-1}	4.6360×10^{-5}	1.0968×10^{-1}
270	1439.5867	0.1440	0.0157	4.6451×10^{-1}	4.6451×10^{-5}	1.9577×10^{-2}
271	1442.5615	0.1443	0.0135	4.6576×10^{-1}	4.6576×10^{-5}	1.9502×10^{-1}
272	1447.6920	0.1448	0.0272	4.6682×10^{-1}	4.6682×10^{-5}	7.3938×10^{-2}
273	1447.4258	0.1447	0.0186	4.6756×10^{-1}	4.6756×10^{-5}	8.1439×10^{-2}
274	1451.5740	0.1452	0.0154	4.6858×10^{-1}	4.6858×10^{-5}	9.7629×10^{-2}
275	1455.1183	0.1455	0.0104	4.6988×10^{-1}	4.6988×10^{-5}	2.6025×10^{-2}
276	1455.1551	0.1455	0.0014	4.7117×10^{-1}	4.7117×10^{-5}	8.9214×10^{-2}
277	1455.6150	0.1456	0.0127	4.7292×10^{-1}	4.7292×10^{-5}	2.0487×10^{-1}
278	1456.6886	0.1457	0.0158	4.7425×10^{-1}	4.7425×10^{-5}	3.8799×10^{-2}
279	1456.5808	0.1457	0.0067	4.7525×10^{-1}	4.7525×10^{-5}	1.6225×10^{-1}
280	1471.5497	0.1472	0.0118	4.7859×10^{-1}	4.7859×10^{-5}	1.6676×10^{-1}
281	1471.5191	0.1472	0.0016	4.8042×10^{-1}	4.8042×10^{-5}	7.8549×10^{-2}
282	1476.5539	0.1477	0.0182	4.8107×10^{-1}	4.8107×10^{-5}	1.6103×10^{-2}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
283	1476.5776	0.1477	0.0316	4.8266×10^{-1}	4.8266×10^{-5}	6.0042×10^{-2}
284	1478.2934	0.1478	0.0078	4.8312×10^{-1}	4.8312×10^{-5}	2.1548×10^{-2}
285	1478.5850	0.1479	0.0300	4.8388×10^{-1}	4.8388×10^{-5}	1.4649×10^{-1}
286	1482.7295	0.1483	0.0052	4.8501×10^{-1}	4.8501×10^{-5}	1.8279×10^{-2}
287	1482.6977	0.1483	0.0081	4.8525×10^{-1}	4.8525×10^{-5}	1.9330×10^{-2}
288	1486.4832	0.1486	0.0219	4.8553×10^{-1}	4.8553×10^{-5}	2.6633×10^{-2}
289	1486.5372	0.1487	0.0274	4.8663×10^{-1}	4.8663×10^{-5}	8.1697×10^{-2}
290	1489.4790	0.1489	0.0279	4.8797×10^{-1}	4.8797×10^{-5}	9.4002×10^{-2}
291	1498.5925	0.1499	0.0212	4.8892×10^{-1}	4.8892×10^{-5}	6.0443×10^{-2}
292	1498.4784	0.1498	0.0249	4.9014×10^{-1}	4.9014×10^{-5}	9.2770×10^{-2}
293	1498.4686	0.1498	0.0109	4.9122×10^{-1}	4.9122×10^{-5}	4.2299×10^{-2}
294	1507.5182	0.1508	0.0184	4.9177×10^{-1}	4.9177×10^{-5}	7.7160×10^{-2}
295	1511.5381	0.1512	0.0210	4.9500×10^{-1}	4.9500×10^{-5}	8.2550×10^{-2}
296	1511.3312	0.1511	0.0169	4.9574×10^{-1}	4.9574×10^{-5}	7.5344×10^{-2}
297	1518.6771	0.1519	0.0239	4.9643×10^{-1}	4.9643×10^{-5}	4.6826×10^{-2}

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ไนเตรท			ไนไตรท์		
	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD	ความเข้มข้น (ppm)	ความเข้มข้น (%)	%RSD
298	1518.3541	0.1518	0.0186	4.9771×10^{-1}	4.9771×10^{-5}	6.0823×10^{-2}
299	1553.6451	0.1554	0.0202	4.9884×10^{-1}	4.9884×10^{-5}	5.4769×10^{-2}
300	1623.7008	0.1624	0.0175	4.9946×10^{-1}	4.9946×10^{-5}	7.3792×10^{-2}

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นางสาวนภณัฐ์ สะสมทรัพย์
วัน เดือน ปีเกิด	2 พฤศจิกายน 2530
สถานที่เกิด	จังหวัดปทุมธานี
ที่อยู่ปัจจุบัน	21 ซ.รังสิต-ปทุมธานี14ซอย18 หมู่ 2 ต.ประชาธิปไตย อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี
ประวัติการศึกษา	ปีพุทธศักราช 2552 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ปีพุทธศักราช 2554 กำลังศึกษาในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ผลงานที่นำเสนอ	นภณัฐ์ สะสมทรัพย์ และ ระจิตร สุวพานิช. 2556. การตรวจสอบปริมาณ ไนเตรทและไนไตรท์ในผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์. การประชุมวิชาการ เสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 29, มหาวิทยาลัย แม่ฟ้าหลวง จ.เชียงราย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้