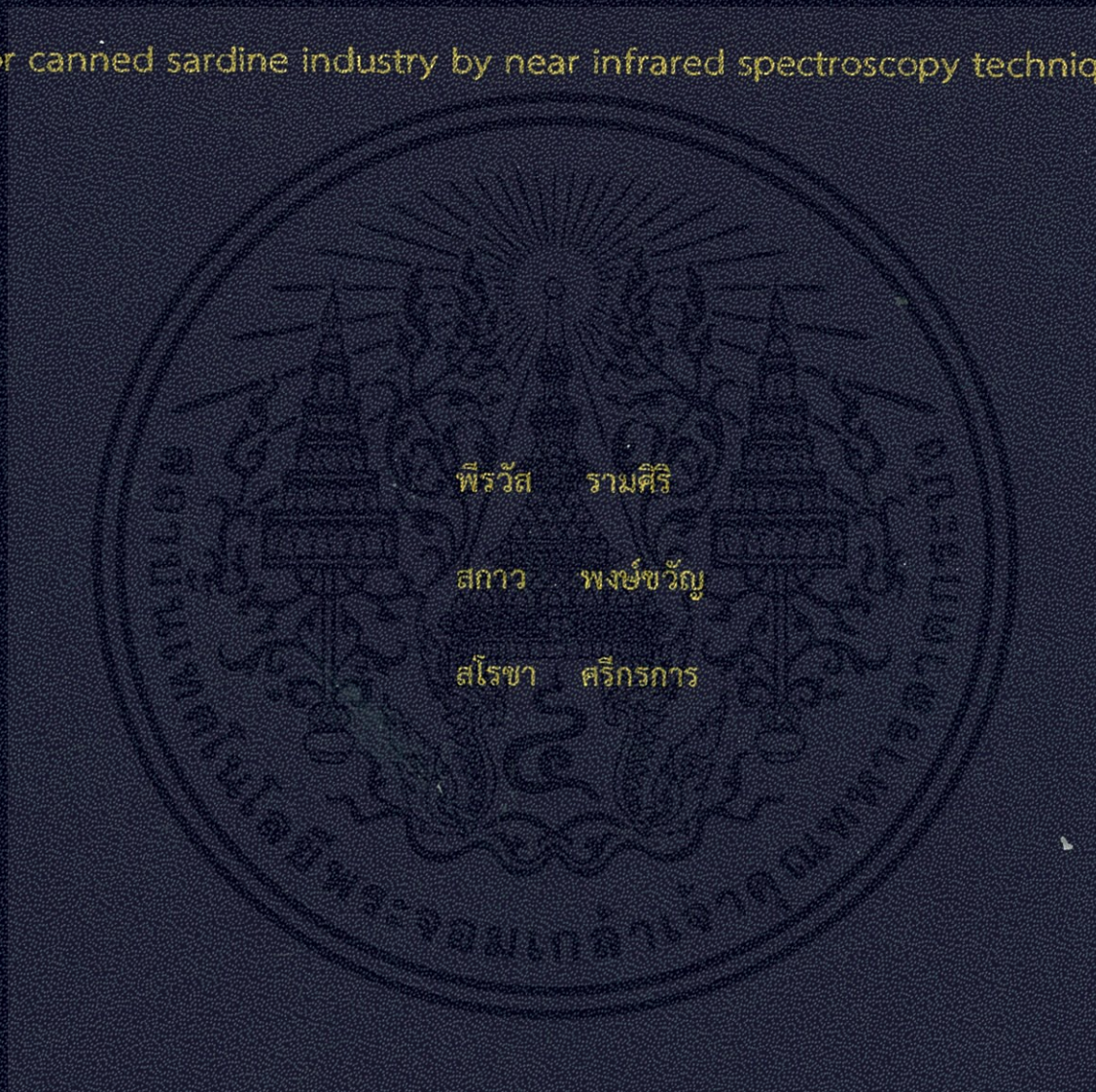


การวิเคราะห์ปริมาณเกลือของปลาซาร์ดีนในซอสมะเขือเทศ

ในอุตสาหกรรมผลิตปลาซาร์ดีนกระป๋องด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

Evaluation of salt content of sardine in tomato ketchup .

for canned sardine industry by near infrared spectroscopy technique



พีรวัส รามศิริ

สกาว พงษ์ขวัญ

สโรชา ศรีกรการ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การวิเคราะห์ปริมาณเกลือของปลาซาร์ดีนในซอสมะเขือเทศ
ในอุตสาหกรรมผลิตปลาซาร์ดีนกระป๋องด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
Evaluation of salt content of sardine in tomato ketchup
for canned sardine industry by near infrared spectroscopy technique



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาหรือข้อมูลใดๆเป็นเจ้าของเอกสารเรทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Evaluation of salt content of sardine in tomato ketchup
for canned sardine industry by near infrared spectroscopy technique



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE
OF BACHELOR OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำข้อมูลไปใช้ในการอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การวิเคราะห์ปริมาณเกลือของปลาซาร์ดีน
ในซอสมะเขือเทศในอุตสาหกรรมผลิตปลาซาร์ดีนกระป๋อง
ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
Evaluation of salt content of sardine in tomato
ketchup for canned sardine industry
by near infrared spectroscopy technique

นักศึกษาผู้จัดทำ นายพิรวัส รามศิริ รหัสนักศึกษา 53011162
นางสาวสกา พงษ์ขวัญ รหัสนักศึกษา 53011622
นางสาวสโรชา ศรีกรการ รหัสนักศึกษา 53011652

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร
ปีการศึกษา 2556

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. ปานมนัส ศิริสมบุรณ์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การวิเคราะห์ปริมาณเกลือของปลาชาร์ดินในซอสมะเขือเทศในอุตสาหกรรมผลิต ชาร์ดินกระป๋องด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายพีรวัส	รามศิริ	53011162
	นางสาวสกว	พงษ์ขวัญ	53011622
	นางสาวโรชา	ศรีกรการ	53011652
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ปานมนัส ศิริสมบุญ		
ปีการศึกษา	2556		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบปริมาณเกลือในปลาชาร์ดินกระป๋องในซอสมะเขือเทศ โดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมของโรงงาน ซึ่งใช้เครื่องออโต้ไตเตรเตอร์ในการตรวจสอบ ซึ่งใช้เวลานาน ใช้สารเคมี และมีการตรวจวัดที่ยุ่งยาก การสแกนคลื่นเนียร์อินฟราเรดทำด้วยเครื่อง Micro near infrared spectrometer ในช่วงความยาวคลื่น 1,150-2,150 นาโนเมตร และเครื่อง FT-NIR spectrometer ในช่วงจำนวนคลื่น 12,500-4,000 ต่อเซนติเมตร (800-2,500 นาโนเมตร) ด้วยวิธีสะท้อนแบบแพร่ การสร้างแบบจำลองใช้วิธี Partial least square regression จากข้อมูลสองชุดคือข้อมูลจากตัวอย่างที่มีการปรับปริมาณเกลือรวมกับตัวอย่างที่ไม่ได้ปรับปริมาณเกลือและข้อมูลจากตัวอย่างที่ไม่ได้ปรับปริมาณเกลือเท่านั้น ได้ผลสรุปว่า เครื่อง FT-NIR spectrometer ให้การทำนายที่ดีและแม่นยำกว่าเครื่อง Micro near infrared spectrometer โดยให้แบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลจากตัวอย่างที่ไม่ได้ปรับปริมาณเกลือ โดยใช้สเปกตรัมที่ผ่านการทำ First derivative + Straight line subtraction ในช่วง $9403.8-4242.9 \text{ cm}^{-1}$ โดยมี PLS factor = 9 โดยชุด Calibration มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (coefficient of determination, R^2) = 89.99, ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ยของการประมาณ (Root Mean Square Error of estimation, RMSEE) = 0.039, ค่าอัตราส่วนการเบี่ยงเบนการทำนาย (Ratio of Prediction Deviation, RPD) = 3.16 สำหรับชุด Prediction มีค่า R^2 = 84.99, ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย (Root Mean Square Error of Prediction, RMSEP) = 0.046, ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Bias) = -0.002 และ RPD = 2.58 ซึ่งถือว่าเป็นโมเดลที่ดีที่สุด เพราะมีค่า RMSEP น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Evaluation of salt content of sardine in tomato ketchup for canned sardine industry by near infrared spectroscopy technique		
Authors	Mr. Peerawat	Ramsiri	53011162
	Miss Sakaow	Pongkuan	53011622
	Miss Sarocha	Srikornkarn	53011652
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Panmanas		Sirisomboon
Year	2013		

Abstract

This research aimed to determine the salt content in canned sardines in tomato sauce using near infrared spectroscopy compared with traditional methods of the factory that used auto-titrator which took a long time, used chemicals and was difficult to measure. Scanning of near Infrared radiation was done by micro near infrared spectrometer in the wavelength range of 1150-2150 nm and FT-NIR spectrometer in wavenumber range of 12500-4000 cm^{-1} (800-2500 nm) with the diffuse reflection mode. The model development was done by partial least square regression from 2 groups of samples which were sample group that included salt adjusted samples and sample group that not included salt adjusted samples. It was concluded that the FT-NIR spectrometer provided better prediction accuracy than the micro near infrared spectrometer. The model from the sample group that not included salt adjusted samples using the first derivative + Straight line subtraction spectra in 9403.8-4242.9 cm^{-1} with 9 PLS factors provided coefficient of determination of calibration (R^2) of 89.99, Root mean square error of estimation (RMSEE) of 0.039, Ratio of Prediction Deviation (RPD) of 3.16 coefficient of determination for prediction (R^2) of 84.99, Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP) of 0.046, Bias of -0.002 and RPD of 2.58. This was the best models because it had the minimum RMSEP.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่องนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยยูเนี่ยนโพรเซสโปรดักส์ จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างปลาที่ใช้ในการทดลองและจากกองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่สนับสนุนงบประมาณวิจัย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ปานมนัส ศิริสมบุรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาผู้คอยให้ความรู้ด้านวิชาการ ตลอดจนคำชี้แนะแนวทางในการช่วยปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้จนสำเร็จ รวมทั้งอาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆพร้อมทั้งให้ความรู้แก่คณะผู้วิจัยโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในหลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ช่วยเหลือในการทำการทดลอง และให้กำลังใจเสมอมา

คณะผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณทุกท่าน ที่ได้ให้การสนับสนุนการทำงาน และให้คำแนะนำแก่ผู้ทำวิจัยเสมอมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่คณะผู้วิจัย

นายพีรวัส รามศิริ

นางสาวสกว พงษ์ขวัญ

นางสาวสโรชา ศรีกรการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของปริญญาานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษาของปริญญาานิพนธ์	2
1.4 แผนการดำเนินงานของปริญญาานิพนธ์	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับของปริญญาานิพนธ์	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เกลือ	5
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near infrared spectroscopy, NIR)	6
2.2.1 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR Spectroscopy)	6
2.2.2 หลักการพื้นฐานของเครื่อง Near Infrared Spectroscopy	7
2.2.3 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง Spectrometer	8
2.2.3.1 FT-NIR spectrometer	9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3.2	Micro NIR spectrometer.....	10
2.2.4	การเลือกวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น (Selecting the Data Preprocessing Model Method).....	12
2.2.4.1	การลบโดยค่าคงที่ (Subtraction of a Constant Offset).....	12
2.2.4.2	การลบโดยเส้นตรง (Subtraction of a Straight Line).....	12
2.2.4.3	Vector Normalization.....	12
2.2.4.4	Min-Max-Normalization.....	12
2.2.4.5	Multiplicative Scatter Correction.....	13
2.2.4.6	อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (First Derivative).....	13
2.2.4.7	อนุพันธ์อันดับที่สอง (Second Derivative).....	13
2.2.5	การสร้างสมการ Calibration.....	14
2.2.6	เทอมที่จำเป็นในการประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของโมเดล สถิติที่ใช้ในการประเมินค่า NIRS calibration.....	14
2.2.6.1	Mean (ค่าเฉลี่ย).....	14
2.2.6.2	Standard deviation,SD (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน).....	14
2.2.6.3	Bias (ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดย NIRS และข้อมูลที่อ้างอิง).....	15
2.2.6.4	Coefficient of determination (สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ, R^2).....	15
2.2.6.5	Root mean square error of estimation (RMSEE).....	16
2.2.6.6	Root mean square of the prediction (RMSEP).....	16
2.2.6.7	Ratio of SEP to the SD (RPD).....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.7 ประโยชน์ของการใช้เทคนิค NIR.....	17
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 ตัวอย่างปลาซาร์ดีนกระป๋องในซอสมะเขือเทศ.....	19
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.2.1 เครื่อง Homoginizer.....	19
3.2.2 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์.....	20
3.2.3 เครื่อง Auto titrator.....	21
3.2.4 เครื่องชั่งไฟฟ้า.....	21
3.2.3 อุปกรณ์อื่นๆ.....	22
3.3 การสแกนคลื่นเนียร์อินฟราเรด.....	22
3.4 การวัดปริมาณเกลือด้วยวิธีดั้งเดิม.....	23
3.5 การสร้างแบบจำลอง.....	23
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	24
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	34
เอกสารอ้างอิง.....	35
ภาคผนวก.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 ตารางแผนการดำเนินงาน.....	3
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องสเปกโทรมิเตอร์แบบต่างๆ.....	8
ตารางที่ 2.2 Specification for FT-NIR.....	9
ตารางที่ 2.3 Specification for MICRO NIR.....	11
ตารางที่ 2.4 การแปลความหมายของค่า R^2	16
ตารางที่ 2.5 ค่าทางสถิติ <i>RPD</i>	17
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางสถิติของค่าปริมาณเกลือในปลาชาร์ทันในซอสมะเขือเทศกระป๋อง.....	27
ตารางที่ 4.2 ผลของการทำ PLS regression สำหรับวิเคราะห์ปริมาณเกลือในปลาชาร์ทัน ในซอสมะเขือเทศในกระป๋องด้วยเครื่อง Micro near infrared spectrometer และ FT-NIR spectrometer.....	28
ตารางที่ 4.3 เลขคลื่นและความยาวคลื่นที่มีผลต่อการทำนายปริมาณเกลือจาก Regression coefficient plot (Osborne et al., 1993)	31
ตารางที่ 4.4 เลขคลื่นและความยาวคลื่นที่มีผลต่อการทำนายปริมาณเกลือ จาก X-loading plot (Osborne et al., 1993)	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่	2.1 การกระทำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารต่างๆ.....	7
รูปที่	2.2 Michelson Interferometer.....	9
รูปที่	2.3 Cube-Corner Interferometer	9
รูปที่	2.4 NIR สเปกตรัมวัดแบบการสะท้อนแบบแพร่.....	13
รูปที่	3.1 เครื่อง Homoginizer.....	19
รูปที่	3.2 เครื่อง Micro near infrared spectrometer.....	20
รูปที่	3.3 เครื่อง FT-NIR spectrometer.....	20
รูปที่	3.4 เครื่อง Auto titrator.....	21
รูปที่	3.5 เครื่องชั่งไฟฟ้า.....	21
รูปที่	3.6 การสแกนด้วยเครื่อง Micro-NIR	22
รูปที่	3.7 การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR.....	22
รูปที่	4.1 สเปกตรัมของปลาซาร์ตินกระป๋องในซอสมะเขือเทศสดที่ไม่รวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือ และรวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือของเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	25
รูปที่	4.2 การทำ second derivative สเปกตรัมของปลาซาร์ตินกระป๋องในซอสมะเขือเทศสดที่ ไม่รวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือและรวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือของ เครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	25
รูปที่	4.3 สเปกตรัมของปลาซาร์ตินกระป๋องในซอสมะเขือเทศสดที่ไม่รวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือ และรวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือของเครื่อง Micro NIR Spectrometer.....	26
รูปที่	4.4 การทำ second derivative สเปกตรัมของปลาซาร์ตินกระป๋องในซอสมะเขือเทศสดที่ ไม่รวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือและรวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือของ เครื่อง Micro NIR Spectrometer.....	26

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ของปริมาณเกลือระหว่างค่าที่ทำนายกับค่าวัดจริงของ เครื่อง FT-NIR spectrometer ของข้อมูลชุด Calibration.....	29
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ของปริมาณเกลือระหว่างค่าที่ทำนายกับค่าวัดจริงของ เครื่อง FT-NIR spectrometer ของข้อมูลชุด Prediction.....	29
รูปที่ 4.7	Regression coefficient plot ของแบบจำลองค่าการตรวจวัดปริมาณเกลือ ในปลาซาร์ดีนกระป๋องในซอสมะเขือเทศวัดโดยการสแกนที่เนื้อปลาบดละเอียดของ เครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	27
รูปที่ 4.8	X-loading weight plot ของแบบจำลองการตรวจวัดปริมาณเกลือ ในปลาซาร์ดีนกระป๋องในซอสมะเขือเทศวัดโดยการสแกนที่เนื้อปลาบดละเอียดของ เครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

อุตสาหกรรมปาล์วดินกระป๋องนับเป็นกิจการที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจอย่างหนึ่งของประเทศไทย ปาล์วดินบรรจุกระป๋องมีตลาดสำคัญทั้งภายในประเทศและการส่งออกไปยังต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกาและกลุ่มประเทศตะวันออกกลาง เป็นต้น^[1] ประเทศไทยนับเป็นแหล่งผลิตปาล์วดินบรรจุกระป๋องที่สำคัญ เพราะสามารถหาวัตถุดิบคุณภาพดีได้จากทรัพยากรภายในประเทศและแหล่งใกล้เคียงทำให้มีโรงงานผลิตปาล์วดินบรรจุกระป๋องกระจายตัวอยู่ทั่วไปโดยเฉพาะในบริเวณภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคใต้ของประเทศ^[2] โดยในโรงงานผลิตปาล์วดินในซอสมะเขือเทศกระป๋องมีการตรวจวัดปริมาณเกลือในหลายขั้นตอนการผลิต ได้แก่ การตรวจรับปาล์วดินเข้าสู่โรงงาน ขั้นตอนหลังจากการนึ่ง (ปาล์วดินนึ่ง) ขั้นตอนหลังเติมซอสในกระป๋องก่อนปิดฝา (ปาล์วดินในซอส) และขั้นตอนปิดฝาแล้ว (ปาล์วดินกระป๋อง) เดิมโรงงานวัดปริมาณเกลือโดยวิธีดั้งเดิมคือไตเตรทหาปริมาณเกลือด้วยเครื่อง Auto titrator ซึ่งคาลิเบรตโดยใช้ Sodium Chloride (NaCl) โดยมี Silver Nitrate (AgNO₃) เป็นสารไตเตรต ที่ต้องมีการใช้สารเคมี ใช้เวลานานและมีขั้นตอนที่ซับซ้อน^[3]

เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นคลื่นแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 780-2500 นาโนเมตร เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นวิธีการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีที่รวดเร็ว แม่นยำ ไม่ต้องใช้สารเคมี เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่การนำเทคโนโลยีนี้มาใช้จำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการ (Calibration model) ก่อนการนำไปใช้งาน^[4] เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำกับวิธีอ้างอิงที่เป็นมาตรฐานในปัจจุบัน หากพิสูจน์ได้ว่ามีความแม่นยำเป็นที่ยอมรับได้จะใช้เวลาเพียง 2-3 วินาที ในการวิเคราะห์ ซึ่งรวดเร็วและใช้ได้กับตัวอย่างปริมาณมากทำให้ลดต้นทุนและแรงงานในขั้นตอนการตรวจวัดปริมาณเกลือของทางโรงงาน

ก่อนหน้านี้มีการศึกษาประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการทำนายปริมาณเกลือใน dry-cured ham^[5] โดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีช่วง 400-2,500 นาโนเมตร ได้ค่า R² ของการพิสูจน์แบบไขว้ R_{CV}² > 0.90 และ (RPD) > 3.0 การทำนายค่าปริมาณเกลือใน processed cheese^[6] โดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีที่ช่วงความยาวคลื่น 1000-2500 nm แบบ diffuse reflectance ให้ค่า R² ของข้อมูลชุด calibration = 0.998, R² ของข้อมูลชุด prediction = 0.892, RMSEC = 0.023 และ RMSEP = 0.092 การทำนายปริมาณเกลือในปลาหมึกด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี^[7] ได้ผลจากเครื่อง FT-NIR spectrometer ค่า R² = 0.9, SEC = 0.19%, SEP = 0.17% และ Bias = 0.0001 ได้ผลจากเครื่อง FQA-NIR GUN ค่า R² = 0.78, SEC = 0.23%, SEP = 0.2% และ Bias = 0.00004 จากการตรวจเอกสารพบว่ามีบทความวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับการวัดปริมาณเกลือของผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ และยังไม่พบบทความ

วิจัยที่วัดปริมาณเกลือในปลาซาร์ดีนกระป๋อง ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ปริมาณเกลือของปลาซาร์ดีนในซอสมะเขือเทศในอุตสาหกรรมผลิตปลาซาร์ดีนกระป๋องด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการวิเคราะห์ปริมาณเกลือของปลาซาร์ดีน

1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ปริมาณเกลือของปลาซาร์ดีน

1.2.3 นำแบบจำลองในข้อที่ 2 มาประยุกต์ใช้จริง เพื่อลดเวลาลดต้นทุน และแรงงานในการตรวจสอบคุณภาพปลาซาร์ดีน

1.2.4 เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

1.3 ขอบเขตการศึกษาของปริญญานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาการวัดปริมาณเกลือในปลาซาร์ดีนกระป๋องในซอสมะเขือเทศ

1.3.2 วัดปริมาณเกลือโดยการเปรียบเทียบ 2 วิธี คือวิธีดั้งเดิมโดยใช้เครื่องไตเตรทอัตโนมัติและเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 แผนการดำเนินงานของปริญญานิพนธ์

ตารางที่ 1.1 ตารางแผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนดำเนินงาน		ปี / เดือน										
		พ.ศ.2556						พ.ศ.2557				
		มี.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	
1	ศึกษากระบวนการผลิตปลาชาร์ทินกระป๋อง	←	→									
2	ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการวัดปริมาณเกลือ		←	→								
3	สุ่มตัวอย่างมาสแกนด้วยคลื่น NIR		←	→								
4	นำตัวอย่างมาป่นแล้วสแกนด้วยคลื่น NIR และวัดปริมาณเกลือ		←	→								
	นำตัวอย่างมาปรับปริมาณเกลือที่แตกต่างกัน แล้วสแกนด้วยคลื่น NIR และวัดปริมาณเกลือ		←	→								
5	นำข้อมูลทั้งหมดมาสร้างแบบจำลอง					←	→					
6	ทดสอบแบบจำลอง								←	→		
7	สรุปและเขียนรายงาน		←									→

- 1) ศึกษากระบวนการผลิตปลาชาร์ทึนกระป๋องของโรงงานเพื่อการส่งออกและบริโภคภายในประเทศ ทั้งนี้เน้นการตรวจวัดปริมาณเกลือในผลิตภัณฑ์
- 2) ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการวัดปริมาณเกลือในปลาชาร์ทึนในขั้นตอนการผลิตต่างๆ
- 3) สุ่มตัวอย่างในขั้นตอนการผลิตก่อนปิดฝาภาสแกนด้วยคลื่น NIR อย่างน้อย 150 ตัวอย่าง
- 4.1) นำตัวอย่างมาป่นให้ละเอียดแล้วสแกนด้วยคลื่น NIR และวัดปริมาณเกลือด้วยวิธีดั้งเดิม
- 4.2) นำตัวอย่างมา ปรับปริมาณเกลือที่ระดับ 0, 0.2, 0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.6 และ 2.0 % เพื่อให้ได้ปริมาณเกลือที่แตกต่างกัน 9 ระดับโดยแต่ละระดับมี 5 ตัวอย่าง ดังนั้นรวมเป็น 45 ตัวอย่าง แล้วนำมาสแกนด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด และวัดปริมาณเกลือด้วยวิธีดั้งเดิม
- 5) แล้วนำข้อมูลทั้งหมดมาสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเกลือของปลาชาร์ทึน กับ Optical dataโดยวิธีทาง Chemometric แบบ Partial least square regression
- 6) ทดสอบแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายปริมาณเกลือในเนื้อปลาของตัวอย่างที่เป็น Unknown
- 7) สรุปผล และ เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับของปริญญาโท

- 1.5.1 สามารถใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปริมาณเกลือในปลาชนิดอื่นได้
- 1.5.2 ลดต้นทุนในการผลิตซึ่งหมายถึงลดเวลาลดการใช้สารเคมีและลดแรงงานในการตรวจสอบ
- 1.5.3 สามารถเพิ่มศักยภาพของการปรับปรุงและประกันคุณภาพของการผลิตปลาชาร์ทึนกระป๋องทั้งเพื่อการส่งออกและบริโภคภายในประเทศได้ ทำให้โรงงานสามารถมั่นใจในคุณภาพของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เกลือ[8], [9]

เกลือเป็นแร่ธาตุทางโภชนาการชนิดหนึ่ง โดยหลักแล้วมีชื่อทางเคมีว่า โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งสามารถสกัดได้จากสัตว์และพืชแต่เกลือจากพืชบางครั้งอาจเป็นพิษ เกลือบริโภคนสามารถผลิตได้จาก น้ำทะเลหรือดินเค็มลักษณะเป็นผลึกสีขาวมีรสเค็ม เกลือเป็นอาหารธรรมชาติที่มีความสำคัญต่อมนุษย์ และสัตว์มาตั้งแต่สมัยโบราณจนถึงปัจจุบัน มนุษย์ต้องบริโภคเกลือประมาณวันละ 5-10 กรัม เพื่อนำไปช่วยรักษาสมดุลของน้ำในร่างกายให้เซลล์เนื้อเยื่อต่างๆ ทำงานอย่างปกติ นอกจากนี้เกลือยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ได้มากมายในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากราคาถูกและใช้ได้หลากหลายเพื่อเป็นเครื่องปรุงรส, ใช้เพื่อการถนอมอาหาร, ใช้ผสมกับน้ำแข็งเพื่อเพิ่มความเย็นและการหมักเกลือ (salt curing) ช่วยลดแอกทิวิตีของน้ำ (water activity) ทำให้ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย (microbial spoilage) และจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen) เช่น อาหารที่มีปริมาณเกลือสูงได้แก่ กะปิ กุ้งแห้ง น้ำปลา ปลาร้า ปลาจ่อม กุ้งจ่อม ปลาส้ม ไตปลา ปูเค็ม เครื่องพริกแกง ผักดอง ปลาเค็ม ปลาแห้ง ไข่เค็ม เต้าเจี้ยว ซีอิ้วขาว นอกจากนี้ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารเคมีต่างๆ ได้แก่ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) หรือโซดาทำขนมโซเดียมคาร์บอเนต (NaCO_3) หรือโซดาแอส โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซดาไฟ และ ไฮโดรคลอริก (HCl) หรือกรดเกลือ เป็นต้น ในเกลือที่ใช้บริโภคที่ไม่มีความชื้นอยู่เลยจะมีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 95.5 - 98.5 และมีสารอื่นเจือปนในปริมาณน้อย เช่น แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) และซัลเฟต (SO_4) เกลือมี 2 ประเภท คือ 1. เกลือทะเลหรือเกลือสมุทร (Sea Salt) คือเกลือที่ผลิตขึ้นโดยการนำน้ำทะเลขึ้นมาตากแดดให้น้ำระเหยไปเหลือแต่ผลึก เกลือตกอยู่ (Solar Evaporation System) เกลือ ประเภทนี้มีการผลิตและการใช้มาตั้งแต่สมัยโบราณและถือเป็นอาชีพเก่าแก่อาชีพหนึ่งของโลกและของคนไทย 2. เกลือหินหรือเกลือสินเธาว์ (Rock Salt) คือเกลือที่ทำจากดินที่น้ำชะดินละลายแล้วแห้งปรากฏเป็นคราบเกลือติดอยู่บนผิวดิน เรียกว่า “สำดิน” เมื่อน้ำผิวดินหรือสำดินมาละลายน้ำ แล้วต้มจะได้เกลือสินเธาว์ ต่อมาในปี พ.ศ. 2512 ได้มีการค้นพบเกลือหินที่อยู่ใต้ดินในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้รูปแบบการผลิตเกลือสินเธาว์เปลี่ยนแปลงไปเป็นการใช้เกลือหินแทน โดยใช้วิธีฉีดน้ำลงไปละลายเกลือในบ่อเกลือ หรือใช้วิธีสูบน้ำเกลือใต้ดินขึ้นมาตากแดด หรือโดยการต้มเพื่อให้ได้ตะกอนเกลือ และหากใช้เครื่องจักรที่ทันสมัยสามารถผลิตได้ตลอดปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near infrared spectroscopy, NIR)[10]

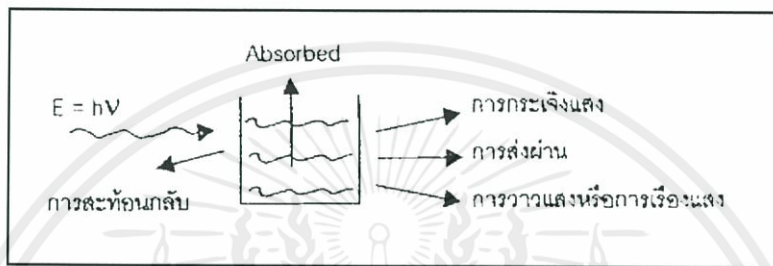
2.2.1 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR Spectroscopy) [11]

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near infrared spectroscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการอันตรกิริยา (Interaction) เมื่อคลื่นเนียร์อินฟราเรด (ความยาวคลื่นระหว่าง 700-2500 nm) ที่ส่องไปยังวัสดุ เช่น ผลผลิตทางเกษตรและอาหาร ทำให้พันธะทางเคมีภายในวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพันธะ O-H, C-H และ N-H ของวัสดุ ดูดซับคลื่นและทำให้เกิดอาการสั่นสะเทือนของพันธะ โดยการเปลี่ยนระดับพลังงานข้ามขั้นมากกว่า 1 ชั้น (Overtone) หรือเกิดจากการสั่นสะเทือนข้าม 1 ชั้น (Fundamental vibration) พร้อมกันของพันธะตั้งแต่ 2 พันธะขึ้นไป ทำให้ได้ผลรวมของการสั่น (Combination vibration) เครื่องมือที่ใช้เรียกว่า สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ซึ่งมีแหล่งแสงที่ให้ช่วงคลื่นเนียร์อินฟราเรด ปกติเป็นหลอดทังสเตนฮาโลเจน (Tungsten halogen) ตัวตรวจวัด (Detector) ในเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ทำจากสารต่างๆ ไม่เหมือนกันขึ้นกับช่วงคลื่นที่ต้องการตรวจวัด เช่น ช่วงคลื่น 350-1100 nm ใช้ Si (Silicon) ช่วง 1100-2500 nm ใช้ PbS (Lead sulphide) หรือ InGaAs (Indium Gallium Arsenide) ช่วงแสงที่มองเห็นได้และช่วงเนียร์อินฟราเรด (400-2600 nm) ใช้ PbS ควบคู่ (Sandwiched) กับ Silicon photodiodes วิธีการจัดวางตัวอย่างเพื่อการสแกนด้วยสเปกโตรมิเตอร์ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีสะท้อน (Reflectance) เป็นวิธีที่ง่ายต่อการจัดวางตัวอย่าง เมื่อแสงส่องไปยังวัตถุแล้วแพร่ลงไปใต้อวัตถุบางส่วนแล้วสะท้อนกลับขึ้นมาสู่ตัวตรวจวัด บางทีเรียกว่า การสะท้อนแบบแพร่ (Diffused reflectance) โดยมีแหล่งแสงและตัวตรวจวัดอยู่ด้านล่าง ในปัจจุบันเนื่องจากมีความสะดวกในการใช้สายไฟเบอร์ออปติก การวัดสะท้อนจากวัตถุจึงเป็นแบบ Interactance ซึ่งมีสายไฟเบอร์ออปติกที่เป็นตัวนำคลื่นที่สะท้อนจากวัตถุกลับไปยังตัวตรวจวัด ซึ่งอยู่ใกล้กัน เรียกว่า Interactance-Reflectance ได้ วิธีส่องผ่านคลื่นไปใต้อตัวอย่าง ก่อนที่จะรับแสงที่ผ่านออกมาไปวิเคราะห์ เรียกว่า วิธีส่องผ่าน (Transmittance) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กับของเหลว นอกจากนี้ยังสามารถใช้กับของแข็ง เช่น กรณีของผลไม้ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ FQA NIR Gun (Shizuoka Shibuya Seiki, Japan) ซึ่งปกติเป็นแบบสะท้อนให้เป็นวิธีส่องผ่าน โดยใช้ Gold cup นอกจากนี้ยังมีการวัดแบบส่องผ่านสะท้อน (Transflectance) เป็นการส่งคลื่นผ่านตัวอย่าง ซึ่งโดยปกติเป็นของเหลวที่อยู่ในภาชนะที่ทำด้วยอะลูมิเนียมที่มีความลึกลงๆ เมื่อคลื่นกระทบพื้นอะลูมิเนียมจะสะท้อนผ่านตัวอย่างขึ้นมาเข้าสู่ตัวตรวจวัด

เนื่องจากเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมจะมีค่าพิค ส่วนใหญ่เป็นพิคกว้าง (Broad spectrum) บางทีมีพิคกว้างที่มีความเข้มสูง เนื่องจากการซ้อนทับกัน (Overlapping bands) บางทีอาจจะเห็นพิคที่คมชัด (แต่มีน้อย) สเปกตรัมของวัสดุเกษตรและอาหารส่วนใหญ่มีพิคของน้ำเป็นพิคใหญ่และกว้างที่บริเวณ 760, 970, 1450 และ 1940 nm ลักษณะของสเปกตรัมเช่นนี้ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุได้โดยตรง จำเป็นต้องใช้หลักทางเคมีเมตริก (Chemometric) มาใช้ โดยต้องทำสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าองค์ประกอบทางเคมีหรือสมบัติทางกายภาพหรือสมบัติอื่นที่ต้องการวิเคราะห์ (เช่น ไขมันในปลา ความหวานของผลไม้ สมบัติเนื้อสัมผัสของอาหาร ปริมาณเนือยางแห้งของน้ำยาง เป็นต้น) กับข้อมูลของสเปกตรัม ซึ่งเรียกว่าข้อมูลเชิงแสง (Optical data) เพื่อประมาณค่าองค์ประกอบหรือสมบัติที่ต้องการ

2.2.2 หลักการพื้นฐานของเครื่อง Near Infrared Spectroscopy [12]

หลักการของสเปกโทรสโกปี คือ เมื่อลำแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ จะมีแสงบางส่วนที่จะถูกดูดกลืน (Absorbed) บางส่วนผ่านทะลุออกไป (Transmitted) บางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ (Reflected) บางส่วนเกิดการวาวแสงหรือการเรืองแสง (fluorescence or phosphorescence) และบางส่วนอาจเกิดการกระเจิงแสง (Scattered) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การกระทำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารต่างๆ[12]

สเปกโทรสโกปีมีกฎของการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กฎ คือ

1. กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) กล่าวว่า “เมื่อแสงสีเดียว (monochromatic light) คือ แสงความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว (homogeneous) เป็นสัดส่วนของความเข้มแสงที่ถูกตัวกลางดูดกลืนไว้ โดยไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงเริ่มต้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน”[13]

2. กฎของเบียร์ (Beer's law) กล่าวว่า “เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางดูดกลืนไว้จะแปรโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น”[13] ในทางปฏิบัติปริมาณความเข้มข้นของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่แสงส่องผ่าน จึงต้องรวมกฎทั้งสองเข้าด้วยกันเรียกว่า กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon bc \quad (2.1)$$

เนื่องจาก T (Transmittance) เท่ากับ

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.2)$$

เพราะฉะนั้น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปใช้ของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon bc = \log \frac{1}{T} \quad (2.3)$$

- เมื่อ l = ความเข้มของแสงความยาวคลื่นเดียวที่ส่งผ่านออกมา
 ϵ = สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง ปกติเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น และอุณหภูมิ
 l_0 = ความเข้มของแสงก่อนผ่านตัวกลางเมื่อ $b=0$
 b = ความหนาของตัวกลางในหน่วย cm
 c = ความเข้มข้นของสารในหน่วย mol/l
 A = ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

โมเลกุลของสารแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์กับช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันเนื่องจากการจัดเรียงโครงสร้างของโมเลกุลต่างกัน นอกจากนี้ในแต่ละโมเลกุลจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นมากกว่า 1 ช่วง เช่นโมเลกุลของน้ำ (H_2O) ที่มีมากในผลิตภัณฑ์อาหาร มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น 4 ช่วง คือ 760, 970, 1450 และ 1940 nm ดังนั้นถ้าทำการทดสอบที่ช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวจะสามารถหาความสัมพันธ์ของน้ำภายในตัวอย่างได้

2.2.3 ส่วนประกอบหลักของเครื่อง Spectrometer[14]

ส่วนประกอบของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมีลักษณะการจัดการที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการออกแบบและความต้องการการใช้งาน

โดยทั่วไปวิธีการจัดวางตัวอย่างเพื่อการสแกนด้วยสเปกโตรมิเตอร์ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีสะท้อน (Reflectance) เป็นวิธีที่ง่ายต่อการจัดวางตัวอย่าง เมื่อแสงส่องไปยังวัตถุแล้วแพร่ลงไปใต้อวัตถุบางส่วนแล้วสะท้อนกลับขึ้นมาสู่ตัวตรวจวัด บางทีเรียกว่า การสะท้อนแบบแพร่ (Diffused reflectance) ในปัจจุบันเนื่องจากมีความสะดวกในการใช้สายไฟเบอร์ออปติก การวัดสะท้อนจากวัตถุจึงเป็นแบบ Interactance ซึ่งมีสายไฟเบอร์ออปติกที่เป็นตัวนำคลื่นที่สะท้อนจากวัตถุกลับไปยังตัวตรวจวัด ซึ่งอยู่ใกล้กัน เรียกว่า Interactance-Reflectance ในงานวิจัยนี้จะศึกษา

สเปกโตรมิเตอร์สองเครื่องได้แก่ FT-NIR และ MICRO NIR ซึ่งมีส่วนประกอบหลักดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบต่างๆ [11]

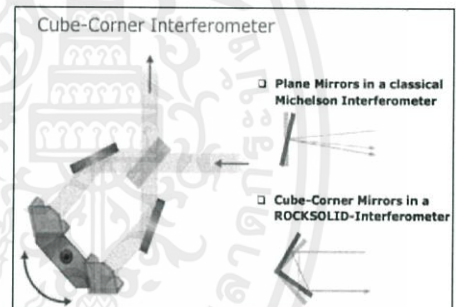
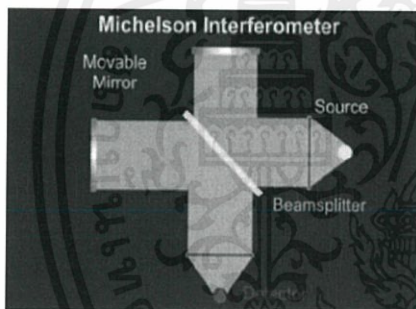
รายละเอียด	FT-NIR spectrometer	MICRO NIR
ความยาวคลื่น (Wavelength)	700-2500 นาโนเมตร	1150-2150 นาโนเมตร
แหล่งกำเนิดแสง (Light sources)	ทังสเทนฮาโลเจน (Tungsten halogen)	ทังสเทนฮาโลเจน (Tungsten halogen)
เครื่องวัดแสง (Detector)	Silicon photodiodes, InGaAs (Indium Gallium Arsenide)	InGaAs (Indium Gallium Arsenide)
ความละเอียดของคลื่น	ปรับได้ตามความต้องการ	ไม่แน่นอน ปรับไม่ได้

2.2.3.1 FT-NIR spectrometer [15]

ใช้ Michelson Interferometer (รูปที่ 2.2) โดยมี Movable mirror เป็นอุปกรณ์ที่ใช้การเลื่อนเข้าออก เพื่อให้แสงแทรกสอดกันแล้วตกมาที่ Detector จะให้ความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

ข้อดี

1. ไม่มีช่องให้แสงรอด แสงสามารถส่องผ่านได้เต็มที่
2. ความยาวคลื่นที่ได้มีความแม่นยำสูง
3. มีแสงเลเซอร์เป็นตัวที่ใช้ในการเปรียบเทียบค่า
4. สแกนได้อย่างรวดเร็ว
5. แสงจะออกในแนวเส้นตรงเดิม (ไม่มีผลของการสั่นสะเทือน) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 Michelson Interferometer [15]

รูปที่ 2.3 Cube-Corner Interferometer [15]

ตารางที่ 2.2 Specification for FT-NIR [16]

Parameter	Specification
Resolution	2 cm ⁻¹
Wavenumber Reproducibility	Better than 0.04 cm ⁻¹
Wavenumber Accuracy	Better than 0.1 cm ⁻¹
Photometric Accuracy	0.1 % T
Interferometer	RockSolid™, permanently aligned, high stability
IR Source	High energy air cooled NIR source

Laser Class	Class 1
Beamsplitter	Quartz substrate with proprietary coating
Scanner	Mechanical, frictionless bearing (no compressed air required), 4 selectable mirror velocities
A/D Converter	24-bit
Validation	Internal Validation Unit (IVU)
Spectrometer Size	40.0 (W) * 58.9 (D) * 26.2 (H) cm (base configuration)
Weight	30-40 kg (depending on configuration)
Spectrometer Power	100 – 240 VAC, 50 – 60 Hz, max. 180 W
Computer Interface	Ethernet connection
Spectroscopy Software	OPUSTM: easy – to – use, fully GMP and 21 CFR Part 11 compliant
Optional	OPUSTM packages: -OPUS/LAB, software package for QVAC -OPUS/IDENT, software package for identification of raw materials -OPUS/QUANT, software package for quantification of ingredients -OPUS/SEARCH, software package for creating library search capabilities

2.2.3.2 Micro NIR spectrometer [17]

ใช้การออกแบบชั้นสูงเคลือบฟิล์มบางและเทคโนโลยีการผลิต linear variable filter (LVF), JDSU จะแนะนำแบบพิเศษกะทัดรัดน้ำหนักเบาใช้ต้นทุนต่ำ LVF คือการเคลือบตัวกรองของ bandpass ที่ตั้งใจแยกคลื่นในทิศทางหนึ่ง เนื่องจากความยาวคลื่นศูนย์กลางของ bandpass เปลี่ยนแปลงตามความหนาของการเคลือบ ความยาวคลื่นส่งผ่านตัวกรอง (filter) จะแปรผันตรงแบบเชิงเส้นกับทิศทางการแยกคลื่น เซ็นเซอร์ของ JDSU ใช้ LVF คู่กับอาร์เรย์ของเครื่องตรวจจับเชิงเส้นเพื่อให้ข้อมูลสเปกตรัมสำหรับการใช้งานที่หลากหลายในเชิงพาณิชย์ อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติที่สำคัญ

1. ขนาดกระทัดรัด: เส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มม. x สูง 42 มม.
2. น้ำหนักเบา: <60 กรัม
3. เป็นการออกแบบที่แข็งแกร่ง; ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว
4. แหล่งกำเนิดแสงและตัวเก็บเชิงแสงแบบบูรณาการ
5. ช่วงความยาวคลื่น:

1150-2150 นาโนเมตร

ช่วงที่กำหนดเองได้

6. สะท้อนแบบแพร่หรือการส่องผ่าน
7. สามารถปรับแต่งได้ง่าย
8. ขับเคลื่อนระบบ USB

ตารางที่ 2.3 Specification for MICRO NIR [17]

Parameter	Specification
Illumination source	Two integrated vacuum tungsten lamps
Bulb life	>18,000 hours
Illumination geometry	Flood Illumination/0 observer
Input aperture dimension	2.5*3.0 mm
Sample working plane	3 mm from window
Dispersing element	Linear variable filter
Detector	128-pixel uncooled InGaAs photodiode array
Pixel size/pitch	30*250 um/50 um
Spectral bandwidth (FWHM)	<1.25% of center wavelength. For example, at 1000 nm, the resolution is 12.5 nm
Analog to digital converter	16 bit
Dynamic range (max)	1000:1
Measurement time (typical)	0.5 sec
Integration time	Minimum 10 us; maximum limited by dark signal
Interface	USB 2.0, high speed (480 Mbps)
Dimensions	45*42 mm
Weight	2.0 oz (<60g)
Operating environment	-20 to 40 °C, non – condensing

Storage environment	-40 to 70 ° C, non – condensing
Power requirement	USB powered (<500 mA @ 5 V)
CE Mark	Yes
Environmental qualification	
Shock and vibration	Mil-PRE-28800F Class 2
Temperature and humidity	Mil-PRE-28800F Class 3
Package drop test	ISTA 2A

2.2.4 การเลือกวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น (Selecting the Data Preprocessing Model Method) [18]

วิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้นเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่สำคัญ ที่มีจุดประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองของสเปกตรัมในทางที่อัลกอริทึม PLS สามารถให้ความสัมพันธ์ที่ตรงระหว่างสเปกตรัมกับข้อมูลความเข้มข้น

2.2.4.1 การลบโดยค่าคงที่ (Subtraction of a Constant Offset):

สเปกตรัมจะถูกปรับแบบเชิงเส้นเพื่อให้ค่า Y ที่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับศูนย์

การใช้งาน : เป็นการกำจัดปัญหาการขยับขึ้นของเบสไลน์ (Baseline Shift) เชิงเส้น สิ่งเหล่านี้เกิดจาก เช่น จากค่าที่แตกต่างกันของการขยายสัญญาณของดีเทคเตอร์ (Detector Amplification)

2.2.4.2 การลบโดยเส้นตรง (Subtraction of a Straight Line):

ในแต่ละช่วงเวลาที่เลือกไว้ เส้นตรงเส้นหนึ่งจะถูกฟิตเส้นสเปกตรัมโดยใช้วิธีวิธี partial least squares (PLS) เส้นตรงเส้นนี้จะถูกลบออกจากสเปกตรัมดังกล่าว

การใช้งาน: กำจัดปัญหาความเอียงเชิงเส้นของการขยับขึ้นของเบสไลน์ (ดูรูปที่ 2.4)

2.2.4.3 Vector Normalization:

ขั้นแรกสเปกตรัมจะถูกหาค่ากลาง จากนั้นผลรวมของค่ายกกำลังสองของค่า Y ทั้งหมดจะถูกคำนวณ และสเปกตรัมใดๆจะถูกหารด้วยค่ารากที่สองของผลรวมนี้ สิ่งนี้เรียกว่า vector norm ของสเปกตรัมที่ได้จะเท่ากับ 1 เสมอ

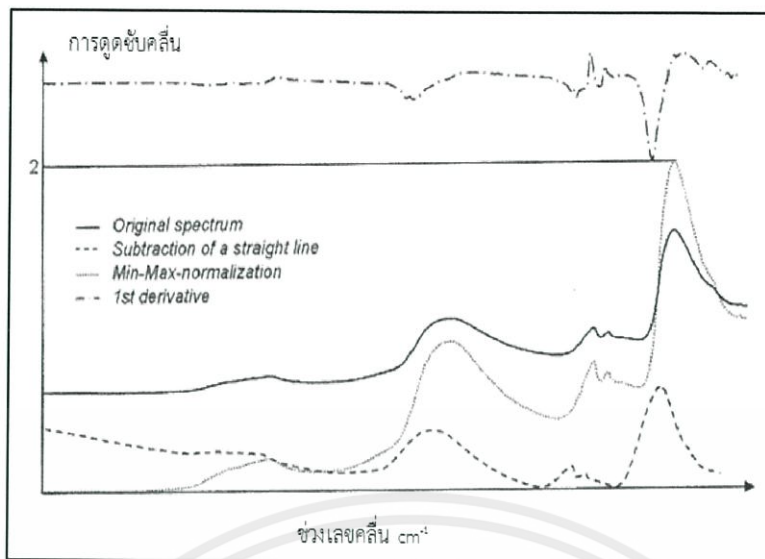
การใช้งาน : ในหลักการ สเปกตรัมจะประกอบด้วยสองส่วนของข้อมูล คือความสูงของแถบการดูดซับและโครงสร้าง หลังจากการนอร์มัลไลเซชัน (Normalization) ข้อมูลความสูงจะหายไป; มีเพียงโครงสร้างข้อมูลยังคงอยู่ การนอร์มัลไลเซชัน (Normalization) ถูกใช้เพื่อ เช่นการกำจัดผลกระทบของเส้นทางผ่านเชิงแสง (Optical Path Length) ที่แตกต่างกัน ในกรณีของการวัดแบบส่องผ่าน ความยาวของเส้นทางผ่านเชิงแสงทำให้ความสูงของสัญญาณเปลี่ยนแปลง แต่โครงสร้างยังเหมือนเดิม ในทำนองเดียวกันการวัดแบบสะท้อนแบบแพร่จะมีผลกระทบของการรบกวนเนื่องจากความหนาแน่นของวัสดุแตกต่างกันหรือขนาดอนุภาคแตกต่างกัน สิ่งเหล่านี้ก็จะลดลง

2.2.4.4 Min-Max-Normalization (สำหรับสเปกตรัมการดูดซับคลื่น):

สเปกตรัมจะถูกขยับเชิงเส้นเพื่อให้ค่า Y ที่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับศูนย์ แล้วสเปกตรัมจะถูกขยายเพื่อให้ค่า Y สูงสุดเท่ากับสองหน่วยของการดูดซับคลื่น (รูปที่ 2.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ

การใช้งาน : เทียบได้กับ Vector Normalization ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 NIR สเปกตรัมวัดแบบการสะท้อนแบบแพร่ [18]

2.2.4.5 Multiplicative Scatter Correction : ขั้นตอนแรก, สเปกตรัมเฉลี่ยคำนวณจากทุกๆสเปกตรัมของชุดข้อมูลคาลิเบรชัน แล้วแต่ละสเปกตรัม $X(i)$ จะถูกแปรเปลี่ยนไปตาม

$$X(i)' = u + v \cdot X(i) \quad (2.4)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ u และ v จะถูกเลือกเพื่อให้ความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงแล้ว $X(i)'$ กับสเปกตรัมเฉลี่ยน้อยที่สุด

การใช้งาน: วิธีการนี้มักจะใช้สำหรับการวัดแบบการสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse reflection)

2.2.4.6 อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (First Derivative): คำนวณอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของสเปกตรัม (รูปที่ 2.4)

การใช้งาน : โดยการคำนวณอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่ง สัญญาณที่มีความชันจะถูกเน้นมากกว่าสัญญาณที่ค่อนข้างแบนราบ วิธีนี้จะถูกใช้เน้นลักษณะที่ชัดเจน แต่มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับโครงสร้างที่มีแถบการดูดซับคลื่นที่กว้าง การประยุกต์ใช้ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การประเมินแถบการดูดซับคลื่นที่กว้างนี้ มักจะทำในเทคโนโลยี NIR โดยการคำนวณอนุพันธ์ โครงสร้างเหล่านี้จะมีรูปร่างที่สูงชันขึ้น ซึ่งสามารถได้รับการประเมินได้ง่ายขึ้น

เมื่อใช้อนุพันธ์เป็นการจัดการข้อมูลเบื้องต้น จะต้องคำนึงถึงว่าสัญญาณรบกวนจะถูกจัดการเช่นกัน สิ่งนี้จะซ้อนทับบนสเปกตรัมเป็นสิ่งรบกวนเพิ่มเติม และสามารถทำให้สัญญาณของตัวอย่างเลวลง

2.2.4.7 อนุพันธ์อันดับที่สอง (Second Derivative): คำนวณอนุพันธ์อันดับสองของสเปกตรัมนั้น

การใช้งาน: เมื่อเทียบกับอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง แม้โครงสร้างที่ราบเรียบมากๆสามารถประเมินได้ ผลการรบกวนของสัญญาณรบกวน ซึ่งโดยทั่วไปมีมากจนทำให้สเปกตรัมถูกวิเคราะห์ในช่วงสเปกตรัมที่จำกัดมากๆ

จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นอิทธิพลของวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้นแบบต่างๆต่อลักษณะของ NIR-สเปกตรัม (การวัดโดยใช้หัววัดไฟเบอร์ออปติก) สเปกตรัมเดิมแสดงให้เห็นการขจัด (Offset)

เล็กน้อยของเบสไลน์ เช่นเดียวกับการขยับขึ้น (Drift) การขยับขึ้นนี้สามารถถูกกำจัดโดยการลบออก จากเส้นตรง (Subtraction of a Straight Line) (เส้นประ) และการขจัดถูกกำจัดโดยการ Min-Max Normalization (เส้นจุด) อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของเส้นสเปกตรัมเดิม (เส้นประ-จุด) ถูกขยายเพื่อแสดง ให้ดูง่ายและขยับขึ้นสู่ตำแหน่งที่ค่าการดูดซับคลื่นสูง สามารถสังเกตเห็นโครงสร้างที่แหลมขึ้นมาได้ ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมเดิม

วิธีที่เหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับระบบที่จะวิเคราะห์ จากประสบการณ์แสดงให้เห็นว่าใน หลายกรณีการลบด้วยเส้นตรง การนอมนัลไรเซชันสเปกตรัม หรือการทำอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งได้ผล ที่ดีที่สุดใน การ คาลิเบรชัน ในบางกรณีการใช้วิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น 2 วิธีรวมกันก็ได้ผลดีที่สุด เช่นกัน บ่อยครั้งที่แบบจำลองแบบต่างๆให้ผลได้ดีเท่าเทียมกันซึ่งโดยทั่วไปควรทดสอบดูหลายๆวิธี เปรียบเทียบกัน

2.2.5 การสร้างสมการ Calibration[10]

Partial Least Square (PLS) Regression เป็นเทคนิคในการลดจำนวนตัวแปร เช่นเดียวกับวิธี PCR กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมจะเป็นอิสระจากกระบวนการทำสมการ ถดถอยของสมการทำนาย ซึ่งใน PLS ทั้งสองกระบวนการจะถูกเชื่อมโยงเข้าไว้ด้วยกัน โดยมีการนำค่า องค์ประกอบทางเคมีมาคิดในกระบวนการหาปัจจัยด้วย ซึ่ง Kasemsamran, 2005 [19] ได้อธิบายถึง PLS ว่าเป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบตัวแปรหลายตัวแปร โดยการสร้างปัจจัยแบบสมการเชิง เส้นตรงจากข้อมูลของสเปกตรัมเริ่มต้น และนำไปใช้ในการสร้างสมการถดถอย โดยปัจจัยที่ได้ จากการสร้างสมการด้วยวิธีสถิติ PLS ต้องสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล และเกี่ยวข้องกับการ ประเมินค่าทางเคมีในเวลาเดียวกัน วัตถุประสงค์ของ PLS เพื่อต้องการลดจำนวนข้อมูลสเปกตรัม ให้ได้เฉพาะข้อมูลสเปกตรัมที่มีความสำคัญกับการทำนายค่าทางเคมีที่สนใจเท่านั้น เพื่อให้สามารถ ประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น

2.2.6 เทอมที่จำเป็นในการประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของโมเดล สถิติที่ใช้ในการประเมินค่า NIRS calibration

2.2.6.1 Mean (ค่าเฉลี่ย) [20]

ค่าเฉลี่ยเป็นค่าทางคณิตศาสตร์ของข้อมูลที่ใช้อ้างอิง (X) หรือ ข้อมูลสเปกตรัมที่ ได้จากเครื่องวัดสเปกตรัม (Y) ค่าเฉลี่ยนั้นจะถูกคำนวณจากผลรวมของค่า X หรือ Y และถูกหารโดย จำนวนของข้อมูล (N) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} \quad (2.5)$$

2.2.6.2 Standard deviation, SD (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) [20]

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลง หรือความแปรปรวนใน เอกสารนี้ ข้อมูล นั่นคือ รากที่สอง ของความแปรปรวน สูตรในการหาค่า SD_x (หรือ SD_y) คือ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SD_x = \{(\sum X^2 - [(\sum X)^2 / N]) / (N - 1)\}^{1/2} \quad (2.6)$$

2.2.6.3 Bias (ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดย NIRS และข้อมูลที่อ้างอิง) [20]

เมื่อทำนายค่าตัวแปรที่ต้องการของข้อมูลในเซตตัวอย่าง Validation ค่า Bias หมายถึงความแตกต่างระหว่างค่าอ้างอิงและค่าที่ทำนายโดย NIRS และเป็นการวัดความแม่นยำโดยรวมของ calibration ในโลกความเป็นจริงของทางการค้าและอุตสาหกรรม Bias เป็นหนึ่งในสิ่งที่สำคัญมากในทางสถิติ Bias สามารถเกิดขึ้นได้ถึงแม้เมื่อค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และ SEP แสดงว่าค่า calibration นั้นดีเยี่ยม

สูตรสำหรับการคำนวณ Bias คือ

$$Bias = (\sum X/N) - (\sum Y/N) \quad (2.7)$$

เมื่อ X = ค่าอ้างอิง และ Y = ค่าที่ได้จากการทำนาย โดย NIRS สามารถเป็นบวกหรือลบก็ได้

2.2.6.4 Coefficient of determination (สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ, R^2) [20]

แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดยความแปรปรวนในข้อมูล Y ค่าของ R^2 จะเป็นบวกเสมอ เช่น ถ้า $R = 0.97$ แล้ว $R^2 = 0.941$ หมายความว่า 94.1% ของความแปรปรวนในข้อมูล X และ 5.9% ของความแปรปรวนในข้อมูล X เกิดขึ้นจากตัวแปรอื่น เช่น การเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดลองอ้างอิง และอื่นๆ ค่า R^2 เป็นบวกเสมอโดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของ R ในทางปฏิบัติ R^2 ให้ข้อมูลมากกว่า R และใช้กันมากกว่า R การแปลความหมายของค่า R^2 แสดงดังตารางที่ 2.4 ซึ่งค่า R^2 คำนวณได้จาก (สมการ 2.8) [21]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_1^n (Y_i^{meas} - Y_i^{pred})^2}{\sum_1^n (Y_i^{meas} - \bar{Y})^2} \quad (2.8)$$

- เมื่อ Y^{meas} คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี
 Y^{pred} คือ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIRS
 n คือ จำนวนตัวอย่าง
 i คือ เลขที่ตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 การแปลความหมายของค่า R^2 [20]

R^2	ความหมาย
ถึง 0.25	ไม่สามารถใช้ใน NIR calibration
0.26-0.49	เป็นความสัมพันธ์ที่ไม่ดี ควรหาเหตุผล
0.50-0.64	OK สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) อย่างหยาบๆ
0.66-0.81	OK สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบๆ
0.83-0.90	ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย
0.92-0.96	ใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
0.98+	ดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้

2.2.6.5 Root mean square error of estimation (*RMSEE*) [21]

เป็นค่าที่ใช้วิเคราะห์ข้อผิดพลาดของชุดคาลิเบรชัน (Calibration) ไม่เหมาะในการใช้กับชุดทำนาย (Validation) สูตรการคำนวณ *RMSEE* คือ

$$RMSEE = \left\{ \left[\sum_{i=1}^M (Y_i^{\text{meas}} - Y_i^{\text{pred}})^2 \right] / (M - R - 1) \right\}^{1/2} \quad (2.9)$$

M คือ จำนวนตัวอย่าง

i คือ เลขที่ตัวอย่าง

R คือ จำนวนแพคเตอร์

2.2.6.6 Root mean square of the prediction (*RMSEP*) [20]

เป็นค่าในการวัดความแม่นยำเชิงปริมาณของชุดทดสอบ

$$RMSEP = \left[\frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M (Y_i^{\text{meas}} - Y_i^{\text{pred}})^2 \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

2.2.6.7 Ratio of SEP to the SD (*RPD*) [21]

RPD ย่อมาจาก Ratio of Standard error of Prediction (Validation) to (Standard) Deviation คืออัตราส่วนของ ค่า error มาตรฐานของการทำนาย (validation) กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11

$$RPD = (SD_{X(\text{validation set})}) / SEP_{\text{bias}} \quad (2.11)$$

อีกวิธีหนึ่งคือใช้สูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ $RPD = 1/(1-r^2)^{1/2}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.12) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผู้ใช้ส่วนมากพบว่าการใช้สูตรแรกง่ายกว่า โดย SEP_{bias} หาได้จากสูตร

$$SEP_{bias} = \left[\frac{1}{M-1} \cdot \sum_{i=1}^M (Y_i^{meas} - Y_i^{pred} - bias)^2 \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

ค่า SEP ควรต่ำกว่า SD มากๆ ซึ่งอัตราส่วนควรเท่ากับ 5 หรือมากกว่า บางกรณีตัวอย่างมีความสม่ำเสมอมาก ค่า SD จึงไม่สูง ซึ่ง RPD อาจจะไม่สูง แต่ถ้า SEP ต่ำกว่า SD มาก ดังนั้น RPD เท่ากับ 2.5-3.0 ก็อาจแสดงถึงการวิเคราะห์ที่แม่นยำถ้า SD มีค่าเพียง 0.4-0.5

ตารางที่ 2.5 ค่าทางสถิติ RPD [20]

ค่า RPD	การแบ่งกลุ่ม	การประยุกต์ใช้
0.0-2.3	เลวมาก	ไม่แนะนำ
2.4-3.0	เลว	คัดเลือกแบบหยาบๆ
3.1-4.9	พอใช้	คัดเลือก
5.0-6.4	ดี	ควบคุมคุณภาพ
6.5-8.0	ดีมาก	ควบคุมขั้นตอน
8.1+	ดีเยี่ยม	ได้ทุกการประยุกต์ใช้

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์, R^2 , $bias$ และค่า RPD คือค่าทางสถิติที่มีความสำคัญมากที่สุดสำหรับการประเมินค่าความมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์โดย NIRS

นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์สมรรถนะของแบบจำลองโดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดที่วิเคราะห์ Reproducivity กับ SEP โดยถ้าค่านี้มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าแบบจำลองใช้ได้ดีเยี่ยม ถ้าเท่ากับ 1-2.1 แสดงว่าดี ถ้าเท่ากับ 2.1-2.4 แสดงว่าพอใช้ ถ้าเท่ากับ 2.5-3 แสดงว่าไม่ดี ถ้ามากกว่า 3 แสดงว่าเลว (จากการสนทนากับ Tony, Pietroutonio, Caltest, USA)

2.2.7 ประโยชน์ของการใช้เทคนิค NIR [22]

ประโยชน์จากการใช้ NIR มีข้อดีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ทางเคมี หรือการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่น สำหรับการนำเครื่อง NIR ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมีประโยชน์มากมาย เช่น

1. เป็นวิธีทดสอบที่ไม่ทำลายตัวอย่าง รวมทั้งวิธีการเตรียมตัวอย่างไม่ยุ่งยาก และใช้ตัวอย่างในปริมาณน้อย
2. เป็นวิธีการตรวจวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ประหยัดเวลา เชื่อถือได้ และปลอดภัย
3. เป็นวิธีที่สามารถใช้ทดแทนการวิเคราะห์ทางเคมีได้ในระยะยาว จึงสามารถลดต้นทุนการผลิตอีกทั้งไม่ใช้สารเคมีในการเตรียมตัวอย่างดังนั้นจึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย
4. ในการวัดสเปกตรัมแต่ละครั้งสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อทำนายค่าต่างๆได้หลายค่าในเวลาเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุรีพร ณรงค์วงศ์ และคณะ (2011) การวิเคราะห์หาปริมาณเกลือในปลาทูน่าด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่าการวัดปริมาณเกลือในปลาทูน่าด้วยเครื่อง FT-NIR spectromrter รุ่น MPA และเครื่อง FQA-NIR GUN สามารถทำนายปริมาณเกลือได้โดยค่า R, SEC, SEP และค่า Bias ซึ่งได้ค่าที่ไม่แตกต่างกับการวัดโดยวิธีดั้งเดิม[7]

วสันต์ อินทร์ตา และคณะ(2012) ได้ทำการศึกษาปริมาณเกลือระหว่างกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากปลาทูน่าในระดับอุตสาหกรรมด้วยวิธีดั้งเดิมโดยใช้เครื่อง Auto titrator ในการวิเคราะห์ปริมาณเกลือของปลาทูน่าพันธุ์ทองแถบ ซึ่งพบว่าปลาทูน่าพันธุ์ทองแถบ ขนาดกลางจะมีปริมาณเกลือมากที่สุด เมื่อเทียบกับขนาดเล็กและขนาดใหญ่[23]

Lin and Brown (1992) ได้ศึกษาการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีตรวจสอบเกลือในสารละลายผลที่ได้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีนี้สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ตรวจสอบอย่างต่อเนื่องและใช้ในกระบวนการควบคุมปริมาณของเกลือได้[24]

Prevolnik et al. (2011) ได้ศึกษาความถูกต้องของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับการทำนายองค์ประกอบทางเคมี, ปริมาณเกลือและกรดอะมิโนอิสระในแฮมแห้ง (dry-cured ham) ความสามารถของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR spectroscopy) ถูกพิจารณาสำหรับวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมคุณภาพของแฮมแห้งของชาวสโลเวเนียแบบดั้งเดิมซึ่งชื่อว่า “Kraski prsut” แบบจำลองที่ใช้ในการทำนายถูกพัฒนาขึ้นสำหรับความชื้น, เกลือ, โปรตีน, ไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน, ไขมันในกล้ามเนื้อ, และกรดอะมิโนอิสระในกล้ามเนื้อ bicep femoris โดยมีจำนวนตัวอย่าง 135 ตัวอย่าง คุณภาพของแบบจำลองถูกประเมินโดยใช้พารามิเตอร์ทางสถิติได้แก่ Coefficient of determination (R^2), Standard error of cross-validation (SECV), Standard error of external validation (SEEV), Residual predictive deviation (RPD) ผลที่ดีที่สุดสำหรับแบบจำลองทำนายปริมาณเกลือ และเปอร์เซ็นต์เกลือในความชื้น หรือในมวลแห้ง ($R^2_{cv} > 0.90$, RPD > 3.0) แบบจำลองได้ผลดีสำหรับความชื้น ไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน ไขมันในเนื้อ และกรดอะมิโนอิสระทั้งหมด ($R^2_{cv}=0.75-0.90$, RPD=2.0-3.0) ขณะที่ผลสำหรับปริมาณโปรตีนและดัชนี Proteolysis ได้ไม่ดี ($R^2_{cv}=0.65-0.75$, RPD < 2.0) การ calibrations สำหรับกรดอะมิโนอิสระแต่ละชนิดให้ค่า R^2_{cv} ตั้งแต่ 0.40-0.09 และ RPD ตั้งแต่ 1.3 - 2.9 การพิสูจน์แบบภายนอกของแบบจำลองโดยใช้ตัวอย่างชุดใหม่ให้ผลใกล้เคียงกัน จากผลเหล่านี้แสดงว่า NIR spectroscopy สามารถทดแทนวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพของแฮมแห้ง[5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 ตัวอย่างปลาซาร์ดีนกระป๋องในซอสมะเขือเทศ

ในการทดลองแต่ละครั้งแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่ม 30 กระป๋องกับกลุ่ม 5 กระป๋อง ซึ่งจะดำเนินการที่ 30 กระป๋องแรกก่อน โดยนำตัวอย่างปลาซาร์ดีนกระป๋องในซอสมะเขือเทศ 1 กระป๋องใส่ บีกเกอร์พลาสติกขนาด 250 ml แล้วปั่นให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง Homogenizer (T 25 digital ULTRA-TURRAX®, IKA, Germany) ด้วยความเร็วรอบ 10000 rpm เป็นเวลาประมาณ 3-4 นาที หลังจากนั้นเทเนื้อปลาที่ปั่นละเอียดแล้วลงงานแก้วเพื่อนำมาสแกนด้วย near infrared spectroscopy ส่วน 5 กระป๋องที่เหลือนั้นมีไว้สำหรับปรับปริมาณเกลือ โดยนำบีกเกอร์พลาสติกขนาด 250 ml ใส่โซเดียมคลอไรด์ลงไปและชั่งน้ำหนักที่แตกต่างกันคือ 2, 4, 6 ,8 และ 10 กรัม ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงเทตัวอย่างปลาซาร์ดีนกระป๋องในซอสมะเขือเทศตามลงไปและทำการปั่นให้ละเอียด เหมือนดังที่กล่าวข้างต้น

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่อง Homoginizer (T 25 digital ULTRA-TURRAX®, IKA, Germany) (รูปที่ 3.1)



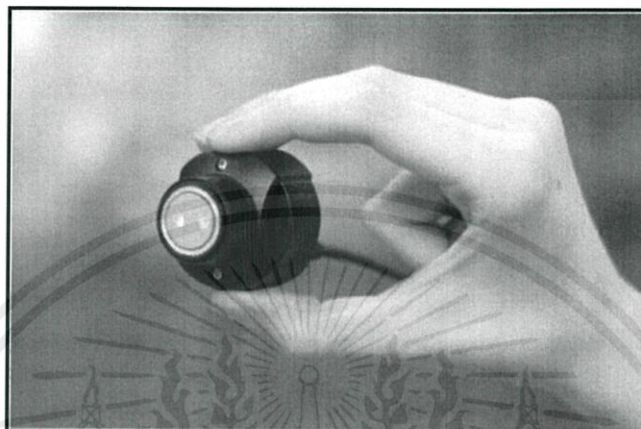
รูปที่ 3.1 เครื่อง Homoginizer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

3.2.2.1 เครื่อง Micro near infrared spectrometer (JDSU, USA)

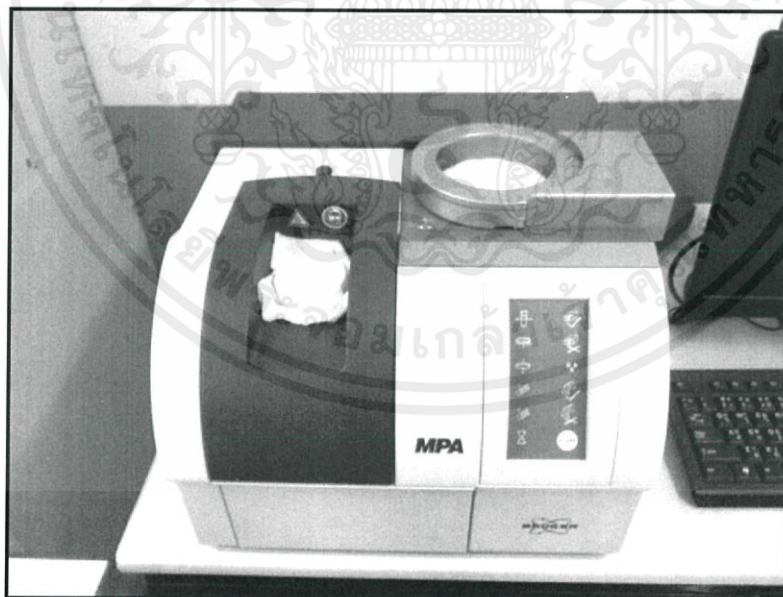
ช่วงความยาวคลื่นยาว 1150-2500 นาโนเมตร (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 เครื่อง Micro near infrared spectrometer

3.2.2.2 FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany)

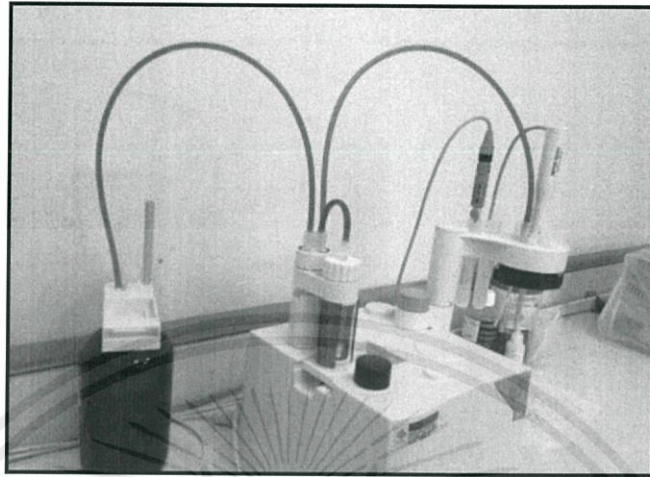
ในช่วง $12,500-4,000 \text{ cm}^{-1}$ (800-2500 นาโนเมตร) (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 เครื่อง FT-NIR spectrometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 เครื่อง Auto titrator (T50, Metler Toledo, USA) (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 เครื่อง Auto titrator

3.2.4 เครื่องชั่งไฟฟ้า (ARC140 Adventure, OHAUS ความละเอียด 0.0001 g) (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 อุปกรณ์อื่นๆ

3.2.3.1 งานแก้วกลมขนาดเส้นผ่านกลาง 100 มิลลิเมตร สูง 20 มิลลิเมตร

3.2.3.2 ปีกเกอร์พลาสติก ขนาด 250 มิลลิตร

3.2.3.3 ทิชชู

3.2.3.4 น้ำกลั่น

3.2.3.5 ขวดบีบน้ำกลั่น

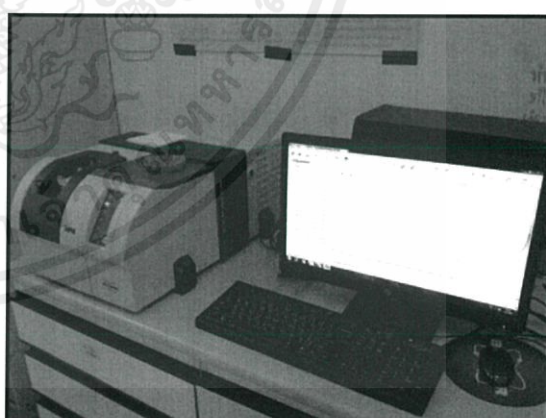
3.2.3.6 ถุงดำ

3.3 การสแกนคลื่นเนียร์อินฟราเรด

นำตัวอย่างปลาซาร์ดีนกระป๋องในซอสมะเขือเทศที่ปั่นละเอียดแล้วมาสแกนด้วยเครื่อง Micro near infrared spectrometer (JDSU, USA) ช่วงความยาวคลื่นยาว 1150-2500 นาโนเมตร (รูปที่ 3.1) หลังจากนั้นนำมาสแกนต่อด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ในช่วง $12,500-4,000 \text{ cm}^{-1}$ (800-2500 นาโนเมตร) (รูปที่ 3.2) การสแกนทั้ง 2 เครื่องนี้ใช้หลักการเดียวกันคือการวัดแบบสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse reflectance) และสแกน 2 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่าง ซึ่งการทดลองทั้งหมดดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง ($25 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$)



รูปที่ 3.6 การสแกนด้วยเครื่อง Micro-NIR



รูปที่ 3.7 การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวัดปริมาณเกลือด้วยวิธีดั้งเดิม

นำเนื้อปลาป่นละเอียดที่ผ่านการสแกนแล้วไปชั่งน้ำหนัก 0.5-1 กรัม ใส่ลงในกระบอกพลาสติก 3 กระบอก จากนั้นนำไปวัดปริมาณเกลือด้วยวิธีดั้งเดิมโดยใช้เครื่อง Auto titrator (T50, Metler Toledo, USA) การปรับเทียบมาตรฐานเครื่องโดยใช้โซเดียมคลอไรด์

3.5 การสร้างแบบจำลอง

นำข้อมูลทั้งหมดมาสร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือของปลาชาร์ทินใน ซอสมะเขือเทศกระป๋องกับข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) และเครื่อง MICRO NIR spectrometer (JDSU, USA) โดยวิธีทาง Chemometric แบบ Partial least square regression โดยแบ่งข้อมูลเป็นสองชุดคือชุด calibration และชุด prediction โดยมีอัตราส่วนข้อมูล 1:1 วิเคราะห์โดยโปรแกรม OPUS 7.0 (Bruker, Germany) โดยไม่มีหรือมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นโดยวิธี constant offset elimination, Straight line subtraction, vector normalization (SNV), min-max normalization, multiplicative scattering correction (MSC), First derivative, second derivative, First derivative+Straight line subtraction, First derivative+SNV และ First derivative+MSC หรือใช้สเปกตรัมดั้งเดิมทั้งนี้ ในการสร้างแบบจำลองได้ใช้ข้อมูลสองชุดคือข้อมูลจากตัวอย่างที่มีการปรับปริมาณเกลือรวมกับตัวอย่างที่ไม่ได้ปรับปริมาณเกลือและข้อมูลจากตัวอย่างที่ไม่ได้ปรับปริมาณเกลือเท่านั้น การคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2) ที่สูงที่สุด หรือค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย (Root Mean Square Error of Prediction, RMSEP) และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Bias) ต่ำที่สุด

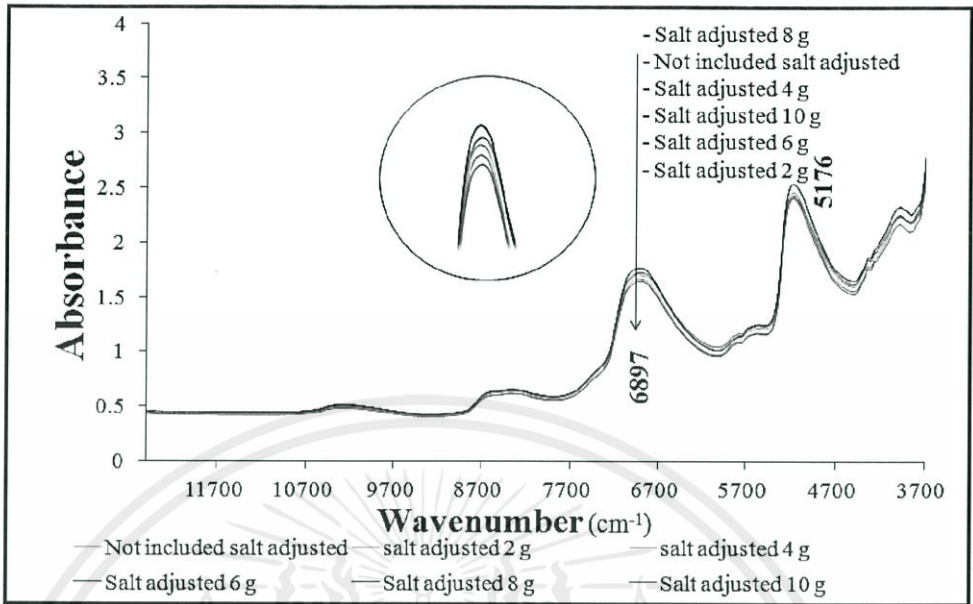
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

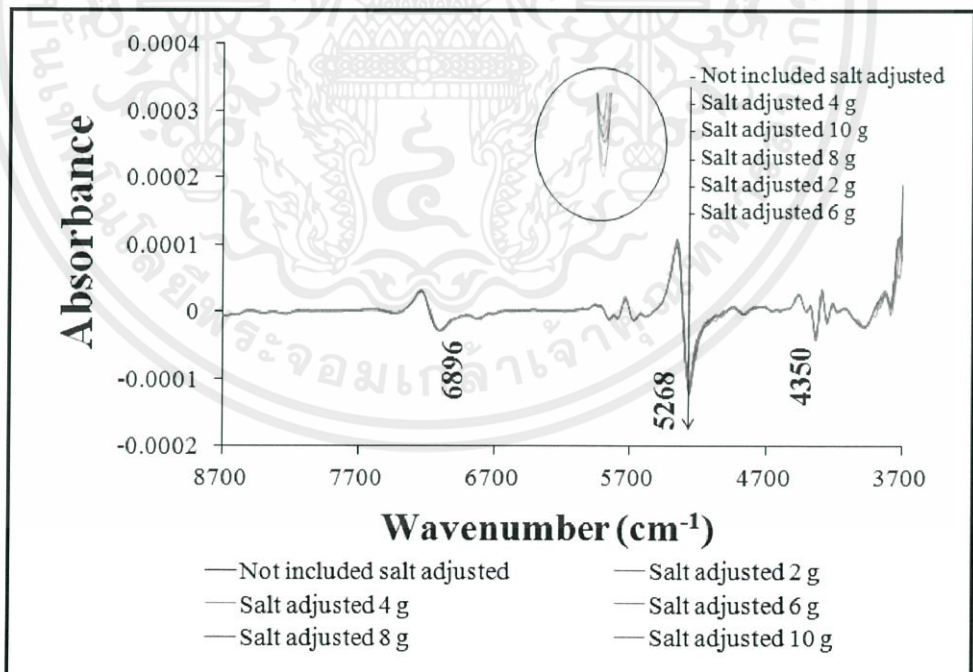
ผลการทดลอง

จากการตรวจวัดสเปกตรัมของเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมดิบของเนื้อปลาชาร์ดินในซอสมะเขือเทศพบว่ามี Peak เกิดขึ้นที่เลขคลื่น 5178 และ 6897 cm^{-1} (1932 และ 1449 นาโนเมตร) เมื่อนำสเปกตรัมดิบมาทำ second derivative (รูปที่ 4.2) จะพบ Peak เกิดขึ้นที่เลขคลื่น 4350, 5268 และ 6896 cm^{-1} (2298, 1898 และ 1450) และจากการตรวจวัดสเปกตรัมของเครื่อง Micro near infrared spectrometer (JDSU, USA) ในรูปที่ 4.3 พบว่ามี Peak ที่เลขคลื่น 5168 และ 6896 cm^{-1} (1935 และ 1450 นาโนเมตร) เมื่อนำสเปกตรัมดิบมาทำ second derivative (รูปที่ 4.4) พบ Peak ที่เลขคลื่น 6985 cm^{-1} (1431 นาโนเมตร) เนื่องจากปลาชาร์ดินในซอสมะเขือเทศมีปริมาณน้ำมากจึงปรากฏ Peak ส่วนใหญ่เป็น Peak ของน้ำที่ความยาวคลื่น 1431, 1449, 1450, 1932, 1935 นาโนเมตรโดยเป็น Peak ที่ขยับจาก 1450 และ 1940 นาโนเมตร [25] ซึ่งเป็นการดูดซับของ O-H str. First overtone และ O-H str. + O-H def. Peak ที่ความยาวคลื่น 2298 นาโนเมตรโดย Peak ขยับจาก 2294 นาโนเมตรซึ่งเป็นการดูดซับของ N-H str. + C=O str. และ Peak ที่ความยาวคลื่น 1898 นาโนเมตรซึ่งขยับจากที่ความยาวคลื่น 1900 นาโนเมตรเป็นการดูดซับของ C=O str. Second overtone

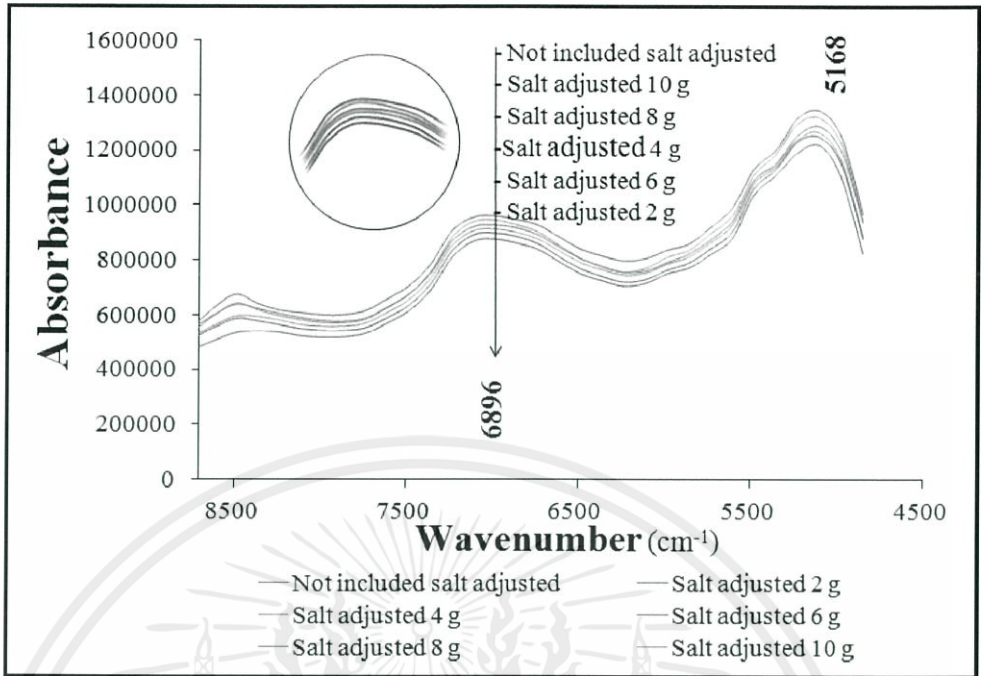
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



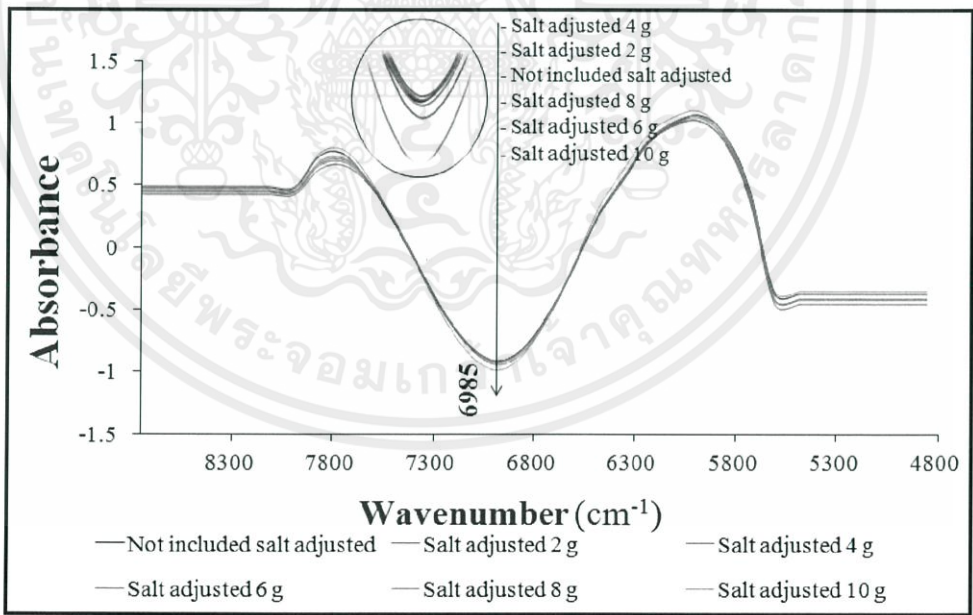
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมของปลาซาร์ดินที่กระป๋องในซอสมะเขือเทศชนิดที่ไม่รวมตัวอย่าง ที่ปรับ ปริมาณเกลือและรวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือของเครื่อง FT-NIR Spectrometer



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.2 การทำ second derivative สเปกตรัมของปลาซาร์ดินที่กระป๋องในซอสมะเขือเทศชนิดที่ไม่รวมตัวอย่าง ที่ปรับ ปริมาณเกลือและรวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือของเครื่อง FT-NIR Spectrometer



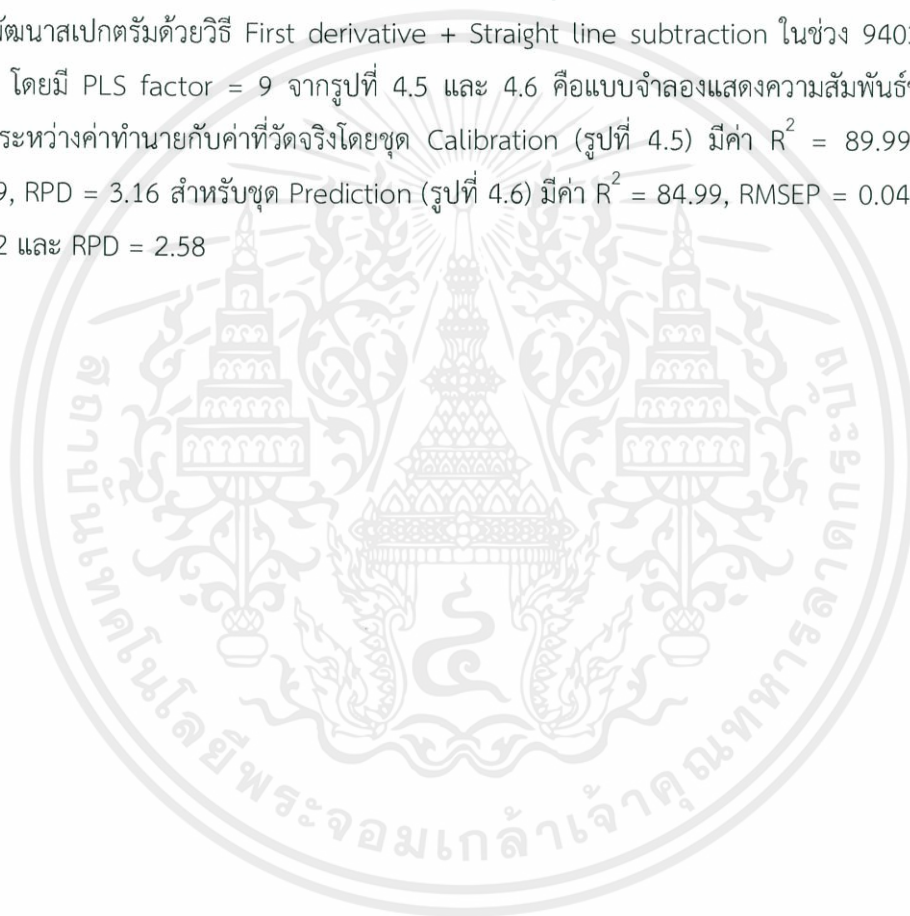
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของปลาซาร์ดินกระป๋องในซอสมะเขือเทศบดที่ไม่รวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือและรวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือของเครื่อง Micro NIR Spectrometer



รูปที่ 4.4 การทำ second derivative สเปกตรัมของปลาซาร์ดินกระป๋องในซอสมะเขือเทศ

บดที่ไม่รวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือและรวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือของเครื่อง Micro การทำ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 NIR Spectrometer

ข้อมูลทางสถิติของค่าปริมาณเกลือในปลาซาร์ดีนในซอสมะเขือเทศกระป๋องจากเครื่อง FT-NIR spectrometer และเครื่อง Micro near infrared spectrometer (ตารางที่ 4.1) โดยแบ่งข้อมูลเป็น 2 ชุดคือชุด Calibration และชุด Prediction ซึ่งอยู่ในช่วง 0.699–7.451 ppm ตารางที่ 4.2 ผลของการทำ PLS regression สำหรับวิเคราะห์ปริมาณเกลือในปลาซาร์ดีนในซอสมะเขือเทศในกระป๋องด้วยเครื่อง Micro near infrared spectrometer และ FT-NIR spectrometer ของข้อมูลชุดที่รวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือ และข้อมูลชุดที่ไม่รวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือ พบว่าแบบจำลองในการวัดปริมาณเกลือที่ดีที่สุดได้จากเครื่อง FT-NIR spectrometer ในตัวอย่างที่ไม่รวมตัวอย่างที่ปรับปริมาณเกลือ คือมีค่า Bias, RMSEE ต่ำ แม้ว่า R^2 จะไม่สูงกว่าแบบอื่นก็ตาม โดยแบบจำลองได้มาจากการพัฒนาสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative + Straight line subtraction ในช่วง 9403.8-4242.9 ซม.¹ โดยมี PLS factor = 9 จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 คือแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณเกลือระหว่างค่าทำนายกับค่าที่วัดจริงโดยชุด Calibration (รูปที่ 4.5) มีค่า $R^2 = 89.99$, RMSEE = 0.039, RPD = 3.16 สำหรับชุด Prediction (รูปที่ 4.6) มีค่า $R^2 = 84.99$, RMSEP = 0.046, Bias = -0.002 และ RPD = 2.58



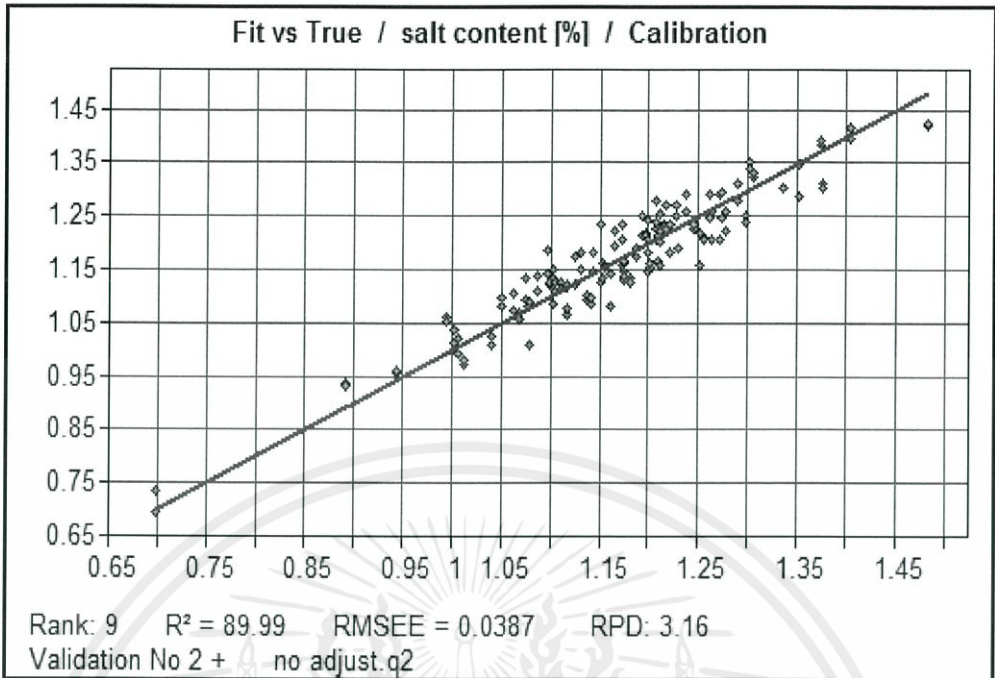
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางสถิติของค่าปริมาณเกลือในปลาชาร์ดินในซอสมะเขือเทศกระป๋อง

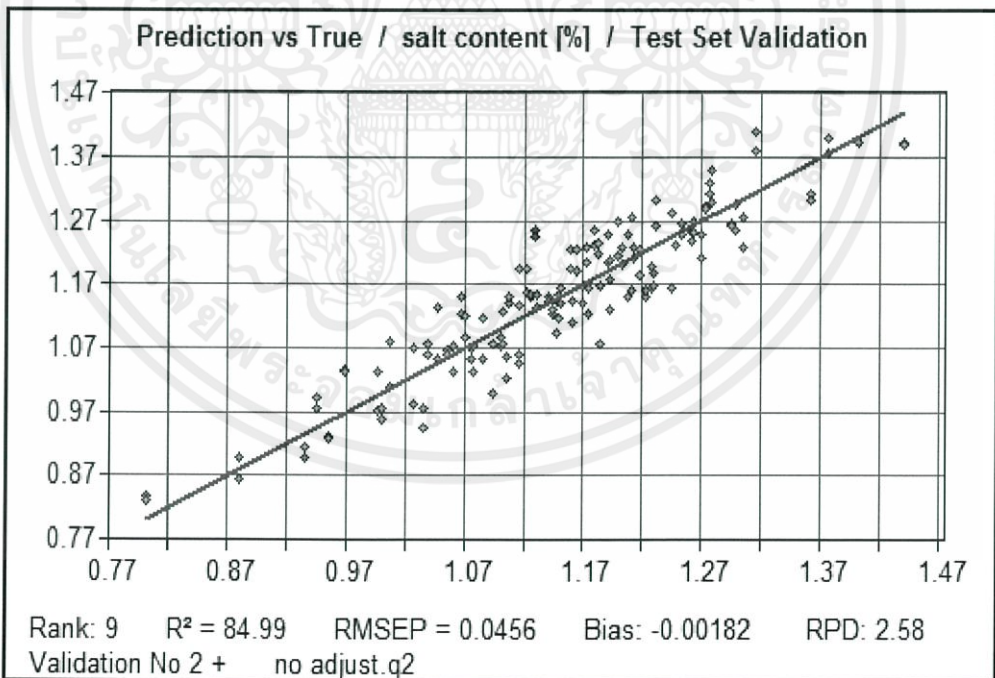
Spectrometer	Sample	Calibration set					Prediction set				
		N	Mean	Max	Min	SD	N	Mean	Max	Min	SD
Micro NIR	Adjust	83	1.540	7.451	0.699	1.276	83	1.463	7.410	0.802	1.132
	No adjust	76	1.170	1.482	0.699	0.119	75	1.154	1.440	0.802	0.118
FT-NIR	Adjust	83	1.540	7.451	0.699	1.276	83	1.463	7.410	0.802	1.132
	No adjust	76	1.170	1.482	0.699	0.119	75	1.154	1.440	0.802	0.118

ตารางที่ 4.2 ผลของการทำ PLS regression สำหรับวิเคราะห์ปริมาณเกลือในปลาซาร์ดีนในซอสมะเขือเทศในกระป๋องด้วยเครื่อง Micro near infrared spectrometer และ FT-NIR spectrometer

Tools	sample group	pretreatment	rank	Region (cm ⁻¹)	Calibration				Prediction				
					n	R ²	RMSEE	RPD	n	R ²	RMSEP	Bias	RPD
Micro NIR	Included salt adjusted	No spectral data preprocessing	10	8740.1-4854.3	166	69.72	0.724	1.82	166	44.53	0.841	-0.003	1.34
	Not included salt adjusted	Straight line subtraction	7	7612-4854.3	152	44.31	0.091	1.34	150	34.07	0.096	-0.008	1.24
FT-NIR	Included salt adjusted	First derivative + Straight line subtraction	7	9403.8-5446.3	166	99.24	0.114	11.5	166	99.08	0.109	-0.002	10.4
	Not included salt adjusted	First derivative + Straight line subtraction	9	9403.8-4242.9	152	89.99	0.039	3.16	150	84.99	0.046	-0.002	2.58



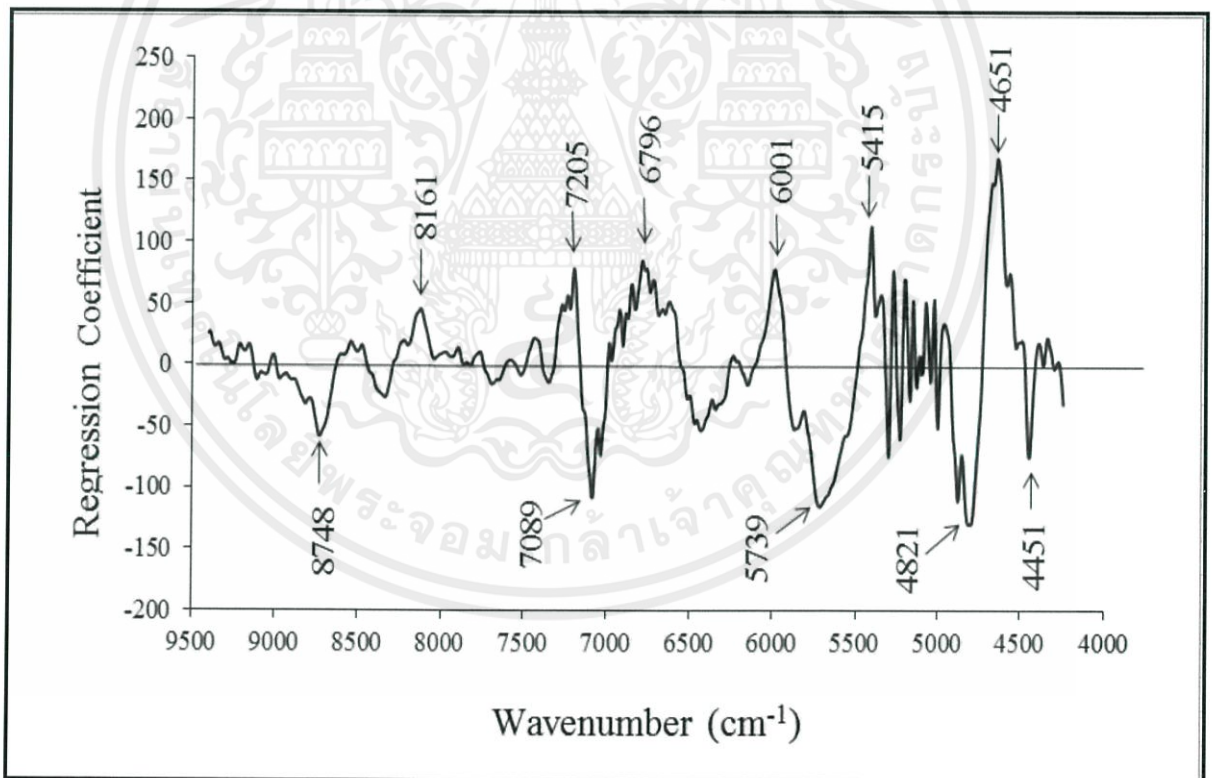
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของปริมาณเกลือระหว่างค่าที่ทำนายกับค่าวัดจริงของเครื่อง FT-NIR spectrometer ของข้อมูลชุด Calibration



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของปริมาณเกลือระหว่างค่าที่ทำนายกับค่าวัดจริงของเครื่อง FT-NIR เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ spectrometer ของข้อมูลชุด Prediction หากได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 แสดง Regression coefficient plot ของแบบจำลองค่าการตรวจวัดปริมาณเกลือในปลาซาร์ดีนกระป๋องในซอสมะเขือเทศวัดโดยการสแกนที่เนื้อปลาบดละเอียดของเครื่อง FT-NIR Spectrometer พบ Peak ที่เลขคลื่นต่างๆโดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.3 จากตารางที่ 4.3 แสดงเลขคลื่นและความยาวคลื่นที่มีผลต่อการทำนายปริมาณเกลือจาก Regression coefficient plot จะเห็นว่าการดูดซับคลื่นของ CONH_2 ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของพันธะ $2 \times \text{amide I} + \text{amide III}$ มีอิทธิพลต่อการทำนายปริมาณเกลือในเนื้อปลากระป๋องในซอสมะเขือเทศมากที่สุด เนื่องจากมีค่า Regression coefficient สูงที่สุด (รูปที่ 4.7)

สำหรับ X-loading weight plot (รูปที่ 4.8) ถ้าเลขคลื่นที่มีค่า X-loading weight มากแสดงว่ามีความสำคัญต่อการทำนายของสมการซึ่งทั้ง 3 factor มี Peak ที่สำคัญที่เลขคลื่นต่างๆสรุปดังตารางที่ 4.4 จากตารางที่ 4.4 แสดงเลขคลื่นและความยาวคลื่นที่มีผลต่อการทำนายปริมาณเกลือจาก X-loading plot จะเห็นว่าการดูดซับคลื่นของ CH_2 , CH_3 และ starch มีอิทธิพลต่อการทำนายปริมาณเกลือในเนื้อปลาซาร์ดีนกระป๋องในซอสมะเขือเทศมากที่สุด



รูปที่ 4.7 Regression coefficient plot ของแบบจำลองค่าการตรวจวัดปริมาณเกลือในปลาซาร์ดีนกระป๋องในซอสมะเขือเทศวัดโดยการสแกนที่เนื้อปลาบดละเอียดของเครื่อง FT-NIR

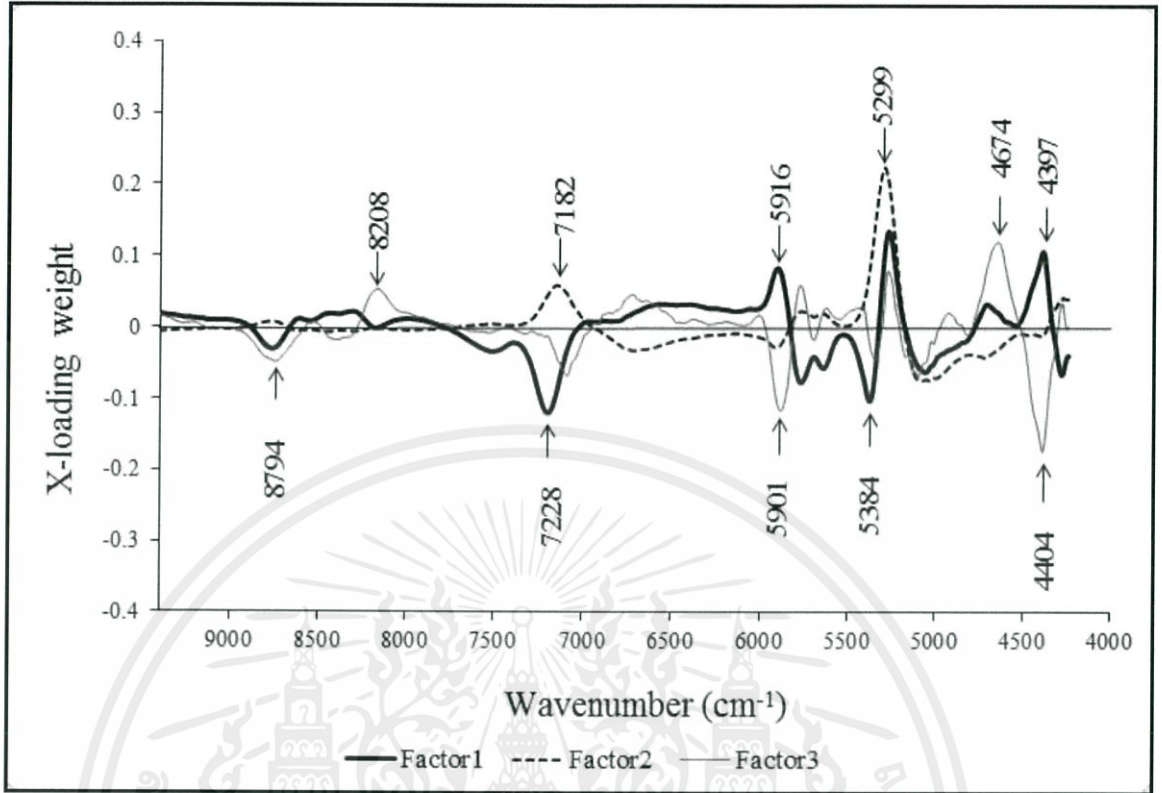
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ในสื่อโซเชียลมีเดียหรือเว็บไซต์ใดๆ
Spectrometer

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 เลขคลื่นและความยาวคลื่นที่มีผลต่อการทำนายปริมาณเกลือจาก Regression coefficient plot (Osborne et al., 1993) [25]

Wavenumber (cm ⁻¹)	Wavelength (nm)	Bond vibration	Structure
8748	1143	2 x C-H str. First overtone	aromatic
7089	1411	O-H str. First overtone	ROH
5739	1742	S-H str. First overtone	-SH
4821	2074	O-H str. + O-H def	ROH,SUCROSE,STARCH
4451	2247	N-H str. + NH ₃ ⁺ def	amino acid
8161	1225	C-H str. Second overtone	CH
7205	1388	-	-
6796	1471	N-H str. First overtone	CONHR
6001	1666	C-H str. First overtone	cis-RCH=CHR
5415	1847	-	-
4651	2150	2 x amide I +amide III	CONH ₂

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 X-loading weight plot ของแบบจำลองการตรวจวัดปริมาณเกลือในปลาซาร์ดีนกระป๋อง
ในหอสมะเชื้อเตศวัดโดยการสแกนที่เนื้อปลาบดละเอียดของเครื่อง FT-NIR Spectrometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 เลขคลื่นและความยาวคลื่นที่มีผลต่อการทำนายปริมาณเกลือจาก X-loading plot (Osborne et al., 1993) [25]

Wavenumber (cm ⁻¹)	Wavelength (nm)	Bond vibration	Structure
8794	1137	-	-
7228	1384	-	-
5901	1695	C-H str. First overtone	CH ₃
5384	1857	-	-
4404	2271	O-H str. + O-H def	Starch
8208	1218	C-H str. Second overtone	CH ₂
7182	1392	2 x C-H str. + C-H def	CH ₂
5916	1696	C-H str. First overtone	CH ₃
5299	1887	-	-
4674	2139	=C-H str. + C=C str.	HC=CH
4397	2274	O-H str. + C-C str.	Starch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ผลจากการทดลองสรุปได้ว่าเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ให้แบบจำลองในการทำนายปริมาณเกลือของปลาชาร์คินในซอสมะเขือเทศกระป๋องที่ไม่ปรับปริมาณเกลือดีกว่าเครื่อง MICRO NIR spectrometer (JDSU, USA) โดยสร้างจากสเปกตรัมที่ผ่านการ First derivative + Straight line subtraction ในช่วง 9403.8-4242.9 ซม.⁻¹ โดยมี PLS factor = 9 มีค่า R², RMSEP, RPD และ Bias สำหรับการทำนายปริมาณเกลือของปลาชาร์คินกระป๋องในซอสมะเขือเทศได้ คือ 84.99 %, 0.046, 2.58 และ -0.002 ตามลำดับ จากผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการตรวจวัดปริมาณเกลือในขั้นตอนการผลิตของโรงงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] อุตสาหกรรมปลากระป๋อง . กรมโรงงานอุตสาหกรรม, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.diw.go.th/hawk/default.php>, เข้าดูเมื่อวันที่ 05/07 2555
- [2] กลุ่มวิเคราะห์การค้าสินค้าประมงระหว่างประเทศ (2555) กองประมงต่างประเทศ กรมประมง ประมวลข้อมูลจากกรมศุลกากร <http://www.fisheries.go.th/foreign/images/pdf/v06254.pdf>, เข้าดูเมื่อวันที่ 05/07 2555
- [3] AOAC (2006) AOAC official in canned Vegetables Method III (Potentiometric Method). Official methods of analysis of AOAC International.
- [4] เมธี ดีพร้อมมิตร และคณะ(2554) “การใช้เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีช่วงคลื่นสั้นในการตรวจสอบหาปริมาณเนื้อเยื่อแห้งและปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยาอาหาร”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [5] Prevolnik M., Škrlep M., Janeš L., Velikonja-Bolta Š., Škorjanc D., Čandek-Potokar M. (2011) Accuracy of near infrared spectroscopy for prediction of chemical composition, salt content and free amino acids in dry-cured ham. Meat Science, 88(2), 299-304.
- [6] Pi F., Shinzawa H., Ozaki Y., Han D. (2009) Non-destructive determination of components in processed cheese slice wrapped with a polyethylene film using near-infrared spectroscopy and chemometrics. International Dairy Journal, 19(10), 624-629.
- [7] สุธีพร ณรงค์วงศ์ และคณะ (2011) “การวิเคราะห์หาปริมาณเกลือในปลาทูน่าด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี”, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.phtnet.org/research/view-abstract.asp?research_id=mi338, เข้าดูเมื่อวันที่ 07/07/2556.
- [8] Wikipedia (2014), [online], URL : <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B8%A5%E0%B8%B7%E0%B8%A>, เข้าถึงเมื่อวันที่ 05/03/2014
- [9] คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, URL : <http://www.agri.kmitl.ac.th/km/blog/?p=1182> เข้าถึงเมื่อวันที่ 05/03/2014
- [10] นัฐกรณ์ สอนสงวน, 2556, “การประเมินสมบัติเชิงการยึดติดของข้าวในโรงงานปรับปรุงคุณภาพข้าว โดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี”, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] ปานมนัส ศิริสมบุรณ์.,(2012).เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลผลิตเกษตรและอาหาร (ตอนที่ 1) [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.nirsresearch.com> เข้าถึงเมื่อวันที่ 16/02/2556.
- [12] นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์. 2545. “หลักการพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้สเปกโทรสโกปี (Principles of Near Infrared Spectroscopy)”. การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. หน้า 39-66.
- [13] วิชัย รวีตระกูล และคณะ. 2527. “การประยุกต์สเปกโทรสโกปีในเคมีอินทรีย์”. กรุงเทพฯ. หน้า 298.
- [14] กรนรรณ แก่นภริมย์, กิ่งดาว ชนะโชติ, ภคินี แสนพินิจ, 2555, “ความเป็นไปได้ในการวิเคราะห์อิสตามีนของปลาซาร์ดินด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี”, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [15] Brukercompany., (2013). Opus Spectroscopic Software, paper presented in Introduction to quantitative NIR analysis using chemometrics.
- [16] ศูนย์วิจัยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี , (2013), เครื่อง MPA FT-NIR Spectrometer, [online], URL: http://www.nirsresearch.com/NP-15970-mpa_ft_nir_spectrometer.html, access on 09/04/2013.
- [17] JDSU, (2013),MicroNIR Spectrometer, [online], URL: <http://www.jdsu.com/en-us/Custom-Optics/Products/a-z-product-list/Pages/miniature-near-infrared-Spectrometer.aspx>, access on 09/04/2013.
- [18] ปานมนัส ศิริสมบุรณ์, รวิภัทร ลากเจริญสุข, กรรณพต แก้วสอน, พลนันท อ่อนไสว, บัณฑิต ทองสร้อย, นัฐกรณ์ สอนสงวน, สมชาย กลัดสุข, ศิวดล รัตนโอภา, อภิชาติ สมผิว และกิ่งดาว ชนะโชติ .2556. “การคาลิเบรชันแบบตัวแปรพหุ เนาะแนวเชิงปฏิบัติสำหรับการ พัฒนาแบบจำลองในเคมีวิเคราะห์”. <http://www.nirsresearch.com>.
- [19] Kasemsamran, S. 2005. “Nondestructive Quantitative Analysis of biomedical Samples by Near Infrared Spectroscopy with Chemometrics and Development of novel Chemometric Methods for quantitative Analysis” Ph. D. Thesis, Kwansai Gakuin University, Japan.
- [20] Williams, P. Near-infrared Technology-Getting the best out of light. Edition 5.0. Nanaimo, Canada : A short course in the practical implementation of near-infrared spectroscopy for the user, PDK Grain. 2007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[21] Jörg-Peter Conzen 2006. “Multivariate Calibration. A practical guide for developing methods in the quantitative analytical chemistry” Bruker Optik GmbH. 116 p.

[22] วารุณี ณะแพศย์. 2550. “สถานการณ์และการใช้ประโยชน์ด้วยเทคนิค NIR ในประเทศไทย: แนวโน้มงานวิจัยในด้านเทคนิค NIR ในความต้องการของอุตสาหกรรมและมาตรฐานคุณภาพของสินค้า” โครงการสัมมนาวิชาการ การควบคุมมาตรฐานคุณภาพของสินค้าทางการเกษตร และ อุตสาหกรรมโดยวิธีไม่ทำลาย เพื่อการแข่งขันบนเวทีการค้าโลก, หน้า 21-31.

[23] วสันต์ อินทร์ตา และคณะ(2012) “ศึกษาปริมาณเกลือระหว่างกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากปลาหูฉลามในระดับอุตสาหกรรม”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[24] JIE LIN and CHRIS W. BROWN, Near-IR Spectroscopic Determination of NaCl in Aqueous Solution, Department of Chemistry, University of Rhode Island, Kingston, Rhode Island 02881

[25] Osborne, B.G. and Fearn T. (1986), Near infrared spectroscopy in food, 1st Edition, the Bath Press, Great Britain, GB, 200 pages

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาปริมาณเกลือในปลาซาร์ดีนกระป๋องในซอสมะเขือเทศ

(วัดโดยวิธีโรงงาน)

ครั้งที่ 1

ตัวอย่างที่	ปริมาณเกลือ (%)
1	1.115
2	1.262
3	1.252
4	1.264
5	1.151
6	1.176
7	1.255
8	1.101
9	1.208
10	1.180
11	1.040
12	1.160
13	1.007
14	1.208
15	1.302
16	1.079
17	1.222
18	1.051
19	1.099
20	1.086
21	1.077
22	1.193
23	1.230
24	1.173
25	1.212
26	1.212
27	1.124
28	1.039
29	1.306
30	1.245

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาไปใช้

ตัวอย่างที่	ปริมาณเกลือ (%)
31	1.103
32	1.218
33	1.150

ครั้งที่ 2

ตัวอย่างที่	ปริมาณเกลือ (%)
1	1.230
2	1.122
3	1.161
4	1.070
5	1.298
6	1.276
7	1.096
8	1.160
9	1.172
10	1.137
11	1.305
12	1.209
13	1.182
14	1.102
15	1.185
16	1.173
17	1.211
18	1.076
19	1.094
20	0.946
21	1.211
22	1.183
23	1.227
24	1.105
25	1.212
26	1.130
27	1.067
28	1.231

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรอ้างอิงเพื่อการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม

ตัวอย่างที่	ปริมาณเกลือ (%)
29	1.087
30	1.068
31	1.217
32	1.075

ครั้งที่ 3

ตัวอย่างที่	ปริมาณเกลือ (%)
1	1.252
2	1.482
3	1.273
4	1.248
5	1.261
6	1.143
7	1.295
8	1.116
9	1.269
10	1.222
11	1.228
12	1.169
13	1.297
14	1.377
15	1.377
16	1.440
17	1.405
18	1.401
19	1.374
20	1.314
21	1.335
22	1.035
23	1.198
24	1.238
25	1.362
26	1.262
27	1.202

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรอ้างอิงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ จะถึงมือผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องแจ้งคืนเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

ตัวอย่างที่	ปริมาณเกลือ (%)
28	1.111
29	1.155
30	1.352
31	2.557
32	4.081
33	4.919
34	6.313
35	7.410

ครั้งที่ 4

ตัวอย่างที่	ปริมาณเกลือ (%)
1	1.187
2	0.955
3	1.117
4	1.007
5	1.077
6	1.141
7	-
8	0.699
9	1.141
10	1.003
11	0.892
12	0.802
13	1.108
14	1.062
15	1.152
16	1.056
17	-
18	0.880
19	0.943
20	1.147
21	1.086
22	1.027
23	1.216

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม

ตัวอย่างที่	ปริมาณเกลือ (%)
24	1.105
26	1.149
27	0.969
28	1.001
29	1.012
30	0.935
31	2.086
32	3.937
33	4.547
34	6.315
35	7.451

ครั้งที่ 5

ตัวอย่างที่	ปริมาณเกลือ (%)
1	1.174
2	1.060
3	1.130
4	1.103
5	0.993
6	1.165
7	1.193
8	1.199
9	1.116
10	1.191
11	1.200
12	1.201
13	1.192
14	1.131
15	1.278
16	1.164
17	1.047
18	1.277
19	1.175
20	1.174

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรอ้างอิง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่ และต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

ตัวอย่างที่	ปริมาณเกลือ (%)
21	1.126
22	1.289
23	1.145
24	1.244
25	1.272
26	1.200
27	1.274
29	1.207
30	0.997
31	2.311
32	3.902
33	4.835
34	5.924
35	7.169

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้