

การประเมินค่าคุณภาพน้ำมันทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

EVALUATION OF USED OILS QUALITY PARAMETERS BY NEAR INFRARED
SPECTROSCOPY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-270-140

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประเมินค่าคุณภาพน้ำมันทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

EVALUATION OF USED OILS QUALITY PARAMETERS BY NEAR INFRARED
SPECTROSCOPY



T148821



เลขหมู่ 148821
เลขทะเบียน 148821
ชั้นเดือนปี 23 11/ค 2560

b. 00266931
f.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

KMITL-2017-EN-M-270-140

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EVALUATION OF USED OILS QUALITY PARAMETERS BY NEAR INFRARED
SPECTROSCOPY



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

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KMITL-2017-EN-M-270-140
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017





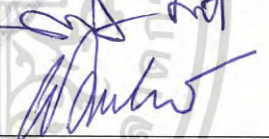
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษ เท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประเมินค่าคุณภาพน้ำมันทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
Thesis Title Evaluation of Used Oils Quality Parameters by Near Infrared Spectroscopy
นักศึกษา นายวสันต์ อินทร์ตา
รหัสประจำตัว 56601463
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-270-140

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อนุพันธ์	เทอดวงศ์วรกุล	
รศ.ดร.ปานมนัส	ศิริสมบุญ	
ผศ.ดร.มาฤดี	ผ่องพิพัฒน์พงศ์	
ผศ.ดร.กัณฑ์กนิษฐ์	ขวัญฤกษ์	
ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ	พรเฉลิมพงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วันที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2560
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินค่าคุณภาพน้ำมันทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
นักศึกษา	นายวสันต์ อินทร์ตา
รหัสประจำตัว	56601463
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันทอดซ้ำโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ได้แก่ ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมด (%TPM) ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA) และค่าเพอร์ออกไซด์ [PV (meq/kg)] ในน้ำมันทอดซ้ำ 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันรำข้าว น้ำมันปาล์มโอเลอิน และน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธี การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำที่เก็บจากการทอดอาหารในห้องปฏิบัติการและตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำในการผลิตอาหารทอดระดับอุตสาหกรรม ตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำที่เก็บจากการทอดในห้องปฏิบัติการได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการวัดค่าทางเคมี รวมถึงศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างแบบจำลอง และตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำในการผลิตอาหารทอดระดับอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มจำนวนตัวอย่างให้มากขึ้นและครอบคลุมน้ำมันที่ใช้ในการทอดในระดับอุตสาหกรรม

การทดลองจากการทอดในห้องปฏิบัติการใช้ตัวอย่างน้ำมัน 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธี ชนิดละ 50 ตัวอย่าง ส่วนตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำในการผลิตอาหารทอดระดับอุตสาหกรรมใช้ตัวอย่างน้ำมัน 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันรำข้าว น้ำมันปาล์มโอเลอิน และน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธี รวม 150 ตัวอย่าง สแกนตัวอย่างด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ช่วง wavenumber ระหว่าง $12500-3600\text{ cm}^{-1}$ (800-2778 nm) การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันทอดซ้ำตามวิธีมาตรฐานสำหรับปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดวัดด้วยอุปกรณ์ cooking oil tester ปริมาณกรดไขมันอิสระหาโดยการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการหาค่าเพอร์ออกไซด์โดยการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต การสร้างแบบจำลองโดยใช้วิธี partial least squares (PLS) regression และวิธีการพิสูจน์แบบไขว้ ผลการทดลองตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำที่เก็บจากการทอดในห้องปฏิบัติการให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ระหว่างค่าการทำนายด้วย NIR และค่าที่วัดด้วยวิธีมาตรฐานสูงที่สุด และค่ารากที่สองของการพิสูจน์แบบไขว้ (RMSECV) ต่ำที่สุด ในตัวอย่างน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ ปริมาณ %TPM = 0.972, 0.501 ปริมาณ %FFA = 0.927, 0.015 และค่า PV (meq/kg) = 0.983, 0.034 และในตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ ปริมาณ %TPM = 0.95, 0.854 ปริมาณ %FFA = 0.96, 0.043 และค่า PV (meq/kg) = 0.98, 0.037 และผลการทดลองตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำที่เก็บจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมการสร้างแบบจำลองโดยใช้วิธี PLS regression และวิธีการพิสูจน์แบบ test set validation ให้ค่า R^2 ระหว่างค่าการทำนายด้วย NIR และค่าที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการสูงที่สุด และค่า RMSEE ต่ำที่สุด ปริมาณ %TPM = 0.98, 0.711 ปริมาณ %FFA = 0.98, 0.015 และค่า PV (meq/kg) = 0.87, 1.180

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับครูในทางเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่สามารถนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ ได้
ไม่วารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนค่า PV สมรรถนะการทำนายสามารถใช้การประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย แต่ต้องใช้ด้วยความระมัดระวัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Evaluation of Used Oils Quality Parameters by Near Infrared Spectroscopy
Student	Mr. Wasan Inta
Student ID.	56601463
Degree	Master of Engineering
Program	Food Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Pimpen Pornchaloempong

ABSTRACT

The aim of this research was to apply near infrared for evaluation of the used oil (rice bran oil, palm olein oil and refined coconut oil). The qualities of used oil included total polar compound (TPM), free fatty acid (FFA) and peroxide value (PV). The used oil obtained from 2 frying sources; a laboratory frying and a commercial scale frying.

The samples were scanned with Fourier transform near infrared (FT-NIR) spectroscopy using wavenumber range 12500-3600 cm^{-1} (800-2778 nm). By standard analysis, TPM, FFA and PV were measured by Cooking oil tester, titration with standard NaOH and titration with standard $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, respectively. The calibration models were developed by partial least squares (PLS) regression and validated by full cross validation. For the quality evaluation of used rice bran oil, the coefficient of determination (R^2) and root mean squared error of cross validation (RMSECV) of optimum model were found to be 0.97, 0.015 for %TPM, 0.93, 0.015 for %FFA and 0.98, 0.034 for P.V. (meq/kg) Similarly, R^2 and RMSECV of optimum model for used refined coconut oil wave found to be 0.95, 0.854 for %TPM, 0.96, 0.043 for %FFA and 0.98, 0.037 for P.V. (meq/kg)

A commercial fried foods experiment, the calibration models were developed by partial least square (PLS) regression and validated by test set validation. The coefficient of determination (R^2) and root mean squared error of test set validation (RMSEE) of optimum model were found to be 0.98, 0.711 for %TPM, 0.98, 0.015 for %FFA and 0.87, 1.180 for P.V. (meq/kg)

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส ศิริสมบุญ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเกษตร ให้คำชี้แนะแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้เรื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.นิธิยา รัตนাপนนท์ อาจารย์สาขาวิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้กรุณาตรวจเล่มวิทยานิพนธ์และให้คำชี้แนะและให้ความรู้เรื่องวิทยาศาสตร์การอาหารของไขมันและน้ำมัน

ขอขอบพระคุณ คุณวราภรณ์ มาไพศาลทรัพย์ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร ที่คอยให้ความช่วยเหลือแนะนำการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง ประจำห้องปฏิบัติการส่วนวิจัยด้านวิศวกรรมอาหารและกระบวนการทางชีวภาพ บัณฑิตศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมอาหารและหลักสูตรวิศวกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วสันต์ อินทร์ตา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	V
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการทำวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร.....	4
2.1 ไขมันและน้ำมัน (Fats and Oils).....	4
2.2 การทอด (Frying).....	7
2.3 การเปลี่ยนแปลงน้ำมันระหว่างการทอด.....	8
2.4 ดัชนีควบคุมคุณภาพของน้ำมันบริโภค.....	11
2.5 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและการใช้ประโยชน์.....	13
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 การทดลอง.....	26
3.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ.....	26
3.2 การตรวจวัดวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ.....	27
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างแบบจำลอง.....	31
บทที่ 4 การทดลองและการอภิปราย.....	35
4.1 ผลการทดลองของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำในห้องปฏิบัติการ.....	35
4.2 สมรรถนะของแบบจำลอง.....	40
4.3 ผลการทดลองของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำในระดับอุตสาหกรรม.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปและเสนอแนะ.....	62
5.1 สรุปผลการทดลองของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำในห้องปฏิบัติการ.....	62
5.2 สรุปผลการทดลองของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารใน การผลิตระดับอุตสาหกรรม.....	62
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก แผนการดำเนินงานวิจัย.....	69
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	81



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อกำหนดของน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการทอดในแต่ละประเทศ	12
2.2 การจัดการทางคณิตศาสตร์ต่อสเปกตรัมและการเลือกใช้งาน.....	17
2.3 การแปรความหมายของค่า R และ R ²	21
2.4 การอธิบายผลของค่า PRD และ RER.....	22
4.1 ค่าทางสถิติของการวัดทางเคมีของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ.....	36
4.2 ผลการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วย NIR โดยวิธีทางสถิติแบบ partial least squares regression ทดสอบประสิทธิภาพของสมการแบบ Full cross validation.....	40
4.3 ผลการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วย NIR โดยวิธีทางสถิติแบบ partial least squares regression ทดสอบประสิทธิภาพของสมการแบบ Full cross validation.....	44
4.4 ผลการทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ของน้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วย NIR ด้วยวิธีทางสถิติแบบ partial least squares regression ทดสอบประสิทธิภาพของสมการแบบ Full cross validation.....	47
4.5 ค่าทางสถิติของการวัดทางเคมีของน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม.....	51
4.6 ผลการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIR ด้วยวิธีทางสถิติแบบ partial least squares regression ทดสอบประสิทธิภาพของสมการแบบ Test set validation.....	54
4.7 ผลการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIR ด้วยวิธีทางสถิติแบบ partial least squares regression ทดสอบประสิทธิภาพของสมการแบบ Test set validation.....	56
4.8 ผลการทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ของน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIR ด้วยวิธีทางสถิติแบบ partial least squares regression ทดสอบประสิทธิภาพของสมการแบบ Test set validation.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ปฏิกริยาระหว่างกลีเซอรอลกับกรดไขมันได้ไขมันและน้ำมัน.....	4
2.2 โครงสร้างกรดไขมันชนิดอิ่มตัว กรดแคพริก.....	5
2.3 โครงสร้างกรดไขมันไม่อิ่มตัวชนิดกรดโอเลอิก (Oleic acid).....	6
2.4 ปฏิกริยาทางกายภาพและเคมีในระหว่างการทอดแบบน้ำมันท่วม.....	9
2.5 การเกิดปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์.....	10
2.6 การสแกนตัวอย่างด้วย NIR Spectroscopy.....	13
2.7 การสแกนตัวอย่างด้วย FQA NIR GUN ด้วยวิธีส่องผ่านโดยใช้ Gold cup.....	14
2.8 การกระทำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารต่าง ๆ.....	14
2.9 เส้นสเปกตรัมของแป้งบิสคิสที่บริเวณพื้นที่หลักตามการดูดซับ.....	15
3.1 วิธีการทอดอาหารในห้องปฏิบัติการเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ.....	25
3.2 วิธีการทอดอาหารในระดับอุตสาหกรรมเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ.....	26
3.3 การเก็บตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำในขวดแก้วสีชา.....	27
3.4 ผังการเตรียมตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ.....	27
3.5 การสแกนตัวอย่างด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer.....	28
3.6 การเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ.....	28
3.7 ขั้นตอนการไทเทรตเพื่อหาปริมาณกรดไขมันอิสระในตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ.....	29
3.8 ขั้นตอนการไทเทรตเพื่อหาค่าเปอร์ออกไซด์ในน้ำมันทอดซ้ำ.....	30
3.9 ผังการสร้างแบบจำลองและการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง.....	34
4.1 สเปกตรัมเฉลี่ยของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีและน้ำมันรำข้าวที่ผ่านการทอดซ้ำ โดยพิกในสัญลักษณ์วงกลมเส้นประแสดงถึงช่วงพิกหลักของการเสื่อมคุณภาพของน้ำมันทอดซ้ำ.....	36
4.2 กราฟฮีสโตแกรมของข้อมูลปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ.....	37
4.3 กราฟฮีสโตแกรมของข้อมูลปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ.....	37
4.4 กราฟฮีสโตแกรมของข้อมูลปริมาณไขมันอิสระของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ.....	38
4.5 กราฟฮีสโตแกรมของข้อมูลปริมาณไขมันอิสระของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ.....	38
4.6 กราฟฮีสโตแกรมของข้อมูลค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ.....	39
4.7 กราฟฮีสโตแกรมของข้อมูลค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ.....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.8 การเปรียบเทียบปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (X axis) กับวัดโดยอุปกรณ์ Cooking Oil Tester (Y axis)	40
4.9 การเปรียบเทียบปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (X axis) กับวัดโดยอุปกรณ์ Cooking Oil Tester (Y axis).....	41
4.10 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ.....	41
4.11 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ.....	42
4.12 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำด้วย NIRS.....	42
4.13 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วย NIRS.....	43
4.14 การเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (X axis) กับการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Y axis).....	44
4.15 การเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (X axis) กับการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Y axis).....	45
4.16 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ.....	45
4.17 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ.....	46
4.18 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำด้วย NIRS.....	46
4.19 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วย NIRS.....	47
4.20 การเปรียบเทียบค่าเพอร์ออกไซด์ของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (X axis) กับการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (Y axis).....	48
4.21 การเปรียบเทียบค่าเพอร์ออกไซด์ของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (X axis) กับการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (Y axis).....	48
4.22 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนาย	

เอกสารนี้ค่าเพอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ.....เท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขประโยชน์ 49 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.23 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ.....	49
4.24 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำด้วย NIRS.....	50
4.25 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วย NIRS.....	50
4.26 กราฟฮีสโตแกรมของข้อมูลปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม.....	52
4.27 กราฟฮีสโตแกรมของข้อมูลปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม.....	52
4.28 กราฟฮีสโตแกรมของข้อมูลปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม.....	53
4.29 การเปรียบเทียบปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (X axis) กับวัดโดยอุปกรณ์ Cooking Oil Tester (Y axis).....	54
4.30 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ.....	55
4.31 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIRS.....	55
4.32 การเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระของทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (X axis) กับการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Y axis).....	57
4.33 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ.....	57
4.34 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIRS.....	58
4.35 การเปรียบเทียบค่าเพอร์ออกไซด์ของทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (X axis) กับการไทเทรตสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (Y axis).....	59
4.36 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ.....	60
4.37 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIRS.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

การทอดแบบน้ำมันท่วม เป็นวิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปในการทอดอาหาร เช่น ขนมขบเคี้ยว มันฝรั่งแผ่น โดนัท และเฟรนช์ฟราย เป็นต้น เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็ว และราคาไม่แพง อาหารที่ผ่านกระบวนการทอดจะมีกลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์ สีสวย และเนื้อสัมผัสมีความกรอบ การทอดเป็นวิธีที่ใช้ตั้งแต่ในระดับครัวเรือน ร้านอาหาร จนถึงในระดับอุตสาหกรรม [1][2] ในประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้การทอดแบบน้ำมันท่วมในระดับอุตสาหกรรมและร้านอาหารมากกว่า 500,000 โรงงาน [3] ศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหารสำรวจตลาดน้ำมันพืชในประเทศไทยปี พ.ศ. 2558 พบว่า เติบโตเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.5 มีมูลค่าทางการตลาด 22,065.4 ล้านบาท โดยน้ำมันที่ผลิตจากปาล์มมีส่วนแบ่งการตลาดสูงที่สุดถึงร้อยละ 59 และผลจากการสำรวจยังพบว่า ตลาดอาหารประเภทที่ใช้ น้ำมันทอดมีมูลค่าสูงชันและขยายตัวเพิ่มขึ้นทุกปี ทั้งอาหารประเภทจานด่วน เช่น ไก่ทอดมีมูลค่าทางการตลาดสูงถึง 12,000 ล้านบาท ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 40 ของตลาดอาหารจานด่วนทั้งหมด และตลาดอาหารขนมขบเคี้ยวประเภทที่ใช้ น้ำมันทอด เติบโตเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.5 ในปี พ.ศ. 2559 มีมูลค่าทางการตลาด 39,587 ล้านบาท [4] ผลการสำรวจสถานะการณ์การใช้ น้ำมันทอดของผู้บริโภคและผู้ประกอบการของ คณะทำงานแผนงานคุ้มครองผู้บริโภคด้านสุขภาพ ถึงพฤติกรรมการใช้น้ำมันทอดซ้ำในกลุ่มตัวอย่างในระดับครัวเรือนและผู้ประกอบการกว่า 5,299 ราย ทั่วประเทศ พบว่า ผู้ประกอบการส่วนใหญ่ใช้น้ำมันทอดซ้ำมากกว่า 1 ครั้ง ถึงร้อยละ 54.54 และร้อยละ 34.49 ใช้น้ำมันที่มีค่าโพลาร์เกิน 20 ซึ่งอยู่ในระดับที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค

น้ำมันหรือไขมันเมื่อใช้ทอดอาหารซ้ำหลายครั้ง ที่อุณหภูมิสูงระหว่าง 170-210 องศาเซลเซียสอย่างต่อเนื่องและเป็นระยะเวลาานาน น้ำมันสัมผัสกับก๊าซออกซิเจนในอากาศและน้ำที่ระเหยออกจากอาหารทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง (thermal oxidation) และปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) เกิดสารประกอบเคมีมากกว่า 400 ชนิด เป็นสารที่ระเหยได้จำนวน 220 ชนิด สารประกอบเคมีที่เกิดขึ้น เช่น กรดไขมันอิสระ แอลกอฮอล์ สารประกอบที่เป็นวง ไตเมอร์และพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของน้ำมันเสื่อมลง เช่น น้ำมันมีสีดำคล้ำ มีกลิ่นหืน จุดเกิดควันต่ำลง มีฟองและเหนียวหนืดขึ้น คุณค่าทางโภชนาการของน้ำมันลดลง และส่งผลเสียต่อสุขภาพของผู้บริโภค [1][2][5] ปัจจัยที่มีผลต่อการเร่งการเสื่อมคุณภาพของน้ำมันทอดซ้ำ ได้แก่ ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ทอดอาหาร อัตราการหมุนเวียนของน้ำมัน ชนิดของกรดไขมันในน้ำมัน ปริมาณน้ำและความชื้นในอาหาร ออกซิเจนที่สัมผัสในระหว่างการทอดทอดอาหาร และจำนวนครั้งของการทอด [2][6]

การตรวจสอบการเสื่อมเสียของน้ำมันทอดซ้ำถือเป็นปัจจัยสำคัญ ต้องมีการควบคุมน้ำมันที่ใช้ทอดอาหารเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภคและเป็นการควบคุมคุณภาพของอาหารทอด [2][7] วิธีการวัดเพื่อชี้คุณภาพของน้ำมันทอดซ้ำในปัจจุบัน แบ่งตามขนาดของสถานประกอบการ เช่น สถานประกอบการประเภทร้านอาหารทั่วไป นิยมใช้ดัชนีบ่งชี้คุณภาพน้ำมันทอดโดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น สีของน้ำมันที่ดำคล้ำมากขึ้น การเกิดฟอง ความหนืดที่เพิ่มขึ้น หรือรสชาติของอาหารที่เปลี่ยนแปลงไป [8] ส่วนการวัดคุณภาพน้ำมันทอดที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

ส่วนใหญ่ นิยมใช้วิธีการตรวจวัดทางเคมี เช่น การวัดปริมาณกรดไขมันอิสระ ค่าเพอร์ออกไซด์และรค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมด เป็นต้น แต่การตรวจวัดด้วยวิธีทางเคมีเป็นวิธีการวัดที่สิ้นเปลืองสารเคมี และค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ และต้องวัดโดยผู้ที่มีความเชี่ยวชาญ รวมทั้งใช้ระยะเวลาในการตรวจวัด [1][8][9]

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIRS) เป็นเทคนิคที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร ใช้ตรวจสอบทำนายค่าปัจจัยคุณภาพของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ของอาหารหลายชนิด สามารถวัดองค์ประกอบต่าง ๆ ได้ในการวัดเพียงครั้งเดียว เป็นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ไม่สร้างมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถตรวจสอบได้อย่างรวดเร็วใช้เวลาเพียง 2-3 วินาทีนอกจากนี้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เป็นวิธีการวัดในอุดมคติสำหรับการแบ่งกลุ่มของคุณภาพของน้ำมันที่ใช้ทอดอาหารได้อย่างรวดเร็ว [10][11][12][13]

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการพัฒนาการตรวจวัดการทำนายองค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนไปของน้ำมันทอดซ้ำ เช่น การตรวจวัดปริมาณกรดไขมันอิสระ ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมด และค่าเพอร์ออกไซด์ ในน้ำมันทอดอาหารด้วยวิธี NIRS ในน้ำมันชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะกอก และน้ำมันพืชชนิดอื่น ๆ แต่ผลการตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังไม่พบงานวิจัยใดที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำมันทอดซ้ำของน้ำมันรำข้าว น้ำมันปาล์มโอเลอินและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธี (refined coconut oil) ที่สัมพันธ์กับการตรวจวัดด้วย NIRS ซึ่งเป็นน้ำมันที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมอาหารทอด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาเพื่อหาความเป็นไปได้ในการวัดคุณภาพของน้ำมันทอดซ้ำ ได้แก่ ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมด ปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณเพอร์ออกไซด์ โดยการวัดเพียงครั้งเดียวด้วยเทคนิค NIRS

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมันทอดซ้ำที่สัมพันธ์กับการการดัดแปลง NIRS ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าวทอดผ่านกรรมวิธี

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานทางเคมีกับการวัดด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และสามารถสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันทอดซ้ำได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีช่วงความยาวคลื่น 800-2778 นาโนเมตร (nm) ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer โดยวิธีส่องผ่าน (Transmittance)

1.3.2 ศึกษาเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำมันทอดซ้ำ ได้แก่ ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมด ปริมาณกรดไขมันอิสระ และปริมาณเพอร์ออกไซด์

1.3.3 น้ำมันที่ใช้ในการศึกษามี 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบเทคนิคการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี โดยวิธีแบบไม่ทำลายตัวอย่าง

1.4.2 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการใช้ประโยชน์ของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เพื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านนี้การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันทอดซ้ำ ไม่วารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.3 ผู้ผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมสามารถวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันทอดซ้ำ ได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย และต้องมีความรู้และเทคนิควิธีการวัดแบบใหม่ ๆ

1.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษากระบวนการผลิตอาหารทอดในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับโรงงาน สืบหาข้อมูลการเลือกใช้น้ำมันทอดอาหาร และการตรวจวัดคุณภาพของน้ำมันทอดซ้ำที่ใช้กันโดยทั่วไปในระดับอุตสาหกรรม

1.5.2 สร้างตัวอย่างสำหรับการทดลองเบื้องต้น จากการทอดอาหารในห้องปฏิบัติการ โดยใช้วิธีการทอดแบบน้ำมันท่วมที่อุณหภูมิประมาณ 160 - 180 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างน้ำมันเริ่มต้นและน้ำมันที่ผ่านกระบวนการทอดที่ระยะเวลาต่าง ๆ เก็บตัวอย่างน้ำมันในขวดแก้วสีชาขนาด 100 มิลลิลิตร และเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ก่อนนำตัวอย่างน้ำมันมาประเมินคุณภาพ

1.5.2 สแกนตัวอย่างด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด สแกนตัวอย่างด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ใช้ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $12500-3600\text{ cm}^{-1}$ (800-2778 nm) โดยวิธีส่องผ่าน (Transmittance) และจำนวนการสแกนเพื่อหาสเปกตรัมเฉลี่ยเท่ากับ 64 สเปกตรัม ทำการตรวจวัดในช่วงความยาวคลื่นทุก ๆ 16 cm^{-1}

1.5.3 วิเคราะห์คุณภาพของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ ได้แก่ ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมด ปริมาณกรดไขมันอิสระ และปริมาณเพอร์ออกไซด์ ภายหลังการสแกนตัวอย่าง

1.5.4 นำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ กับ Optical data โดยวิธีทาง Chemometric แบบ Partial least square regression โดยใช้สเปกตรัมดั้งเดิมหรือสเปกตรัมที่ผ่านการจัดการทางคณิตศาสตร์เบื้องต้น โดยใช้โปรแกรม OPUS

1.5.5 ทดสอบแบบจำลอง เพื่อใช้ทำนายคุณภาพของน้ำมันทอดซ้ำของตัวอย่าง โดยวิธีการแบบไขว้ (cross validation) และแบบ test set validation

1.5.6 วิเคราะห์ความยาวคลื่นเนียร์อินฟราเรดที่มีผลต่อการวัดคุณภาพน้ำมันทอดซ้ำ

1.5.7 นำวิธีการที่ได้มาใช้ประโยชน์จริงในโรงงานผลิตอาหารทอด หรือหน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตอาหารทอด

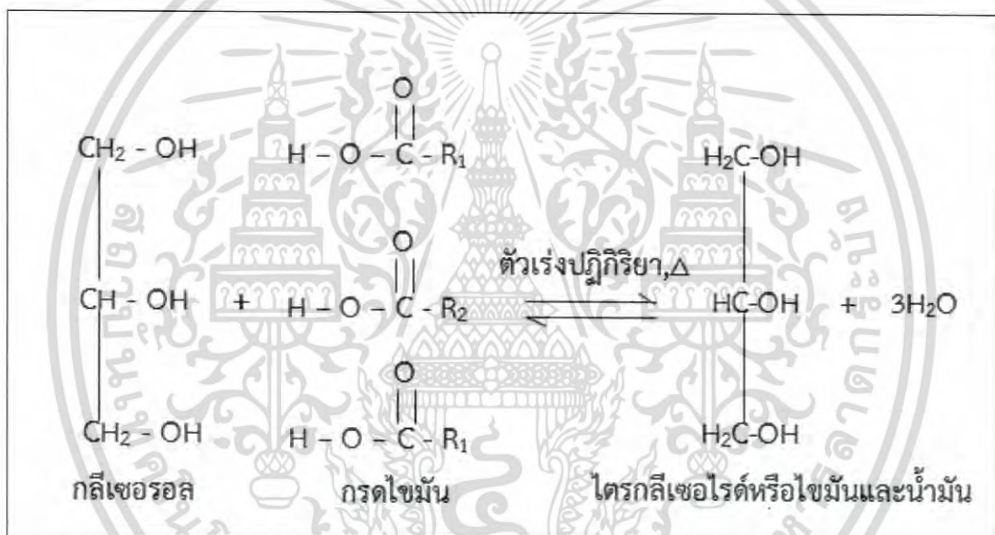
1.5.8 สรุปผล และเขียนรายงาน

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 ไขมันและน้ำมัน (Fats and Oils)

ไขมันและน้ำมัน เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน 3 โมเลกุล กับกลีเซอรอล 1 โมเลกุล เรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) หรือไตรเอซิลกลีเซอรอล (triacylglycerol) แสดงดังภาพที่ 2.1 ไขมันและน้ำมันที่สกัดได้จากพืชและสัตว์ นอกจากประกอบด้วยไตรเอซิลกลีเซอรอลประมาณร้อยละ 96-99 แล้ว ยังมีสารประกอบอื่น ๆ เช่น ฟอสโฟลิพิด สเตอรอล ไฮโดรคาร์บอน สารสีที่ละลายได้ในไขมัน และวิตามินอี เป็นต้น สารประกอบเหล่านี้มีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและแหล่งที่มาของวัตถุดิบ และนอกจากนี้ยังสามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างกระบวนการแปรรูปหรือเกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา เช่น กรดไขมันอิสระและสารประกอบพวกเพอร์ออกไซด์ เป็นต้น



ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาระหว่างกลีเซอรอลกับกรดไขมันได้ไขมันและน้ำมัน [14]

2.1.1 กรดไขมัน (Fatty acid)

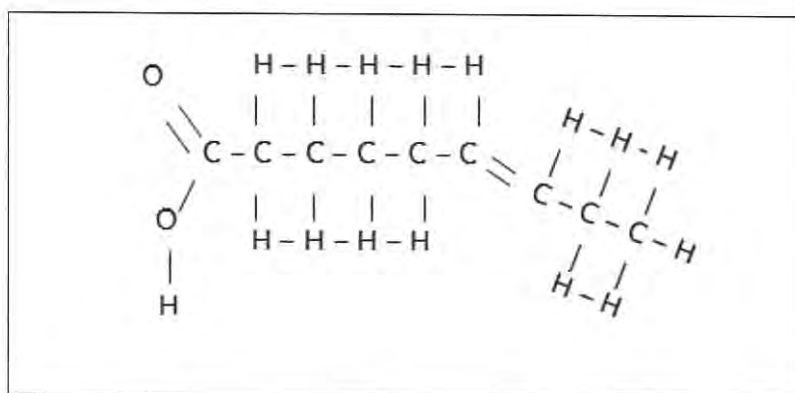
กรดไขมันเป็นกรดอินทรีย์สายตรงที่มีหมู่คาร์บอกซิล 1 หมู่ มีสูตรโมเลกุลเป็น R-COOH โดย R- คือหมู่แอลคิล (alkyl) ในโมเลกุลของกรดไขมันมีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ที่มีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิก คือชอบรวมตัวกับน้ำ และหมู่ R- มีสมบัติเป็น hydrophobic alkyl chain ซึ่งชอบละลายในน้ำมันและตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดที่ไม่มีขั้ว จึงทำให้โมเลกุลของกรดไขมันมีทั้งส่วนที่ละลายได้ในน้ำและน้ำมัน

กรดไขมันเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ และฟอสโฟกลีเซอรอลเป็นส่วนใหญ่ การสังเคราะห์กรดไขมันในร่างกายมีสารเริ่มต้นเป็นหมู่แอซิติล ซึ่งมีคาร์บอนในโมเลกุล 2 อะตอม ต่อกันเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น จึงทำให้จำนวนคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมันเป็นเลขคู่เสมอ พันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมในโมเลกุลของกรดไขมัน มีทั้งที่เป็นพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ กรดที่มีพันธะ

เดี่ยวทั้งหมด เรียกว่า กรดไขมันชนิดอิ่มตัว ส่วนกรดไขมันที่มีพันธะคู่ตั้งแต่ 1 อันขึ้นไป เรียกว่า กรดไขมันไม่อิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน โดยผู้จัดทำหนังสือเรียนฉบับนี้ไม่ได้มีเจตนาที่จะ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างกรดไขมันไม่อิ่มตัวชนิดกรดโอเลอิก (Oleic acid) [14]

2.1.2 น้ำมันทอด

น้ำมันที่ผลิตเพื่อใช้ในการบริโภคส่วนใหญ่ได้มาจากเมล็ดพืชบางชนิด ซึ่งรวมเรียกว่า เมล็ดพืช น้ำมัน (oilseed) แต่มีน้ำมันบางชนิดสกัดได้จากส่วนเนื้อเยื่อที่หุ้มเมล็ด (mesocarp) เช่น น้ำมันมะกอกและน้ำมันปาล์ม น้ำมันพืชแต่ละชนิดมีสัดส่วนปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวแตกต่างกัน เช่น น้ำมันมะพร้าวและน้ำมันปาล์มเคอร์เนลจากเมล็ดปาล์มมีกรดไขมันอิ่มตัวร้อยละ 80 ส่วนน้ำมันปาล์มโอเลอีนจากเนื้อปาล์มมีสัดส่วนของกรดโอเลอิก (กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง) และกรดพาริติก (กรดไขมันชนิดอิ่มตัว) ส่วนน้ำมันถั่วเหลืองมีกรดลิโนเลอิก (กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ 2 ตำแหน่ง) เนื่องจากเป็นกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย จะทำให้เกิดการสลายตัวของกรดไขมันไม่อิ่มตัวอย่างรวดเร็ว สร้างไดเมอร์และพอลิเมอร์ ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และสารประกอบกลุ่มคาร์บอนิล โดยไดเมอร์และพอลิเมอร์เกิดการรวมตัวกันของอนุมูลอิสระ และนำไปสู่การสร้างอะไซคลิกและไซคลิก จากอนุมูลอิสระของไดเมอร์ที่ทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ดังนั้นจึงไม่นิยมน้ำมันที่มีส่วนประกอบของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสูงมาใช้ในการทอดอาหาร [2]

น้ำมันปาล์มโอเลอีน

น้ำมันปาล์มโอเลอีน คือ น้ำมันที่สกัดจากเนื้อปาล์ม (crude palm oil) เป็นน้ำมันที่อยู่บริเวณเนื้อของผลปาล์ม (pericarp) ซึ่งอยู่ระหว่างเปลือกกับกะลา น้ำมันที่ได้มีสีส้ม เนื่องจากมีเบต้าแคโรทีนและวิตามินอีสูง มีปริมาณกรดโอเลอิก (oleic acid) สูงมากถึงร้อยละ 46 ซึ่งฉลากน้ำมันชนิดนี้ต้องระบุไว้ว่า น้ำมันปาล์มโอเลอีนจากเนื้อปาล์มผ่านกรรมวิธี (refined palm olein from pericarp) กระทรวงสาธารณสุขกำหนดคุณภาพมาตรฐานของน้ำมันปาล์มเพื่อจำหน่าย หรือที่จำหน่าย เพื่อใช้รับประทานหรือใช้ปรุงแต่งอาหาร ดังนี้ มีค่าของกรด (Acid value, AV) ไม่เกิน 10 มิลลิกรัม โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อน้ำมัน 1 กรัม สำหรับน้ำมันปาล์มที่ทำโดยวิธีธรรมชาติ และไม่เกิน 0.6 มิลลิกรัม โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อน้ำหนัก 1 กรัม สำหรับน้ำมันปาล์มที่ทำโดยวิธีผ่านกรรมวิธี และมีค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide value, PV) ไม่เกิน 10 มิลลิกรัมสมมูลเปอร์ออกไซด์ออกซิเจนต่อน้ำมัน 1 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันรำข้าว

น้ำมันรำข้าว เป็นน้ำมันพืชที่ผลิตจากน้ำมันรำข้าวดิบ เป็นผลผลิตที่ได้จากการสีข้าวเปลือก น้ำมันรำข้าวมีความสำคัญมาก เพราะข้าวเป็นพืชที่มีผลผลิตมากที่สุดในโลก รำข้าวมีประมาณร้อยละ 6 โดยน้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าว น้ำมันรำข้าวมีกรดไขมันอิสระสูง เมื่อนำรำข้าวใหม่มาสกัดน้ำมันออก จะมีกรดไขมันอิสระประมาณร้อยละ 4-6 ถ้าเก็บรำข้าวปล่อยทิ้งไว้ค่าความเป็นกรดของน้ำมันรำข้าว จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วประมาณร้อยละ 1 ต่อชั่วโมง น้ำมันรำข้าวที่มีค่าความเป็นกรดสูงไม่สามารถนำมารีไฟน์ให้บริสุทธิ์เพื่อใช้บริโภคได้ แต่น้ำมันรำข้าวมีความคงตัวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน เพราะมีวิตามินอีเป็นสารต้านการออกซิเดชันที่มีอยู่ในน้ำมันตามธรรมชาติ น้ำมันรำข้าวประกอบด้วยไขมันชนิดอิ่มตัวประมาณร้อยละ 15-20 และกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวร้อยละ 80-85 [14] รำข้าวมีสารอาหารที่มีผลต่อสุขภาพ เช่น วิตามินอี โนอาซิน และไขมันที่มีคุณค่า [16] มีปริมาณโอโรซานอลสูง อีกทั้งยังมีสารในกลุ่มไฟโตสเตอรอลปริมาณมากถึง 1190 มิลลิกรัมต่อน้ำมัน 100 กรัม โดยเป็นสเตอรอลกลุ่มที่พบในพืชมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ซึ่งพบว่ามีมากกว่าอาหารหลาย ๆ ชนิด [17]

น้ำมันมะพร้าว

น้ำมันมะพร้าว เป็นน้ำมันพืชที่ผลิตได้จากเนื้อมะพร้าวแห้ง ซึ่งเรียก Copra มีน้ำมันประมาณร้อยละ 63-68 น้ำมันมะพร้าวถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น ทำเนยเทียม เนยขาว และน้ำมันทอดอาหาร เป็นต้น น้ำมันมะพร้าวที่ขายทั่วไปเป็นชนิด 76 °oil และ 92 °oil ตัวเลขนี้บ่งชี้ถึงจุดหลอมละลายในหน่วยองศาฟาเรนไฮต์ น้ำมันมะพร้าวชนิด 76 °oil เป็นชนิดไม่ผ่านการไฮโดรจิเนชัน ส่วนน้ำมันมะพร้าวชนิด 92 °oil เป็นน้ำมันที่ผ่านการไฮโดรจิเนชันเพียงบางส่วน น้ำมันมะพร้าวเป็นน้ำมันที่ทนทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันมาก เนื่องจากมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวน้อยมาก ซึ่งสมบัตินี้ทำให้น้ำมันมะพร้าวถูกนำไปใช้ประโยชน์มาก โดยเฉพาะใช้ทอดอาหารขบเคี้ยวต่าง ๆ ที่ต้องการอายุการเก็บรักษานาน น้ำมันมะพร้าวประกอบด้วยกรดไขมันชนิดอิ่มตัวประมาณร้อยละ 90 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันโมเลกุลปานกลาง (medium chain fatty acid) เช่น กรดลอริก เมื่อบริโภคเข้าสู่ร่างกายจะดูดซึมและเผาผลาญได้รวดเร็ว ทำให้สะสมอยู่ในเนื้อเยื่อไขมันได้น้อยกว่ากรดไขมันที่มีโมเลกุลเป็นสายยาว (long chain fatty acid) [14]

2.2 การทอด (Frying)

การทอด หมายถึง การทำอาหารให้สุกโดยใช้น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์เป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน การทอดใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 170-210 องศาเซลเซียส ความร้อนของน้ำมันที่อุณหภูมิสูงกว่า 170 องศาเซลเซียส ทำให้น้ำภายในอาหารเดือดและระเหยจากภายในออกสู่ภายนอก และมีการพองตัวของเม็ดแป้งเกิด gelatinization ทำให้ความชื้นของอาหารลดลงและผิวหน้าแห้งกรอบ การทอดจึงเป็นการถนอมอาหารโดยใช้ความร้อนทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียและจุลินทรีย์ก่อโรค รวมทั้งเอนไซม์ในอาหาร และทำให้ค่า water activity (a_w) ที่ผิวหน้าหรือทั้งชิ้นของอาหารลดลง

วิธีการทอดในครัวเรือนหรือในระดับอุตสาหกรรมแบ่งได้ 2 วิธี ซึ่งแบ่งโดยวิธีการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ การทอดแบบน้ำมันตื้น (shallow frying) เป็นการทอดชิ้นอาหารในกระทะที่มีปริมาณน้ำมันเพียงเล็กน้อย น้ำมันไม่ท่วมชิ้นอาหารทั้งชิ้น และการทอดแบบน้ำมันท่วม (deep - fat frying) เป็นการทอดอาหารในน้ำมันที่มีปริมาณมากเพียงพอที่จะท่วมอาหารทั้งชิ้น [14][15]

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทอด

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อกระบวนการทอดมีปัจจัยหลักๆ 3 ปัจจัย ได้แก่

2.2.1.1 สมบัติของกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และวิธีการทอด เช่น การทอดแบบน้ำมันร้อนหรือการทอดแบบน้ำมันท่วม

2.2.1.2 น้ำมันที่ใช้ในการทอด ได้แก่ สมบัติของน้ำมันทั้งทางกายภาพและเคมี โดยน้ำมันที่เหมาะสมกับการทอดอาหารแบบน้ำมันท่วม ควรเป็นน้ำมันที่ทนความร้อนได้สูง และเสื่อมสลายตัวช้า มีจุดเกิดควันสูง เป็นน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวต่ำ มีกรดลิโนเลอิกน้อยกว่าร้อยละ 2 เช่น น้ำมันจากไซสตรั น้ำมันพืชบางชนิด เช่น น้ำมันปาล์ม และน้ำมันมะพร้าว น้ำมันพืชที่ผ่านการไฮโดรจิเนชันบางส่วน และไม่ควรใช้น้ำมันที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสูง เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันข้าวโพด น้ำมันเมล็ดคำฝอย และน้ำมันดอกทานตะวันในการทอดอาหาร เนื่องจากน้ำมันดังกล่าวไม่มีความคงตัว และมีกรดลิโนเลอิกสูงถึงร้อยละ 6-7 [18]

2.2.1.3 ธรรมชาติของอาหาร ได้แก่ ชนิดของอาหาร เช่น ส่วนประกอบในอาหาร ปริมาณน้ำหรือความชื้นในอาหาร และพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมันระหว่างการทอด

ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำมันทอด ได้แก่ ชนิดของกรดไขมัน อุณหภูมิในการทอด และธรรมชาติของอาหาร

2.2.2.1 ชนิดของกรดไขมัน กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวนั้นมีตำแหน่งพันธะคู่ซึ่งมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ยังมีจำนวนพันธะคู่มากทำให้มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น นอกจากนี้กรดไขมันที่จัดตัวในรูปซิส (Cis) จะถูกออกซิไดส์ง่ายกว่าการจัดรูปแบบทรานส์ (Trans) [19]

2.2.2.2 พื้นที่ผิว อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเป็นโดยตรงต่อสัดส่วนของพื้นที่ผิวของไขมันที่สัมผัสอากาศ [19]

2.2.2.3 อุณหภูมิและเวลาในการทอด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทอดเพิ่มขึ้น สามารถทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระและสารประกอบมีขี้ทั้งหมดเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงการเสื่อมเสียของน้ำมัน [19]

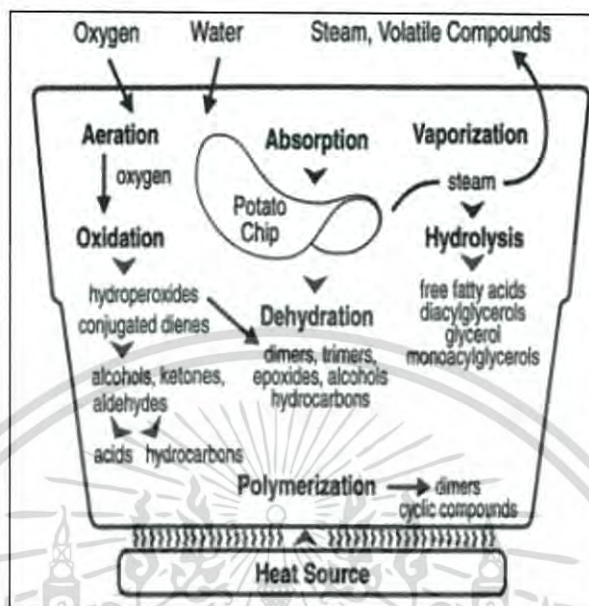
2.2.2.4 อัตราส่วนของน้ำมันใหม่ การเติมน้ำมันใหม่ในระหว่างกระบวนการทอดจะทำให้น้ำมันทอดมีคุณภาพดีขึ้น อีกทั้งการเติมน้ำมันใหม่ยังช่วยลดการก่อตัวของสารประกอบมีขี้ และกรดไขมันอิสระ [21] [22]

2.2.2.5 ธรรมชาติของอาหาร ส่วนประกอบจากอาหาร เช่น ไขมันที่มีในอาหาร ปริมาณความชื้น โปรตีน และสารสีมีผลทำให้เกิดการเสื่อมเสียของน้ำมันทอด

2.3 การเปลี่ยนแปลงน้ำมันระหว่างการทอด

ในระหว่างการทอด เมื่อน้ำมันได้รับความร้อนมีอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน และมีการสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ และมีน้ำระเหยออกจากชิ้นอาหาร จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การเกิดไฮโดรไลซิสส่งผลให้ไตรกลีเซอไรด์สลายตัวเป็นกรดไขมันอิสระ ทำให้ค่าความเป็นกรดเพิ่มสูงขึ้น เกิดเป็นสารประกอบทางเคมีอื่น ๆ ที่มากกว่า 400 ชนิด โดย 200 ชนิดเป็นสารที่ระเหยได้ แสดงดังในภาพที่ 2.4 ทำให้อาหารมีกลิ่นผิดปกติและน้ำมันมีสีคล้ำ การเกิดพอลิเมอร์เซชันของโมเลกุลน้ำมันในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน จะทำให้เกิดสารประกอบที่มีวงแหวน อาจเป็นพิษต่อร่างกาย และอาหารที่ไม่ควรรับประทาน ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านการทอดจะเกิดปฏิกิริยาลิพิดออกซิเดชันได้ง่ายระหว่างการเก็บรักษา [23] โดยในระหว่างการทอดจะเกิดสารประกอบและปฏิกิริยาเคมีของน้ำมันดังนี้



ภาพที่ 2.4 ปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีในระหว่างการทอดแบบน้ำมันท่วม [23]

2.3.1 สารประกอบสลายตัวที่ระเหยได้ (Volatile decomposed products; VDP)

สารประกอบที่สลายตัวได้ ประกอบด้วย แอลดีไฮด์ (aldehyde) คีโตน (ketone) แอลกอฮอล์ (alcohols) ไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) แล็กโตน (lactones) และสารประกอบแอโรมาติก (aromatic compounds) สารประกอบที่สลายตัวได้เหล่านี้จะระเหยไปกับไอน้ำในระหว่างการทอด แต่สารประกอบบางชนิดจะถูกเก็บไว้ในอาหารทอดและเมื่อคนทอดอาหารสุดคมเข้าไปจนถึงระดับที่เป็นอันตรายอาจจะส่งผลเสียต่อสุขภาพได้ [24]

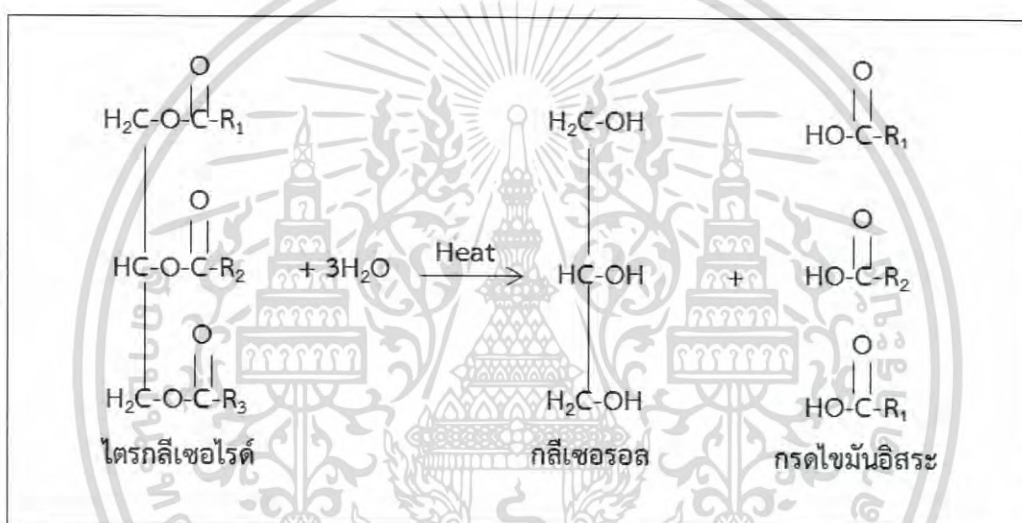
2.3.2 สารประกอบสลายตัวที่ไม่ระเหย (Non-volatile decomposed products; NVDP)

สารประกอบสลายตัวที่ไม่ระเหย ประกอบด้วย ผลิตภัณฑ์ขั้นที่สองที่เกิดขึ้นระหว่างการทอดแบบน้ำมันท่วม เช่น ระหว่างการเกิดออกซิเดชันและพอลิเมอไรเซชันของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว สารประกอบสลายตัวที่ไม่ระเหย เช่น มอโนเมอร์แบบวง (cyclic monomer) มอโนเมอร์ไม่ใช่วง (noncyclic monomer) ไดเมอร์ (dimer) ไตรเมอร์ (trimer) และสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง สารที่ไม่ระเหยเหล่านี้ยังคงอยู่ในน้ำมันทอด และจะเร่งการเสื่อมสลายต่อไปทุกครั้งที่ใช้ น้ำมันนี้ทอดอาหาร และอาหารจะดูดซึมสารเหล่านี้ไว้หากใช้น้ำมันทอดหลาย ๆ ครั้งจะทำให้เกิดสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น น้ำมันมีความหนืดเพิ่มขึ้น เกิดสีคล้ำและเป็นฟอง และมีการเปลี่ยนแปลงค่าทางเคมีมีเพิ่มมากขึ้น เช่น กรดไขมันอิสระ สารประกอบคาร์บอนิล ค่าสะปอนนิฟิเคชัน และการลดลงของกรดไขมันอิ่มตัว [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การหืนจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic rancidity)

ไฮโดรไลซิส คือ ปฏิกิริยาทางเคมีที่มีน้ำเข้าไปสลายพันธะเคมี ทำให้สารโมเลกุลใหญ่แตกตัวเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลง นำไปสู่การหืนในน้ำมัน ไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญเกิดขึ้นในระหว่างการทอด โดยจะเกิดขึ้นเมื่ออาหารอยู่ในน้ำมันขณะร้อน น้ำในอาหารซึ่งมีสถานะเป็นไอขณะทอดจะสลายไตรกลีเซอไรด์ ทำให้แตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระ มอโนเอซิลกลีเซอรอล (monoacylglycerol) ไดเอซิลกลีเซอรอล (diacylglycerol) และกลีเซอรอล แสดงดังในภาพที่ 2.5 โดยไฮโดรไลซิสจะเกิดได้ดีเมื่อมีเอนไซม์ลิเพสร่วมด้วย แต่สามารถป้องกันได้โดยการใช้ความร้อน เช่น การลวก เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ดังกล่าว ควรลดปริมาณน้ำในอาหารให้น้อยลง ระวังการทำให้อาหารชื้น การกระแทก และเกิดบาดแผล ซึ่งทำให้เอนไซม์และสารเริ่มต้น คือ ไขมันและน้ำเข้ามาสัมผัสกันได้ และการลดกากและเศษอาหารที่สะสมในเตาทอดสามารถช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้น้อยลงด้วย



ภาพที่ 2.5 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ [14]

2.3.4 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (Oxidative rancidity)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด เป็นปฏิกิริยาที่ออกซิเจนในอากาศทำปฏิกิริยากับน้ำมันที่ตำแหน่งพันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้า ๆ ระหว่างการเก็บรักษา และจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วเมื่อให้ความร้อนแก่น้ำมัน เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ปฐมภูมิ (primary oxidation products)

ออโตออกซิเดชัน (autoxidation) พันธะคู่ในโมเลกุลของไขมันและน้ำมัน สามารถเกิดกับออกซิเจนในอากาศได้อย่างช้า ๆ ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ปฐมภูมิ ทุติยภูมิและตติยภูมิ (tertiary oxidation products) ซึ่งสารเหล่านี้หากมีปริมาณมาก อาจทำให้สมบัติของน้ำมันและไขมันเปลี่ยนแปลงไป เช่น เกิดความผิดปกติของกลิ่นและรสชาติของไขมันและน้ำมัน ที่เรียกว่า เกิดการหืน ซึ่งการหืนส่วนใหญ่จะหมายถึง การหืนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative rancidity) เมื่อน้ำมันสัมผัสกับอากาศ ออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในโมเลกุลของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างต่อเนื่องช้า ๆ เมื่อลิพิดหรืออาหารสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องของอนุมูลอิสระ (free-radical chain reaction) ซึ่งมีกลไกการเกิด 3 ขั้นตอนดังนี้

ไม่วารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. Initiation เป็นขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระ (free radical)

ข. Propagation เป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องของอนุมูลอิสระ

ค. Termination เป็นปฏิกิริยาสุดท้ายที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นไม่ได้เป็นอนุมูลอิสระ (non-radical product) ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของลิพิด ได้แก่ ชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ โดยเกิดกับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเท่านั้นโดยเฉพาะกรดไขมันอิสระจะถูกออกซิไดส์ได้ง่าย ปริมาณและพื้นที่ผิวสัมผัสของออกซิเจนอาหารที่มีโลหะ เช่น ทองแดง และตะกั่ว เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น นอกจากนี้ความร้อนและแสงมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาด้วย การเกิดการหืนโดยปฏิกิริยานี้ทำให้กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ซึ่งเป็นกรดไขมันจำเป็นถูกทำลาย มีผลทำให้คุณค่าทางโภชนาการของไขมันและน้ำมันลดลง การตรวจวิเคราะห์ไขมันและน้ำมันที่เกิด oxidative rancidity สามารถหาค่า Peroxide value เป็นการหาปริมาณสารเพอร์ออกไซด์ ที่เกิดขึ้นในน้ำมันหรือไขมัน [6][25]

2.4 ดัชนีควบคุมคุณภาพของน้ำมันบริโภค

2.4.1 ค่าเพอร์ออกไซด์ (Peroxide value: PV)

ผลิตภัณฑ์ปฐมภูมิที่เกิดจากกระบวนการปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ ไฮโดรเพอร์ออกไซด์ ซึ่งเรียกโดยทั่วไปว่า เพอร์ออกไซด์ เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่เสถียรที่เกิดขึ้นจากไตรกลีเซอไรด์ ค่าเพอร์ออกไซด์เป็นวิธีดั้งเดิมสำหรับการวิเคราะห์การเกิดออกซิเดชันในไขมันและน้ำมัน เป็นค่าที่บ่งชี้การเสื่อมเสียของน้ำมันได้ ถ้าค่าเพอร์ออกไซด์สูงแสดงว่าไขมันหรือน้ำมันเกิดออกซิเดชันมาก มีกลิ่นหืนมาก จากประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 205 (พ.ศ.2543) เรื่อง น้ำมันและไขมัน มีค่าเพอร์ออกไซด์คิดเป็นมิลลิกรัมสมมูลต่อน้ำมันและไขมัน 1 กิโลกรัมได้ไม่เกิน 10 [28]

2.4.2 ค่าไอโอดีน (Iodine value)

ค่าไอโอดีนของไขมันหรือน้ำมันเป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ระดับของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล และใช้เป็นดัชนีของเลขพันธะคู่ ค่าไอโอดีนแสดงค่าเป็นจำนวนกรัมของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยาแฮโลจีเนชัน (halogenation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับพันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไขมันหรือน้ำมันจำนวน 100 กรัม ถ้ามีค่าไอโอดีนสูงแสดงว่ามีปริมาณกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบมาก และจะเกิดการหืนด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย

2.4.2 กรดไขมันอิสระ (Free fatty acid content)

ปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ถึงการเกิดไฮโดรไลซิสที่โมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ในน้ำมันในระหว่างทอด ผลิตภัณฑ์ที่ได้นอกจากกรดไขมันอิสระแล้ว ยังประกอบไปด้วย ไดกลีเซอไรด์ มอนอกลิเซอไรด์และกลีเซอรอล กรดไขมันอิสระที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจะระเหยง่ายและมีกลิ่นเหม็นทำให้ค่าความเป็นกรดในน้ำมันเพิ่มสูงขึ้น โดยกรดไขมันอิสระจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นเมื่อน้ำมันถูกทอดจำนวนหลายครั้ง [26] ปัจจัยที่ทำให้ค่าความเป็นกรดเพิ่มสูงขึ้น ได้แก่ ความร้อนหรือเอนไซม์ลิเพสเป็นตัวเร่งร่วมกับปริมาณน้ำที่สูงในอาหารกรดไขมันอิสระประเภทกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งเป็นสาเหตุเบื้องต้นของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาลดลง ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันทอดซ้ำที่แนะนำคือ ร้อยละ 0.05-0.08 และตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขประเทศไทยเกี่ยวกับคุณภาพน้ำมันปรุงอาหารใหม่ผ่านกรรมวิธีการผลิตต้องมีค่าความเป็นกรดไม่เกิน 0.6 [2][7][25]

2.4.3 สารโพลาร์ทั้งหมด (Polar compounds: TPM)

สารโพลาร์เป็นสารประกอบมีประจุที่เกิดขึ้นระหว่างการทอดอาหาร แสดงปริมาณสารที่มีขั้วทั้งหมด เกิดขึ้นจากการที่สารไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นสารไม่มีขั้วที่อยู่ในน้ำมันถูกไฮโดรไลซ์ออกซิไดส์ และพอลิเมอไรซ์ [27] ทำให้เกิดการก่อตัวของสารประกอบที่สลายตัวได้ (decomposition products) ขึ้น ทั้งสารประกอบสลายตัวที่ระเหยได้ เช่น แอลดีไฮด์สายตรง (aliphatic aldehydes) คีโตนสายตรง (aliphatic ketones) อีพอกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbones) กรดคาร์บอกซิลิก โครงสร้างที่เปนวง (cyclic structures) เปนตน และสารประกอบสลายตัวที่ไม่ระเหย เช่น โมโนเมอร์แบบวง (cyclic monomer) โมโนเมอร์ไม่ใช่วง (non-cyclic monomer) ไดมอร์ ไตรเมอร์ รวมถึงอะคริลามิด (acrylamide) ด้วย [28] ดังนั้นสารประกอบมีขั้วจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการประเมินคุณภาพและการยอมรับของน้ำมันใช้แล้วในทุกประเทศ หากมีสารประกอบมีขั้วมากในน้ำมันทอดจะมีผลต่อกลิ่นรสและคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร

ปัจจัยที่ทำให้เกิดสารโพลาร์ เช่น น้ำมันที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวในปริมาณที่สูง ระยะเวลาการทอดและอุณหภูมิการทอด ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 283) พ.ศ. 2547 เรื่อง กำหนดปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันที่ใช้ทอดหรือประกอบอาหารเพื่อจำหน่ายได้กำหนดให้ในน้ำมันมีปริมาณสารโพลาร์ได้ไม่เกินร้อยละ 25 ของน้ำหนัก [25]

2.4.4 ข้อกำหนดคุณภาพของน้ำมันและน้ำมันทอดซ้ำ

ในประเทศต่างๆ มีการกำหนดค่าคุณภาพของน้ำมันเพื่อจำหน่ายหรือปรุงอาหาร ซึ่งได้กำหนดค่าเพอร์ออกไซด์ ค่าความเป็นกรด และค่ากรดไขมันอิสระไว้ดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดของน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการทอดในแต่ละประเทศ

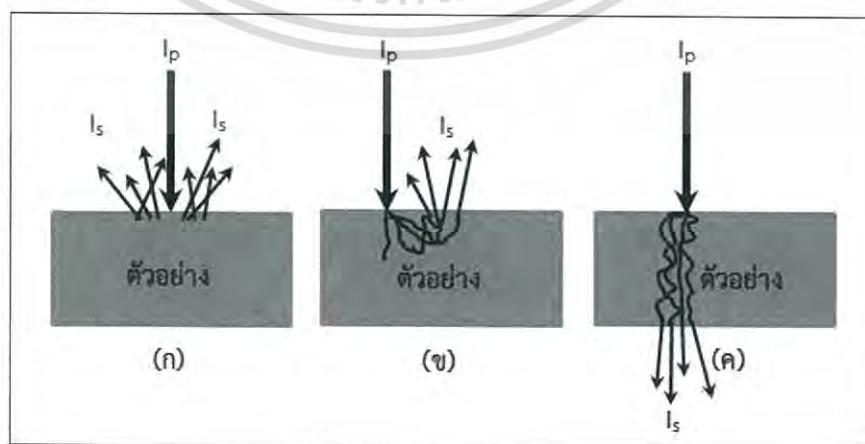
ค่า	ปริมาณ	ชนิดของน้ำมัน	ประเทศ	อ้างอิง
PV	<10.0 meq peroxide/kg oil	น้ำมันใช้ซ้ำ	ไทย	[25]
AV	<0.6 mq KOH/1g oil	น้ำมันใหม่	ไทย	[25]
AV	<2.5mg KOH/1g oil	น้ำมันใช้ซ้ำ	ออสเตรีย	[29]
AV	<2.0 mg KOH/1g oil	น้ำมันใช้ซ้ำ	เยอรมนี	[29]
AV	<2.5mg KOH/1g oil	น้ำมันใช้ซ้ำ	ญี่ปุ่น	[29]
AV	<4.5mg KOH/1g oil	น้ำมันใช้ซ้ำ	เนเธอร์แลนด์	[29]
FFA	<0.2%	น้ำมันใหม่	สหรัฐอเมริกา	[29]
FFA	<0.4%	น้ำมันใหม่	ออสเตรีย	[29]
TPM	<25%	น้ำมันใช้ซ้ำ	ไทย	[25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและการใช้ประโยชน์

2.5.1 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

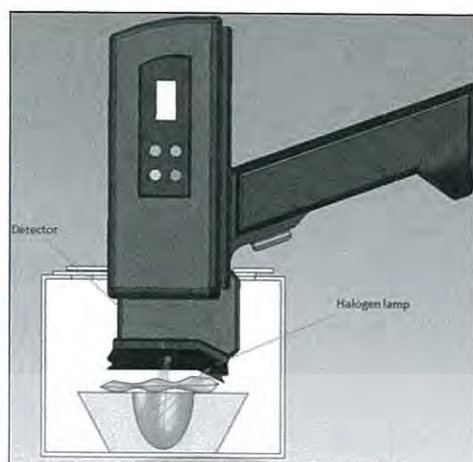
NIRS เป็นวิธีการวิเคราะห์โมเลกุลของสารที่ไม่ทำลายตัวอย่างอาหาร อาศัยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่นำมาวัด เป็นวิธีการวัดที่รวดเร็วและให้ผลการวัดที่ดี ถูกนำมาใช้ตั้งแต่การตรวจสอบหรือควบคุมคุณภาพอาหารหรือผลิตผลทางการเกษตร ไปจนถึงการตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นการศึกษาอันตรกิริยา (interaction) ของรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (infrared radiation) ความยาวคลื่นที่ใช้อยู่ระหว่าง 700 – 2500 นาโนเมตร ส่งไปยังสารหรือวัสดุ โดยสารหรือวัสดุที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับอินฟราเรดย่านใกล้ได้นั้น ต้องมีโมเลกุลที่ประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจน ได้แก่ C-H (คาร์บอนกับไฮโดรเจน) O-H (ออกซิเจนกับไฮโดรเจน) S-H (ซัลเฟอร์กับไฮโดรเจน) และ N-H (ไนโตรเจนกับไฮโดรเจน) โดยโมเลกุลเหล่านี้จะดูดซับคลื่นและทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของพันธะ โดยการเปลี่ยนระดับพลังงานข้ามขึ้นมากกว่า 1 ชั้น (overtone) หรือเกิดจากการสั่นสะเทือนข้าม 1 ชั้น (fundamental vibration) พร้อมกันของพันธะตั้งแต่ 2 พันธะขึ้นไปทำให้ได้ผลรวมของการสั่น (combination vibration) เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดพลังงานเรียกว่า สเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer) ซึ่งมีแหล่งแสงที่ให้ช่วงคลื่นเนียร์อินฟราเรด การตรวจวัดพลังงานด้วยสเปกโตรมิเตอร์ทำได้หลายรูปแบบ แสดงดังภาพที่ 2.5 เช่น แบบวัดการสะท้อน (reflectance) เป็นวิธีที่ง่ายต่อการจัดวางตัวอย่าง เมื่อแสงส่องไปยังผิวของวัตถุแล้วแพร่ลงไปใต้อวัตถุบางส่วนแล้วสะท้อนกลับขึ้นมาสู่ตัวตรวจวัด บางทีเรียกว่า การสะท้อนแบบแพร่ (diffuse transreflectance) โดยมีแหล่งแสงและตัวตรวจวัดอยู่ด้านล่าง และในปัจจุบันเนื่องจากมีความสะดวกในการใช้สายไฟเบอร์ออปติก การวัดสะท้อนจากวัตถุจึงเป็นแบบ Interactance ซึ่งมีสายไฟเบอร์ออปติก (Fiber Optics Probe) เป็นตัวนำคลื่นที่สะท้อนจากวัตถุกลับไปยังตัวตรวจวัดซึ่งอยู่ใกล้กัน และวิธีวัดแบบการส่องผ่าน (Transmittance) โดยการส่องผ่านคลื่นไปในตัวอย่าง ก่อนที่จะรับแสงที่ผ่านออกมาในด้านตรงข้ามกับด้านที่แสงตกกระทบไปวิเคราะห์ การวัดแบบส่องผ่านนิยมใช้วัดตัวอย่างที่เป็นของเหลว หรือของแข็งที่เป็นผลไม้ นอกจากนี้รูปแบบการวัดยังมีการใช้ประโยชน์อุปกรณ์ FQA NIR GUN ซึ่งปกติเป็นการวัดแบบสะท้อนให้เป็นวิธีส่องผ่าน โดยใช้ Gold cup แสดงดังในภาพที่ 2.7 ซึ่งอุปกรณ์มีขนาดเล็กและสะดวกต่อการพกพา



ภาพที่ 2.6 การสแกนตัวอย่างด้วย NIR Spectroscopy (ก) การสะท้อนแบบแพร่ (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนเห็นใบเซอร์ประโยชน์ด้านการค้า การสะท้อนจากวัตถุ (ค) การวัดแบบส่องผ่าน [34]

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

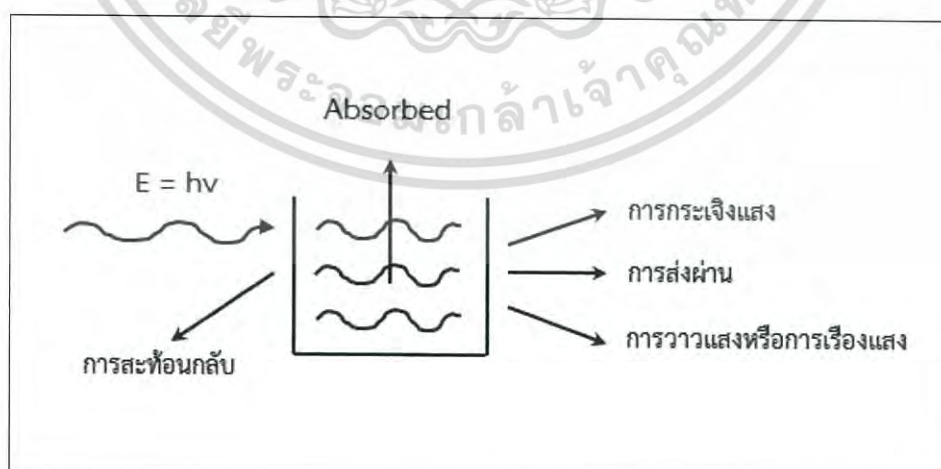


ภาพที่ 2.7 การสแกนตัวอย่างด้วย FQA NIR GUN ด้วยวิธีส่องผ่านโดยใช้ Gold cup [9]

สเปกตรัมในช่วงคลื่น NIRS ที่ได้ จะถูกนำมาประมวลผลและหาความสัมพันธ์ทางสถิติกับข้อมูลของตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมี หรือวิธีอื่นๆ ซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน จะได้สมการสอบเทียบมาตรฐาน (calibration equation) เพื่อใช้ทำนายค่าปัจจัยคุณภาพของของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์อาหารได้ทั้งเชิงปริมาณ (quantitative) และเชิงคุณภาพ (qualitative) [9][11]

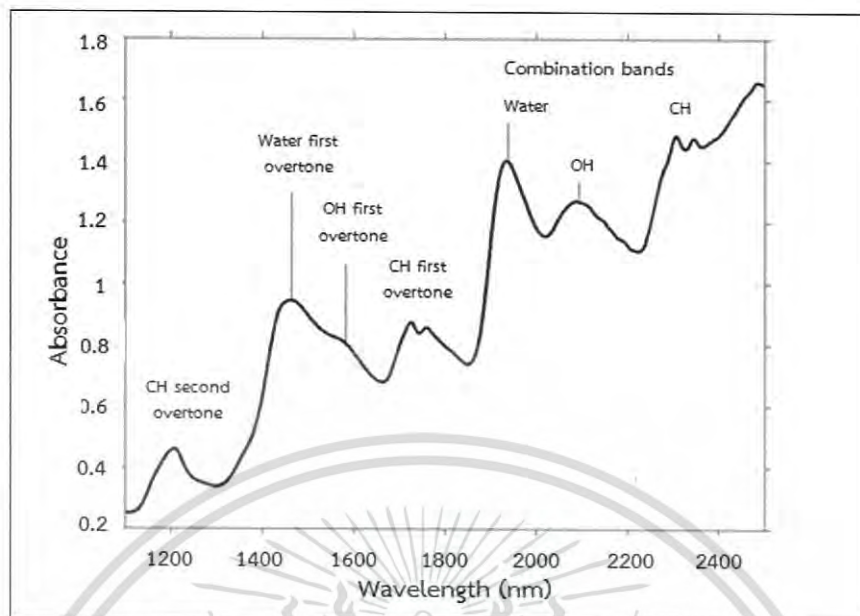
2.5.2 หลักการพื้นฐานของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เครื่อง NIR คือเครื่องที่ใช้แสงที่มีความยาวคลื่นย่านใกล้อินฟราเรด ส่องไปยังสิ่งที่เราต้องการวิเคราะห์ เพื่อให้เกิดการดูดกลืนแสง แล้วมีการเปลี่ยนแปลงของพันธะระหว่างพันธะไฮโดรเจน โดยเกิดการยืดหด หรือบิดงอ ในรูปแบบต่างๆ แล้วทำการตรวจวัดคลื่นแสงที่ไม่ดูดกลืน ซึ่งสะท้อนหรือส่องผ่านออกมา แล้วประมวลผลเป็นค่าการดูดกลืนแสง แสดงดังในภาพที่ 2.7 ที่คลื่นต่างๆ เกิดเป็นสเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะตัวในแต่ละตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ลักษณะแสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การกระทำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารต่างๆ [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.9 เส้นสเปกตรัมของแบ่งบิสคิสที่บริเวณพื้นที่หลักตามการดูดซับ [32]

สเปกโทรสโกปีมีกฎของการดูดกลืนแสงที่สำคัญอยู่ 2 กฎ คือ [31]

กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) เมื่อแสงสีเดียว (monochromatic light) คือ แสงความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียวหรือตัวกลางเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) เป็นสัดส่วนของความเข้มแสงที่ถูกตัวกลางดูดไว้ โดยไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงเริ่มต้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน

กฎของเบียร์ (Beer's law) เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางที่มีเนื้อเดียวสัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางดูดกลืนไว้จะแปรโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดแสงนั้น

ในทางปฏิบัติปริมาณความเข้มของแสงที่ดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่ลำแสงส่องผ่าน จึงต้องรวมกฎทั้งสองเข้าด้วยกันเรียกว่า กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon bc = \log \frac{I_0}{I}$$

- เมื่อ
- I = ความเข้มของแสงความยาวคลื่นเดียวที่ส่องผ่านออกมา
 - ϵ = สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง (ปกติเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นและอุณหภูมิ)
 - I_0 = ความเข้มของแสงก่อนผ่านตัวกลางเมื่อ $b = 0$
 - b = ความหนาของตัวกลางในหน่วยเซนติเมตร
 - c = ความเข้มของสารในหน่วย โมล/ลิตร
 - A = ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance)

โมเลกุลของสารแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์กับช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันเนื่องจากการ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่
 จัดเรียงโครงสร้างของโมเลกุลที่ต่างกัน นอกจากนี้ในแต่ละโมเลกุลจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นได้
 ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่า 1 ช่วง เช่น โมเลกุลของน้ำ ที่มีมากในผลิตภัณฑ์อาหาร มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น 4 ช่วง ได้แก่ 760, 970, 1450 และ 1940 nm ดังนั้นถ้าทำการทดสอบในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวจะสามารถหาความสัมพันธ์ของน้ำภายในตัวอย่างได้

2.5.3 ส่วนประกอบของเครื่องเนียร์อินฟราเรด [10]

ส่วนประกอบหลักเครื่องมือสเปกโทรมิเตอร์ส่วนใหญ่มีความคล้ายคลึงกัน ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสงและเครื่องตรวจจับและบันทึกผล

2.5.3.1 แหล่งกำเนิดรังสีในช่วง NIR

ส่วนใหญ่ใช้หลอดทังสเตนเนื่องจากราคาถูกและใช้งานได้ทันที ใช้ฟิลเตอร์ช่วยในการกรองแสงในช่วงความถี่ที่นอกขอบเขตออกเป็นการป้องกันไม่ให้ตัวอย่างร้อนจนเกินไป

2.5.3.2 มอโนโครมาเตอร์ (monocromator)

ช่วยในการกระจายแสงโดยอาศัยเกรตติง และควบคุมให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ ด้วยช่องผ่านแสงเข้า (Entrance Slit) และช่องผ่านแสงออก (Exit Slit)

2.2.3.3 ตำแหน่งที่วางตัวอย่าง

ควรได้รับการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบการวิเคราะห์และปริมาณอนุภาคที่ใช้วิเคราะห์ เซลล์สำหรับใส่ตัวอย่างต้องทำจากวัสดุที่ยอมให้แสงในช่วง NIR สามารถทะลุผ่านได้ เช่น แก้วหรือควอทซ์ และมีระยะทางเดินของแสงที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่าง

2.5.3.4 อุปกรณ์ตรวจจับ (Detector)

อุปกรณ์สำหรับตรวจจับปริมาณแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการทาง Photoconductive effect การเลือกเครื่องตรวจจับนั้นขึ้นกับช่วงความยาวคลื่นและการออกแบบตัวแปรต่างๆ ของสเปกโทรมิเตอร์

2.5.4 การเลือกวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น [10][33]

สเปกตรัมของตัวอย่างที่วัดได้ด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์สามารถนำมาใช้เลย หรืออาจมีการจัดการทางคณิตศาสตร์ต่อสเปกตรัม (Spectrum pretreatment) ก่อนเพื่อสามารถสร้างความสัมพันธ์ที่ตรงระหว่างสเปกตรัมกับข้อมูลความเข้มข้น ซึ่งมีหลายวิธีด้วยวัตถุประสงค์แตกต่างกัน เช่น ทำสเปกตรัมที่มีสัญญาณรบกวนให้เรียบขึ้นโดยใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยในช่วงคลื่นสั้นๆ ต่อเนื่องกัน การปรับค่าศูนย์กลางข้อมูล (mean centering, MC) การทำอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่ง (1^{st} Derivative, D1) เพื่อแก้ปัญหาค่าการเลื่อนขึ้นของเส้นสเปกตรัม (baseline shift) การทำอนุพันธ์ลำดับที่สอง (2^{nd} Derivative, D2) เพื่อแก้ปัญหาค่าการเลื่อนขึ้นและการที่มีพีคซ้อนทับกัน (overlapping peaks) การปรับเป็นค่ามาตรฐาน (normalization) ทำเพื่อกำจัดความแปรปรวนจากปัจจัยที่ไม่ต้องการการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (multiplicative scatter correction, MSC) เพื่อแก้ปัญหาค่าการกระเจิงแสงที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น ขนาดอนุภาคหรือผลที่ไม่เท่ากัน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแหล่งแสง เป็นต้น การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard normal variate, SNV) และการปรับแนวโน้ม (detrending) ซึ่งแก้ปัญหาเช่นเดียวกับ MSC สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การจัดการทางคณิตศาสตร์ต่อสเปกตรัมและการเลือกใช้งาน

วิธีการจัดการข้อมูลสเปกตรัม	วิธีการและการใช้งาน
ไม่มีการจัดการข้อมูล	-
การลบโดยค่าคงที่ (Subtraction of a constant offset)	- สเปกตรัมจะถูกปรับแบบเชิงเส้นเพื่อให้ค่า Y ที่ต่ำที่สุดเป็นศูนย์ - กำจัดปัญหาการขยับขึ้นของเบสไลน์ (baseline shift) เชิงเส้น ที่เกิดจากค่าที่แตกต่างกันของการขยายสัญญาณของดีเทคเตอร์
การลบโดยเส้นตรง (Subtraction of a straight line)	- ในแต่ละช่วงความถี่ที่เลือกไว้ เส้นตรงเส้นหนึ่งจะถูกฟิตเส้นสเปกตรัมโดยใช้วิธี partial least squares (PLS) เส้นตรงเส้นนี้จะถูกลบออกจากสเปกตรัมดังกล่าว - กำจัดปัญหาความเอียงเชิงเส้นของการขยับขึ้นของเบสไลน์
Vector normalization	- ชั้นแรกสเปกตรัมจะถูกหาค่ากลาง จากนั้นผลรวมของค่ายกกำลังสองของ Y ทั้งหมดจะถูกคำนวณ และสเปกตรัมใดๆ จะถูกหารด้วยค่ารากที่สองของผลรวมนี้ สิ่งนี้เรียกว่า Vector norm ของสเปกตรัมที่ได้จะเท่ากับ 1 เสมอ - กำจัดผลกระทบของเส้นทางผ่านเชิงแสง (optical path length) ที่แตกต่างกัน
Min-Max-Normalization	- สเปกตรัมจะถูกขยับเชิงเส้นเพื่อให้ค่า Y ที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับศูนย์ แล้วสเปกตรัมจะถูกขยายเพื่อให้ค่า Y สูงสุดเท่ากับ 2 หน่วยของการดูดซับคลื่น - กำจัดผลกระทบของเส้นทางผ่านเชิงแสง (optical path length) ที่แตกต่างกัน
Multiplicative scatter correction	- สเปกตรัมเฉลี่ยคำนวณจากทุกๆ สเปกตรัมของชุดข้อมูลคลิเบอร์ชัน แล้วแต่ละสเปกตรัม ($X(i)$) จะถูกแปรเปลี่ยนไปตามสมการ $X(i)' = u + v \cdot X(i)$ ค่า u และ v จะถูกเลือกเพื่อให้มีความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงแล้ว $X(i)'$ กับสเปกตรัมเฉลี่ยที่น้อยที่สุด - มักใช้กับการวัดแบบการสะท้อนแบบแพร่
อนุพันธ์ลำดับที่ 1 (First derivative)	- คำนวณอนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของสเปกตรัม - โดยการคำนวณอนุพันธ์ลำดับที่ 1 สัญญาณที่มีความชันจะถูกเน้นมากกว่าสัญญาณที่ค่อนข้างแบนราบ วิธีนี้ใช้เน้นลักษณะที่ชัดเจน แต่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่มีแถบการดูดซับคลื่นที่กว้าง
อนุพันธ์ลำดับที่ 2 (Second derivative)	- คำนวณอนุพันธ์ลำดับที่ 2 ของสเปกตรัม - เมื่อเทียบกับอนุพันธ์อันดับที่ 1 แม้โครงสร้างจะราบเรียบมากๆ สามารถประเมินได้นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ

ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีที่เหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับระบบที่วิเคราะห์ จากประสบการณ์แสดงให้เห็นว่าในหลายกรณี ไปด้วยเส้นตรง การนอมนัลโรเซชันสเปกตรัม หรือการทำอนุพันธ์อันดับ 1 ได้ผลดีที่สุดในการคาลิเบรชัน ในบางกรณีการใช้ 2 วิธีร่วมกันก็ทำให้ได้ผลดีที่สุด ควรทดสอบหลายๆ วิธีเปรียบเทียบกับ

2.5.5 การวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม NIR [34]

ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ การสร้างสมการที่ใช้ทำนาย (calibration) เพื่อให้ได้สมการมาตรฐานที่ใช้ในการทำนายคุณลักษณะหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทราบ และขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้น (validation) เพื่อทดสอบสมการที่ได้ในขั้นตอน calibration มีความแม่นยำหรือเหมาะสมเพียงใด เมื่อได้ผลทดสอบในระดับที่น่าเชื่อถือจึงสามารถใช้สมการที่สร้างขึ้นทำนายคุณลักษณะที่ต้องการศึกษาจากสเปกตรัมจาก NIR ที่ทำการวัดมา

2.4.5.1 การทำสมการที่ใช้ทำนาย [34]

หลังจากเก็บข้อมูลมาแล้วสามารถแบ่งได้ 3 ขั้นตอนดังนี้

ก. กำหนดตัวแปรอิสระ (independent variables) และตัวแปรตาม (dependent variable) ตัวแปรอิสระที่นำมาใช้ในการสร้างสมการ คือ สเปกตรัมที่อ่านได้จากเครื่อง NIR เช่น ค่า $\log(1/R)$ เป็นต้น ส่วนตัวแปรตาม คือค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานที่ตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ (reference laboratory method) เช่น ความชื้นของแป้ง ด้วยวิธี oven drying

ข. การสร้างสมการที่ใช้ทำนาย

การสร้างสมการนั้นสิ่งสำคัญคือ การหาตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับค่าของตัวแปรตามที่ต้องการวิเคราะห์ สามารถแบ่งได้ 2 วิธีหลัก คือ

Wavelength selection เป็นวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม เทคนิคในการคัดเลือกมีหลายรูปแบบ เช่น

1. เลือกจากความรู้อย่างชำนาญ เอกสารอ้างอิงที่บ่งบอกถึงช่วงความยาวคลื่นที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าที่วิเคราะห์

2. ใช้เทคนิคทางสถิติในการคัดเลือกความยาวคลื่นที่คาดว่าจะสัมพันธ์กัน เช่น multiple regression หรือการสร้าง correlogram ซึ่งเป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกน X (ความยาวคลื่น) และแกน Y (ค่า correlation อย่างง่ายของความสัมพันธ์ระหว่าง optical data ความยาวคลื่นกับค่าวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน) การสร้างสมการแบบ wavelength selection อาศัยหลักและวิธีการทางสถิติเป็นเครื่องมือในการสร้างสมการ ได้แก่ simple linear regression และ multiple linear regression

Full spectrum analysis เป็นวิธีการคัดเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสม (selective wavelength) จากความยาวคลื่นทั้งหมดที่มีในสเปกตรัม มาสร้างสมการ correlation ตามวิธีที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้น บางครั้งอาจเกิดความผิดพลาดถ้ามีการสร้างสมการที่ไม่ถูกต้อง ทำให้ค่าที่ทำนายต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่แท้จริง (underestimation) อันเนื่องมาจากการเกิดความคลาดเคลื่อนจากการสร้างสมการ (interference) หรือเกิดปัญหาเมื่อจำนวนตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการทำนายมีจำนวนน้อย ทำให้ได้สมการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไป ทำให้ข้อมูลไม่น่าเชื่อถือ (over fitting) การใช้ข้อมูลทั้งหมดที่มีในทุกความยาวคลื่นของสเปกตรัม (full spectrum) น่าจะเป็นวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่มีอยู่คือ การมีตัวแปรอิสระมากเกินไป การใช้วิธีทางสถิติช่วยจัดกลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แยกประเภทตัวแปรที่มีความข้องเกี่ยวกัน และสร้างตัวแปรใหม่จากตัวแปรเดิมสามารถช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ วิธีการทางสถิติที่นิยมใช้ได้แก่

Principal Component Regression (PCR) เริ่มจากการทำ principle component analysis (PCA) กับข้อมูลที่เป็นตัวแปรอิสระที่ได้มาจากข้อมูลของสเปกตรัมเพื่อสร้างองค์ประกอบหรือตัวแปรใหม่ new factors แล้วนำค่าตัวแปรใหม่ที่สร้างขึ้นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตามเพื่อสร้างสมการ calibration โดยใช้หลักการของ MLR

Principal Component Analysis (PCA) เป็นเทคนิคการลดจำนวนตัวแปรอิสระ โดยแบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่เรียกว่า factor หรือองค์ประกอบ factor ที่สร้างขึ้น อีกนัยหนึ่งคือผลรวมของค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นที่มีน้ำหนักแตกต่างกัน ค่าสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งประกอบกันเป็น factor นั้นๆ factor แรกจะถูกสร้างให้สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าสเปกตรัมได้มากที่สุด Factor ที่สองใช้อธิบายความแปรปรวนที่เหลือ ซึ่งทำให้ระหว่าง factor ไม่มีความสัมพันธ์กัน (non-co linearity) ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ เมื่อหา factor เรียบร้อยแล้ว นำ factor ที่ได้มาทำ regression กับค่าทางเคมีโดยใช้กำลังสองน้อยที่สุด ทำให้ได้ค่า chemical loading หรือ calibration coefficient

Partial Least Squares (PLS) Regression เป็นเทคนิคการลดจำนวนตัวแปรเช่นเดียวกับวิธี PCR กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเป็นอิสระจากกระบวนการทำสมการถดถอยของการทำนาย ซึ่งใน PLS ทั้งสองกระบวนการจะถูกเชื่อมโยงเข้าไว้ด้วยกัน โดยการนำค่าองค์ประกอบทางเคมีมาคิดในกระบวนการหา factor ด้วย ซึ่งได้อธิบายถึง PLS ว่าเป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบหลายตัวแปร โดยการสร้าง factor แบบสมการเชิงเส้นตรงจากข้อมูลของสเปกตรัมเริ่มต้น และนำ factor ที่ได้ไปใช้ในการสร้างสมการถดถอย โดย factor ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยวิธีสถิติ PLS ต้องสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล และเกี่ยวข้องกับการประเมินค่าทางเคมีในเวลาเดียวกัน วัตถุประสงค์ของ PLS เพื่อต้องการลดจำนวนข้อมูลสเปกตรัม เพื่อให้ได้สเปกตรัมที่มีความสำคัญกับการทำนายค่าทางเคมีที่น่าสนใจเท่านั้น เพื่อให้สามารถประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น

ใน PLS regression ข้อมูลสเปกตรัมและข้อมูลความเข้มข้นจะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นรูปแบบของเมทริกซ์และลดลงเป็น Factor จำนวนไม่มาก ซึ่งในแบบจำลองเคโมเมตริกจะเรียก factor ว่า rank ซึ่งจำนวน rank มีความสำคัญกับคุณภาพในการวิเคราะห์ การเลือกจำนวน factor ที่น้อยเกินไป (under fitter) จะไม่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงในข้อมูลสเปกตรัมและความเข้มข้นระหว่างสองชุดข้อมูลและผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองนี้จะไม่เพียงพอ และถ้าเลือก factor มากเกินไป (over fitter) วิธีนี้ทำให้ข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้องกับตัวอย่างจะถูกรวมอยู่ในแบบจำลอง นอกจากนี้ การเลือก factor ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองต้องพิจารณาร่วมกับค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาสร้างสมการ

2.4.5.2 การทำ Validation [34]

เมื่อทำการสร้างสมการที่ใช้ทำนายแล้ว ต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพของสมการก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง การทดสอบสมการมี 2 วิธี คือ

Full cross validation เป็นการทดสอบสมการภายในความหมายคือ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบ เป็นตัวอย่างชุดมาตรฐานทั้งหมด ที่ใช้สร้างสมการประเมินค่าทางเคมีนั่นเอง โดยมีขั้นตอนดังนี้ ด้านการค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ก. ตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐาน
- ข. ใช้ตัวอย่างมาตรฐานที่เหลือสร้างสมการ
- ค. นำสมการที่สร้างได้ประเมินค่าทางเคมีของตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ที่ตัดออก
- ง. ใส่ตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 กลับคืนเข้าไป
- จ. ตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 2 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐาน
- ฉ. ทำขั้นตอนซ้ำข้างต้น จนครบทุกตัวอย่าง

จากนั้นหาค่า Root Mean Square Error of cross validation (RMSECV)

Prediction testing หรือ การทดสอบผลการประเมิน วิธีนี้ทดสอบสมการแบบภายนอก โดยเตรียมชุดตัวอย่างใหม่มาทำการวิเคราะห์ในสภาวะการทดลอง เช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐาน เรียกชุดตัวอย่างที่นำมาทดสอบนี้ว่า ชุดทดสอบ (testing set) ตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวในการประมาณค่าตัวแปรตาม สิ่งที่ต้องระวังคือ ปริมาณค่าทางเคมีที่ใช้ทดสอบต้องอยู่ในช่วงมาตรฐาน หลังจากได้สเปกตรัมจากชุดทดสอบนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณทางเคมีจากสมการ จากนั้นคูณผลการคำนวณที่ได้จากค่าทางสถิติ ซึ่งค่าทางสถิติที่พิจารณาคือ ค่า bias ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธี NIR กับค่าที่ได้จากวิธีมาตรฐาน และค่า Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP) หรือค่า Standard error of prediction (SEP)

2.5.6 การประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของแบบจำลองโดยค่าทางสถิติ [35]

การทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายสมบัติที่ต้องการวัดทำได้โดยวิธีทางสถิติโดยคำนวณค่าที่จำเป็นในการประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของแบบจำลองได้แก่

2.5.6.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation, R)

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) แสดงระดับซึ่งข้อมูล 2 ชุด (ข้อมูลตัวเลข X และ Y ในที่นี้ข้อมูล X คือข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิง ข้อมูล Y คือข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี) สอดคล้องหรือมีสัมพันธ์ซึ่งกันและกันความสอดคล้องที่สมบูรณ์จะไม่มี ความแตกต่างกันเลยระหว่าง 2 ชุดข้อมูลผลของค่า R จะเท่ากับ 1.00 ในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ และ X และ Y อาจจะมี ความสัมพันธ์เป็นเชิงบวกหรือลบก็ได้

2.5.6.2 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2)

เป็นค่าที่แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดยความแปรปรวนในข้อมูล Y ค่าของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าระหว่าง 0.00-1.00 และเป็นบวกเสมอ เช่น ถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ = 0.97 แล้วค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ = 0.941 หมายความว่าร้อยละ 94.1 ของความแปรปรวนในข้อมูล X และร้อยละ 5.9 ของความแปรปรวนในข้อมูล X เกิดขึ้นจากตัวแปรอื่นเช่นการเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดลองอ้างอิง และอื่นๆ ค่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นบวกเสมอโดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ในทางปฏิบัติค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ให้ข้อมูลมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และใช้กันมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ การแปลความหมายของค่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ แสดงดังตารางที่ 2.3

2.5.6.3 ความผิดพลาดมาตรฐานของการจำลอง (Standard error of calibration, SEC)

SEC คือ ค่า SD ของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงในชุดตัวอย่างที่ใช้สร้างแบบจำลอง (calibration set) ถ้าใช้ MLR ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่า R และ SEC จะดีขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรต้นมากขึ้น สิ่งนี้เรียกว่า over-fitting ของข้อมูล ตามหลักค่า SEP ควรจะสูงกว่า SEC เสมอ

ตารางที่ 2.3 การแปลความหมายของค่า R และ R^2 [35]

R	R^2	ความหมาย
ถึง ± 0.5	ถึง 0.25	ไม่สามารถใช้ใน NIR
$\pm 0.51-0.70$	0.26-0.49	เป็นความสัมพันธ์ที่แย่มาก ควรหาเหตุผล
$\pm 0.71-0.80$	0.50-0.64	เหมาะสำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) อย่างหยาบๆ
$\pm 0.81-0.90$	0.66-0.81	เหมาะสำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่า อย่างหยาบ ๆ
$\pm 0.91-0.95$	0.83-0.90	ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย
$\pm 0.96-0.98$	0.92-0.96	ใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
$\pm 0.99+$	0.98+	ดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้

2.5.6.4 ความผิดพลาดมาตรฐานของการทำ Cross-validation (Standard error of cross-validation, SECV)

Cross-validation สามารถใช้ตัวอย่างชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อการทำการพิสูจน์แบบจำลอง (validation) สิ่งนี้ทำโดยชักตัวอย่างออกหนึ่งตัวอย่างหรือกลุ่มของหลายตัวอย่างจากชุดสร้างแบบจำลองและสร้างแบบจำลองด้วยตัวอย่างที่เหลืออยู่แล้วทำนายตัวอย่างที่ถูกกำจัดออกไปและบันทึกค่าความผิดพลาดแล้วนำตัวอย่างที่ถูกกำจัดออกไปนั้นกลับมาแล้วชักตัวอย่างอื่นออกไปและทำซ้ำกระบวนการจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองและทำนาย จะไม่มีตัวอย่างที่ถูกทำนายถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองซึ่งได้ใช้ในการทำนายถ้าเอาออกเพียงทีละ 1 ตัวอย่างจะเรียกว่า "Full" หรือ "One-out" cross-validation ถ้านำชุดตัวอย่าง (จำนวนหลายตัวอย่าง) ออกจะเรียกว่า "Segmented" cross-validation ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุดสร้างแบบจำลองคือ SECV วิธีพิสูจน์นี้เหมาะที่จะใช้กับข้อมูลที่มีจำนวนตัวอย่างน้อยๆ เช่น น้อยกว่า 100 ตัวอย่าง

2.5.6.5 ความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนาย (Standard error of prediction, SEP หรือ SEV)

SEP ย่อมาจาก standard error of prediction หรือ standard error of performance แสดงสมรรถนะของการทำนาย บางครั้งใช้แทน SEV (Standard error of validation) SEP เป็นค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงซึ่งไม่เหมือนกับ RMSEP (root mean square of the prediction) ซึ่งจะอธิบายต่อไปโดย SEP ไม่เกี่ยวข้องกับ Bias ค่า SEP คำนวณจากผลการทำนายของชุดตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองชุดตัวอย่างนี้ เรียกว่า ชุดทำนาย (prediction set)

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.6.6 ค่าอคติ (Bias)

เมื่อทำนายค่าตัวแปรที่ต้องการของข้อมูลในชุดตัวอย่างทดสอบแบบจำลอง (validation set) ค่า bias หมายถึงความแตกต่างระหว่างค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงและค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์ อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและเป็นการวัดความแม่นยำโดยรวมของแบบจำลอง (calibration model) ในโลกความเป็นจริงของทางการค้าและอุตสาหกรรม bias เป็นหนึ่งในสิ่งที่สำคัญมาก ในทางสถิติ bias สามารถเกิดขึ้นได้แม้เมื่อค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และ SEP ที่แสดงว่าแบบจำลอง นั้นดีเยี่ยม

2.5.6.7 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของการทำนาย (Root mean square of the prediction, RMSEP)

RMSEP เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพของแบบจำลอง การคำนวณค่า RMSEP ได้รวมค่า bias ไว้ด้วย ถ้าไม่มีค่า bias ค่า SEP และ RMSEP จะมีค่าเท่ากัน มีการใช้ RMSEP มากกว่า SEP แต่การรายงานผลโดยใช้ SEP กับ bias แสดงถึงความแม่นยำของการทำนายได้ดี เนื่องจาก RMSEP เกี่ยวข้องกับ bias แต่ไม่ได้แสดงขนาดและเครื่องหมาย

2.5.6.8 อัตราส่วนระหว่าง SEP กับ SD (Ratio of SEP to the SD, RPD)

RPD ย่อมาจาก Ratio of (Standard error of) Prediction (Validation) to (Standard) Deviation แต่เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) กับอัตราส่วนของค่าความผิดพลาดมาตรฐานการทำนาย (SEP) ของข้อมูลของค่าอ้างอิงของชุดทำนาย ค่า SEP ควรต่ำกว่า SD มากๆซึ่งอัตราส่วนควรเท่ากับ 5 หรือมากกว่า บางกรณีตัวอย่างมีความสม่ำเสมอมากค่า SD จึงไม่สูง ซึ่ง RPD อาจจะไม่สูง ดังนั้น RPD เท่ากับ 2.5-3.0 ก็อาจแสดงถึงการวิเคราะห์ที่แม่นยำถ้า SD มีค่าเพียง 0.4-0.5

2.5.6.9 อัตราส่วนระหว่าง SEP กับช่วงข้อมูล (Ratio of the SEP to the range, RER)

RER คือ อัตราส่วนของช่วงกว้างของข้อมูลอ้างอิงของชุดทำนาย ต่อ SEP ค่า RER ควรจะสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตารางที่ 2.5 แสดงการอธิบายผลของค่า RPD และ RER

ตารางที่ 2.4 การอธิบายผลของค่า RPD และ RER [35]

RPD	RER	ความหมาย	การประยุกต์ใช้
0.0-2.3	ถึง 6	ไม่ดีมาก	ไม่แนะนำ
2.4-3.0	7-12	ไม่ดี	ใช้คัดเลือกแบ่งกลุ่มแบบหยาบ
3.1-4.9	13-20	พอใช้	ใช้คัดเลือกแบ่งกลุ่มได้
5.0-6.4	21-30	ดี	ใช้ควบคุมคุณภาพได้
6.5-8.0	31-40	ดีมาก	ใช้ควบคุมกระบวนการได้
8.1+	41+	ดีเยี่ยม	ใช้ได้ทุกการประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ng *et al.* [1] ได้ใช้เทคนิค NIRS ชนิดส่องผ่านที่ความยาวคลื่นในช่วง 350-2,500 นาโนเมตร ตรวจวัดน้ำมันถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการเติมไฮโดรเจนบางส่วนเพื่อช่วยให้ชะลอการหืน และทดสอบการทอดที่อุณหภูมิการทอด 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน โดยเติมน้ำมันร้อยละ 2 ของน้ำหนักลงไปน้ำมันในทุก ๆ ชั่วโมงที่ทอด จำนวน 103 ตัวอย่าง ตรวจวัดคุณภาพน้ำมันทอดด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ สารประกอบมีซัวหรือสารโพลาร์ และกรดไขมันอิสระ สร้างสมการที่ใช้ทำนายด้วยวิธีทางสถิติระหว่างวิธี Stepwise multiple linear regression (FSMLR) และ Partial Least Square (PLS) Regression การทดสอบประสิทธิภาพของสมการตัวอย่างใช้ตัวอย่างจำนวน 28 ตัวอย่าง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สมการทำนายด้วยวิธี PLS ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุดมากกว่าวิธี FSMLR โดยสมการ PLS ให้ค่าความสัมพันธ์ (R) ที่ดีที่สุดระหว่างข้อมูลที่ทำนายด้วย NIRS และข้อมูลที่วัดด้วยวิธีมาตรฐานสำหรับสารประกอบมีซัวและกรดไขมันอิสระในน้ำมันเท่ากับ 0.983 และเท่ากับ 0.943 ตามลำดับ สำหรับสมการ FSMLR ให้ค่าความสัมพันธ์ (R) ที่ดีที่สุดระหว่างข้อมูลที่ทำนายด้วย NIRS และข้อมูลที่วัดด้วยวิธีมาตรฐานสำหรับสารประกอบมีซัวและกรดไขมันอิสระในน้ำมันเท่ากับ 0.999 และเท่ากับ 0.983 ตามลำดับ

Garde *et al.* [9] ได้ศึกษาการวัดอย่างรวดเร็วและไม่ทำลายตัวอย่างด้วยเทคนิค NIRS ในน้ำมันถั่วเหลืองที่มีกรดลิโนเลนิกเป็นส่วนประกอบซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว แตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ltra-low-linolenic acid oil (ULL), low linolenic oil (LL) และ Control (Ctrl) ซึ่งมีปริมาณกรดลิโนเลนิกผสมอยู่ในสัดส่วนร้อยละ 1.5 2.6 และ 5.3 ทดสอบทอดเฟรนช์ฟรายเป็นเวลา 23 วัน และน้ำมันที่ใช้มีการกรองและเติมน้ำมันให้ถึงระดับการทอดแบบท่วมด้วยน้ำมันใหม่ในทุก ๆ วัน วัดสารประกอบมีซัวหรือสารโพลาร์ และค่าคอนจูเกตไอดิน (CDA) ตามดัชนีการชั้วตของน้ำมันที่เสื่อมคุณภาพ น้ำมันถูกสแกนด้วย NIRS ชนิดส่องผ่านที่ความยาวคลื่นในช่วง 350-2,500 นาโนเมตร สร้างสมการสำหรับทำนายด้วยวิธี Partial Least Square (PLS) Regression และทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของสมการด้วยวิธีนี้ทดสอบสมการแบบ one-out cross-validation สมการที่ใช้ทำนายได้พัฒนาขึ้นเพื่อหาค่าเชิงปริมาณของกรดไขมันอิสระ สารประกอบมีซัว และค่าคอนจูเกตไอดิน ด้วย NIRS ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการวัดด้วยวิธีมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 0.973 สำหรับ FFA 0.984 สำหรับ TPM และ 0.902 สำหรับ CDANIRS

Kazemi *et al.* [13] ได้ประเมินการเสื่อมคุณภาพน้ำมันด้วย VIS/NIR ในน้ำมันคาโนลาที่ผ่านการเติมไฮโดรเจนและไม่เติมไฮโดรเจน โดยผสมน้ำมันทั้ง 2 ชนิด ระหว่างน้ำมันที่ผ่านการเติมไฮโดรเจนและไม่เติมไฮโดรเจนในสัดส่วน (0 ต่อ 100, 40 ต่อ 60 และ 80 ต่อ 20) เก็บตัวอย่างจากน้ำมันที่ใช้ทอดอาหารภายในครัวเรือนที่ทอดด้วยอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 ชั่วโมงต่อวัน รวมเวลาการทอด 72 ชั่วโมง ตรวจวัดค่าการเสื่อมคุณภาพทางเคมี ได้แก่ สารโพลาร์ทั้งหมด ค่าความเป็นกรด และทางกายภาพ คือ ความหนืด สแกนตัวอย่างด้วย NIRS ในช่วงความยาวคลื่น 400-1,750 นาโนเมตร ผลการทดลองพบว่าสมการทำนายที่สร้างด้วยกระบวนการวิเคราะห์ทางสถิติ Partial Least Squares (PLS) Regression ระหว่างสเปกตรัมและข้อมูลการวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพ ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) การทวนสอบของสมการ ค่าความเป็นกรด ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมด และความหนืดเท่ากับ 0.95, 0.98 และ 0.91 ตามลำดับ

Mailer [39] ได้ประเมินคุณภาพเบื้องต้นของน้ำมันมะกอกจากประเทศออสเตรเลียเพื่อแบ่งระดับชั้นคุณภาพ โดยตรวจวัดปัจจัยคุณภาพของน้ำมันมะกอกได้แก่ กรดไขมันอิสระ ค่าเพอร์ออกไซด์ และค่าความชื้น ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ สารประกอบพอลิฟีนอล ระยะเวลาการเกิดออกซิเดชัน คลอโรฟิลล์ และกรดสำคัญในน้ำมัน ได้แก่ ปาล์มติก, ปาล์มโทเลอิก, สเตียริก, โอเลอิก, ลิโนเลอิก และลิโนเลนิก ใช้เทคนิค NIRS ในรูปแบบการสะท้อนช่วงความยาวคลื่น 400–2,500 นาโนเมตร สร้างแบบจำลองแบบ Partial least squares (PLS) สำหรับแต่ละปัจจัยคุณภาพ (กรดไขมันอิสระ ค่าเพอร์ออกไซด์ สารประกอบพอลิฟีนอล ระยะเวลาการเกิดออกซิเดชัน โคลโรฟิลล์ และกรดสำคัญในน้ำมัน ได้แก่ ปาล์มติก, ปาล์มโทเลอิก, สเตียริก, โอเลอิก, ลิโนเลอิก และลิโนเลนิก ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.97, 0.92, 0.89, 0.88, 0.98, 0.91, 0.87, 0.86, 0.99, 1.0, 0.85 และ 0.98 ตามลำดับ และค่าความผิดพลาดมาตรฐานของการทำ Cross-validation SECV เท่ากับ 0.07, 1.34, 58.67, 0.97, 0.51, 0.48, 0.12, 0.26, 0.47, 0.23 และ 0.06 ตามลำดับ

Kuligowski *et al.* [40] ได้วัดโดยตรงของการเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ (PTG) ในการทอดแบบน้ำมันท่วมด้วยเทคนิค NIRS ในน้ำมันพืชที่ถูกให้ความร้อนเป็นเวลาหลายชั่วโมง ซึ่งเป็นน้ำมันที่ใช้ประกอบอาหารและไม่ประกอบอาหารทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ น้ำมันมะกอก น้ำมันเมล็ดทานตะวัน น้ำมันข้าวโพด และน้ำมันจากเมล็ดองุ่น และมีค่าร้อยละของ PTG โดยน้ำหนัก (%w/w) ของตัวอย่างเท่ากับ 0-38.92, 0-39.67, 0-51.94 และ 0-57.66 ตามลำดับ สร้างแบบจำลองแบบ Partial least squares (PLS) ผลการทดลองพบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.890, 0.981, 0.993 และ 0.988 และค่า bias เท่ากับ -0.13, 3.60, -3.31 และ 1.63 ตามลำดับ

Man and Moh [41] วัดค่ากรดไขมันอิสระด้วยเทคนิค NIRS โดยวิธีการสะท้อน ในน้ำมันปาล์มดิบ และในน้ำมันปาล์มกลั่นให้บริสุทธิ์ (refined bleached and deodorized) 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันปาล์มกลั่นให้บริสุทธิ์โอเลอีน และน้ำมันปาล์มกลั่นให้บริสุทธิ์ สร้างแบบจำลองแบบการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน (stepwise multiple regression analysis) โดยเลือกช่วงพีกสูงสุดของคลื่นการดูดซับพันธะระหว่าง C=O ที่ย่าน 1850-2050 nm ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.994 สำหรับน้ำมันปาล์มดิบ 0.961 สำหรับน้ำมันปาล์มกลั่นให้บริสุทธิ์โอเลอีน และ 0.971 สำหรับน้ำมันปาล์มกลั่นให้บริสุทธิ์

Basri *et al.* [42] ได้แยกประเภทและหาปริมาณสิ่งปลอมปนในน้ำมันปาล์มด้วยเทคนิค NIRS ชนิดเครื่องพกพา ซึ่งโดยทั่วไปน้ำมันปาล์มจะถูกปลอมปนด้วยน้ำมันหมู การสแกนถูกดำเนินการ 2 วิธี ที่ความยาวคลื่นแตกต่างกัน ใช้วิธีการสแกนด้วยวิธีสะท้อนแบบแพร่และแบบวิธีส่องผ่าน น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และน้ำมันปาล์มที่มีการปลอมปนถูกคัดแยกประเภทโดยใช้วิธี soft independent modeling by class analogy (SIMCA) สมการมีความแม่นยำมากกว่าร้อยละ 95 และวิธี partial least squares discriminant analysis (PLS) ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9987 สำหรับการสะท้อนแบบแพร่และ 0.9994 สำหรับวิธีส่องผ่าน ผลของการแยกประเภทและหาปริมาณน้ำมันหมูที่ปลอมปน สมการที่ได้จากการสแกนด้วยวิธีส่องผ่านให้ผลการทำนายแม่นยำกว่าการสแกนด้วยวิธีสะท้อนแบบแพร่

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ

3.1.1 ตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ

ใช้น้ำมัน 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันรำข้าวยี่ห้อ คิง (ผลิตจากบริษัท น้ำมันบริโภคไทย จำกัด กรุงเทพฯ) และน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธียี่ห้อ เนเจอร์ไรฟ์ (ผลิตจากบริษัท Good Me จำกัด) ตัวอย่างอาหารที่ใช้ทอดประกอบด้วย

ก. รากบัว (นำเข้าจากประเทศจีน)

รากบัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ตัดเป็นแผ่นบาง ความหนา 0.40 ± 0.05 เซนติเมตร นำไปผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็ง และเก็บรักษาไว้ในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาทอดตัวอย่างก่อนทอดมีอุณหภูมิเท่ากับ -18 องศาเซลเซียส ทอดด้วยน้ำมันรำข้าวโดยใช้อัตราส่วนรากบัวแช่เยือกแข็ง 200 กรัมต่อน้ำมันทอด 3,000 มิลลิลิตร

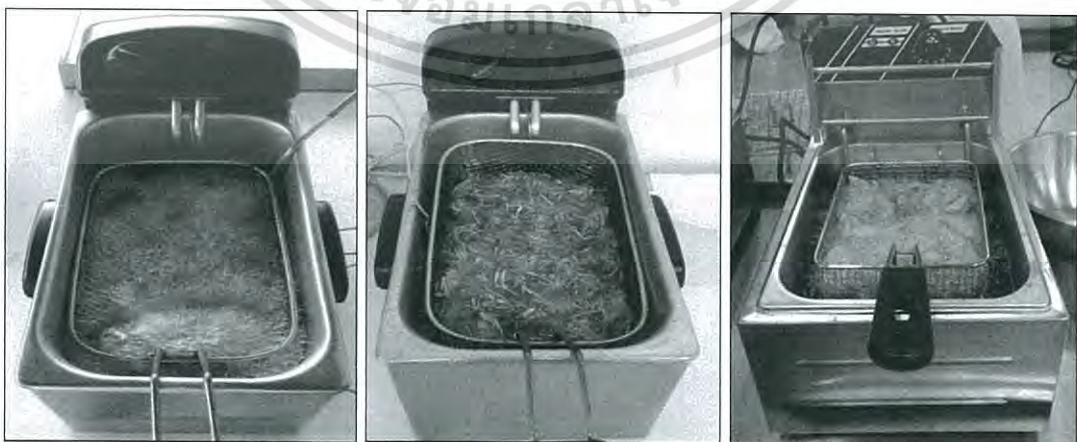
ข. คางกุ้ง (บริษัท ไทยโรแอสตฟรอสเซินฟู้ด จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร)

ขนาดความหนาเฉลี่ย 2 เซนติเมตร ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็ง เก็บรักษาไว้ในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ตัวอย่างก่อนทอดมีอุณหภูมิเท่ากับ -18 องศาเซลเซียส คางกุ้งแช่เยือกแข็งก่อนทอดนำมาคลุกแป้งทอดกรอบในอัตราส่วนคางกุ้งแช่เยือกแข็ง 9 ส่วน ต่อแป้งทอดกรอบ 1 ส่วน ทอดด้วยน้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีโดยใช้อัตราส่วนคางกุ้งคลุกแป้งแล้ว 250 กรัมต่อน้ำมันทอด 3,000 มิลลิลิตร

ค. หนังกุ้ง (บริษัท สหฟาร์ม จำกัด กรุงเทพฯ)

นำหนังกุ้งมาตัดแต่งโดยเอาส่วนเนื้อและไขมันออก ให้มีความหนาเฉลี่ย 0.5 เซนติเมตร อุณหภูมิหนังกุ้งก่อนทอดเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ทอดด้วยน้ำมันรำข้าวโดยใช้อัตราส่วนหนังกุ้ง 400 กรัมต่อน้ำมัน 3,000 มิลลิลิตร

ตัวอย่างอาหารทั้งหมดใช้วิธีการทอดแบบน้ำมันท่วม กำหนดอุณหภูมิที่ใช้ทอดระหว่าง 160 – 200 องศาเซลเซียส ทอดด้วยอุปกรณ์หม้อทอดไฟฟ้าที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ เก็บตัวอย่างน้ำมันก่อนทอดและน้ำมันที่ผ่านกระบวนการทอดซ้ำทุก ๆ 30 นาที จำนวน 50 ตัวอย่างต่อน้ำมัน 1 ชนิด



ภาพที่ 3.1 วิธีการทอดอาหารในห้องปฏิบัติการเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม

ใช้ตัวอย่างน้ำมันจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธี ตามหัวข้อ 3.1.1 และน้ำมันปาล์มโอเลอินี่หือ หยก [จากบริษัท ล้ำสูง (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)] ตัวอย่างอาหารที่ทอดประกอบด้วย

ก. รากบัว (นำเข้าจากประเทศจีน)

รากบัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ตัดเป็นแผ่นบางแช่เยือกแข็ง ความหนา 0.40 ± 0.05 เซนติเมตร เมื่อผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งแล้วนำไปเก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ตัวอย่างก่อนทอดมีอุณหภูมิเท่ากับ -18 องศาเซลเซียส ทอดแบบน้ำมันท่วมด้วยน้ำมันรำข้าวโดยใช้อัตราส่วนรากบัวแช่เยือกแข็ง 3,500 กรัมต่อน้ำมันทอด 18.5 ลิตร กำหนดอุณหภูมิทอดระหว่าง $160-180$ องศาเซลเซียส โดยใช้กระทะทอดที่ทำจากวัสดุทองเหลือง

ข. คางกุ้ง (บริษัท ไทยรอแยลฟรอสเซินฟู้ด จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร)

คางกุ้งมีใช้ขนาดความหนาเฉลี่ย 2 เซนติเมตร ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็ง เก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ตัวอย่างก่อนทอดมีอุณหภูมิเท่ากับ -18 องศาเซลเซียส คางกุ้งแช่เยือกแข็งถูกนำมาคลุกแป้งทอดกรอบในอัตราส่วนคางกุ้งแช่เยือกแข็ง ร้อยละ 80.52 ต่อแป้งทอดกรอบร้อยละ 12.08 ของน้ำหนักทั้งหมด ทอดด้วยน้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีโดยใช้อัตราส่วนคางกุ้งคลุกแป้งแล้ว 6,700 กรัมต่อน้ำมันทอด 18.5 ลิตร

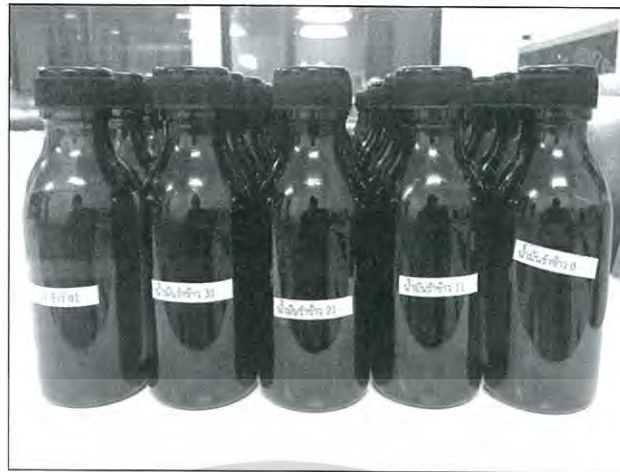
เก็บตัวอย่างน้ำมันเริ่มต้นและน้ำมันที่ผ่านกระบวนการทอดซ้ำทุก ๆ 30 นาที จำนวน 50 ตัวอย่างต่อน้ำมัน 1 ชนิด โดยในกระบวนการทอดอาหารในระดับอุตสาหกรรมมีการเติมน้ำมันใหม่ในระหว่างการทอดอาหารเพื่อให้สัดส่วนของน้ำมันต่ออาหารคงที่เสมอ



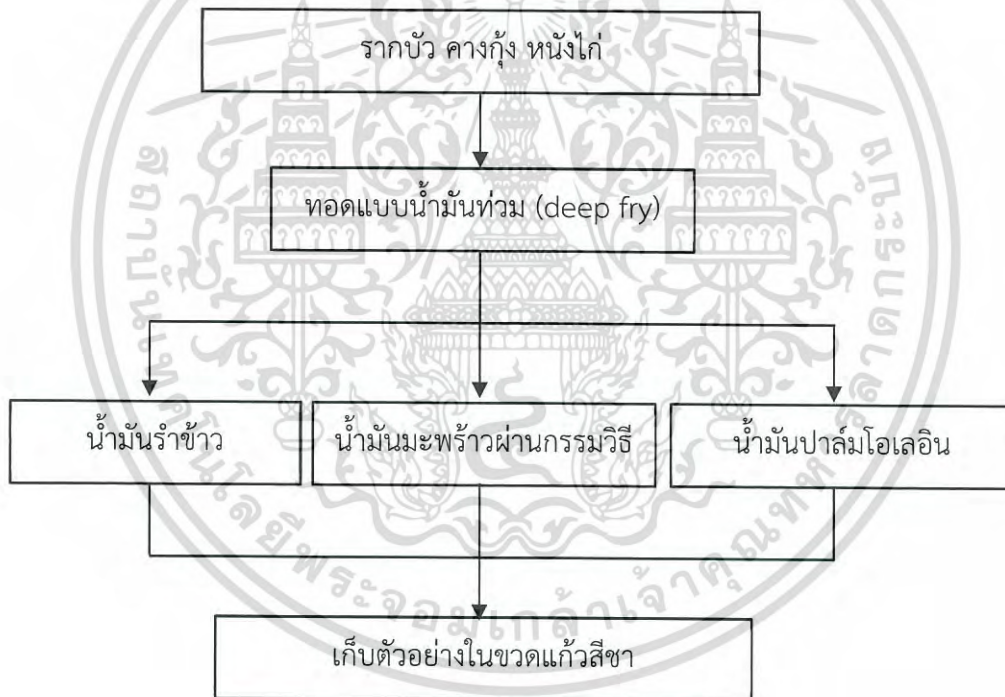
ภาพที่ 3.2 วิธีการทอดอาหารในระดับอุตสาหกรรมเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ

เก็บตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำใส่ในขวดแก้วสีชาที่มีฝาปิดสนิทปริมาตร 100 มิลลิลิตร แสดงดังในภาพที่ 3.3 เก็บรักษาตัวอย่างในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นป้องกันแสงที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและหยุดปฏิกิริยาทางเคมีของตัวอย่าง ก่อนนำตัวอย่างมาตรวจวัดและประเมินคุณภาพ กระบวนการเตรียมตัวอย่างแสดงดังในภาพที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 การเก็บตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำในขวดแก้วสีชา



ภาพที่ 3.4 ผังการเตรียมตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ

3.2 การตรวจวัดวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ

3.2.1 การสแกนด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด

นำตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำมาสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) แสดงดังในภาพที่ 3.5 ซึ่งการสแกนมีลักษณะการวัดแบบวิธีส่องผ่าน (Transmittance) ที่ช่วงคลื่นระหว่าง $12500 - 3600 \text{ cm}^{-1}$ ($800 - 2778 \text{ nm}$) จำนวนสแกนเพื่อหาสเปกตรัมเฉลี่ยเท่ากับ เอกส 64 สเปกตรัม ตรวจวัดทุก 16 cm^{-1} ก่อนการสแกนตัวอย่างควรเขย่าขวดตัวอย่างเบา ๆ เพื่อให้ไขมันไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเนื้อเดียวกัน เทตัวอย่างประมาณ 5-10 มิลลิลิตร ใส่ในควอตซ์ (quartz) ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และสูง 47 มิลลิเมตร วางบนหน้าจอสำหรับสแกนตัวอย่าง (วงกลมประพในภาพที่ 3.5) ดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.5 การสแกนตัวอย่างด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

3.2.2 การตรวจวัดคุณภาพทางเคมีของน้ำมันทอดซ้ำ

3.2.2.1 ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมด (total polar material; %TPM)

วัดค่าปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดในตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วยอุปกรณ์ Cooking Oil Tester (รุ่น Testo 270 ประเทศ Germany) ก่อนวัดตัวอย่างทำการสอบเทียบอุปกรณ์ด้วยน้ำมันมาตรฐานที่มีปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 3.5 ± 0.5 (%TPM) ก่อนวัดตัวอย่างต้องเพิ่มอุณหภูมิตัวอย่างให้สูงกว่า 50 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ทำการวัดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ แสดงการวัดดังในภาพที่ 3.6



ก

ข

ภาพที่ 3.6 การเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ (ก) วัดค่าปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดด้วยอุปกรณ์ Cooking Oil Tester (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.2 กรดไขมันอิสระ (free fatty acid; FFA) โดยวิธี AOCS Official Method Ca 5a-40 (2000)

ก. ชั่งน้ำมันให้ทราบน้ำหนักแน่นอน (อยู่ในช่วง 1-10 กรัม) ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

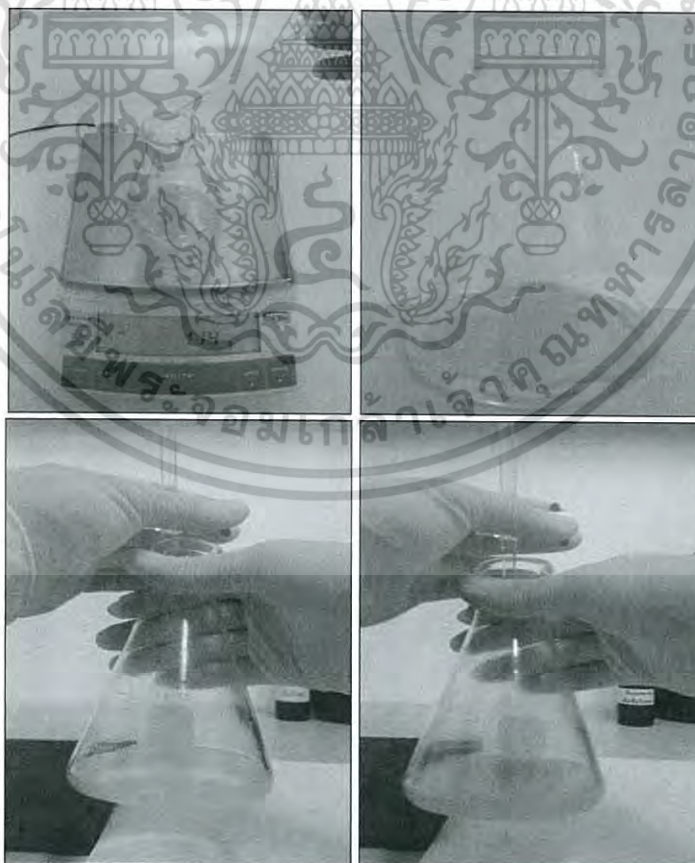
ข. เตรียมสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ให้เป็นกลางโดยการเติมฟีนอล์ฟทาลีนเข้มข้นร้อยละ 1 จำนวน 5 หยด และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล หยดต่างทีละหยดพร้อมทั้งเขย่าจนได้สารละลายเป็นสีชมพูถาวร

ค. เติมเอทิลแอลกอฮอล์ที่เป็นกลาง ลงในตัวอย่างเขย่าอย่างแรงให้ตัวอย่างละลายในแอลกอฮอล์ ถ้าละลายไม่ดีให้อุ่นในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิระหว่าง 60-65 องศาเซลเซียส

ง. ไทเทรตสารละลายตัวอย่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 หรือ 0.05 หรือ 0.01 นอร์มอล ขณะไทเทรตต้องเขย่าตัวอย่างอย่างแรงจนกระทั่งได้สารละลายสีชมพูคงที่อยู่ที่ประมาณ 1 นาที ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

จ. คำนวณหาปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปกรดโอเลอิกจากสูตร

$$\%FFA = \frac{\text{ปริมาตรสารละลายต่างที่ใช้ (ml)} \times \text{ความเข้มข้นสารละลายต่าง (N)} \times 28.2}{\text{น้ำหนักตัวอย่างน้ำมัน (g)}}$$



ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการไทเทรตเพื่อหาปริมาณกรดไขมันอิสระในตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.3 เพอร์ออกไซด์ (peroxide value; P.V.) โดยวิธี AOCS Official Method Ca 8-53 (2002)

ก. ชั่งน้ำมันให้ได้น้ำหนักแน่นอน (อยู่ในช่วง 1-5 กรัม) ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

ข. ใส่โพแทสเซียมลงไปประมาณ 1 กรัม ในตัวอย่างไขมันและใน Blank

ค. เติมตัวทำละลายผสม ปริมาณ 20 มิลลิลิตร (กรดแอสติก 3 ส่วน และคลอโรฟอร์ม 2 ส่วน โดยปริมาตรต่อปริมาตร) ในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุตัวอย่างน้ำมัน ต้มในน้ำเดือดนานประมาณ 30 วินาที

ง. เตรียมสารละลายโพแทสเซียมปริมาณ 20 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร

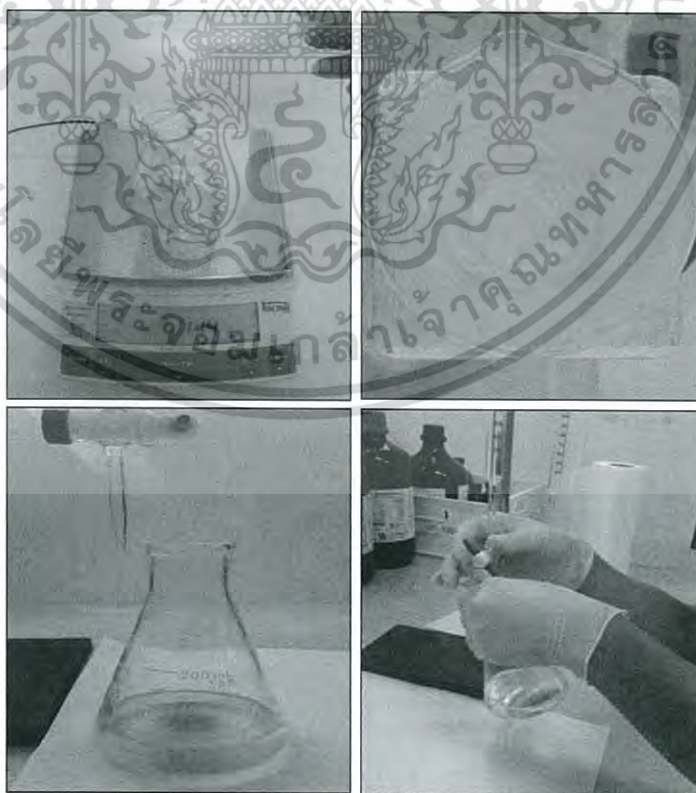
จ. เหน้้ำมันที่ต้มแล้วในหลอดแก้วลงในขวดวัดปริมาตร ที่มีสารละลายโพแทสเซียมอยู่ ล้างด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง ๆ ละ 15 และ 10 มิลลิลิตร

ฉ. ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 หรือ 0.01 หรือ 0.001 นอร์มอล ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

ช. คำนวณค่าเพอร์ออกไซด์ จากสูตร

$$P.V. = \frac{(S-B) \text{ (ml)} \times \text{โมลาลิตีของ } Na_2S_2O_3 \text{ solution (ml)} \times 1000}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}}$$

เมื่อ S = ปริมาณ $Na_2S_2O_3$ solution ที่ใช้กับตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ
M = ปริมาณ $Na_2S_2O_3$ solution ที่ใช้กับ Blank



ภาพที่ 3.8 ขั้นตอนการไทเทรตเพื่อหาค่าเพอร์ออกไซด์ในน้ำมันทอดซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างแบบจำลอง

3.3.1 ฮีสโทแกรมค่าทางเคมีของน้ำมันทอดซ้ำ

การทำฮีสโทแกรมข้อมูลค่าทางเคมีของน้ำมันทอดซ้ำ เพื่อแจกแจงความถี่ของข้อมูล ว่าข้อมูลในแต่ละกลุ่มมีมากน้อยเพียงใดเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลกลุ่มอื่น ๆ โดยนำข้อมูลของค่าอ้างอิงซึ่งเป็นค่าทางเคมีของน้ำมันทอดซ้ำ แจกแจงความถี่แล้วแสดงเป็นกราฟฮีสโทแกรมโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel 2010 สำหรับข้อมูลค่าอ้างอิงที่คืนนั้นเมื่อนำมาแจกแจงค่าความถี่ของข้อมูลแล้วค่าความถี่ในแต่ละช่วงชั้นของข้อมูลไม่ควรแตกต่างกันมาก เนื่องจากจะได้การกระจายของข้อมูลที่ดี

3.3.2 การสร้างแบบจำลอง

สร้างแบบจำลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีบ่งชี้คุณภาพน้ำมันทอดซ้ำที่ตรวจวัดด้วยวิธีมาตรฐาน ได้แก่ ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมด กรดไขมันอิสระ และค่าเพอร์ออกไซด์ กับข้อมูลเชิงแสง (optical data) โดยวิธีทาง chemometric แบบ partial least squares regression ใช้โปรแกรม OPUS version 7.0.129 โดยใช้สเปกตรัมดั้งเดิมหรือสเปกตรัมที่ผ่านการจัดการทางคณิตศาสตร์เบื้องต้น ทำการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองโดยวิธีการพิสูจน์แบบไขว้สำหรับการสร้างแบบจำลองที่ตัวอย่างน้อยกว่า 100 ตัวอย่าง และวิธีการพิสูจน์แบบ test set validation สำหรับการสร้างแบบจำลองที่ตัวอย่างมากกว่า 100 ตัวอย่าง แบบจำลองจะถูกเลือกบนพื้นฐานของค่า coefficient of determination (R^2) ที่สูงที่สุด มีค่า RMSECV และค่า bias ต่ำที่สุด

3.3.3 สถิติที่ใช้ในการประเมินค่าจากการสร้างแบบจำลอง

3.3.3.1 ค่าเฉลี่ย (Mean)

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N}$$

3.3.3.2 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน [Standard deviation (SD)]

$$SD_x = \left[\left(\sum X^2 \right) - \frac{(\sum X)^2}{N} \right]^{1/2}$$

3.3.3.3 ค่าอคติ (Bias)

$$\text{Bias} = \frac{\sum X}{N} - \frac{\sum Y}{N}$$

เมื่อ X คือ ค่าอ้างอิง

Y คือ ค่าที่ได้จากการทำนายโดย NIRS

3.3.3.4 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (Coefficient of correlation, R)

$$R = \frac{\sum(X \times Y) - \left[\left(\frac{\sum X \times Y}{N} \right) \right]}{\left[\sum X^2 - \left(\frac{(\sum X)^2}{N} \right) \right] \times \left[\sum Y^2 - \left(\frac{(\sum Y)^2}{N} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}$$

เมื่อ X คือ ค่าอ้างอิง

Y คือ ค่าที่ได้จากการทำนายโดย NIRS

3.3.3.5 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of correlation, R²)

$$R^2 = \left[\frac{\sum(X \times Y) - \left[\left(\frac{\sum X \times Y}{N} \right) \right]}{\left[\sum X^2 - \left(\frac{(\sum X)^2}{N} \right) \right] \times \left[\sum Y^2 - \left(\frac{(\sum Y)^2}{N} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \right]^2$$

เมื่อ X คือ ค่าอ้างอิง

Y คือ ค่าที่ได้จากการทำนายโดย NIRS

3.3.3.6 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทำนาย (Standard error of prediction, SEP หรือ SEV)

$$SEP = \left[\sum (X-Y)^2 - \frac{(\sum(X-Y))^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{N-1}$$

เมื่อ X คือ ค่าอ้างอิง

Y คือ ค่าที่ได้จากการทำนายโดย NIRS

3.3.3.7 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของการทำนาย (Root mean square of the prediction, RMSEP และ RMSD)

$$RMSD = \left[\frac{(\sum(X-Y))^2}{N-1} \right]^{\frac{1}{2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ X คือ ค่าอ้างอิง
Y คือ ค่าที่ได้จากการทำนายโดย NIRS

3.3.3.8 อัตราส่วนระหว่าง SEP กับ SD (Ratio of SEP to the SD, RPD)

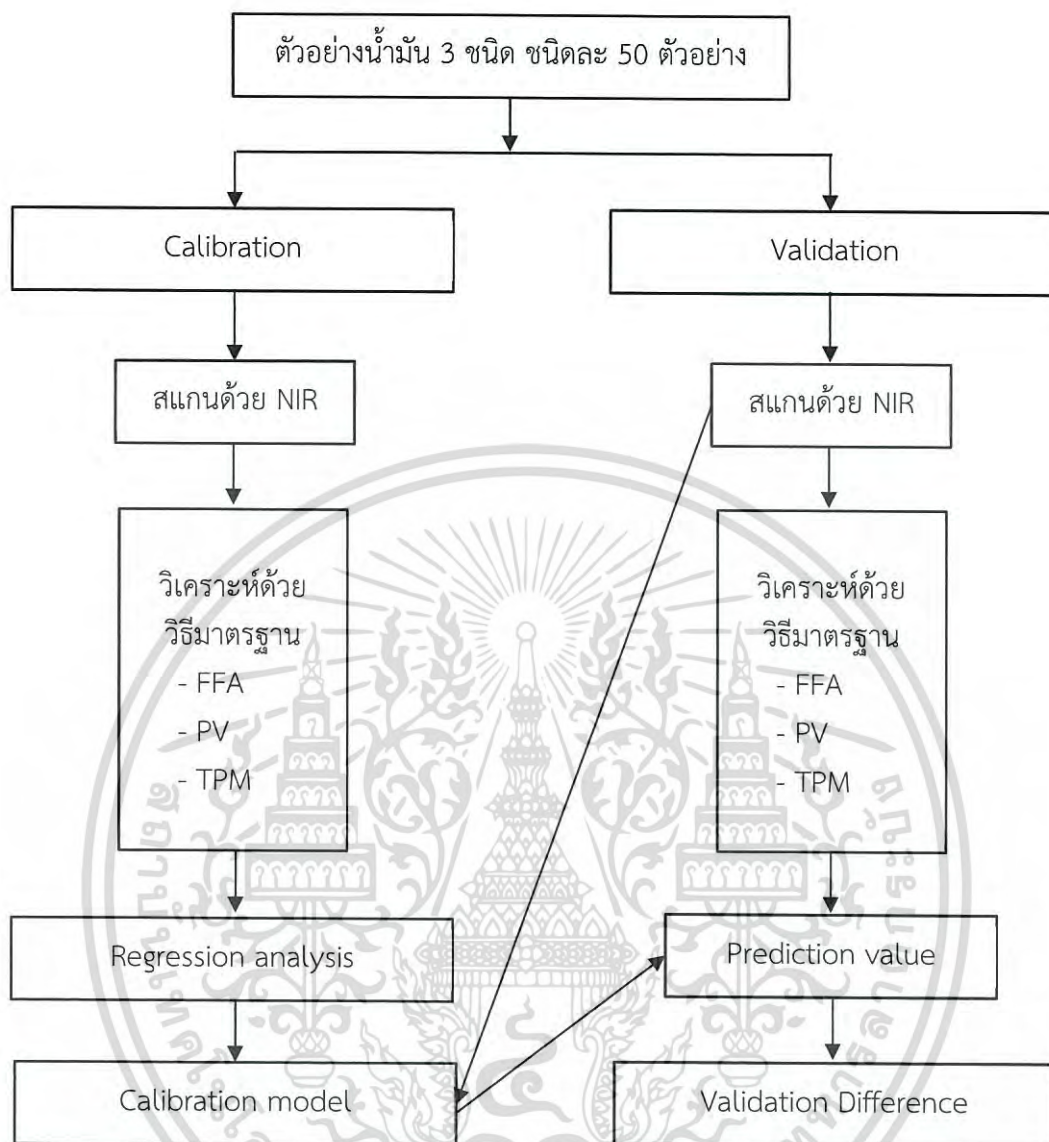
$$RPD = \left(\frac{SD_{X(\text{ตัวอย่าง Validation})}}{SEP} \right)$$

3.3.3.9 อัตราส่วนระหว่าง SEP กับช่วงข้อมูล (Ratio of the SEP to the range, RER)

$$RER = \left(\frac{\text{ช่วงในข้อมูล validation อ้างอิง}}{SEP} \right)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.9 ผังการสร้างแบบจำลองและการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

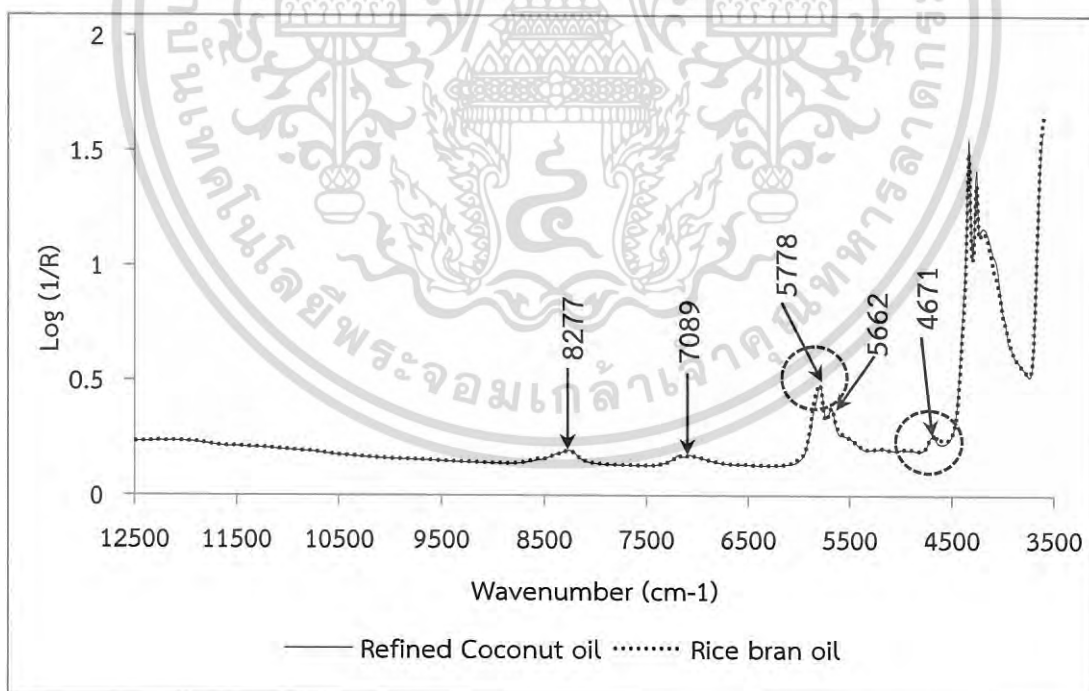
บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 ผลการทดลองของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำในห้องปฏิบัติการ

4.1.1 ลักษณะสเปกตรัมของตัวอย่าง

สเปกตรัมที่ได้จากการดูดกลืนแสงย่าน NIR ช่วง Wavenumber ระหว่าง 12000-3600 cm^{-1} พบว่า สเปกตรัมเฉลี่ยของน้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีที่ผ่านการทอดซ้ำ มีลักษณะสเปกตรัมเหมือนกัน แสดงดังภาพที่ 4.1 ตัวอย่างดูดกลืนแสงชัดเจนที่ Wavenumber 8277, 7089, 5778, 5662 และ 4671 cm^{-1} (2118, 1766, 1730, 1410 และ 1208 nm) ซึ่งพีคที่ 8277 cm^{-1} (1208 nm) เป็นการดูดซับของพันธะกลุ่ม C-H methylene (.CH_2) พีคที่ 7089 cm^{-1} (1410 nm) เป็นการดูดซับของพันธะกลุ่ม C-H methylene CH, O-H alcohol (RO-H) และ O-H hydroxyl O-H พีคที่ 5778 cm^{-1} (1730 nm) เป็นการดูดซับของพันธะกลุ่ม C-H methylene CH พีคที่ 5662 cm^{-1} (1766 nm) เป็นการดูดซับของพันธะกลุ่ม C-H methylene (.CH_2) และพีคที่ 4721 cm^{-1} (2118 nm) เป็นการดูดซับของพันธะกลุ่ม N-H โดยช่วงพีคหลักที่แสดงถึงสเปกตรัมของการเสื่อมคุณภาพของน้ำมันทอดซ้ำ ได้แก่ ช่วงพีคช่วง 5570-6195 cm^{-1} และช่วงที่พีคขนาดเล็กในช่วง 4860-4862 cm^{-1} เป็นช่วงพีคที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Gerde et al [8] และรวมถึง Büning-Pfaue and Kehraus [33] ที่รายงานไว้ว่า ช่วงพีคของน้ำมันเสื่อมเสียอยู่ในช่วง 5263-5556 cm^{-1} (1800-1900 nm) และ 4650-5000 cm^{-1} (2000-2150 nm) ตามลำดับ



ภาพที่ 4.1 สเปกตรัมเฉลี่ยของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีและน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำโดยพีคในสัญลักษณ์วงกลมเส้นประแสดงถึงช่วงพีคหลักของการเสื่อมคุณภาพของน้ำมันทอดซ้ำ

4.1.2 ค่าทางเคมีที่ตรวจวัด

ค่าทางสถิติของค่าทางเคมีที่ตรวจวัดแสดงในตารางที่ 4.1

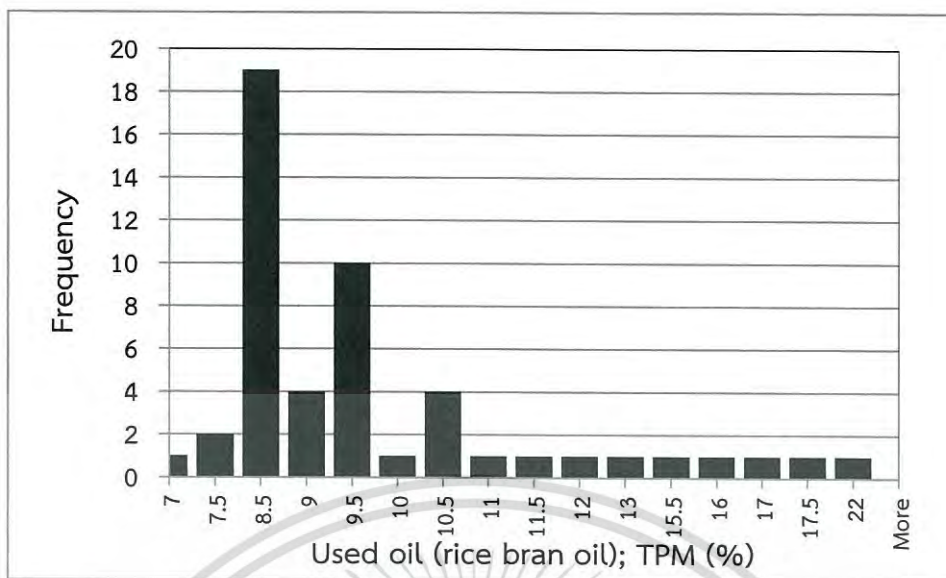
ตารางที่ 4.1 ค่าทางสถิติของการวัดทางเคมีของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ

ตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ	ค่าเคมี	จำนวน	ค่าทางสถิติ			
			ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	±SD
น้ำมันรำข้าว	TPM (%)	50	7.50	40.00	11.40	5.03
	FFA (%)	50	0.22	0.56	0.45	0.06
	P.V. (meq/kg)	50	2.77	3.61	3.23	0.26
น้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธี	TPM (%)	50	32.00	40.00	38.20	4.00
	FFA (%)	50	0.10	0.77	0.40	0.21
	P.V. (meq/kg)	50	1.75	2.60	2.25	0.23

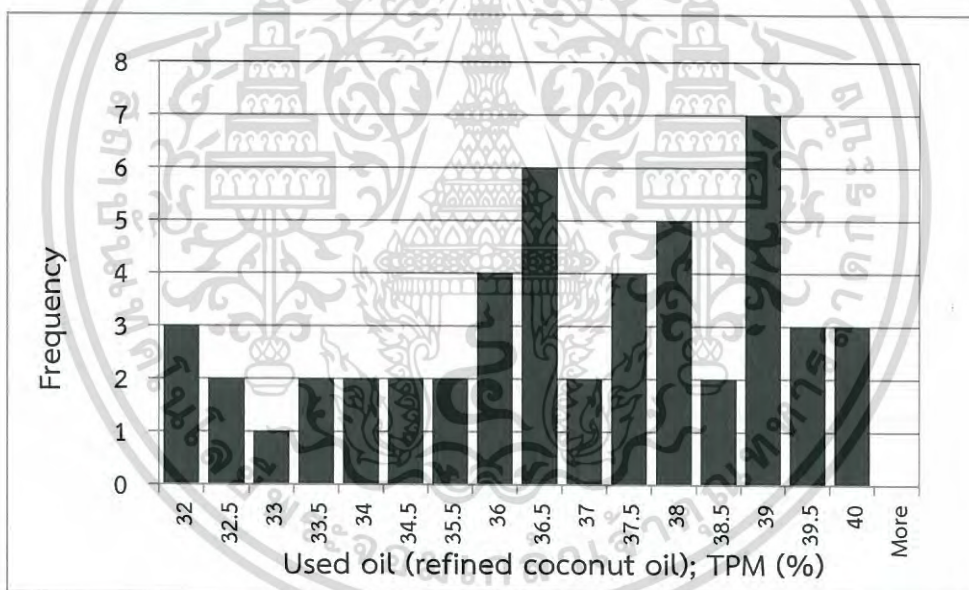
การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดในน้ำมันทอดซ้ำ เกิดขึ้นจากการแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมัน ซึ่งในระหว่างการทอดอาหารน้ำมันจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างต่อเนื่อง เช่น การเกิดออกซิเดชัน โพลีเมอร์ไรเซชัน และไฮโดรไลซิส เป็นต้น [27] โดยปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดในน้ำมันทอดซ้ำจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่น้ำมัน [30] น้ำมันรำข้าวเริ่มต้นก่อนการทอดมีปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 7.50 และเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 40.00 และน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีเริ่มต้นก่อนการทอดอาหารมีปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 34.00 และเพิ่มขึ้นจนสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 40.00

กรดไขมันอิสระจะมีการสะสมในน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่อทำการทอดอาหารอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา [38] น้ำมันรำข้าวมีค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันสูงขึ้นจากร้อยละ 0.22 ถึง 0.56 และน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีมีค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันสูงขึ้นจากร้อยละ 0.10 ถึง 0.77

การเปลี่ยนแปลงค่าเพอร์ออกไซด์ เป็นค่าที่ใช้วัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ระหว่างออกซิเจนกับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ณ ตำแหน่งพันธะคู่ [37] น้ำมันรำข้าวเริ่มต้นก่อนการทอดมีค่าเพอร์ออกไซด์ (meq/kg) เท่ากับ 2.77 และเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงที่สุดเท่ากับ 3.61 และน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีเริ่มต้นก่อนการทอดอาหารมีค่าเพอร์ออกไซด์ (meq/kg) เท่ากับ 1.75 และเพิ่มขึ้นจนสูงที่สุดเท่ากับ 2.60



ภาพที่ 4.2 กราฟฮิสโตแกรมของข้อมูลปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ

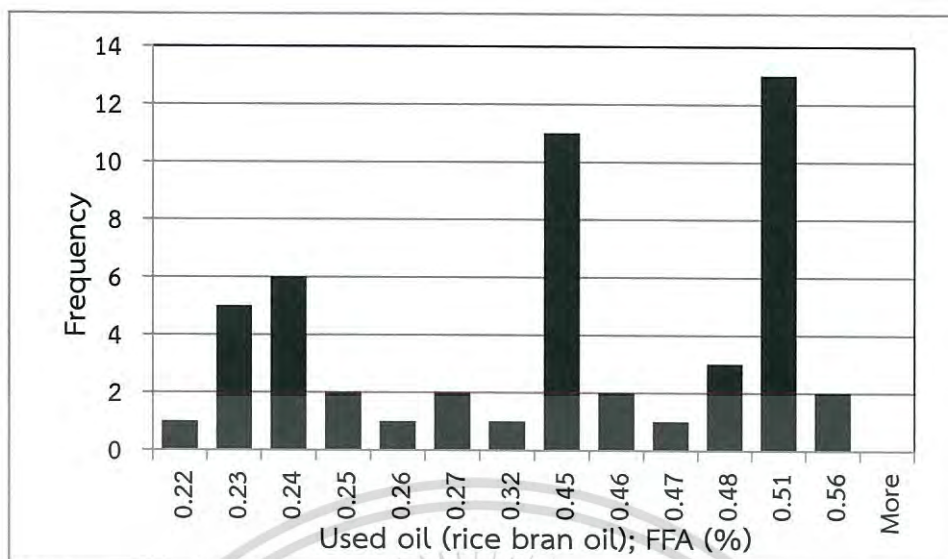


ภาพที่ 4.3 กราฟฮิสโตแกรมของข้อมูลปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ

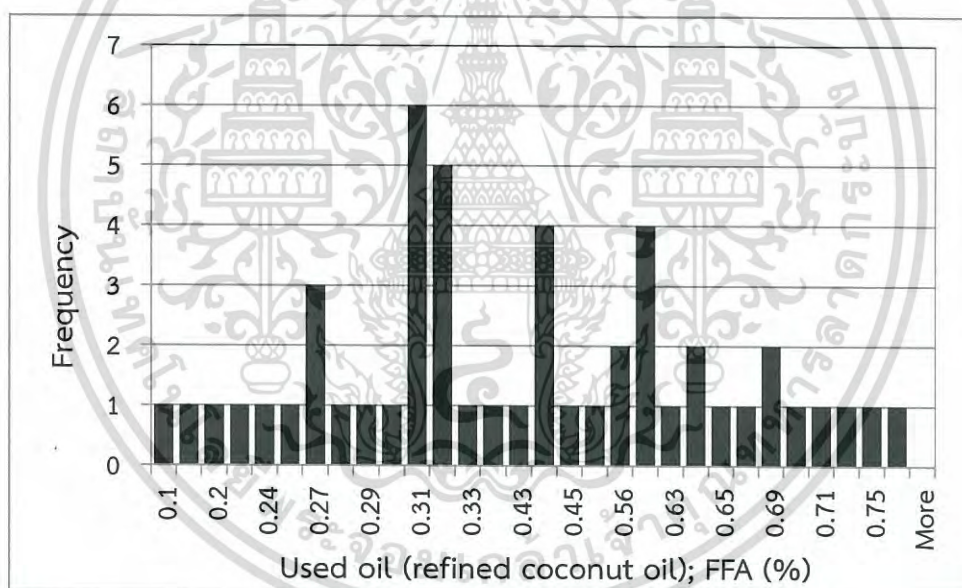
จากภาพที่ 4.2 ความถี่ของข้อมูลปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ สามารถแบ่งความถี่ของข้อมูลได้ตั้งแต่ 7.0% จนถึง 22.0% โดยมีความถี่สูงสุดในช่วง 8.5% (15 ข้อมูล) 9.5% (10 ข้อมูล) และ 10.5% (4 ข้อมูล) ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.3 ความถี่ของข้อมูลปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ มีการกระจายความค่อนข้างถี่สม่ำเสมอ โดยมีความถี่สูงสุดในช่วง 39.0% (7 ข้อมูล) 36.5% (6 ข้อมูล) และ 38.0% (5 ข้อมูล) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.4 กราฟฮิสโตแกรมของข้อมูลปริมาณไขมันอิสระของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ

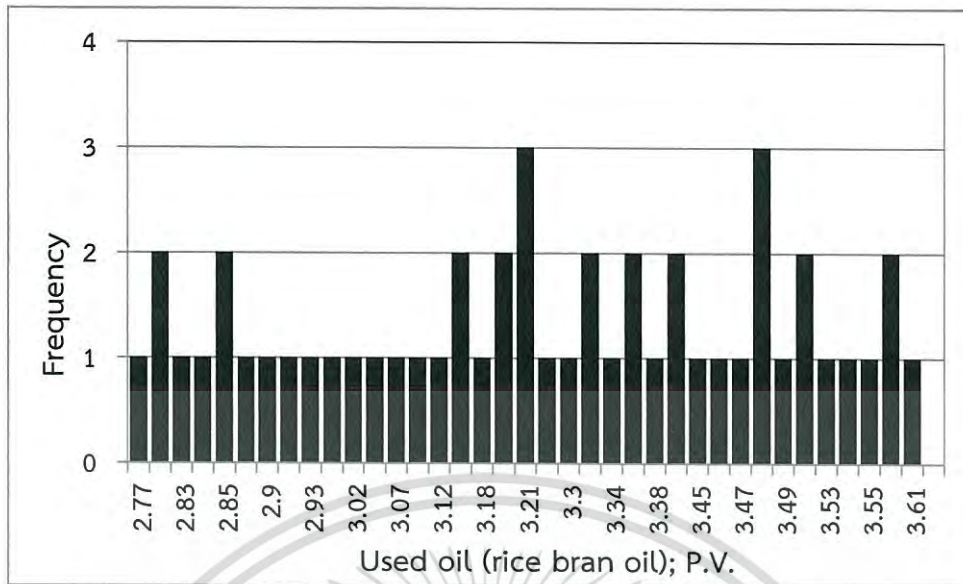


ภาพที่ 4.5 กราฟฮิสโตแกรมของข้อมูลปริมาณไขมันอิสระของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ

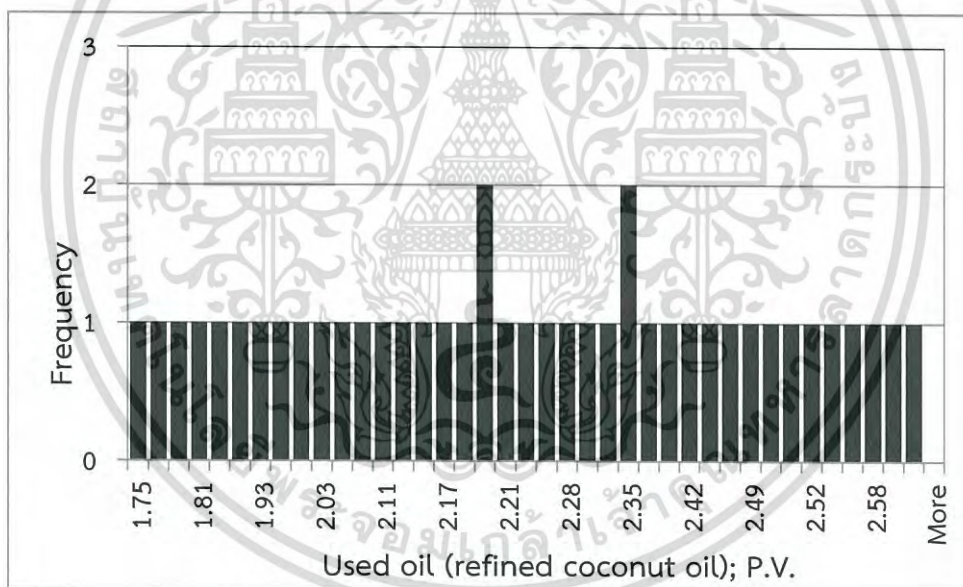
จากภาพที่ 4.4 ความถี่ของข้อมูลปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำมีการกระจายความถี่ไม่สม่ำเสมอ โดยมีความถี่สูงสุดในช่วง 0.51% (13 ข้อมูล) 0.45% (11 ข้อมูล) และ 0.24% (6 ข้อมูล) ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.5 ความถี่ของข้อมูลปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำมีการกระจายความถี่ไม่สม่ำเสมอ โดยมีความถี่สูงสุดในช่วง 0.31% (6 ข้อมูล) 0.32% (5 ข้อมูล) 0.44% (4 ข้อมูล) และ 0.60% (4 ข้อมูล) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 กราฟฮิสโตแกรมของข้อมูลค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 4.7 กราฟฮิสโตแกรมของข้อมูลค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ

จากภาพที่ 4.6 ความถี่ของข้อมูลค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำมีการกระจายความถี่สม่ำเสมอ โดยมีความถี่สูงสุดในช่วง 3.21 meq/kg (3 ข้อมูล) และ 3.48 meq/kg (3 ข้อมูล)

จากภาพที่ 4.7 ความถี่ของข้อมูลปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำมีการกระจายความถี่สม่ำเสมอ โดยมีความถี่สูงสุดในช่วง 2.20 meq/kg (2 ข้อมูล) 2.35 meq/kg (2 ข้อมูล) และความถี่ช่วงอื่นๆ จนวนช่วงละ 1 ข้อมูล ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

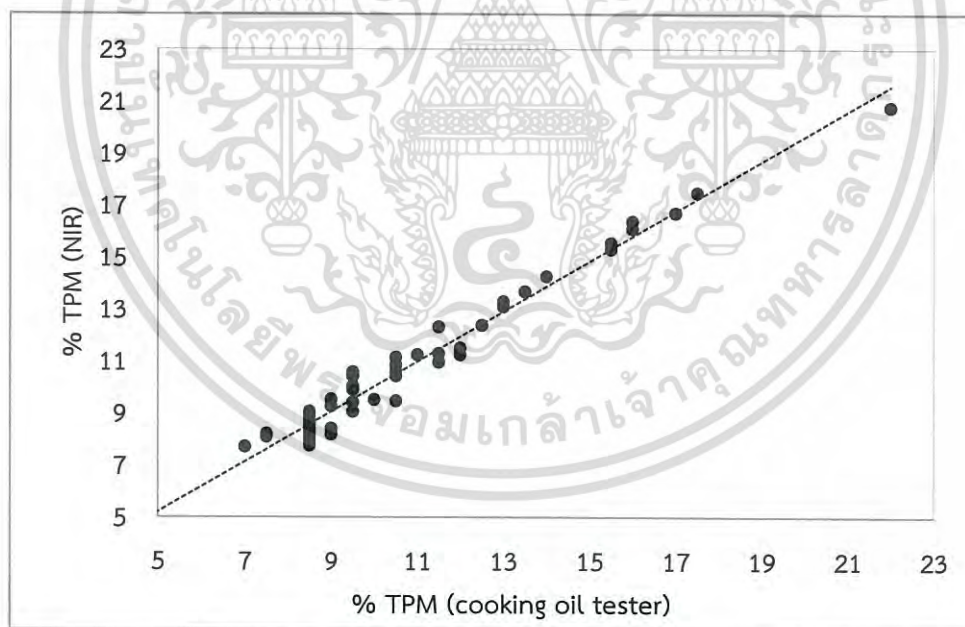
4.2 สมรรถนะของแบบจำลอง

4.2.1 ผลของการสร้างสมการเทียบมาตรฐานน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ

4.2.1.1 การทำนายและการเปรียบเทียบผลการทำนายการวัดปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดในน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIRS กับการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ Cooking Oil Tester

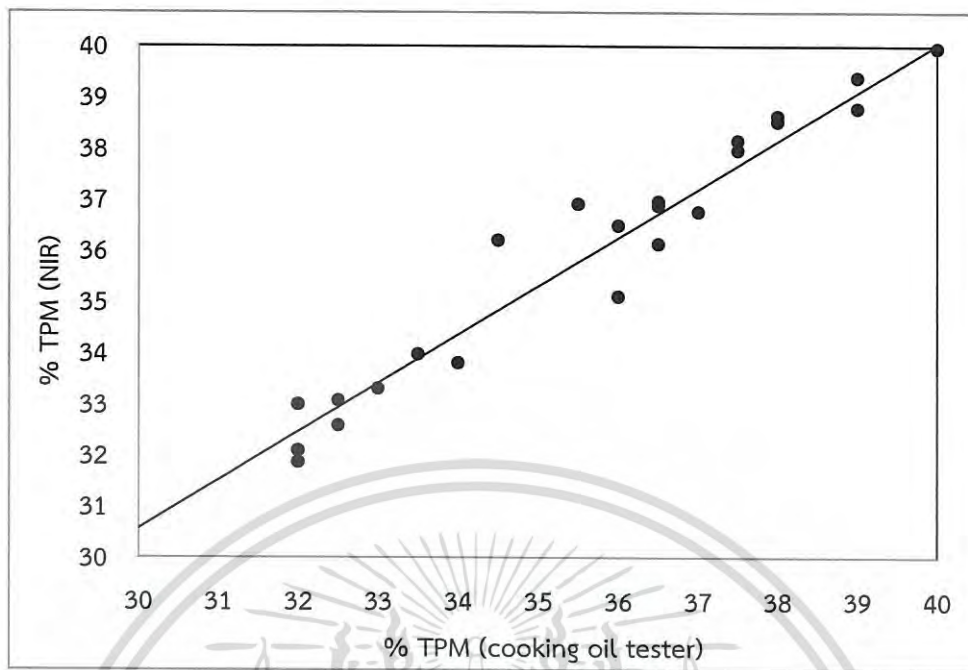
ตารางที่ 4.2 ผลการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วย NIR โดยวิธีทางสถิติแบบ partial least squares regression ทดสอบประสิทธิภาพของสมการแบบ Full cross validation

Sample	Rank	Pretreatment	Validation			
			R ²	RMSECV	RPD	Bias
น้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ	8	Straight line subtraction	0.97	0.501	5.97	0.005
น้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ	6	Constant offset elimination	0.95	0.854	4.66	-0.023



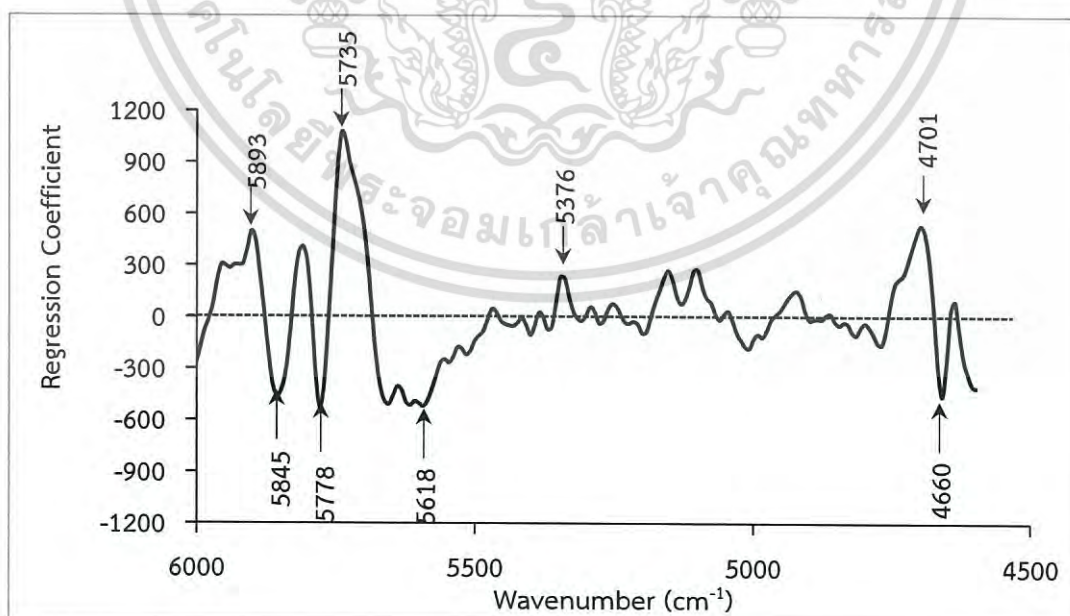
ภาพที่ 4.8 การเปรียบเทียบปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (X axis) กับวัดโดยอุปกรณ์ Cooking Oil Tester (Y axis)

ภาพที่ 4.8 แสดงเส้นสมการถดถอยของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ จัดการสเปกตรัมเบื้องต้นของตัวอย่างด้วยวิธี Straight line subtraction ช่วงพีกสูงสุดของตัวอย่างถูกนำมาสร้างสมการคือ พีกช่วง 4598-6102 cm^{-1} (2175-1639 nm) ซึ่งเป็นช่วงพีกของกลุ่มฟังก์ชัน C-H/C=O lipid associated ซึ่งเป็นกลุ่มของ lipids (2140 nm) [39] แทนนั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

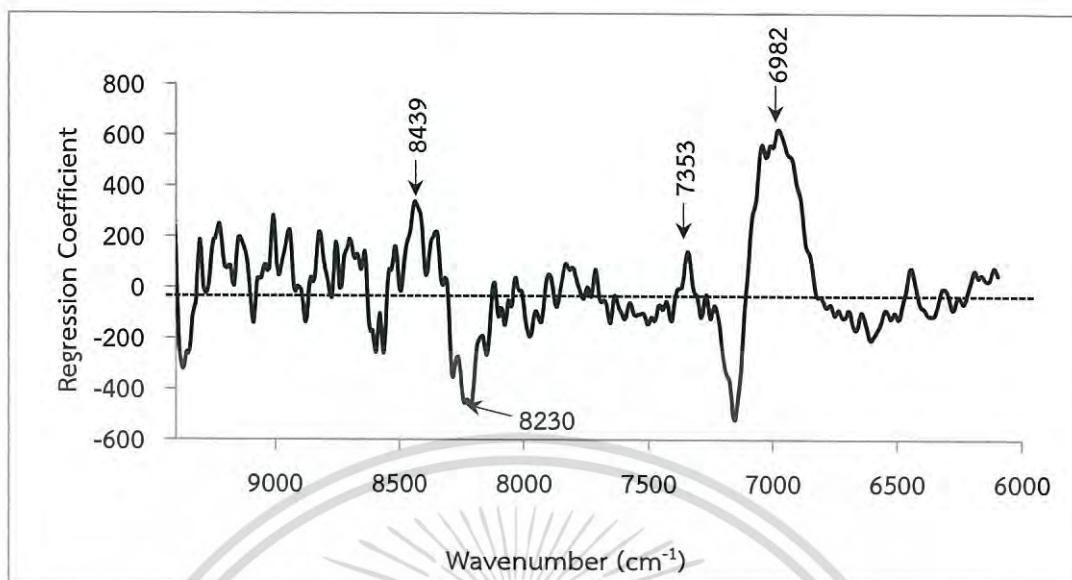


ภาพที่ 4.9 การเปรียบเทียบปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (X axis) กับวัดโดยอุปกรณ์ Cooking Oil Tester (Y axis)

ภาพที่ 4.9 แสดงเส้นสมการถดถอยน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ จัดการสเปกตรัมเบื้องต้นของตัวอย่างด้วยวิธี Constant offset elimination ช่วงพิกัดอยู่ระหว่าง $6094-9404\text{ cm}^{-1}$ ($1641-1063\text{ nm}$) ซึ่งเป็นช่วงพิกัดของกลุ่มฟังก์ชัน C-H methyl O-H stretching band ซึ่งเป็นกลุ่มของ ketones และ Alcohols [39]

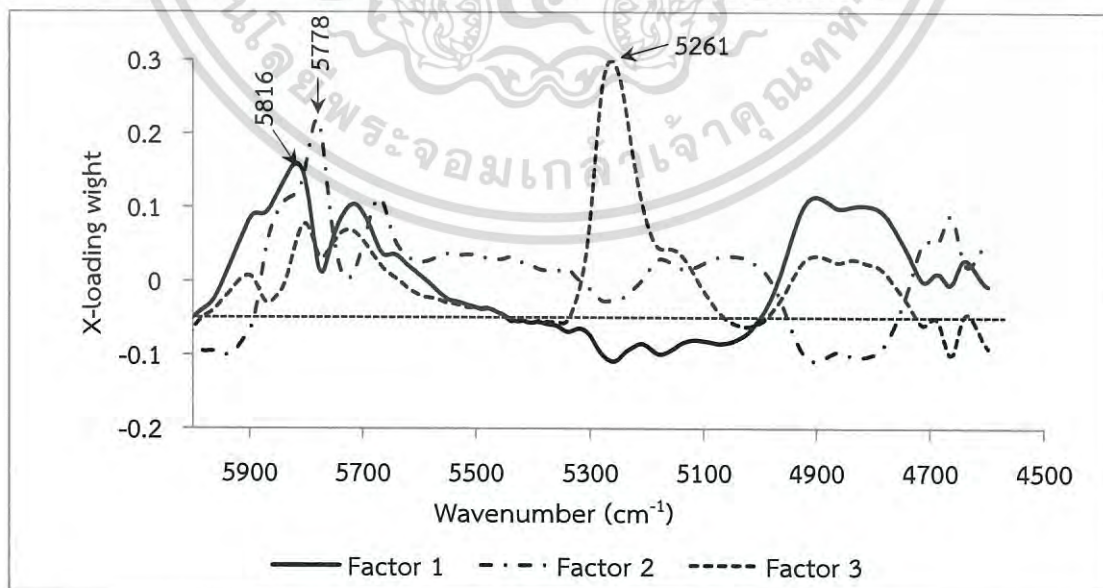


ภาพที่ 4.10 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



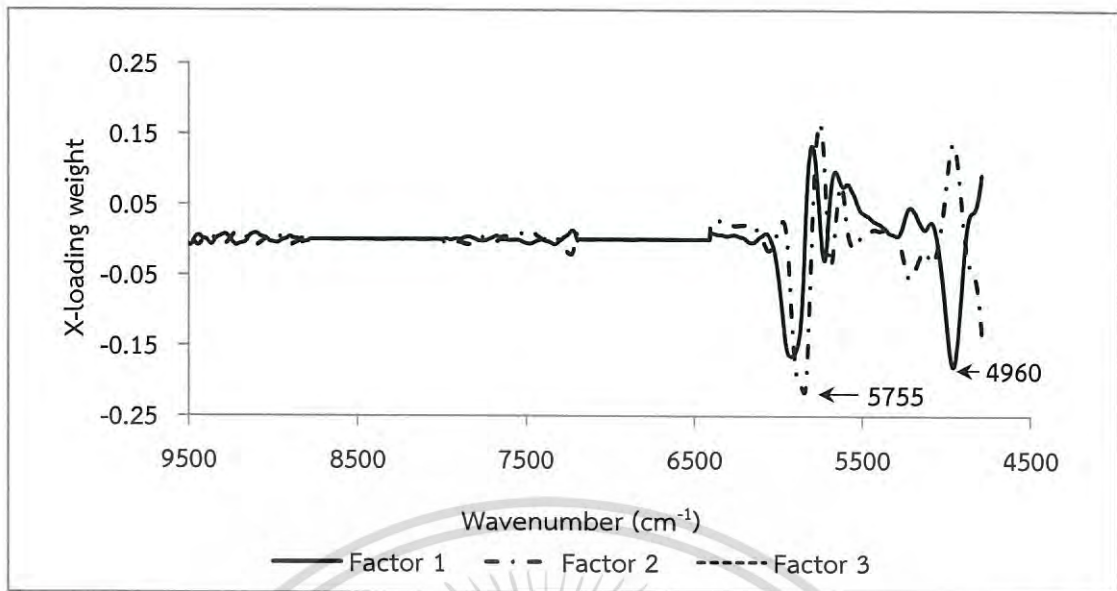
ภาพที่ 4.11 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ

ภาพที่ 4.10 และภาพที่ 4.11 แสดงกราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ ด้วย NIRS ค่าพีคสูงสุดที่สัมพันธ์กับแบบจำลองซึ่งชี้ให้เห็นการสั่นของพันธะเคมีของตัวอย่าง โดยเรียงลำดับจาก Wavenumber ที่มีค่า Regression coefficient สูงสุดไปยังค่าที่น้อยกว่า พบว่าการสั่นสะเทือนของพีค C-H methyl C-H (5735 cm^{-1}) มีผลสูงที่สุดต่อการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ และการสั่นสะเทือนของ N-H primary aromatic amine (6982 cm^{-1}) มีผลสูงที่สุดต่อการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ



ภาพที่ 4.12 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำด้วย NIRS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



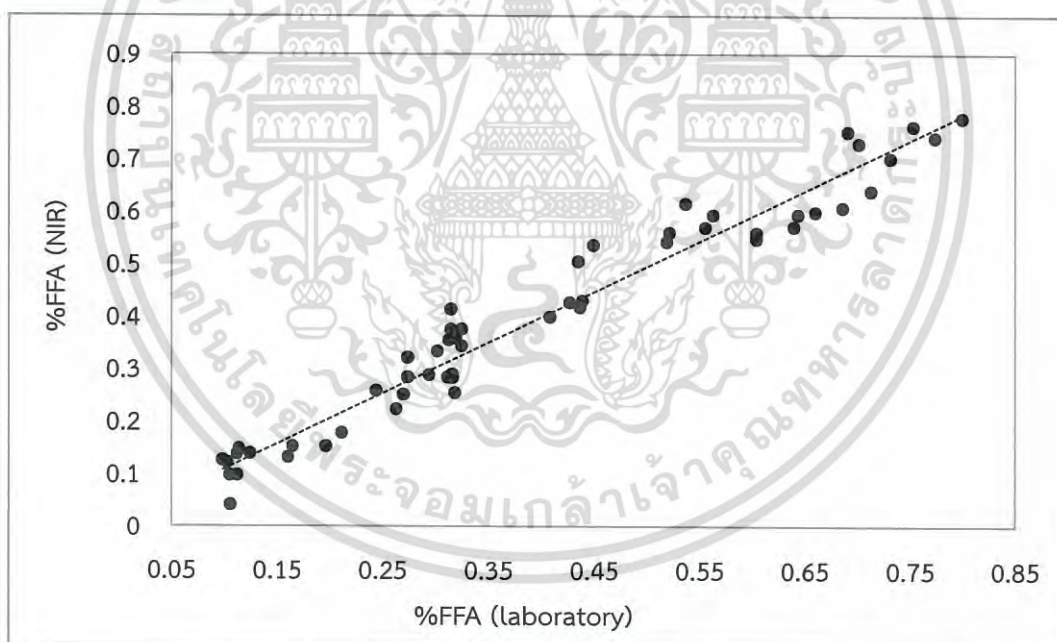
ภาพที่ 4.13 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วย NIRS

ภาพที่ 4.12 และ ภาพที่ 4.13 แสดงค่า X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIRS ค่าพีคสูงสุดที่สัมพันธ์กับแบบจำลองซึ่งชี้ให้เห็นการสั่นของพันธะเคมีของตัวอย่างซึ่งเรียงลำดับจาก Wavenumber ที่มีค่า X-loading สูงสุดไปยังค่าที่น้อยกว่า พบว่าการสั่นสะเทือนของ C-H methyl (5861 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ และการสั่นสะเทือนของ O-H stretching and bending combination from methanol (4960 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ

4.2.1.2 การทำนายและการเปรียบเทียบผลการทำนายการวัดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIRS กับการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 4.3 ผลการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วย NIR โดยวิธีทางสถิติแบบ partial least squares regression ทดสอบประสิทธิภาพของสมการแบบ Full cross validation

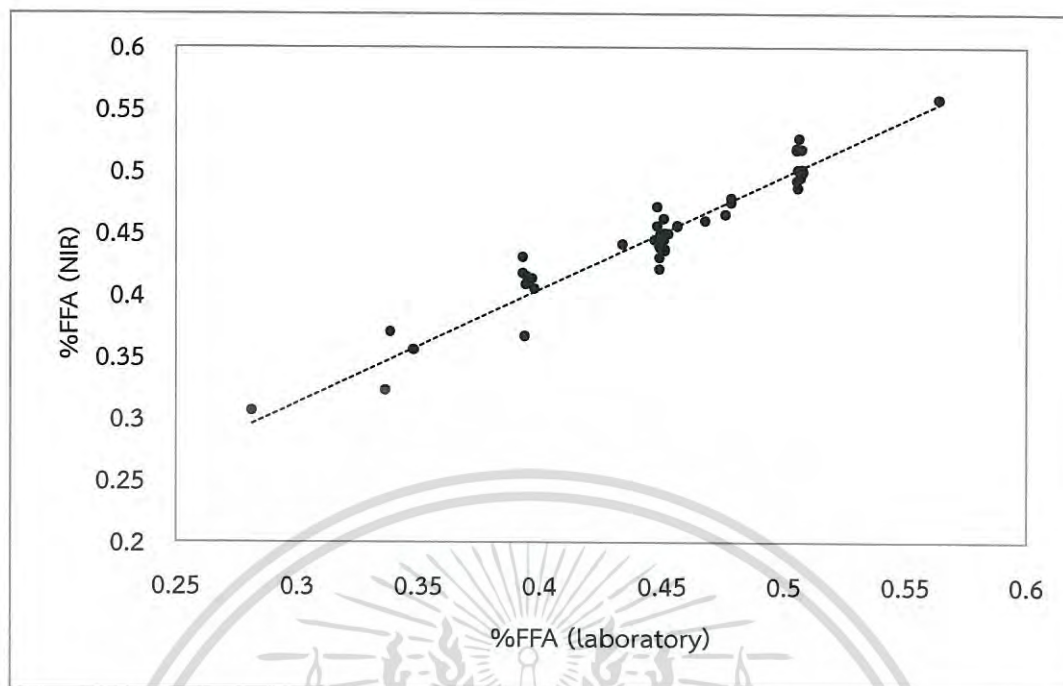
Sample	Rank	Pretreatment	Validation			
			R ²	RMSECV	RPD	Bias
น้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ	7	Min-Max normalization	0.93	0.015	3.71	-0.001
น้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ	8	No spectral data prepressing	0.97	0.043	4.78	0.001



ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (X axis) กับการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Y axis)

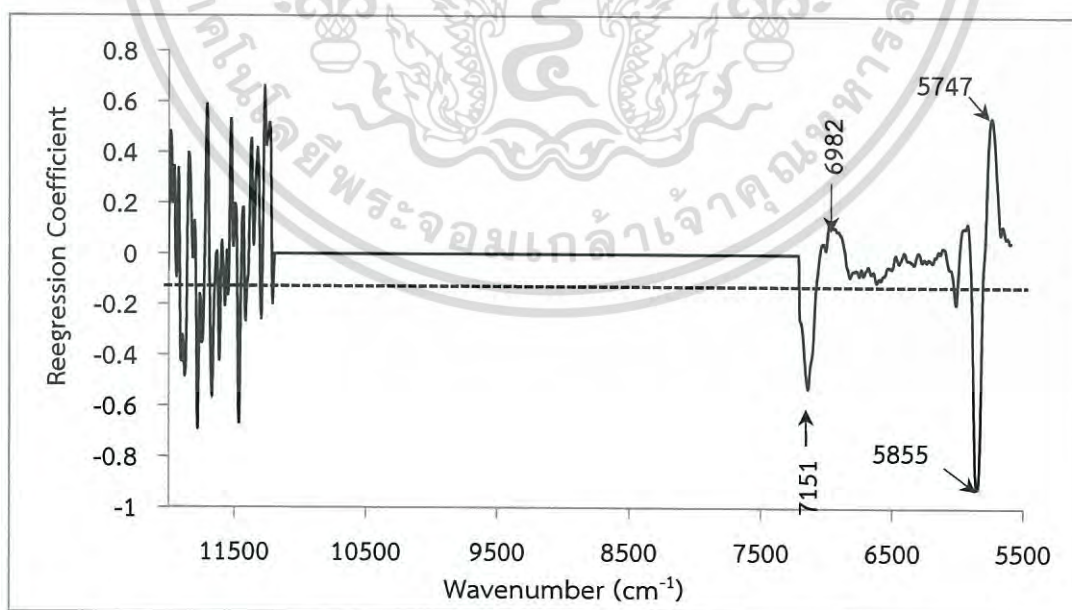
ภาพที่ 4.14 แสดงเส้นสมการถดถอยของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ จัดการสเปกตรัมเบื้องต้นของตัวอย่างด้วยวิธี Min-Max normalization ช่วงพิกที่สูงสุดที่สุดของตัวอย่างที่ถูกนำมาสร้างสมการอยู่ระหว่าง $5592-7205\text{ cm}^{-1}$ (1788-1387 nm) ซึ่งมีช่วงพิกของกลุ่มฟังก์ชัน C-H methyl O-H stretching band ซึ่งเป็นกลุ่มของ ketones และ Alcohols [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



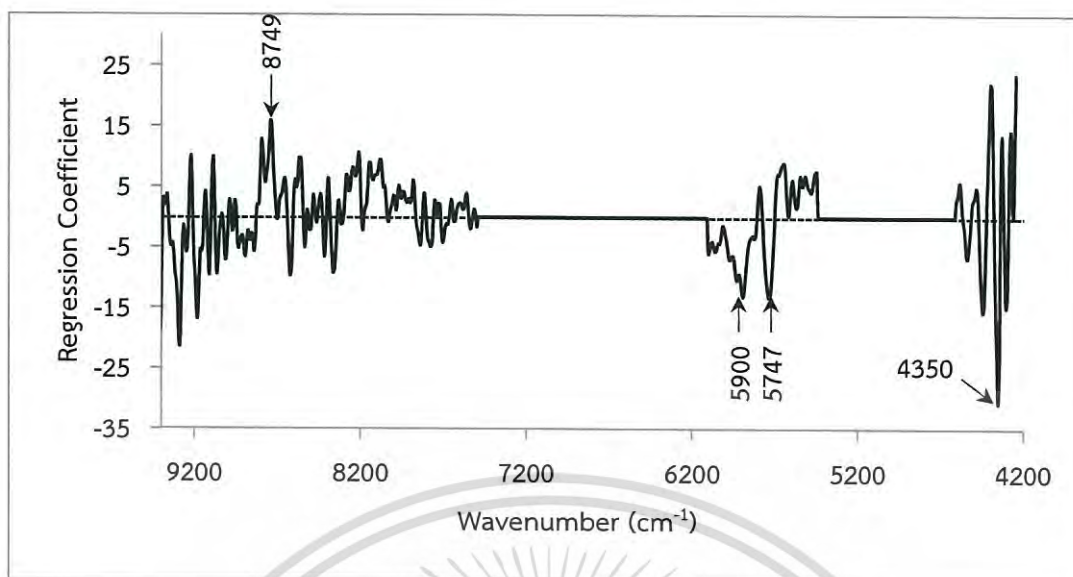
ภาพที่ 4.15 การเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (X axis) กับการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Y axis)

ภาพที่ 4.15 แสดงเส้นสมการถดถอยของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ จัดการสเปกตรัมเบื้องต้นของตัวอย่างด้วยวิธี No spectral data preprocessing ช่วงพีกสูงสุดของตัวอย่างถูกนำมาสร้างสมการอยู่ระหว่าง $7498-9404\text{ cm}^{-1}$ ($1334-1063\text{ nm}$) ซึ่งมีช่วงพีกของ C-H methyl [39]



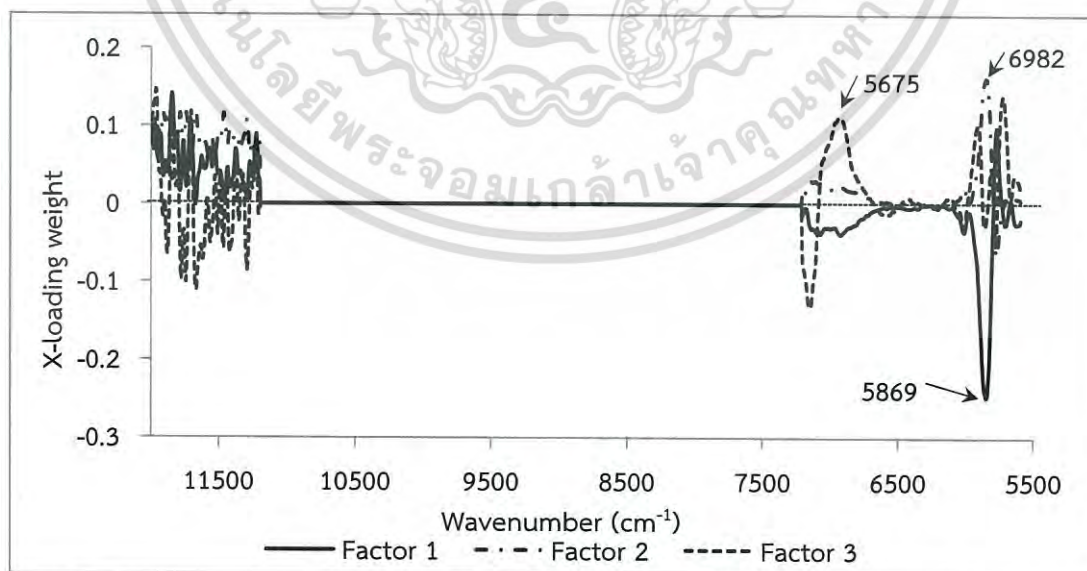
ภาพที่ 4.16 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



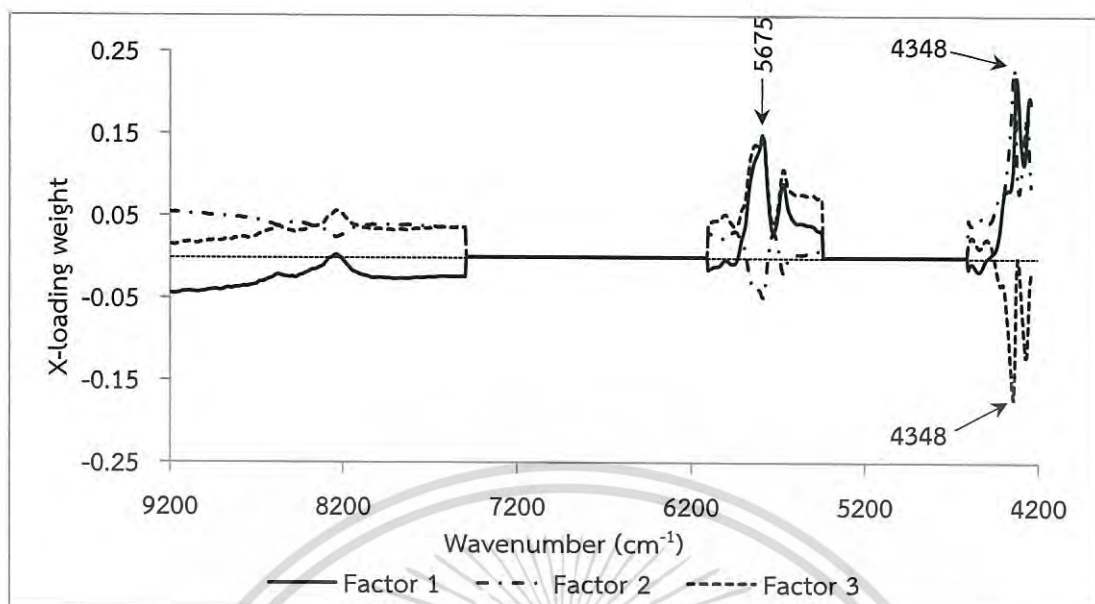
ภาพที่ 4.17 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ

ภาพที่ 4.16 และ ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ ด้วย NIRS พิกที่สูงที่สุดที่สัมพันธ์กับแบบจำลองซึ่งชี้ให้เห็นการสั่นของพันธะเคมีของตัวอย่างซึ่งเรียงลำดับจาก Wavenumber ที่มีค่า Regression coefficient สูงสุดไปยังค่าที่น้อยกว่า พบว่าการสั่นสะเทือนของ C-H methyl (5855 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ และการสั่นสะเทือนของ C-H (.C-H bending) (4350 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ



ภาพที่ 4.18 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำด้วย NIRS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.19 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วย NIR

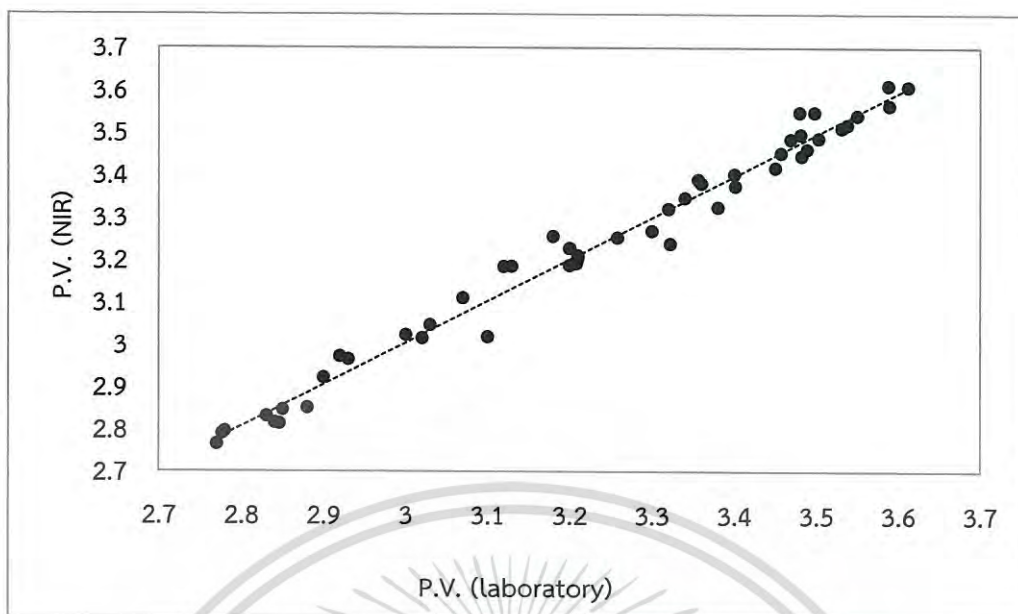
ภาพที่ 4.18 และ ภาพที่ 4.19 แสดงค่า X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระ ของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIR พิกัดสูงสุดที่สัมพันธ์กับแบบจำลองซึ่งชี้ให้เห็นการสั่นของพันธะเคมีของตัวอย่างซึ่งเรียงลำดับจาก Wavenumber ที่มีค่า X-loading สูงสุดไปยังค่าที่น้อยกว่า พบว่าการสั่นสะเทือนของ C-H methyl C-H, (CH_3) (5869 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ และการสั่นสะเทือนของ C-H methylene (CH_2) (5675 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ

4.2.1.3 การทำนายและการเปรียบเทียบผลการทำนายการวัดค่าเปอร์ออกไซด์ในน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIR กับการไทเทรตสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต

ตารางที่ 4.4 ผลการทำนายค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วย NIR ด้วยวิธีทางสถิติแบบ partial least squares regression ทดสอบประสิทธิภาพของสมการแบบ Full cross validation

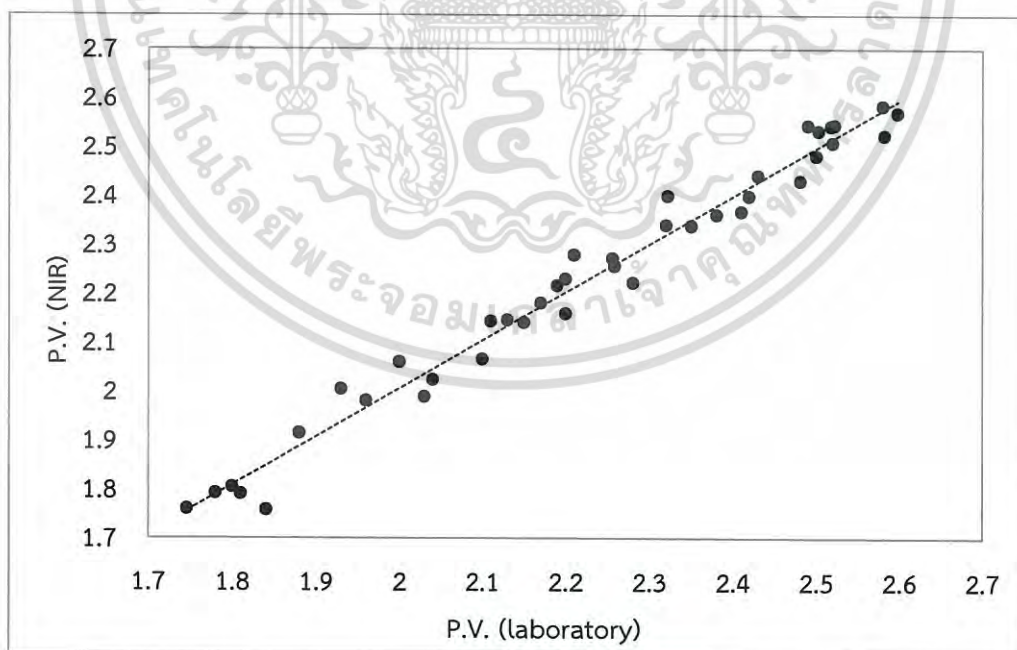
Sample	Rank	Pretreatment	Validation			
			R^2	RMSECV	RPD	Bias
น้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ	8	First derivative + MSC	0.98	0.034	7.55	-0.001
น้ำมันมะพร้าว ผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ	3	Min-Max normalization	0.98	0.037	6.72	-0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.20 การเปรียบเทียบค่าเพอร์ออกไซด์ของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (X axis) กับการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (Y axis)

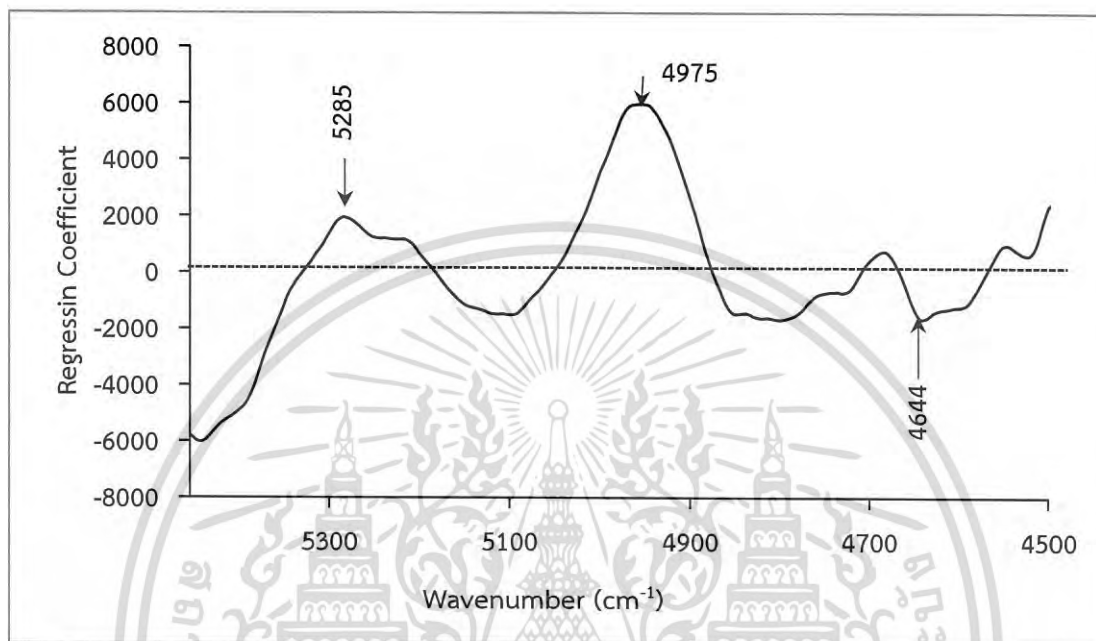
ภาพที่ 4.20 แสดงเส้นสมการถดถอยของน้ำมันรำข้าวที่ผ่านการทอดซ้ำ จัดการสเปกตรัมเบื้องต้นของตัวอย่างด้วยวิธี First derivative + MSC ช่วงพีคสูงสุดของตัวอย่างถูกนำมาสร้างสมการอยู่ระหว่าง $4242\text{-}5454\text{ cm}^{-1}$ ($2357\text{-}1833$) ซึ่งมีช่วงพีคของ C-H (C-H) bending



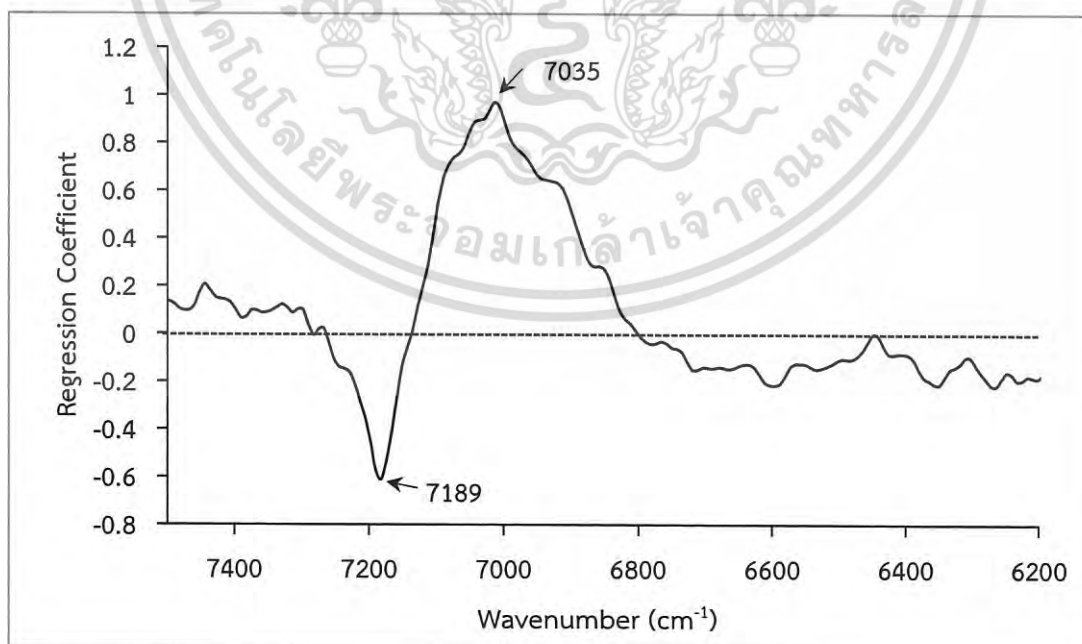
ภาพที่ 4.21 การเปรียบเทียบค่าเพอร์ออกไซด์ของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วยเนียร์อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (X axis) กับการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (Y axis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.21 แสดงเส้นสมการถดถอยของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ จัดการสเปกตรัมเบื้องต้นของตัวอย่างด้วยวิธี Min-Max normalization ช่วงพีคสูงสุดของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำถูกนำมาสร้างสมการอยู่ระหว่าง ช่วงพีคสูงสุดของตัวอย่างถูกนำมาสร้างสมการอยู่ระหว่าง $6094-7506\text{ cm}^{-1}$ ($1641-1332\text{ nm}$) ซึ่งมีช่วงพีคของ C-H methylene (C-H_2)



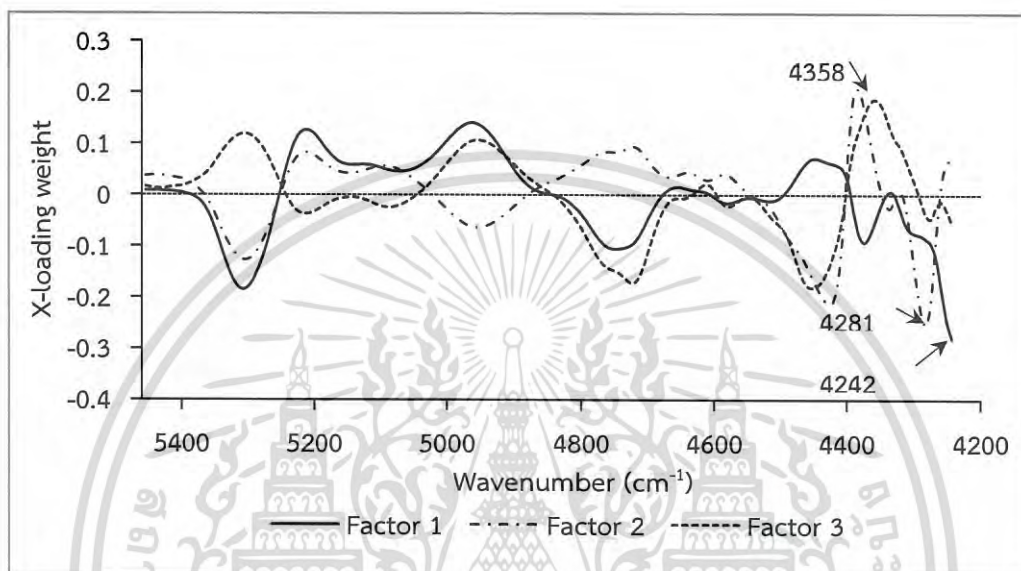
ภาพที่ 4.22 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ



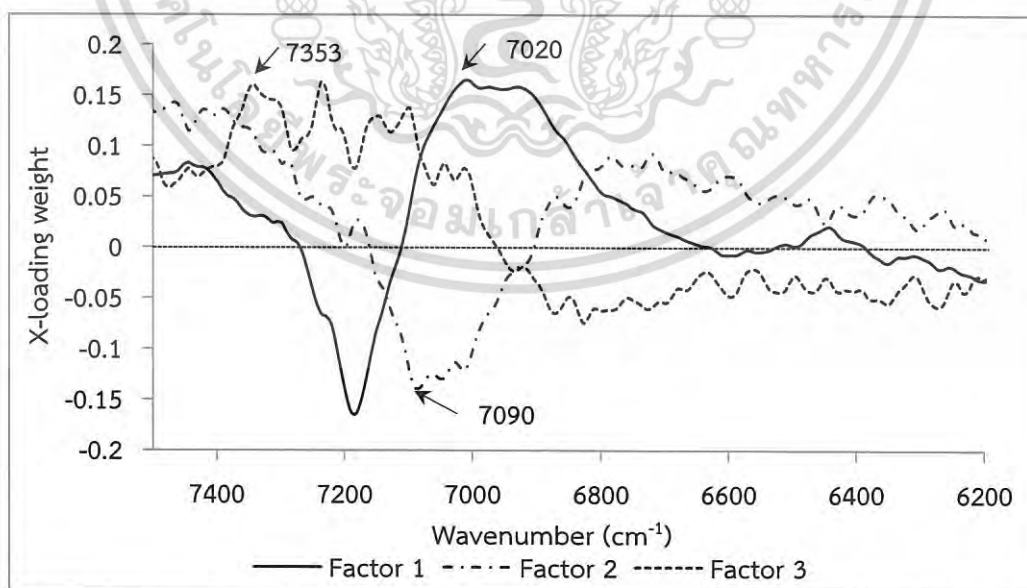
ภาพที่ 4.23 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.22 และ ภาพที่ 4.23 แสดงกราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายค่าเปอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ ด้วย NIRS พีคสูงสุดที่สัมพันธ์กับแบบจำลองซึ่งชี้ให้เห็นการสั่นของพันธะเคมีของตัวอย่างซึ่งเรียงลำดับจาก Wavenumber ที่มีค่า Regression coefficient สูงสุดไปยังค่าที่น้อยกว่า พบว่าการสั่นสะท้อนของ N-H sym. Str. + amide II (4975 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนายค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ และการสั่นสะท้อนของ O-H str. First overtone (7035 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนายค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ



ภาพที่ 4.24 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายค่าเปอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ ด้วย NIRS



ภาพที่ 4.25 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายค่าเปอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำด้วย NIRS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.24 และ ภาพที่ 4.25 แสดงค่า X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIR พิกสูงสุดที่สัมพันธ์กับแบบจำลองซึ่งชี้ให้เห็นการสั่นของพันธะเคมีของตัวอย่างซึ่งเรียงลำดับจาก Wavenumber ที่มีค่า X-loading สูงสุดไปยังค่าที่น้อยกว่า พบว่าการสั่นสะเทือนของ C-H (.C-H) bending (4242 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ ของน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ และการสั่นสะเทือนของ O-H str. First overtone (7020 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ของน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ

4.3 ผลการทดลองของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำในห้องปฏิบัติการ

4.3.1 ผลของการสร้างสมการเทียบมาตรฐานน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม

4.3.1.1 ค่าทางเคมีที่ตรวจวัด

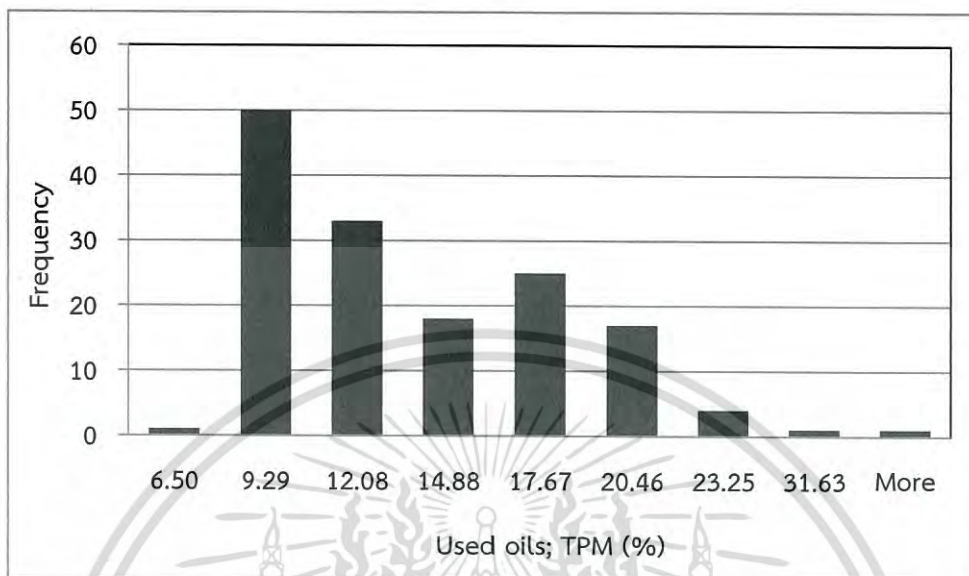
ตารางที่ 4.5 ค่าทางสถิติของการวัดทางเคมีของน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม

ตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ	ค่าเคมี	จำนวน	ค่าทางสถิติ			
			ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	±SD
น้ำมันรำข้าว	TPM (%)	50	8.00	40.00	12.58	5.46
	FFA (%)	50	0.19	0.27	0.22	0.02
	P.V. (meq/kg)	50	5.90	11.52	9.21	1.34
น้ำมันปาล์มโอเลอิน	TPM (%)	50	6.50	11.00	8.42	0.88
	FFA (%)	50	0.16	0.47	0.35	0.07
	P.V. (meq/kg)	50	0.33	8.80	4.32	2.39
น้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธี	TPM (%)	50	14.00	22.5	17.10	2.20
	FFA (%)	50	0.07	0.26	0.17	0.04
	P.V. (meq/kg)	50	1.57	7.00	4.10	1.51
น้ำมันทั้ง 3 ชนิด	TPM (%)	150	6.50	40.00	12.69	4.92
	FFA (%)	150	0.07	0.47	0.25	0.09
	P.V. (meq/kg)	150	0.33	11.52	5.55	2.90

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าทางเคมีของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ ได้แก่ ปริมาณของสารโพลาร์ทั้งหมด ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่าเพอร์ออกไซด์ ในตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำทั้ง 3 ชนิดที่เก็บจากโรงงานผลิตอาหารทอดมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากการทอดในระดับอุตสาหกรรมมีการเติมน้ำมันใหม่ระหว่างการทอดอยู่เสมอ เพื่อให้อัตราส่วนของน้ำมันต่ออาหารคงที่ เมื่อรวมตัวอย่างน้ำมันทอดทั้ง 3 ชนิดเข้าด้วยกัน ทำให้ได้ตัวอย่างสำหรับสร้างสมการเทียบมาตรฐานมีค่าครอบคลุมมากขึ้น และครอบคลุมการทำนายตัวอย่างเมื่อน้ำมันที่ใช้ทอดต่างชนิดกัน ค่าเฉลี่ยปริมาณของสารโพลาร์ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 12.69 ± 4.92 โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 6.50 และค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 40.00 ค่า

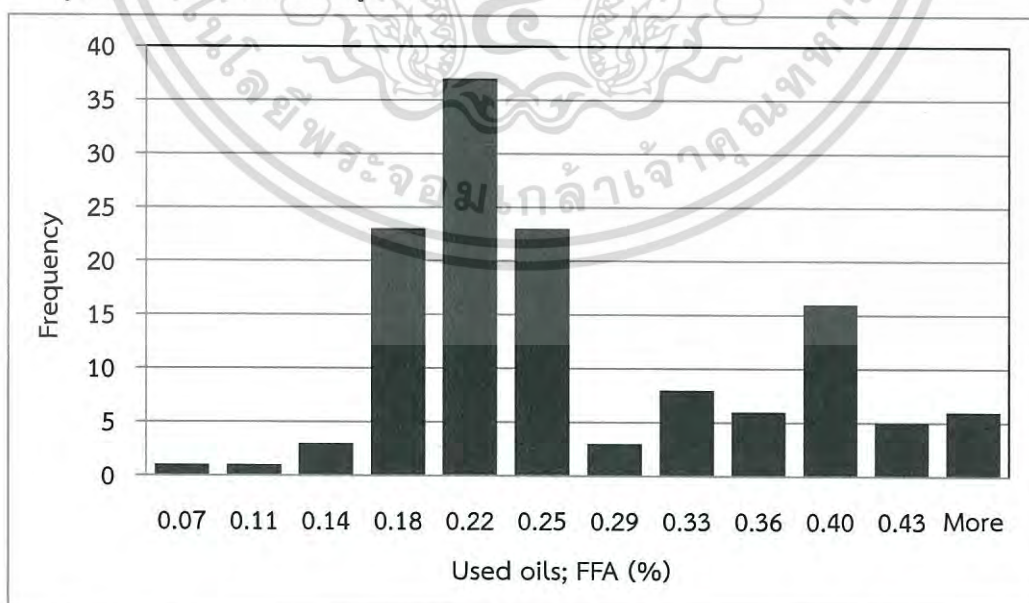
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณกรดไขมันอิสระเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 0.25 ± 0.09 มีค่าต่ำสุดเท่ากับร้อยละ 0.07 และค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 0.47 และค่าเพอร์ออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 5.55 (meq/kg) มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.33 (meq/kg) และค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 11.52 (meq/kg)



ภาพที่ 4.26 กราฟฮิสโตแกรมของข้อมูลปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม

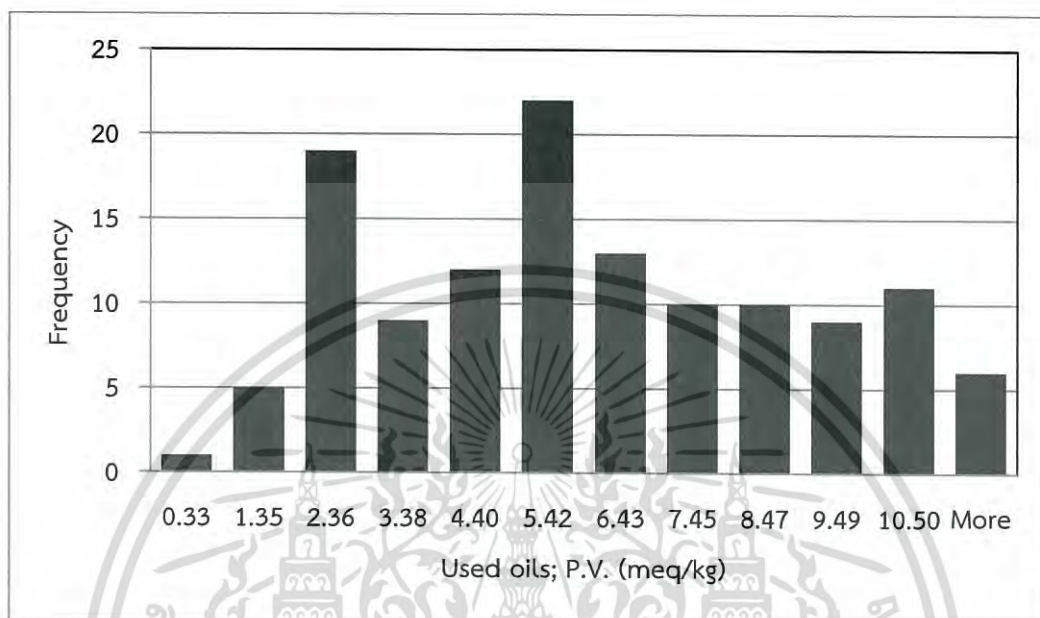
ภาพที่ 4.26 แสดงกราฟฮิสโตแกรมของข้อมูลความถี่ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรม พบว่าข้อมูลจำนวน 150 ตัวอย่าง มีความถี่ของข้อมูลไม่สม่ำเสมอ โดยมีปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดความถี่สูงสุดเท่ากับ 9.29% (50 ข้อมูล) 12.08% (33 ข้อมูล) และ 17.67% (25 ข้อมูล) ตามลำดับ



ภาพที่ 4.27 กราฟฮิสโตแกรมของข้อมูลปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.27 แสดงกราฟฮิสโตแกรมของข้อมูลปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรม พบว่าข้อมูลจำนวน 150 ตัวอย่าง มีความถี่ของข้อมูลไม่สม่ำเสมอ โดยมีปริมาณกรดไขมันอิสระความถี่สูงสุดเท่ากับ 0.22% (37 ข้อมูล) 0.18% (23 ข้อมูล) และ 0.25% (17 ข้อมูล) ตามลำดับ



ภาพที่ 4.28 กราฟฮิสโตแกรมของข้อมูลปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม

ภาพที่ 4.28 แสดงกราฟฮิสโตแกรมของข้อมูลค่าเพอร์ออกไซด์ของน้ำมันทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรม พบว่าข้อมูลจำนวน 150 ตัวอย่าง มีความถี่ของข้อมูลสม่ำเสมอ โดยมีค่าเพอร์ออกไซด์ความถี่สูงสุดเท่ากับ 5.42 meq/kg (22 ข้อมูล) 2.36 meq/kg (19 ข้อมูล) และ 6.43 meq/kg (13 ข้อมูล) ตามลำดับ

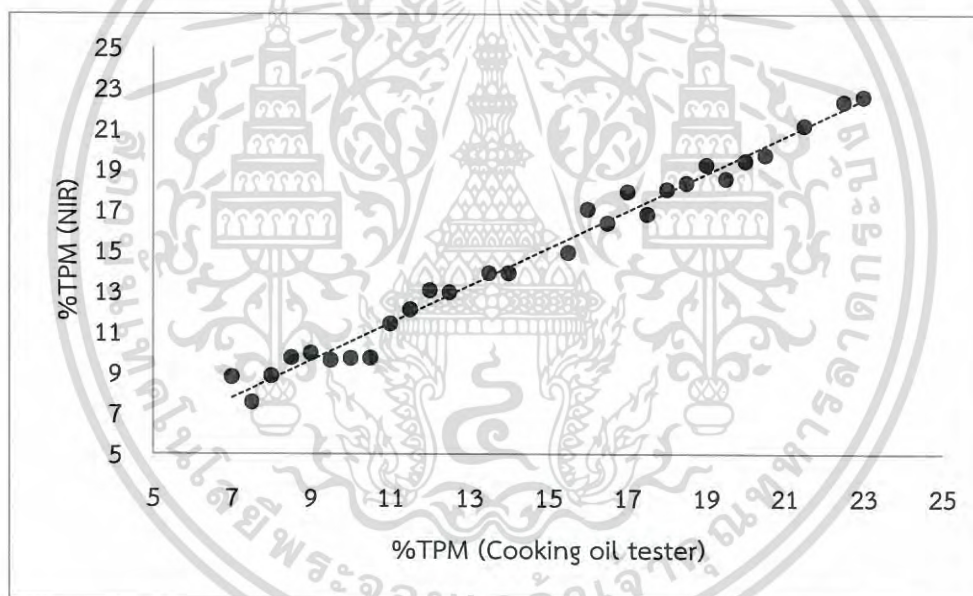
4.3.1.2 การทำนายและการเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดในน้ำมันทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรม

ค่าการทำนายและการเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดในน้ำมันทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วย NIRS กับการวัดโดยใช้อุปกรณ์ Cooking Oil Tester ด้วย 3 วิธี ได้แก่ NIR General A และ General B แสดงดังตารางที่ 4.6 จากผลการทดสอบพบว่าวิธี NIR เป็นวิธีที่มีความแม่นยำในการสร้างแบบจำลองที่ดีที่สุด ($R^2 = 0.98$) ประกอบไปด้วย 9 Rank RMSECV = 0.711 ค่า RPD = 6.96 และค่า Bias = -0.151 สมรรถนะของการทำนายดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้ โดยสามารถสร้างเส้นสมการถดถอยของการทำนายและการเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดในน้ำมันทอดซ้ำได้ดังภาพที่ 4.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIR ด้วยวิธีทางสถิติแบบ partial least squares regression ทดสอบประสิทธิภาพของสมการแบบ Test set validation

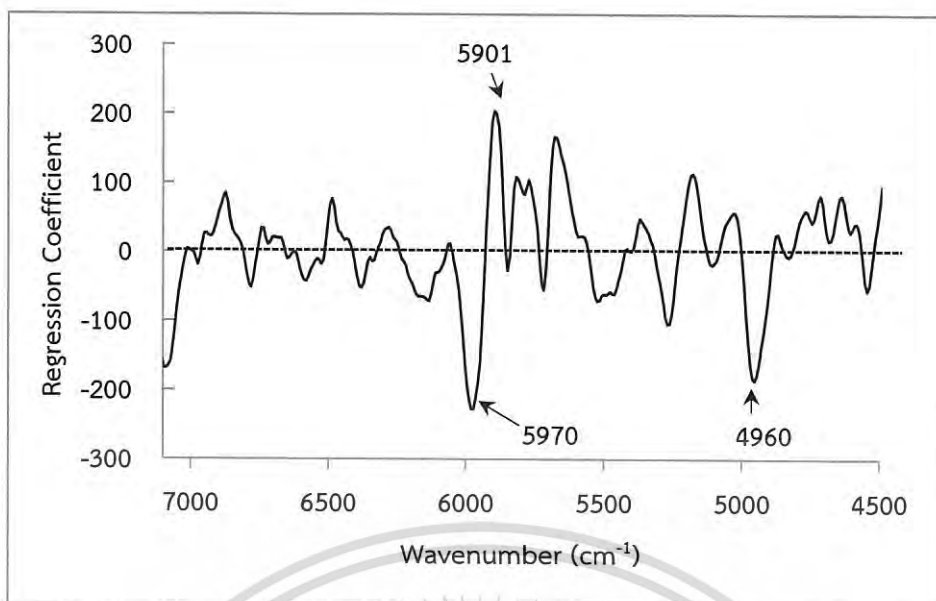
Methods	Rank	Pretreatment	Calibration (n =115)			Validation (n =28)			
			R ²	RMSEE	RPD	R ²	RMSECV	RPD	Bias
NIR n =143	9	Min-Max normalization	0.98	0.619	7.00	0.98	0.711	6.96	-0.151
General A n =143	8	Multiplicative scattering correction	0.98	0.644	6.70	0.98	0.818	5.98	0.128
General B n =143	8	First derivative + Vector Normalization (SNV)	0.98	0.640	6.74	0.98	0.762	6.35	-0.040



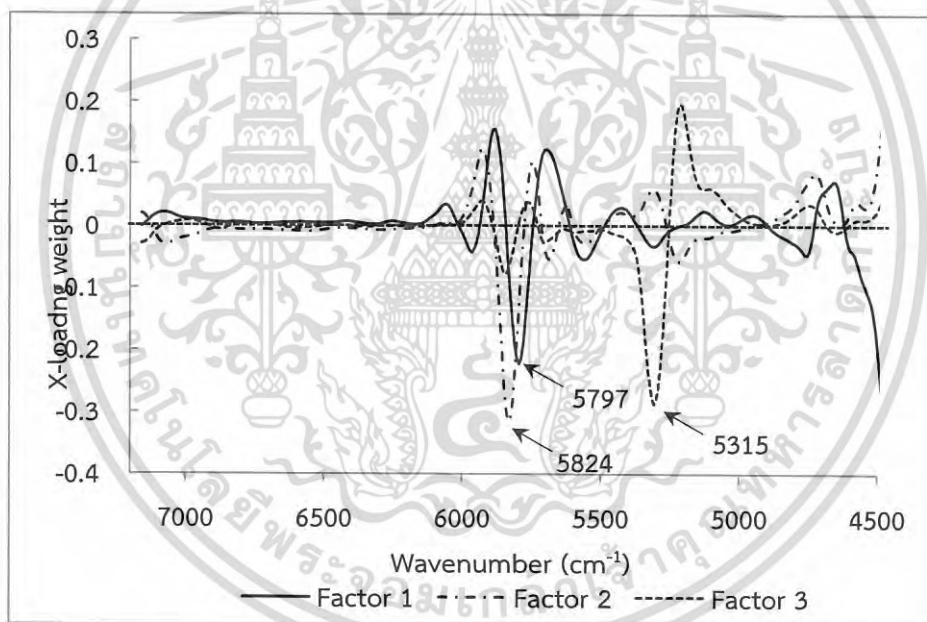
ภาพที่ 4.29 การเปรียบเทียบปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (X axis) กับวัดโดยอุปกรณ์ Cooking Oil Tester (Y axis)

ภาพที่ 4.29 แสดงเส้นสมการถดถอยการเปรียบเทียบปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับวัดโดยอุปกรณ์ Cooking Oil Tester จัดการสเปกตรัมเบื้องต้นของตัวอย่างด้วยวิธี Min-Max normalization ช่วงพีคสูงสุดของตัวอย่างถูกนำมาสร้างสมการคือ พีคช่วง 5454-4597.7 cm^{-1} (2175-1834 nm) ซึ่งมีช่วงพีคของ C-H/C=O lipid associated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.30 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนาย ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ



ภาพที่ 4.31 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIRS

ภาพที่ 4.30 แสดงกราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วย NIRS พิกัดสูงสุดที่สัมพันธ์กับแบบจำลองซึ่งชี้ให้เห็นการสั่นของพันธะเคมีของตัวอย่างซึ่งเรียงลำดับจาก Wavenumber ที่มีค่า Regression coefficient สูงสุดไปยังค่าที่น้อยกว่า พบว่าการสั่นสะเทือนของ C-H methyl C-H (5970 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนาย

ภาพที่ 4.31 แสดงค่า X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIRS ค่าพิกัดสูงสุดที่สัมพันธ์กับแบบจำลองซึ่งชี้ให้เห็นการสั่นของพันธะเคมี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตัวอย่างซึ่งเรียงลำดับจาก Wavenumber ที่มีค่า X-loading สูงสุดไปยังค่าที่น้อยกว่า พบว่าการสั่นสะเทือนของ C-H methylene (CH_2) (5797 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดของน้ำมันทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรม

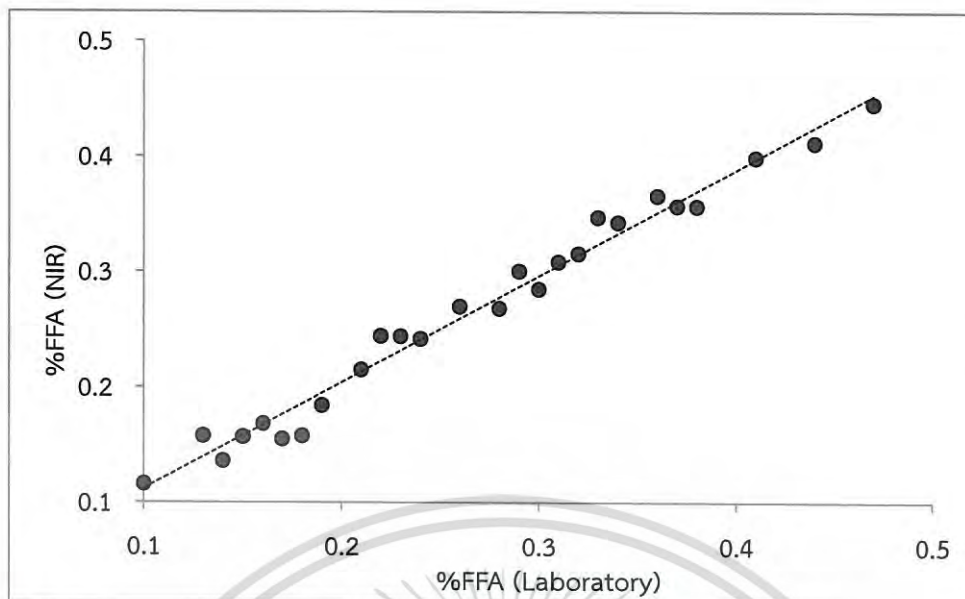
4.3.1.2 การทำนายและการเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันในน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วย

ค่าการทำนายและการเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันในน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วย NIR กับการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วย 3 วิธี ได้แก่ NIR, General A และ General B แสดงดังตารางที่ 4.6 จากผลการทดสอบพบว่าวิธี NIR เป็นวิธีที่มีความแม่นยำในการสร้างแบบจำลองที่ดีที่สุด ($R^2 = 0.98$) ประกอบไปด้วย 7 Rank, ค่า RMSECV = 0.015, ค่า RPD = 6.64 และค่า Bias = 0.001 สมรรถนะของการทำนายดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้ โดยสามารถสร้างเส้นสมการถดถอยของการทำนายและการเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดในน้ำมันทอดซ้ำได้ดังภาพที่ 4.30

ตารางที่ 4.7 ผลการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIR ด้วยวิธีทางสถิติแบบ partial least squares regression ทดสอบประสิทธิภาพของสมการแบบ Test set validation

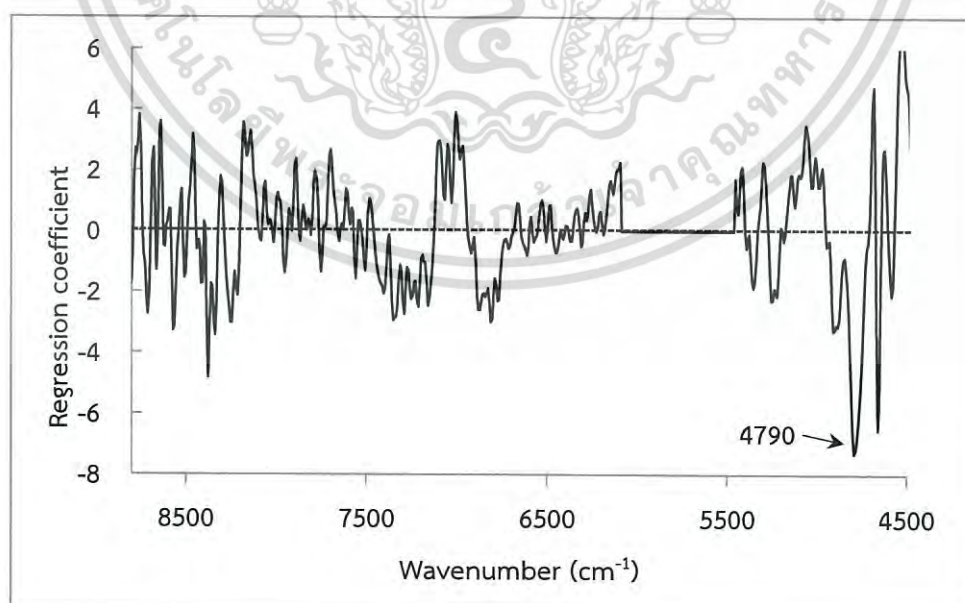
Methods	Rank	Pretreatment	Calibration (n =106)			Validation (n =26)			
			R^2	RMSEE	RPD	R^2	RMSECV	RPD	Bias
NIR n =132	7	Straight line subtraction	0.98	0.014	6.50	0.98	0.015	6.64	0.001
General A n =132	7	Straight line subtraction	0.97	0.014	6.26	0.97	0.017	5.96	0.001
General B n =132	7	Straight line subtraction	0.97	0.014	6.26	0.97	0.017	5.96	0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



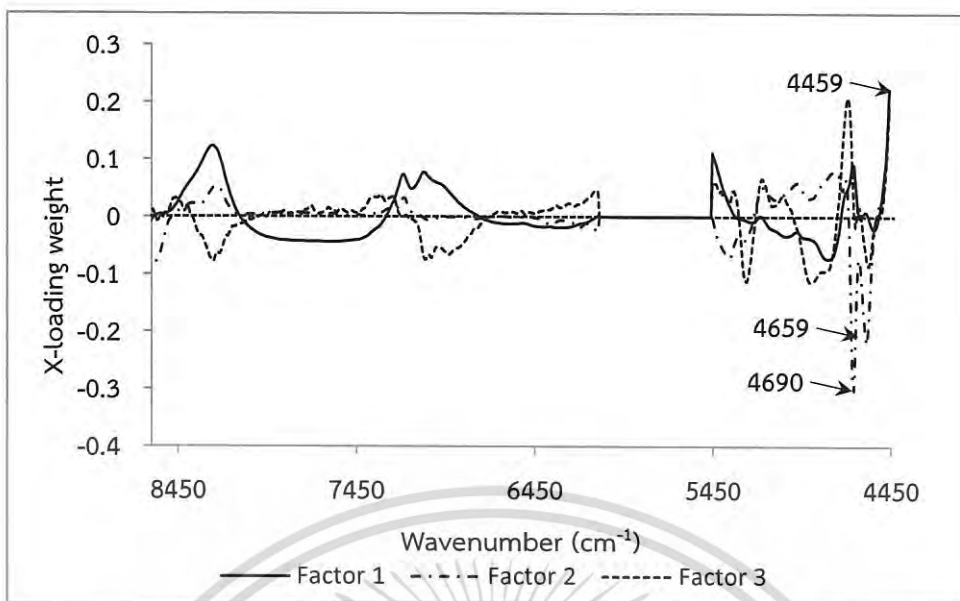
ภาพที่ 4.32 การเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระของทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (X axis) กับการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Y axis)

ภาพที่ 4.32 แสดงเส้นสมการถดถอยของการเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระของทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ จัดการสเปกตรัมเบื้องต้นของตัวอย่างด้วยวิธี First derivative ช่วงพิกสูงสุดของตัวอย่างถูกนำมาสร้างสมการคือ พิกช่วง $8940.9-7498.3 \text{ cm}^{-1}$ ($2175-1639 \text{ nm}$) ซึ่งเป็นช่วงพิกของ C-H methyl (C-H_3)



ภาพที่ 4.33 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.34 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIR

ภาพที่ 4.34 แสดงกราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วย NIR พิกัดสูงสุดที่สัมพันธ์กับแบบจำลองซึ่งชี้ให้เห็นการสั่นของพันธะเคมีของตัวอย่างซึ่งเรียงลำดับจาก Wavenumber ที่มีค่า Regression coefficient สูงสุดไปยังค่าที่น้อยกว่า พบว่าการสั่นสะเทือนของ N-H sym. Str. + amide II (4790 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนาย

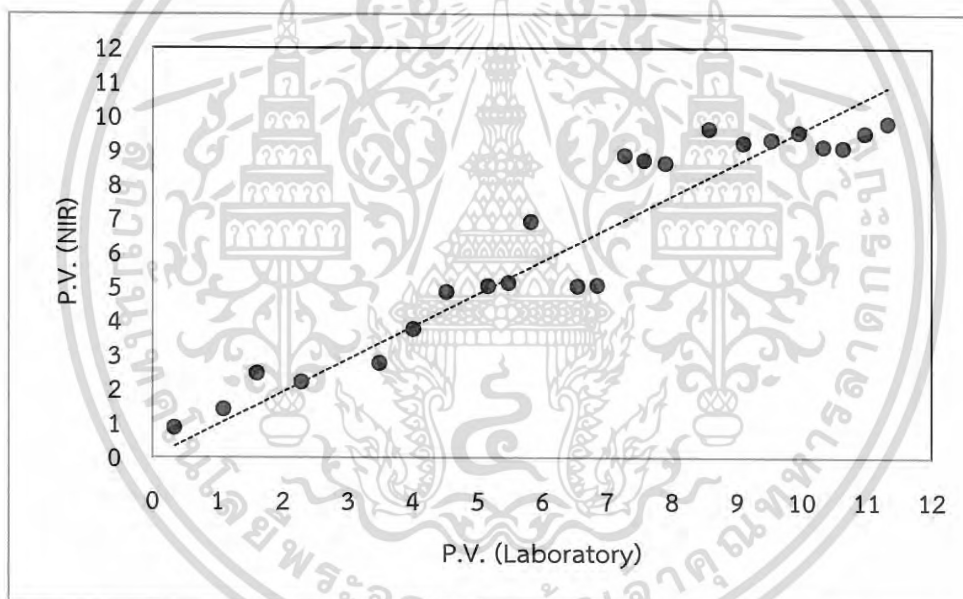
ภาพที่ 4.32 แสดงค่า X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายปริมาณกรดไขมันอิสระของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIR ค่าพิกัดสูงสุดที่สัมพันธ์กับแบบจำลองซึ่งชี้ให้เห็นการสั่นของพันธะเคมีของตัวอย่างซึ่งเรียงลำดับจาก Wavenumber ที่มีค่า X-loading สูงสุดไปยังค่าที่น้อยกว่า พบว่าการสั่นสะเทือนของ C-H str. First overtone (4459 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนาย

4.3.1.3 การทำนายและการเปรียบเทียบผลการทำนายค่าเปอร์ออกไซด์ในน้ำมันทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรม

ค่าการทำนายและการเปรียบเทียบผลการทำนายค่าเปอร์ออกไซด์ในน้ำมันทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วย NIR กับการไทเทรตสารละลายมาตรฐานไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ด้วย 3 วิธี ได้แก่ NIR, General A และ General A แสดงดังตารางที่ 4.7 จากผลการทดสอบพบว่าวิธี NIR เป็นวิธีที่มีความแม่นยำในการสร้างแบบจำลองที่ดี ($R^2 = 0.815$) ประกอบไปด้วย 6 Rank, RMSECV = 1.24, ค่า RPD = 2.33 และค่า Bias = -0.0015 สมรรถนะของการทำนายใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย โดยสามารถสร้างเส้นสมการถดถอยของการทำนายและการเปรียบเทียบผลการทำนายปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดในน้ำมันทอดซ้ำได้ดังภาพที่ 4.33

ตารางที่ 4.8 ผลการทำนายค่าเปอร์ออกไซด์ของน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIR ด้วยวิธีทางสถิติแบบ partial least squares regression ทดสอบประสิทธิภาพของสมการแบบ Test set validation

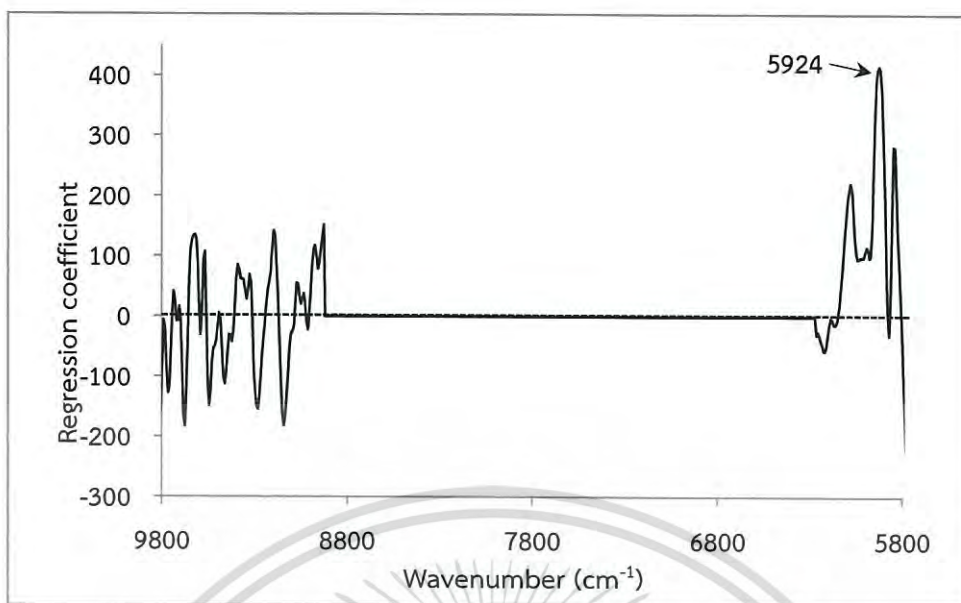
Methods	Rank	Pretreatment	Calibration (n =102)			Validation (n =24)			
			R ²	RMSEE	RPD	R ²	RMSECV	RPD	Bias
NIR n =128	9	First derivative + MSC	0.87	1.07	2.73	0.87	1.18	2.79	0.067
General A n =128	4	Multiplicative scattering correction	0.75	1.41	2.00	0.85	1.26	2.60	-0.010
General B n =128	6	First derivative + Vector Normalization (SNV)	0.85	1.13	2.54	0.91	0.994	3.30	0.150



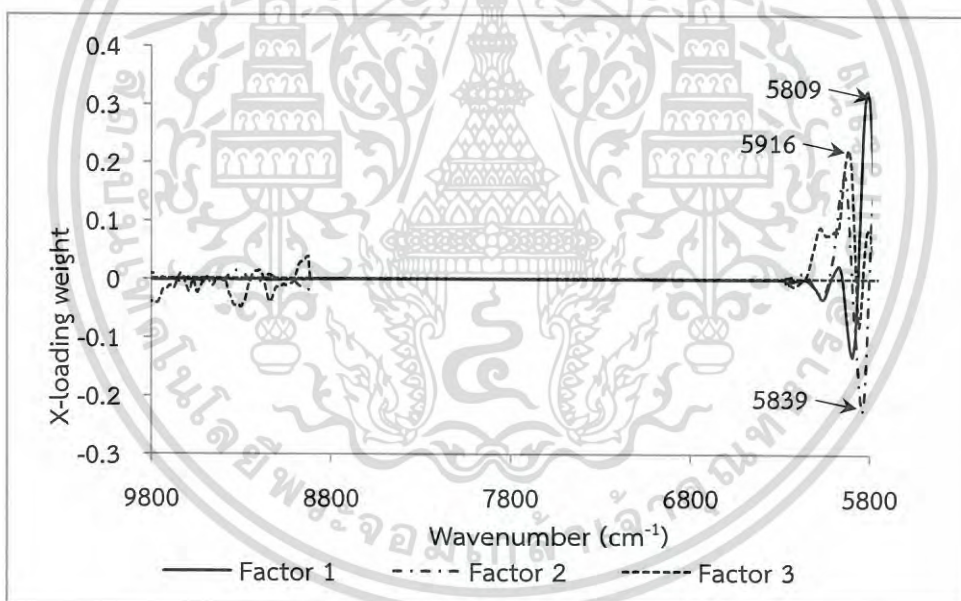
ภาพที่ 4.35 การเปรียบเทียบค่าเปอร์ออกไซด์ของทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (X axis) กับการไทเทรตสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (Y axis)

ภาพที่ 4.35 แสดงเส้นสมการถดถอยของการเปรียบเทียบค่าเปอร์ออกไซด์ของทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับการไทเทรตสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต จัดการสเปกตรัมเบื้องต้นของตัวอย่างด้วยวิธี Second derivative ช่วงพีคสูงสุดของตัวอย่างถูกนำมาสร้างสมการคือ พีคช่วง $6102\text{-}5446.3\text{ cm}^{-1}$ ($2175\text{-}1639\text{ nm}$) ซึ่งมีช่วงพีคของ C-H methyl

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.36 กราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ



ภาพที่ 4.37 X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIRS

ภาพที่ 4.36 แสดงกราฟค่าระหว่าง Regression coefficient ของแบบจำลองที่ดีที่สุดของการทำนายค่าเพอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำจากการผลิตอาหารทอดในระดับอุตสาหกรรมด้วย NIRS พิกัดสูงสุดที่สัมพันธ์กับแบบจำลองซึ่งชี้ให้เห็นการสั่นของพันธะเคมีของตัวอย่างซึ่งเรียงลำดับจาก Wavenumber ที่มีค่า Regression coefficient สูงสุดไปยังค่าที่น้อยกว่า พบว่าการสั่นสะเทือนของ C-H methyl C-H, OH associated as (ROHCH₃) (5924 cm⁻¹) มีผลสูงสุดต่อการทำนาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.37 แสดงค่า X-loading ของแบบจำลองที่ทำนายค่าเปอร์ออกไซด์ของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำด้วย NIRS ค่าพีคสูงสุดที่สัมพันธ์กับแบบจำลองซึ่งชี้ให้เห็นการสั่นของพันธะเคมีของตัวอย่าง ซึ่งเรียงลำดับจาก Wavenumber ที่มีค่า X-loading สูงสุดไปยังค่าที่น้อยกว่า พบว่าการสั่นสะท้อนของ C-H methylene (CH_2) (5809 cm^{-1}) มีผลสูงสุดต่อการทำนาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลองของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำในห้องปฏิบัติการ

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันทอดซ้ำ ได้แก่ ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมด ปริมาณกรดไขมันอิสระ และค่าเพอร์ออกไซด์ ของน้ำมัน 2 ชนิด ได้แก่ น้ำมันรำข้าวและน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีน้ำมันทั้ง 2 ชนิดสแกนด้วย NIRS โดยวิธีส่องผ่าน นำข้อมูลทั้งหมดมาสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์โดยวิธีทาง Chemometric แบบ Partial least squares regression และวิธีการพิสูจน์แบบไขว้ เนื่องจากตัวอย่างน้ำมันมีน้อยกว่า 100 ตัวอย่าง เลือกแบบจำลองจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ระหว่างค่าการทำนายด้วย NIR และค่าที่วัดด้วยวิธีมาตรฐานสูงสุด และค่ารากที่สองของการพิสูจน์แบบไขว้ (RMSECV) ต่ำที่สุด สำหรับตัวอย่างน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ ปริมาณ %TPM = 0.972, 0.501 ปริมาณ %FFA = 0.927, 0.015 และค่า PV (meq/kg) = 0.983, 0.034 และในตัวอย่างน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำ ปริมาณ %TPM = 0.95, 0.854 ปริมาณ %FFA = 0.96, 0.043 และค่า PV (meq/kg) = 0.98, 0.037 จากผลที่ได้เห็นว่า NIR สามารถทำนายค่าคุณภาพของน้ำมันทอดซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพในระดับที่สามารถใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพสำหรับการทำนายน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำ และปริมาณ TPM และปริมาณ FFA ในน้ำมันมะพร้าว รวมถึงประสิทธิภาพในระดับที่ดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้สำหรับการทำนายค่า PV ในน้ำมันมะพร้าวทอดซ้ำ

แต่การทดลองของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำในห้องปฏิบัติการ ใช้ตัวอย่างในการสร้างแบบจำลองเพียง 50 ตัวอย่าง และครอบคลุมตัวอย่างเฉพาะน้ำมันที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนวิธีการวัดและการพัฒนาการสร้างแบบจำลอง ดังนี้

1. ควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างและชนิดของน้ำมันทอดซ้ำ เพื่อให้ค่าการทำนายตัวอย่างครอบคลุมมากขึ้นโดยการรวมตัวอย่างน้ำมันที่ตรวจวัดให้เป็นกลุ่มตัวอย่างเดียว ทำให้แบบจำลองที่ได้สามารถทำนายได้ทุกชนิดน้ำมันที่ทดลองและแบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงขึ้น
2. ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดด้วยอุปกรณ์ Cooking Oil Tester ต้องวัดขณะตัวอย่างน้ำมันร้อน และควรแยกตัวอย่างน้ำมันที่ต้องการตรวจวัดแยกออกมาวัดต่างหาก ไม่ควรวัดในกระทะหรือภาชนะอุปกรณ์ที่ใช้ทอดเพราะจะทำให้ได้ค่าไม่สม่ำเสมอ

5.2 สรุปผลการทดลองของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม

จากผลการทดลองของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำในห้องปฏิบัติการ มาปรับเปลี่ยนวิธีการวัดและพัฒนาแบบการสร้างจำลองให้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้นและเกิดความผิดพลาดน้อยลง ตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำในการผลิตอาหารทอดระดับอุตสาหกรรมเพิ่มจำนวนชนิดเพื่อให้ครอบคลุมน้ำมันที่ใช้ในการทอดในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ น้ำมันรำข้าว น้ำมันปาล์มโอเลอิน และน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีจำนวนชนิดละ 50 ตัวอย่าง รวม 150 ตัวอย่าง สำหรับสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์โดยวิธีทาง Chemometric แบบ Partial least squares regression และวิธีการพิสูจน์แบบ Test set validation อัตราส่วนข้อมูลการสร้างแบบจำลองต่อข้อมูลการทดสอบแบบจำลอง 80 : 20 แบบจำลองให้ค่า R^2 ระหว่างค่าการทำนายด้วย NIR และค่าที่วัดด้วยวิธีมาตรฐาน และค่า RMSEE เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ปริมาณ %TPM = 0.98, 0.711 ปริมาณ %FFA = 0.98, 0.015 และค่า PV (meq/kg) = 0.87, 1.180 งานวิจัยนี้สามารถทำนายค่าคุณภาพของน้ำมันทอดซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดี โดยปริมาณ TPM และ FFA มีสมรรถนะของแบบจำลองดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้ ส่วนค่า PV สมรรถนะการทำนายของแบบจำลองสามารถใช้การประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย แต่ต้องใช้ด้วยความระมัดระวัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] CL Ng, RL Wehling and SL Cuppett. "Near-Infrared Spectroscopic Determination of Degradation in Vegetable Oils Used to Fry Various Foods", *J.Agric. Food Chem.*, Vol.55, March, 2007. pp. 593-597
- [2] WA Chen, CP Chiu, WC Cheng, CK Hsu and MI Kuo. "Total Polar Compounds and Acid Values of Repeatedly Used Flying Oils Measured by Standard and Rapid Methods", *Journal of Food Drug Analysis.*, Vol.21, January, 2013. pp. 58-65
- [3] Brooks, D.D. "Some Prespective on Deep-Fat Frying", *INFROM* 1991, 2, 1091-1095
- [4] ศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร. "ส่วนแบ่งการตลาดน้ำมันพืช ปี 2558" [Online]. Available: <http://fic.nfi.or.th/MarketOverviewDomesticDetail.php?id=102>. 2016.
- [5] นิธิยา รัตนাপนนท์ และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. "Frying/การทอด" [Online]. Available: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0347/frying>. 2016.
- [6] E Choe and DB Min. "Chemistry of Deep-Fat Frying Oils", *Journal of Food Science*, Vol.72, June/July, 2007. pp. 77-86
- [7] ทิพยเนตร อริยปิติพันธ์. "อันตรายของน้ำมันทอดซ้ำ" [Online]. Available : http://www.Nutritionthailand.or.th/scripts/natmagazine_content.asp. 2015.
- [8] บัณฑิตมากรณ์ อุดมคุณ และคณะ. 2549. "ดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำมันที่เหมาะสมสำหรับการประเมิณคุณภาพน้ำมันทอด" หน้า 35-45. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44 สาขาอุตสาหกรรมเกษตร สาขาเศรษฐศาสตร์ สาขาบริหารธุรกิจ. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [9] JA Gerde, CL Hardy, CR Hurburgh and PJ White. "Rapid Determination of Degradaation in Frying Oils with Near-Infrared Spectroscopy", *Journal of the American Oil Chemists' Society.*, Vol.84, May, 2007. pp. 519-522
- [10] ปานมนัส ศิริสมบุรณ์. "เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลิตภัณฑ์เกษตรและอาหาร (ตอนที่ 1)" [Online]. Available: http://www.foodnetworksolution.com/new_and_article/0298. 2015.
- [11] พรรณทิพย์ ห่อศรีสัมพันธ์. "NIR Spectrometer เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์สารอินทรีย์" [Online]. Available : <http://nirapplication.blogspot.com/2008/03/nir-spectro-Meter.html>. 2015.
- [12] D Cozzolino, MJ Kwiatkowski, M Parker, WU Cynkar, RG Damberg, M Gishn and MJ Herderich. "Prediction of phenolic compounds in red wine fermentation by visible and near infrared spectroscopy". *Analytica Chimica Acta.*, Vol.513, June, 2004. pp. 73-80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] S Kazemi, N Wang, M Ngadi and SO Prasher. "Evaluation of Frying Oil Quality Using VIS/NIR Hyperspectral Analysis" *Agricultural Engineering International*, Vol.7, September, 2005. pp. 1-12
- [14] นิธิยา รัตนาปนนท์. *วิทยาศาสตร์การอาหารของไขมันและน้ำมัน*. กรุงเทพฯ: โอ.เอส. พรีนติ้งเฮาส์. 2548.
- [15] นิธิยา รัตนาปนนท์. *เคมีอาหาร*. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์. 2557.
- [16] G Perretti, E. Miniati, L. Montanari, and P. Fantozzi., "Improving the value of rice by-products by SFE" *The Journal of Supercritical Fluids.*, Vol.26, May, 2007. pp. 63-71
- [17] อรุณศรี ปรีเปรม ผดุงขวัญ จิตโรภาส และบังอร ศรีพานิชกุลชัย. "รำข้าวที่มีคุณภาพ : คุณค่าต่อสุขภาพ (Rice bran : Its value for health)" *วารสารศูนย์บริการวิชาการ.*, Vol.3, กรกฎาคม-กันยายน, 2548. pp. 4-9
- [18] วิไล รังสาดทอง. *เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2543.
- [19] นิธิยา รัตนาปนนท์ และไพโรจน์ วิริยจารี. *เทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร*. เชียงใหม่: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2547.
- [20] ธารดาว ทองแก้ว. "น้ำมันพืช : ใช้อย่างไรให้ถูกต้องและปลอดภัย" [Online]. Available : <https://www.doctor.or.th/article/detail/1662>. 2546.
- [21] W Nawar. *Food Chemisry*. O. FENNEMA (Ed.). New York: Marcel Dekker. 1985.
- [22] DP Houhoula, V Oreopoulou, and C Tzia. "A kinetic study of oil deterioration during frying anda comparison with heating". *J. Am. Oil Chem. Soc.*, Vol.79(2), 2002. pp.133-137
- [23] S Paul and GS Mittal. "Regulating the use of degraded oil/fat in deep-fat/oil food frying". *J. Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, Vol. 37, 1997. pp. 635-662
- [24] A Romero, C Cuesta and FJ Sanchez-Muniz. "Effect of oil replenishment during deep fat frying of frozen foods in sunflower oil and high-oleic acid sunflower oil". *J. Am. Oil Chem. Soc.* Vol. 75, 1998. pp. 161-167
- [25] G Márquez-Ruiz and MC Dobarganes. *Nutritional and physi-ological effects of used frying fats*. In: *Deep Frying: Chem-istry. Nutrition and Practical Applications*. Eds. EG Perkins and MD Erickson. American Oil Chemists' Society: Cham-paign, Illinois (USA). 1996.
- [26] Da-Wen Sun. *Advances in deep-fat frying of foods*. Serpil Sahin and Servet Gülüm Sumnu (Ed.). New York: CRC Press Taylor & Francis Group. 2009.
- [27] นิธิยา รัตนาปนนท์ และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. "Lipid oxidation/ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด" [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/lipid-oxidation-ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด>. 2016.
- [28] กระทรวงสาธารณสุข. *ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 205) เรื่อง น้ำมันและไขมัน*. 2543.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [29] J Chung, J Lee and E Choe. "Oxidative Stability of Soybean and Sesame Oil Mixture during Frying of Flour Dough". *Journal of Food Science.*, Vol. 69, 2004. pp. 574-578
- [30] M Hein, H Henning and HD Isengard. "Determination of total polar parts with new methods for the quality survey of frying fats and oils". *Talanta.*, Vol. 47, 1998. pp. 447-454
- [31] ML Shyu, BF Lin and W Chiang. "Effect of dehulled adlay on allergic responses of sensitized mice". *Nutritional Science Journal.*, Vol 23,1998. pp. 161-170
- [32] JB Rossell. *Frying : improving quality*. Boca Raton: CRC Press. 2001.
- [33] Ocean optic. "NIR Spectroscopy Unbound" [Online]. Available : <https://oceanoptics.com/nir-spectroscopy-unbound/2016>.
- [34] อภิดุลย์ แก้วกับทอง. "การตรวจสอบปริมาณเนื้อเยื่อของน้ำยางพาราสดและชั้นด้วยวิธีไม่ทำลายโดยเทคนิค Near-infrared spectroscopy". วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.
- [35] A.M.C. Davies. "an Introduction to Near Infrared (NIR) Spectroscopy". [Online]. Available : <https://www.impublications.com/content/introduction-near-infrared-nir-spectroscopy>. 2016.
- [36] Jörg-Peter Conzen. *Multivariate Calibration A practical guide for developing methods in the quantitative analytical chemistry*. 2nd English Edition, 2006.
- [37] จงชัย สุวรรณสิขณน์. "การวิเคราะห์สเปกตรัม NIR ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ Data Analysis of NIR Spectra: Qualitative and Quantitative Analysis" การอบรมเชิงปฏิบัติการ เรื่อง การควบคุมสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. หน้า 116-119
- [38] Williams P. *Near-infrared Technology-Getting the best out of light Edition 5.0. A short course in practical implementation of near-infrared spectroscopy for the user*. PDK Grain. Canda : Namaimo, Inc.2007.
- [39] RJ Mailer. "Rapid Evaluation of Olive Oil Quality by NIR Reflectance Spectroscopy". *Journal of the American Oil Chemists' Society.*, Vol. 81, 2004. pp. 823-827
- [40] J Kuligowski, D Carrión, G Quintás, S Garrigues and M de la Guardia. "Direct determination of polymerised triacylglycerides in deep-frying vegetable oil by near infrared spectroscopy using Partial Least Squares regression". *Food Chemistry.*, Vol. 113, 2012. pp. 353-359
- [41] YBC Man and MH Moh. "Determination of Free Fatty Acids in Palm Oil by Near-Infrared Reflectance Spectroscopy". *Journal of the American Oil Chemists' Society.*, Vol. 75, 1998. pp. 557-562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [42] KN Basri, MN Hussain, J Bakar, Z Sharif, MF Abdul Khir, and AS Zoolfakar. "Classification and quantification of palm oil adulteration via portable NIR spectroscopy". *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, Vol 173, 2017. Pp.335-345
- [43] Osborn, B.G., and Fearn T., "Near infrared spectroscopy in food analysis (1st published, pp. 117", Longman Science & Technical, UK.1986.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการ	ระยะเวลาดำเนินการ (เดือน)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
ศึกษากระบวนการผลิตอาหารทอดในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับโรงงาน สํารวจข้อมูลการเลือกใช้น้ำมันที่ใช้ทอด และการตรวจวัดคุณภาพน้ำมันทอดซ้ำที่ใช้กันโดยทั่วไปในระดับอุตสาหกรรม	*	*											
สร้างตัวอย่างสำหรับการทดลองเบื้องต้นจากการทอดอาหารในห้องปฏิบัติการ - สแกนตัวอย่างด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด สแกนตัวอย่างด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 12500-3600 cm^{-1} (800-2778 nm) โดยวิธีสะท้อนแสงแบบแพร่ (Diffuse Reflectance) - วัดคุณภาพของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ ได้แก่ ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมด ปริมาณกรดไขมันอิสระ และปริมาณเปอร์ออกไซด์			*	*	*								
สร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของตัวอย่างน้ำมันทอดซ้ำ กับ Optical data โดยวิธีทาง Chemometric แบบ Partial least square regression โดยใช้สเปกตรัมดั้งเดิมหรือสเปกตรัมที่ผ่านการจัดการทางคณิตศาสตร์เบื้องต้น โดยใช้โปรแกรม OPUS					*	*							
ทดสอบแบบจำลอง เพื่อใช้ทำนายคุณภาพของน้ำมันทอดซ้ำของตัวอย่าง โดยวิธีการแบบไขว้ (Cross validation)						*	*						
วิเคราะห์ความยาวคลื่นเนียร์อินฟราเรดที่มีผลต่อการวัดคุณภาพน้ำมันทอด								*					
ประยุกต์ใช้วิธีการในโรงงานผลิตอาหารทอดหรือหน่วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตอาหารทอด									*	*			
สรุปผล และเขียนรายงาน										*	*	*	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ข้อมูลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ

รหัสตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยทางเคมีที่ตรวจวัด		
	%TPM	%FFA	P.V. (meq/kg)
RB001	9.5	0.22	3.50
RB002	10.5	0.26	3.59
RB003	9.0	0.27	3.61
RB004	9.5	0.27	3.53
RB005	8.5	0.25	3.55
RB006	8.5	0.23	3.49
RB007	8.5	0.24	3.48
RB008	8.5	0.23	3.40
RB009	8.5	0.23	3.48
RB010	10.0	0.24	3.54
RB011	8.5	0.23	3.50
RB012	8.5	0.24	3.47
RB013	8.5	0.24	3.40
RB014	8.5	0.24	3.48
RB015	8.5	0.25	3.59
RB016	8.5	0.23	3.46
RB017	13.0	0.24	3.36
RB018	9.5	0.22	3.45
RB019	10.5	0.45	3.36
RB020	11.0	0.45	3.38
RB021	9.0	0.45	3.34
RB022	10.5	0.45	3.32
RB023	9.0	0.45	3.26
RB024	12.0	0.45	3.21
RB025	10.5	0.45	3.13
RB026	8.5	0.45	3.18
RB027	8.5	0.45	3.32
RB028	8.5	0.45	3.30
RB029	9.0	0.45	3.20
RB030	8.5	0.46	3.20
RB031	9.5	0.46	3.21
RB032	9.5	0.47	3.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ (ต่อ)

รหัสตัวอย่าง	ค่าทางเคมีที่ตรวจวัด		
	%TPM	%FFA	P.V. (meq/kg)
RB033	9.50	0.48	3.12
RB034	9.50	0.48	3.13
RB035	40.00	0.51	3.21
RB036	9.50	0.51	3.10
RB037	8.50	0.51	2.90
RB038	8.50	0.51	3.03
RB039	8.50	0.51	3.00
RB040	8.50	0.51	2.92
RB041	7.00	0.51	3.02
RB042	7.50	0.51	2.93
RB043	7.50	0.51	2.83
RB044	11.50	0.51	2.88
RB045	9.50	0.51	2.78
RB046	15.50	0.51	2.85
RB047	16.00	0.51	2.77
RB048	17.00	0.56	2.85
RB049	17.50	0.56	2.84
RB050	22.00	0.48	2.78
Mean	11.40	0.45	3.23
SD	5.030	0.06	0.26
Max	40.00	0.56	3.61
Min	7.50	0.22	2.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ

รหัสตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยทางเคมีที่ตรวจวัด		
	%TPM	%FFA	P.V. (meq/kg)
CR001	32.00	0.10	2.60
CR002	32.00	0.16	2.58
CR003	32.00	0.20	2.58
CR004	32.50	0.21	2.52
CR005	32.50	0.24	2.52
CR006	33.00	0.26	2.52
CR007	33.50	0.27	2.50
CR008	34.00	0.27	2.50
CR009	34.50	0.27	2.49
CR010	35.50	0.11	2.48
CR011	36.00	0.29	2.43
CR012	36.00	0.32	2.42
CR013	36.50	0.32	2.41
CR014	36.50	0.30	2.38
CR015	36.50	0.31	2.35
CR016	37.00	0.31	2.35
CR017	37.50	0.32	2.32
CR018	37.50	0.11	2.32
CR019	38.00	0.31	2.28
CR020	38.00	0.31	2.26
CR021	39.00	0.31	2.26
CR022	40.00	0.32	2.21
CR023	40.00	0.33	2.20
CR024	-	0.32	2.20
CR025	-	0.41	2.19
CR026	-	0.43	2.17
CR027	-	0.44	2.15
CR028	-	0.44	2.13
CR029	-	0.11	2.11
CR030	-	0.44	2.10
CR031	-	0.45	2.04
CR032	-	0.52	2.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีทอดซ้ำที่ได้จากการทอดอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ (ต่อ)

รหัสตัวอย่าง	ค่าทางเคมีที่ตรวจวัด		
	%TPM	%FFA	P.V. (meq/kg)
CR033	-	0.56	2.00
CR034	-	0.60	1.96
CR035	-	0.60	1.93
CR036	33.50	0.11	1.88
CR037	34.00	0.64	1.84
CR038	34.50	0.64	1.81
CR039	35.50	0.66	1.80
CR040	36.00	0.69	1.78
CR041	36.00	0.69	1.75
CR042	36.50	0.70	2.43
CR043	36.50	0.71	2.42
CR044	36.50	0.73	2.41
CR045	37.00	0.75	2.38
CR046	37.50	0.77	2.35
CR047	37.50	0.10	2.35
CR048	38.00	0.56	2.32
CR049	38.00	0.60	2.32
CR050	38.00	0.60	2.28
Mean	38.20	0.40	2.25
SD	4.00	0.21	0.23
Max	40.00	0.77	2.60
Min	32.00	0.10	1.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันทอดซ้ำ (น้ำมันรำข้าว น้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธี
น้ำมันปาล์มโอเลอิน) ที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม

รหัสตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยทางเคมีที่ตรวจวัด		
	%TPM	%FFA	P.V. (meq/kg)
RB001	8.00	0.19	10.91
RB002	19.00	0.19	5.90
RB003	8.50	0.19	6.30
RB004	8.50	0.21	8.07
RB005	15.50	0.21	7.90
RB006	9.50	0.20	10.15
RB007	9.00	0.21	8.57
RB008	9.00	0.20	7.28
RB009	12.00	0.19	11.27
RB010	9.00	0.20	10.97
RB011	9.00	0.20	10.33
RB012	12.50	0.19	8.69
RB013	11.00	0.20	7.27
RB014	11.50	0.21	8.41
RB015	12.00	0.21	9.07
RB016	12.00	0.21	7.71
RB017	9.50	0.21	7.37
RB018	10.00	0.21	9.47
RB019	11.00	0.20	12.07
RB020	11.50	0.21	9.81
RB021	9.50	0.21	9.53
RB022	12.50	0.22	9.72
RB023	10.00	0.22	9.38
RB024	14.00	0.23	9.81
RB025	11.50	0.22	9.10
RB026	10.00	0.22	12.62
RB027	32.00	0.22	7.46
RB028	19.00	0.21	9.57
RB029	14.50	0.22	7.57
RB030	12.50	0.21	11.32
RB031	8.00	0.22	9.76
RB032	19.00	0.21	9.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันทอดซ้ำ (น้ำมันรำข้าว น้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธี
น้ำมันปาล์มโอเลอิน) ที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม (ต่อ)

รหัสตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยทางเคมีที่ตรวจวัด		
	%TPM	%FFA	P.V. (meq/kg)
RB033	30.50	0.22	9.09
RB034	14.00	0.24	11.52
RB035	13.50	0.23	9.86
RB036	10.50	0.25	9.58
RB037	11.00	0.24	10.63
RB038	10.00	0.24	10.97
RB039	12.00	0.24	10.33
RB040	12.00	0.23	8.69
RB041	12.50	0.24	7.27
RB042	11.00	0.23	8.41
RB043	14.00	0.23	9.07
RB044	13.50	0.24	7.71
RB045	12.00	0.23	7.37
RB046	11.50	0.25	9.47
RB047	10.50	0.27	12.07
RB048	13.50	0.27	9.81
RB049	10.00	0.26	9.53
RB050	10.00	0.22	9.72
CR001	7.00	0.16	2.55
CR002	6.50	0.22	5.09
CR003	7.00	0.23	9.15
CR004	7.00	0.23	8.47
CR005	7.50	0.26	6.76
CR006	7.50	0.28	8.17
CR007	8.00	0.30	6.76
CR008	8.00	0.29	11.04
CR009	7.50	0.29	11.17
CR010	7.50	0.31	10.80
CR011	8.00	0.29	9.91
CR012	9.00	0.32	7.89
CR013	8.00	0.31	7.11
CR014	8.50	0.31	4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันทอดซ้ำ (น้ำมันรำข้าว น้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธี น้ำมันปาล์มโอเลอิน) ที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม (ต่อ)

รหัสตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยทางเคมีที่ตรวจวัด		
	%TPM	%FFA	P.V. (meq/kg)
CR015	8.00	0.33	2.97
CR016	9.00	0.33	3.07
CR017	8.00	0.34	3.35
CR018	8.00	0.33	3.48
CR019	8.00	0.32	3.15
CR020	8.00	0.35	5.92
CR021	8.50	0.37	5.89
CR022	8.50	0.37	9.48
CR023	8.50	0.37	6.84
CR024	8.50	0.36	4.24
CR025	8.00	0.40	4.66
CR026	8.00	0.37	3.80
CR027	8.00	0.41	4.93
CR028	8.00	0.37	3.42
CR029	7.50	0.37	3.88
CR030	8.50	0.36	3.15
CR031	7.00	0.37	2.45
CR032	6.50	0.37	2.82
CR033	9.00	0.37	2.49
CR034	9.00	0.38	2.03
CR035	10.50	0.39	2.68
CR036	8.50	0.37	1.20
CR037	8.50	0.33	1.38
CR038	8.00	0.38	1.26
CR039	9.00	0.44	1.24
CR040	9.50	0.40	1.44
CR041	9.00	0.47	1.50
CR042	9.50	0.43	1.13
CR043	9.00	0.42	1.12
CR044	9.00	0.44	1.21
CR045	9.00	0.43	0.47
CR046	9.00	0.47	0.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันทอดซ้ำ (น้ำมันรำข้าว น้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธี น้ำมันปาล์มโอเลอิน) ที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม (ต่อ)

รหัสตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยทางเคมีที่ตรวจวัด		
	%TPM	%FFA	P.V. (meq/kg)
CR047	8.50	0.44	2.07
CR048	8.50	0.45	1.62
CR049	8.50	0.37	1.64
CR050	9.50	0.37	3.48
PO001	22.00	0.07	2.61
PO002	21.50	0.08	5.46
PO003	18.00	0.10	5.59
PO004	18.00	0.11	6.26
PO005	18.50	0.13	6.85
PO006	17.50	0.16	5.16
PO007	17.50	0.17	7.00
PO008	16.50	0.17	4.87
PO009	16.50	0.17	4.98
PO010	16.50	0.17	5.78
PO011	17.00	0.17	5.93
PO012	16.00	0.19	5.24
PO013	17.00	0.18	4.01
PO014	19.00	0.16	4.56
PO015	18.00	0.17	4.26
PO016	18.00	0.18	6.54
PO017	16.50	0.16	3.89
PO018	16.50	0.15	7.40
PO019	15.50	0.18	2.36
PO020	15.50	0.18	4.91
PO021	15.00	0.18	5.81
PO022	15.50	0.19	2.03
PO023	15.50	0.19	4.07
PO024	15.00	0.21	5.24
PO025	15.00	0.18	2.51
PO026	15.00	0.19	2.14
PO027	14.50	0.16	5.30
PO028	14.50	0.20	4.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันทอดซ้ำ (น้ำมันรำข้าว น้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธี น้ำมันปาล์มโอเลอิน) ที่ได้จากการทอดอาหารในการผลิตระดับอุตสาหกรรม (ต่อ)

รหัสตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยทางเคมีที่ตรวจวัด		
	%TPM	%FFA	P.V. (meq/kg)
PO029	20.00	0.20	4.24
PO030	14.50	0.18	5.64
PO031	15.00	0.20	4.80
PO032	14.50	0.21	2.78
PO033	14.50	0.21	2.61
PO034	14.00	0.20	1.78
PO035	15.50	0.20	1.57
PO036	14.50	0.21	3.49
PO037	16.50	0.26	1.60
PO038	22.50	0.26	4.93
PO039	17.00	0.21	4.23
PO040	15.00	0.21	2.34
PO041	16.50	0.19	2.22
PO042	18.00	0.16	4.23
PO043	18.00	0.17	1.40
PO044	19.50	0.15	3.18
PO045	19.00	0.15	4.13
PO046	20.00	0.14	1.88
PO047	18.50	0.17	4.20
PO048	19.50	0.17	2.12
PO049	19.50	0.18	4.93
PO050	20.50	0.12	4.23
Mean	12.69	0.25	5.55
SD	4.92	0.09	2.90
Max	40.00	0.07	11.52
Min	6.50	0.47	0.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวสันต์ อินทร์ตา
วัน เดือน ปีเกิด	9 สิงหาคม 2530 ที่จังหวัดมหาสารคาม
ที่อยู่	13/8 หมู่ 12 ตำบลห้วยป่าหวาย อำเภอพระพุทธบาท จังหวัดสระบุรี 18120
ประวัติการศึกษา	2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ. 2556 - 2557	- นักวิจัยและผู้ประสานงานโครงการ กิจกรรมการเชื่อมโยงงานวิจัยสู่การผลิต เชิงพาณิชย์ครั้งที่ 3 ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานอุตสาหกรรมเกษตรแปรรูป กระทรวงอุตสาหกรรม
พ.ศ. 2557 - 2558	- นักวิจัยและผู้ประสานงานโครงการ กิจกรรมการเชื่อมโยงงานวิจัยสู่การผลิต เชิงพาณิชย์ ได้รับทุนอุดหนุนจากศูนย์ส่งเสริมอุตสาหกรรมภาคที่ 9 กระทรวงอุตสาหกรรม - พัฒนาระบบการผลิตหนอนไม้ไผ่และดักแด้ทอดอบกรอบ - พัฒนาระบบการผลิตสเปรดจากงาขาวและงาดำ - พัฒนาระบบการผลิตวุ้นทางจระเข้ในน้ำองุ่นขาว - พัฒนาระบบการผลิตเยลลี่สำหรับวัยรุ่น - พัฒนาระบบการผลิตถั่วเคลือบอบกรอบ
พ.ศ. 2558 - 2559	- นักวิจัยโครงการ การพัฒนาระบบการต้นแบบอาหารทอดในระดับ วิสาหกิจชุมชนและวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมเพื่อจำหน่ายเชิง พาณิชย์ (คางกุ้งทอด) ทุนสนับสนุนจาก ITAP สวทช. - นักวิจัยโครงการ การพัฒนาระบบการต้นแบบอาหารทอดในระดับ วิสาหกิจชุมชนและวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมเพื่อจำหน่ายเชิง พาณิชย์ (รากบัวทอด) ทุนสนับสนุนจาก ITAP สวทช. - นักวิจัยโครงการ การพัฒนาระบบการต้นแบบอาหารทอดในระดับ วิสาหกิจชุมชนและวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมเพื่อจำหน่ายเชิง พาณิชย์ (แผ่นข้าวตังทอด) ทุนสนับสนุนจาก ITAP สวทช. - นักวิจัยโครงการ การพัฒนาระบบวิธีการเก็บรักษาเกาหลีลูกชิ้นเนื้อด้วยวิธี แช่เยือกแข็ง ทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย - วสันต์ อินทร์ตา พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และปานมนัส ศิริสมบุญณ์ “การ วิเคราะห์คุณภาพน้ำมันมะพร้าวผ่านกรรมวิธีและน้ำมันรำข้าวทอดซ้ำด้วย เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี” การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตร แห่งประเทศไทยประจำปี 2559 ระดับชาติ ครั้งที่ 17 อิมแพค เมืองทองธานี กรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้