

การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีในการประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์
อาหารทอดกรอบ

THE USE OF NEAR INFRARED SPECTROSCOPY FOR QUALITIES EVALUATION OF
CRISPY FRIED-FOOD

นายธัญพิสิษฐ์ คิตรงเรือง
นางสาวสุกัญญา ศุภลักษณ์วัจนะ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

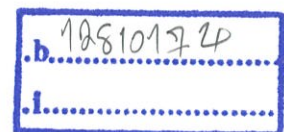
การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีในการประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์
อาหารทอดกรอบ

THE USE OF NEAR INFRARED SPECTROSCOPY FOR QUALITIES EVALUATION OF
CRISPY FRIED-FOOD



นายธัญพิสิษฐ์ คิดรุ่งเรือง
นางสาวสุกัญญา ศุภลักษณ์วัจนะ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 143870
วัน,เดือน,ปี 04 ต.ค. 2559



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

THE USE OF NEAR INFRARED SPECTROSCOPY FOR QUALITIES EVALUATION OF
CRISPY FRIED-FOOD

Mr. Tanyapisit Kidrungruang

Miss Sukanya Supaluckwatjana

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE
DEGREE OF BARCHHELOR OF FOOD ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2015

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีในการประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ

The use of near infrared spectroscopy for qualities evaluation of crispy fried-food

ผู้จัดทำ

1. นายธัญพิสิษฐ์ คิตรงู้งเรือง
2. นางสาวสุกัญญา ศุภลักษณ์วัจนะ



.....
(ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

| | |
|--------------------|---|
| ปริญญานิพนธ์เรื่อง | การใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีในการประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ |
| โดย | นายธัญพิสิษฐ์ คิตรงูเรือง นางสาวสุกัญญา ศุภลักษณ์วัจนะ |
| ปริญญานิพนธ์ | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ |

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีในการประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ โดยใช้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบที่มีส่วนประกอบและอายุการเก็บรักษาที่แตกต่างกัน 80 ตัวอย่าง ($n = 80$) มาสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ความยาวคลื่น 700-2500 นาโนเมตร โดยวิธีแบบสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse reflectance) จากการนำข้อมูลสเปกตรัมและค่าอ้างอิงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ได้แก่ ปริมาณความชื้นฐานเปียก ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ปริมาณไขมัน และ ค่าเพอร์ออกไซด์ มาสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์และทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยวิธีการทางเคโมเมตริกซ์ แบบ Partial least square (PLS) regression โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือชุดที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและชุดทดสอบ พบว่ามีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีในการตรวจวัดปริมาณความชื้นฐานเปียก ค่าวอเตอร์แอกติวิตี และปริมาณไขมัน เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา(R^2) ของชุดที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง เท่ากับ 0.8390 , 0.9043 และ 0.5531 ตามลำดับ สำหรับค่าเพอร์ออกไซด์พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างแย่ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา(R^2) เท่ากับ 0.2338

Report Title The use of near infrared spectroscopy for qualities evaluation of crispy fried-food

By Mr. Tanyapisit Kidrungruang
Miss Sukanya Supaluckwatjana

Report for Bachelor's Degree of Food Engineering
Department of Food Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Advisor Asst.Prof.Dr.Plampen Pornchalermpong

Abstract

The objective of this research is the use of near infrared spectroscopy for evaluation quality of crispy fried-food. Quantitative quality parameters of crispy fried-food were monitored using partial least-squares (PLS) regression and near infrared (NIR) spectroscopy. Eighty ($n = 80$) crispy fried-food samples were scanned in diffuse reflectance by an FT-NIR spectrometer (700-2500 nm). Calibration models were performed for moisture content, water activity, fat content and peroxide value. The Coefficients of determination in calibration set (R^2) were 0.8390, 0.9043, 0.5531 and 0.2338 for moisture content, water activity, fat content, respectively. The poor accuracy was obtained for the NIR calibration models developed for Peroxide value which The Coefficients of determination in calibration set (R^2) were 0.2338.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้โดยได้รับความกรุณาและความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ คำชี้แนะและแนวทางในการปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำงานที่ดี รวมไปถึง รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง คอยให้คำแนะนำต่างๆ ฝึกให้นักศึกษารู้จักกระบวนการคิดและวิเคราะห์ผล และประสบการณ์ในการทำงานวิจัยอีกมากมาย

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้

ขอขอบคุณ คุณวราภรณ์ มาไพศาลทรัพย์, คุณวสันต์ อินตรา และ Mr. Amrit Shrestha เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านเอกสารการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ พร้อมทั้งช่วยตรวจและแก้ไขข้อผิดพลาด จนทำให้ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายธัญพิสิษฐ์ คิตรงูเรือง

นางสาวสุกัญญา ศุภลักษณ์วิจนะ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | III |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | IV |
| กิตติกรรมประกาศ | V |
| สารบัญ | VI |
| สารบัญตาราง | VIII |
| สารบัญภาพ | IX |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 3 |
| 2.1 อาหารทอดและการเสื่อมเสียของอาหารทอด | 3 |
| 2.1.1 ประเภทของการทอด | 3 |
| 2.1.2 การเสื่อมเสียของอาหารทอด | 4 |
| 2.2 ความชื้นฐานเปียก | 5 |
| 2.3 วอเตอร์แอกติวิตี | 6 |
| 2.3.1 ความหมายของค่าวอเตอร์แอกติวิตี | 6 |
| 2.3.2 ผลของค่าวอเตอร์แอกติวิตีในอาหารต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน | 6 |
| 2.3.3 ความสัมพันธ์ของวอเตอร์แอกติวิตีกับคุณภาพและความปลอดภัยของอาหาร | 7 |
| 2.4 ค่าเพอร์ออกไซด์ | 9 |
| 2.5 เนียร์อินฟราเรด | 9 |
| 2.5.1 หลักการพื้นฐานของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี | 10 |
| 2.5.2 ส่วนประกอบของเครื่องเนียร์อินฟราเรด | 11 |
| 2.5.3 การวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด | 12 |
| 2.5.3.1 การทำแคลิเบรชัน | 12 |
| 2.5.3.2 การทำแวลิดชัน | 15 |
| 2.5.4 การประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของแบบจำลอง | 15 |

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง | 20 |
| 3.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ | 20 |
| 3.2 การสแกนผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด | 27 |
| 3.3 การวัดปัจจัยคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยวิธีอ้างอิง | 27 |
| 3.3.1 ปริมาณความชื้น | 27 |
| 3.3.2 ปริมาณน้ำอิสระ | 28 |
| 3.3.3 ปริมาณไขมัน | 29 |
| 3.3.4 ค่าเพอร์ออกไซด์ | 30 |
| 3.4 การวิเคราะห์สเปกตรัม | 31 |
| 3.5 การสร้างแบบจำลอง | 32 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ | |
| 4.1 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม | 33 |
| 4.2 ผลการทำนายแบบจำลอง | 36 |
| 4.2.1 ผลการทำนายแบบจำลองของปริมาณความชื้นฐานเปียก | 36 |
| 4.2.2 ผลการทำนายแบบจำลองของวอเตอร์แอกติวิตี | 42 |
| 4.2.3 ผลการทำนายแบบจำลองของปริมาณไขมัน | 47 |
| 4.2.4 ผลการทำนายแบบจำลองของค่าเพอร์ออกไซด์ | 53 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง | 60 |
| 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์สเปกตรัม | 60 |
| 5.2 สรุปผลการทำนายของแบบจำลอง | 60 |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ | 60 |
| บรรณานุกรม | 61 |
| ภาคผนวก | 63 |
| ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีอ้างอิง | 64 |
| ภาคผนวก ข ภาพอุปกรณ์ วัสดุดิบ และตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง | 81 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 การแปลความหมายของ R และ R^2 | 17 |
| ตารางที่ 2.2 การอธิบายค่า RPD และ RER | 19 |
| ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบที่ใช้ในงานวิจัย | 20 |
| ตารางที่ 4.1 สเปกตรัมแสดงการสั่นสะเทือนของพันธะที่ปรากฏเป็นพีคในสเปกตรัมเฉลี่ยและสเปกตรัมอนุพันธ์อันดับสองของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ | 34 |
| ตารางที่ 4.2 ข้อมูลทางสถิติของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบจากการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer | 35 |
| ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ด้วย PLS regression | 37 |
| ตารางที่ 4.4 เลขคลื่นที่พบใน Regression plot และ X-loading plot ของแบบจำลองปริมาณความชื้นฐานเปียกในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนของเครื่อง FT-NIR spectrometer | 40 |
| ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ด้วย PLS regression | 43 |
| ตารางที่ 4.6 เลขคลื่นที่พบใน Regression plot และ X-loading plot ของแบบจำลองค่าวอเตอร์แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนของเครื่อง FT-NIR spectrometer | 46 |
| ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ด้วย PLS regression | 48 |
| ตารางที่ 4.8 เลขคลื่นที่พบใน Regression plot และ X-loading plot ของแบบจำลองปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนของเครื่อง FT-NIR spectrometer | 51 |
| ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ค่าเพอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ด้วย PLS regression | 54 |
| ตารางที่ 4.10 เลขคลื่นที่พบใน Regression plot และ X-loading plot ของแบบจำลองค่าเพอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนของเครื่อง FT-NIR spectrometer | 57 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 อิทธิพลของวอเตอร์แอกติวิตีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆในอาหาร | 8 |
| 2.2 เส้นสเปกตรัมของแป้งบิสคิสที่บริเวณพื้นที่หลักตามการดูดซับ | 10 |
| 3.1 FT-NIR spectrometer | 27 |
| 3.2 เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ | 28 |
| 3.3 อุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน | 29 |
| 3.4 สารเคมีที่ใช้ในการไตเตรดหาปริมาณเปอร์ออกไซด์ในน้ำมัน | 30 |
| 4.1 สเปกตรัมเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ | 33 |
| 4.2 อนุพันธ์อันดับสองของสเปกตรัมเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ | 34 |
| 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นฐานเปียกระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแคลิเบรชัน | 36 |
| 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นฐานเปียกระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแวลิดเรชัน | 38 |
| 4.5 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการวัดปริมาณความชื้นฐานเปียกในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer | 38 |
| 4.6 X-loading plot ของแบบจำลองการวัดปริมาณความชื้นฐานเปียกในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer | 39 |
| 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าวอเตอร์แอกติวิตีระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแคลิเบรชัน | 42 |
| 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าวอเตอร์แอกติวิตีระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแวลิดเรชัน | 44 |
| 4.9 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer | 44 |
| 4.10 X-loading plot ของแบบจำลองการวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer | 45 |
| 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไขมันระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแคลิเบรชัน | 47 |
| 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไขมันระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแวลิดเรชัน | 49 |

สารบัญภาพ(ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.13 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการวัดปริมาณไขมัน ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer | 49 |
| 4.14 X-loading plot ของแบบจำลองการวัดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์ อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer | 50 |
| 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไขมันระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแคลิเบรชั่น | 53 |
| 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเพอร์ออกไซด์ระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแวลิดเรชั่น | 55 |
| 4.17 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการวัดค่าเพอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหาร ทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer | 55 |
| 4.18 X-loading plot ของแบบจำลองการวัดค่าเพอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ โดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer | 56 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากเอกลักษณ์เฉพาะตัวของอาหารทอดที่ถูกปากผู้บริโภค มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่กรอบนอก นุ่มในหรือกรอบทั้งชิ้น (เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร, 2558) ส่งผลให้อาหารทอดกรอบเป็นอาหารที่มีมูลค่าและศักยภาพทางการตลาดสูง แต่อย่างไรก็ตามในระหว่างกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบจะมีการดูดซับน้ำมันเข้าไปในตัวของอาหารทำให้ผู้บริโภคได้รับโทษจากน้ำมันที่ใช้ทอดอาหาร (จตุตญาณี, 2553) ดังนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือปัจจัยคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบได้แก่ ค่าความชื้นฐานเปียก (% wet basis), ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (water activity, a_w), ปริมาณไขมัน (% Fat content) และ ค่าเพอร์ออกไซด์ (Peroxide value, PV) โดยทั่วไปในการประเมินปัจจัยคุณภาพหรือการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารจะทำการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีมาตรฐานซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการตรวจประเมิน (D.Cozzolino et al., 2005)

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Near-infrared spectroscopy, NIRS) เป็นเทคนิคการวัดคุณภาพโดยไม่ทำลายตัวอย่าง สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารได้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างการควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์อาหาร (Osborne, Fearn, & Hindle, 1993) เทคนิคดังกล่าวเป็นเทคนิคที่สามารถทำนายค่าทางเคมีได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ประหยัดเวลา ลดต้นทุนการใช้สารเคมีและต้นทุนการผลิตในระยะยาว จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีในการวิเคราะห์ปัจจัยคุณภาพของน้ำมันชนิดต่างๆ เช่น การใช้คลื่นเนียร์อินฟราเรดในการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันอิสระในน้ำมัน (Holman & Edmondson, 1956), การวิเคราะห์กรดไขมันอิสระและปริมาณความชื้นในน้ำมันปลาโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีและเทคนิคการวิเคราะห์ Partial Least Square (PLS) (D.Cozzolino, Murray, Scaife & Chree, 2005) ซึ่งพบว่ายังไม่มีงานวิจัยใดที่ศึกษาการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร

ทอดกรอบ ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีในการประเมินปัจจัยคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อนำเทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีซึ่งเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายมาใช้ในการวัด ปัจจัยคุณภาพต่างๆของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบได้แก่ ปริมาณความชื้นฐานเปียก (Moisture content, %wb), ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity, a_w), ปริมาณไขมัน (Fat content) และค่าเพอร์ออกไซด์ (Peroxide value) เพื่อลดระยะเวลา สารเคมี และค่าใช้จ่ายในการวัดและเพื่อให้สามารถวัดตัวอย่างได้ในจำนวนที่มากขึ้นและตัวอย่างสามารถถูกนำกลับเข้ามาบริโภคได้ ทำให้ลดต้นทุนการผลิตและสามารถควบคุมการผลิตได้แน่นอนขึ้นและผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่สม่ำเสมอมากขึ้น

2. เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี เพื่อวัด ปริมาณความชื้นฐานเปียก (Moisture content, %wb), ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity, a_w), ปริมาณไขมัน (Fat content) และค่าเพอร์ออกไซด์ ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ใช้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบที่แตกต่างกันจำนวน 80 ตัวอย่างมาตรวจประเมินค่าปัจจัยคุณภาพได้แก่ ปริมาณความชื้นฐานเปียก (Moisture content, %wb), ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity, a_w), ปริมาณไขมัน (Fat content) และค่าเพอร์ออกไซด์ โดยใช้เครื่อง FT-NIR spectrometer ในช่วงความยาวคลื่น 700-2500 นาโนเมตร ($12500-3600\text{ cm}^{-1}$)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ผู้ผลิตสามารถลดค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอขึ้นตลอดจนลดระยะเวลาในกระบวนการผลิต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไปแล้วอาหารจัดเป็นสิ่งที่สามารถเสื่อมเสียได้ตามธรรมชาติ ทั้งนี้ระยะเวลาในการเสื่อมเสียดังกล่าวขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างประกอบกัน เช่น วัตถุดิบ กระบวนการการผลิต ขั้นตอนการเก็บรักษา ฯลฯ โดยในช่วงต่างๆ นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงในอาหารเกิดขึ้นมากมาย ซึ่งล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารชนิดนั้นๆ โดยตรง แต่การบ่งชี้ว่าเมื่อใด อาหารดังกล่าวจะอยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะแก่การบริโภค หรือหมดอายุนั้น คงต้องอาศัยเกณฑ์ หรือดัชนีชี้วัดที่เหมาะสมในการเป็นตัวแทนของการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในผลิตภัณฑ์นั้นๆ ได้

2.1 อาหารทอดและการเสื่อมเสียของอาหารทอด

อาหารทอดเป็นอาหารที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำมัน ซึ่งเป็นตัวกลางในการให้ความร้อน โดยจะทำให้เกิดลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เฉพาะตัว ได้แก่ มีความกรอบ มีสีเหลืองทองน่ารับประทาน ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ว่า ในระหว่างการทอดเมื่ออาหารสัมผัสกับน้ำมันซึ่งมีอุณหภูมิสูง จะทำให้อุณหภูมิที่บริเวณผิวหน้าของอาหารนั้นสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นน้ำที่บริเวณผิวหน้าก็จะเริ่มเดือดอย่างทันทีทันใด ทำให้น้ำมันบริเวณรอบๆ นั้นถูกทำให้เย็นลงเนื่องจากอุณหภูมิที่ระเหยออกมา แต่อุณหภูมิที่ลดลงของน้ำมันนี้จะได้รับการทดแทนจากการพาความร้อนของแหล่งความร้อนที่ให้อาหารน้ำมันทำให้น้ำที่บริเวณผิวหน้าของอาหารนั้นเกิดการเดือดและระเหยกลายเป็นไอน้ำออกมาได้อีก เป็นผลให้ที่บริเวณผิวหน้าของอาหารนั้นเกิดลักษณะที่แห้ง และการระเหยของน้ำนั่นเอง ทำให้ที่บริเวณผิวนั้นเกิดลักษณะที่เป็นรูพรุนและขรุขระ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าน้ำมันเกิดการระเหยออกมาอย่างรุนแรงจะก่อให้เกิดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะก่อให้เกิดโอกาสการดูดซับน้ำมันได้ค่อนข้างมาก

2.1.1 ประเภทของการทอด

1. การทอดโดยใช้น้ำมันน้อย (pan frying) เป็นการทอดโดยการใช้ไขมันหรือไขมันปริมาณเล็กน้อย เพียงเพื่อไม่ให้อาหารติดภาชนะทอด กระตะที่ใช้ทอดเป็นกระทะก้นตื้น ระหว่างการทอดอาจมีการกลับด้านเพื่อให้อาหารสุกทั่วถึงให้เกิดกลิ่นรสที่ต้องการ เช่น การทอดเนื้อสัตว์ แฮมเบอร์เกอร์ ไข่ดาว เบคอน เป็นต้น
2. การทอดโดยใช้น้ำมันมากหรือน้ำมันท่วม (deep fat frying) - เป็นการทอดที่ใช้ไขมันปริมาณมาก โดยอาหารจมอยู่ในภาชนะที่บรรจุน้ำมันเกิดลักษณะผิวหน้าที่แห้ง กรอบ เป็นเปลือกสีน้ำตาล ตัวอย่างของอาหารที่แปรรูปด้วยการทอด

2.1.2 การเสื่อมเสียของอาหารทอด

อาหารทอดเป็นอาหารที่มีองค์ประกอบของน้ำมันร่วมอยู่ด้วย ซึ่งเป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งต่อการเสื่อมเสียของอาหารทอด อันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาของน้ำมัน หรือไขมันที่มีอยู่ในอาหาร ทำให้เกิดลักษณะของกลิ่นหืน ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค ผลิตภัณฑ์อาหารทอด ทั้งนี้ในระหว่างการทอดจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากมาย ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและกายภาพของน้ำมัน ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) เท่านั้นที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อัตราในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นแตกต่างกันตามชนิดของกรดไขมัน กรดไขมันที่มีพันธะคู่มากจะเกิดได้เร็วกว่าที่มีพันธะคู่ย่อย โดยกรดไขมันชนิดซิส (cis) ไอโซเมอร์เกิดออกซิไดซ์ได้เร็วกว่าทรานส์ (trans) ไอโซเมอร์

2. ความเข้มข้นของออกซิเจน ในภาวะที่มีออกซิเจนมากอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจน แต่ในภาวะที่มีออกซิเจนน้อย อัตราการเกิดออกซิเดชันจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจน อย่างไรก็ตาม ผลของออกซิเจนยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นด้วยไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิและพื้นที่ผิวสัมผัส

3. อุณหภูมิ อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิยังมีผลต่อความดันย่อยของออกซิเจนด้วย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนแปลงความดันย่อยของออกซิเจนจะมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยต่ออัตราเร็วของการเกิดออกซิเดชัน เพราะการละลายของออกซิเจนในน้ำมัน หรือไขมันจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

4. พื้นที่ผิว อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวของน้ำมัน หรือไขมันที่สัมผัสกับอากาศ ดังนั้นหากอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มมากขึ้นการเกิดก็จะเกิดเร็วขึ้น

5. ความชื้น อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นอยู่กับค่าวอเตอร์แอกติวิตี โดยในอาหารแห้งที่มีความชื้นต่ำมาก (ค่าวอเตอร์แอกติวิตีน้อยกว่าประมาณ 0.1) ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตีเพิ่มขึ้นถึง 0.3 จะยับยั้งปฏิกิริยาดังกล่าวให้เกิดน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อค่าวอเตอร์แอกติวิตีเพิ่มมากขึ้นอยู่ในช่วง 0.55-0.85 อัตราการเกิดจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งเนื่องจากมีปริมาณน้ำมากพอที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) และออกซิเจน

- 6.การเกิดอิมัลชัน (Emulsification) ในอาหารที่เป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil in water emulsion) หยดน้ำมันจะกระจายตัวอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ ออกซิเจนจะต้องแพร่กระจายผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำเข้าไปสู่หยดน้ำมันผ่านชั้นระหว่างผิวของน้ำกับน้ำมัน ดังนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆร่วมด้วย เช่น ชนิดและความเข้มข้นของอิมัลซิฟายเออร์ ขนาดของอนุภาคหยดน้ำมัน พื้นที่ผิวระหว่างหยดน้ำมันกับน้ำที่เป็นตัวกลาง ความหนืดของน้ำที่เป็นตัวกลาง ค่าความเป็นกรด ต่าง ส่วนประกอบและคุณสมบัติของตัวกลาง เป็นต้น
- 7.โปรออกซิแดนซ์ (Pro-oxidants) แร่ธาตุหรือโลหะบางชนิด เช่น โคบอลต์ ทองแดง เหล็ก แมงกานีส มีสมบัติเป็นโปรออกซิแดนซ์ได้แม้ที่ความเข้มข้นเพียง 0.1 ส่วนต่อล้านส่วน ซึ่งอาจจะปนเปื้อนมาจากดินที่ปลูก หรือหลุดมาจากอุปกรณ์โลหะต่างๆ
- 8.แสงและรังสีต่างๆ มีผลช่วยในการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- 9.สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) สารต้านอนุมูลอิสระจะช่วยยับยั้งหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ซึ่งมีทั้งสารจากธรรมชาติ เช่น วิตามินอีในน้ำมันพืช และสารจากการสังเคราะห์เช่น บีเอชเอ (BHA) บีเอชที (BHT) เป็นต้น

2.2 ความชื้นฐานเปียก

ความชื้น หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหารหรือวัสดุใดๆ มักกำหนดเป็นอัตราร้อยละของน้ำหนักต่อน้ำหนักของวัสดุ กำหนดไว้ 2 แบบ คือแบบมาตรฐานเปียก (wet basis) และแบบมาตรฐานแห้ง (dry basis)

1. ปริมาณความชื้นแบบมาตรฐานเปียก (wet basis) เป็นร้อยละของน้ำต่อน้ำหนักทั้งหมด
2. ปริมาณความชื้นแบบมาตรฐานแห้ง (Dry basis) เป็นร้อยละของน้ำหนักต่อน้ำหนักวัสดุที่แห้ง

2.3 ค่าวอเตอร์แอกทีวิตี (water activity)

วอเตอร์แอกทีวิตี (water activity) ใช้สัญลักษณ์ a_w คือปริมาณน้ำในอาหารซึ่งใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆในอาหารและที่จุลินทรีย์ในอาหารสามารถใช้ในการเจริญเติบโตได้ (จตุพลและคณะ, 2542)

2.3.1 ความหมายของวอเตอร์แอกทีวิตี

ค่าวอเตอร์แอกทีวิตีมีความหมายได้สามอย่างดังนี้

1. วอเตอร์แอกทีวิตี คืออัตราส่วนของความดันไอ (vapour pressure) ของน้ำในอาหาร (P) ต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ (P_0) ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$a_w = P/P_0$$

2. วอเตอร์แอกทีวิตี ของอาหารมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Equilibrium Relative Humidity, ERH) ของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนของความดันไอของความชื้นในอากาศต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน ความชื้นสัมพัทธ์ใช้สัญลักษณ์เป็น ERH ความสัมพันธ์ระหว่างวอเตอร์แอกทีวิตีและความชื้นสัมพัทธ์เป็นดังนี้

$$a_w = ERH/100$$

3. วอเตอร์แอกทีวิตี มีค่าเท่ากับอัตราส่วนจำนวนโมลตัวทำละลายต่อผลรวมของจำนวนโมลตัวทำละลายและตัวถูกละลายเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$a_w = n_1 / (n_1 + n_2)$$

$$n_1 = \text{จำนวนโมลตัวทำละลาย}$$

$$n_2 = \text{จำนวนโมลตัวถูกละลาย}$$

2.3.2 ผลของค่าวอเตอร์แอกทีวิตีในอาหารต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

อาหารรทอจัดเป็นอาหารที่ระดับของค่าวอเตอร์แอกทีวิตีค่อนข้างต่ำ ซึ่งช่วงดังกล่าวความว่องไวต่อการเกิดออกซิเดชันของไขมันที่แตกต่าง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 5 ช่วงได้ดังนี้

1. ค่าวอเตอร์แอกติวิตีน้อยกว่า 0.2 –เป็นระยะที่ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นแบบปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยทั่วไป คือ เป็นการหืนที่เกิดขึ้นเนื่องจากพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวกับออกซิเดชันในอากาศเกิดลักษณะการเชื่อมตัวกับเพอร์ออกไซด์ (Peroxide linkage) ที่บริเวณระหว่างพันธะคู่ โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาเมื่อไขมัน หรือน้ำมันสัมผัสกับก๊าซออกซิเจนในอากาศ
2. ค่าวอเตอร์แอกติวิตีเท่ากับ 0.2 – จะมีความคงตัวมากที่สุด เนื่องจากน้ำจะอยู่เป็นชั้นระดับเดียว (monolayer) ที่ผิวโมเลกุล จึงปิดบังไม่ให้ออกซิเจนเคลื่อนตัวผ่านไปไขมัน หรือเข้าไปแย่งออกซิเจน ในบริเวณที่เกิดการดูดซับไขมัน
3. ค่าวอเตอร์แอกติวิตีช่วงระหว่าง 0.2-0.5 –เพอร์ออกไซด์ที่แตกตัวแล้ว (Active preoxides) จะมีความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากถูกน้ำจับเอาไว้ เช่นเดียวกับตัวเร่งที่เป็นโลหะ (Metallic catalyst) จะถูกล้อมรอบไปด้วยน้ำ (Hydration) ในขณะเดียวกันโมเลกุลของสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) จะเคลื่อนที่ได้ดี และว่องไวในปฏิกิริยา
4. วอเตอร์แอกติวิตีช่วงระหว่าง 0.5-0.9 – จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูงขึ้นเนื่องจากมีน้ำมากขึ้นทำให้อาหารเกิดการพองตัวมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เร่งปฏิกิริยาสามารถเข้าไปสัมผัสกับอาหาร จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น
5. ค่าวอเตอร์แอกติวิตีมากกว่า 0.9 – จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันลดลง เนื่องจากปริมาณน้ำที่มีมาก จะทำหน้าที่ในการเจือจางตัวเร่งปฏิกิริยาลง ทำให้โอกาสทำปฏิกิริยาลดน้อยลง นอกจากนั้นยังทำหน้าที่ในการตกตะกอนตัวเร่งปฏิกิริยาและพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ของน้ำจะจับกับไฮโดรเพอร์ออกไซด์ (Hydroperoxides) ทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาต่อไป และส่งเสริมให้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นรวมตัวกัน

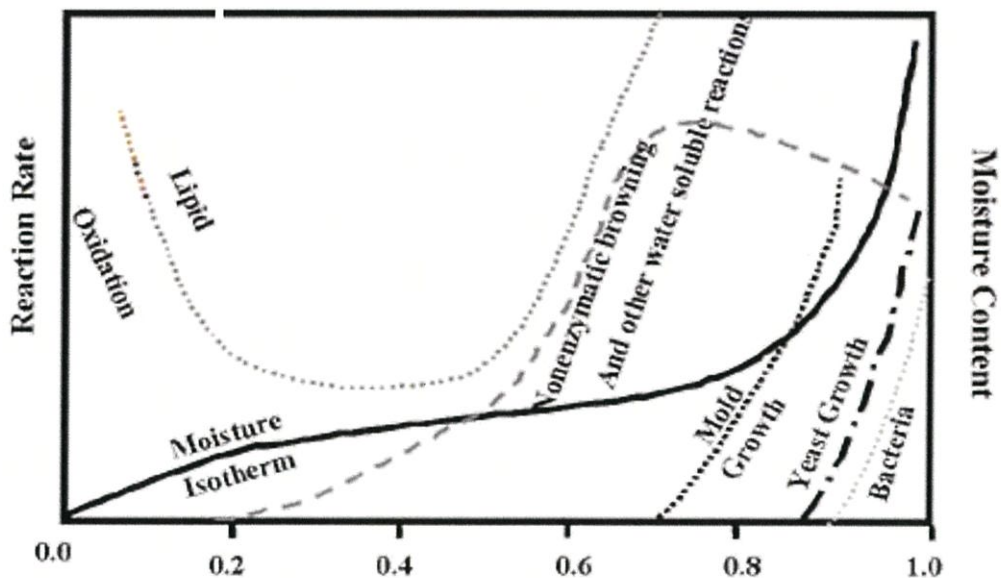
2.3.3 ความสัมพันธ์ของ water activity กับคุณภาพและความปลอดภัยอาหาร

1. สัมพันธ์กับพลังงานของน้ำในอาหาร น้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญในอาหารน้ำ

มีบทบาทสำคัญต่อการเสื่อมเสียของอาหาร น้ำเป็นตัวทำละลายที่ดี และมีส่วนร่วมใน ปฏิกิริยาต่างๆซึ่งมีผลโดยตรงกับคุณภาพและความปลอดภัย

ของอาหาร น้ำในอาหารอยู่ รวมตัวกัน ของสารอาหารต่างๆ ได้แก่ ของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ลิพิด กรดเกลือ โมเลกุลของน้ำ ถูกยึดเหนี่ยวไว้ด้วยสารหลากหลายชนิดด้วยพันธะต่างๆ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หมู่เอมีโนด้วยแรงดึงดูดที่แตกต่างกัน ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวของน้ำกับโมเลกุลของสารอื่น มีผลให้โมเลกุลของน้ำมีอิสระที่จะเคลื่อนที่น้อยลง และมีระดับพลังงานต่ำลง

2. การเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์ น้ำมีความสัมพันธ์กับการเสื่อมเสียและความปลอดภัยของอาหารจากจุลินทรีย์ เนื่องจากจุลินทรีย์ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการเสื่อมเสียทั้งแบคทีเรีย ยีสต์ และรา
3. ความปลอดภัยของอาหาร จากแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค อาหารเป็นพิษ และสารพิษจากเชื้อรา เช่น สารพิษอะฟลาทอกซิน
4. การทำงานของเอนไซม์
5. การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์
6. การเหม็นหืน จากการออกซิเดชันของลิพิด
7. water activity สัมพันธ์กับสมบัติเชิงวิศวกรรมด้านต่างๆ ของอาหาร เช่น Rheological property, thermal properties ฯลฯ



รูปที่ 2.1 แสดงอิทธิพลของวอเตอร์แอกติวิตีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาต่างๆในอาหาร (ที่มา: จตุพลและคณะ, 2542)

2.4 ค่าเปอร์ออกไซด์

เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ระหว่างออกซิเจนกับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ณ ตำแหน่งพันธะคู่ทำให้อาหารเสื่อมคุณภาพ เป็นค่าที่ใช้วัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิวติล ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างต่อเนื่องเมื่อลิวติลหรืออาหารสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องของอนุมูลอิสระ (free-radiation chain reaction) ซึ่งมีกลไกการเกิด ขั้นตอนดังนี้ 3

1. Initiation เป็นขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระ (free radical)
2. Propagation เป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องของอนุมูลอิสระ
3. Termination เป็นปฏิกิริยาสุดท้ายที่ทำให้โปรดักต์ที่เกิดขึ้นไม่ได้เป็นอนุมูลอิสระ

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชันของลิวติล ได้แก่ ชนิดของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ โดยเกิดกับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเท่านั้นโดยเฉพาะกรดไขมันอิสระจะถูกออกซิไดส์ได้ง่าย ปริมาณและพื้นที่ผิวสัมผัสของออกซิเจนอาหารที่มีโลหะ เช่น ทองแดง และตะกั่ว เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น นอกจากนี้ความร้อนและแสงมีผลต่อการเร่งปฏิกิริยาด้วย , ชาตรี และพาราได)2550; ทิพยเนตร , 2555 (จากประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 205 (พ.ศ.2543) เรื่อง น้ำมันและไขมัน มีค่าเปอร์ออกไซด์คิดเป็นมิลลิกรัมสมมูลต่อน้ำมันและไขมัน 1 กิโลกรัมได้ไม่เกิน 10 (กระทรวงสาธารณสุข , 2543)

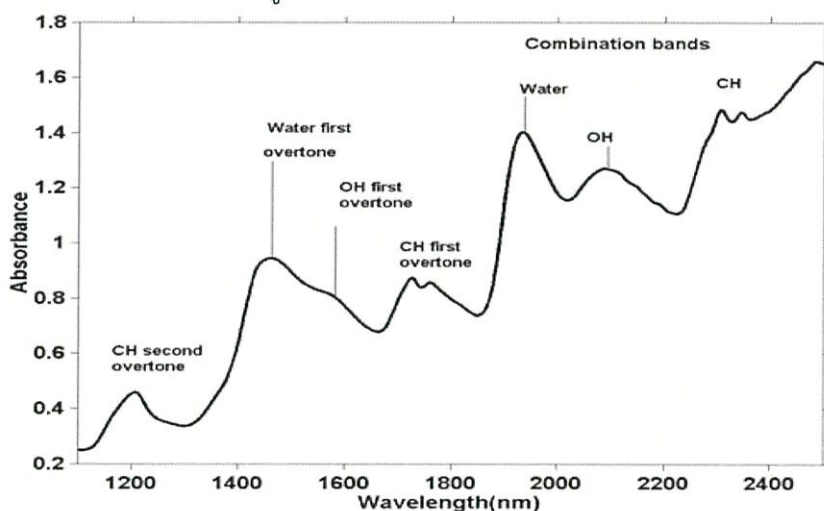
2.5 เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

NIRS เป็นวิธีการวิเคราะห์โมเลกุลที่ไม่ทำลายตัวอย่าง อาศัยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนโดยตัวอย่าง เป็นวิธีการวัดที่รวดเร็วและให้ผลการวัดที่ดี ถูกนำมาใช้ตั้งแต่การตรวจสอบหรือควบคุมคุณภาพ อาหารหรือผลผลิตทางการเกษตร ตั้งแต่วัตถุดิบเริ่มต้นจนถึงการตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีเป็นการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (Infrared radiation) ความยาวคลื่นระหว่าง 700 – 2,500 นาโนเมตรที่ส่องไปยังสสารหรือวัสดุ โดยสสารหรือวัสดุที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับอินฟราเรดย่านใกล้ได้นั้น ต้องมีโมเลกุลที่ประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจน ได้แก่ C-H, O-H, S-H และ N-H โดยโมเลกุลเหล่านี้จะดูดซับคลื่นและทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของพันธะ โดยการเปลี่ยนระดับพลังงานข้ามขั้นมากกว่า 1 ชั้น (overtone) หรือเกิดจากการสั่นสะเทือนข้าม 1 ชั้น (fundamental vibration) พร้อมกันของพันธะตั้งแต่ 2 พันธะขึ้นไปทำให้ได้ผลรวมของการสั่น(combination vibration)การตรวจวัดพลังงานทำได้หลายรูปแบบ เช่น แบบวัดการสะท้อน (reflectance)แบบวัดการส่องผ่าน (transmittance) และการสะท้อนแบบแพร่ (diffuse transreflectance) เป็นต้นซึ่งสเปกตรัมในช่วงคลื่น NIRS ที่ได้ จะถูกนำมาประมวลผลและหาความสัมพันธ์ทางสถิติกับข้อมูลของตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีการทาง

เคมี หรือวิธีอื่นๆ ที่ได้ค่ามาตรฐาน จะได้สมการสอบเทียบมาตรฐาน (calibration equation) เพื่อใช้ทำนายค่าปัจจัยคุณภาพของของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์อาหารได้ทั้งเชิงปริมาณ (quantitative) และเชิงคุณภาพ (qualitative) (ปานมนัส, 2556; วิชัย, 2552; D. Cozzolino *et al.*, 2004)

2.5.1 หลักการพื้นฐานของเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เครื่อง NIR คือเครื่องที่ใช้แสงที่มีความยาวคลื่นย่านใกล้อินฟราเรด ส่องไปยังสิ่งที่เราต้องการวิเคราะห์ (สารอินทรีย์ เช่น อาหาร หรือวัตถุดิบทางอาหาร) เพื่อให้เกิดการดูดกลืนแสง แล้วมีการเปลี่ยนแปลงของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน C-H, ไนโตรเจนกับไฮโดรเจน N-H และออกซิเจนกับไฮโดรเจน O-H โดยเกิดการยืด-หดหรือบิด-งอ ในรูปแบบต่างๆ แล้วทำการตรวจวัดคลื่นแสงที่ไม่ดูดกลืน ซึ่งสะท้อนหรือส่องผ่านออกมา โดยสามารถตรวจวัดด้วย detector แล้วประมวลผลเป็นค่าการดูดกลืนแสงที่คลื่นต่างๆ เกิดเป็นสเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะตัวในแต่ละตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2 เส้นสเปกตรัมของแป้งบิสคิสที่บริเวณพื้นที่หลักตามการดูดซับ

(ที่มา A.M.C. Davies, 2000)

สเปกตรัมของตัวอย่างที่วัดได้ด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์สามารถนำมาใช้เลยหรืออาจมีการจัดการทางคณิตศาสตร์ต่อสเปกตรัม (spectrum pretreatment) ก่อน ซึ่งมีหลายวิธีด้วยวัตถุประสงค์ต่างกัน เช่น ทำสเปกตรัมที่มีสัญญาณรบกวนให้เรียบขึ้นโดยใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยของช่วงคลื่นสั้นๆ ต่อเนื่องกัน การปรับค่าศูนย์กลางข้อมูล (mean centering, MC) การทำอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่ง (1st derivative, D1) เพื่อแก้ปัญหการเลื่อนขึ้นของเส้นสเปกตรัม (baseline shift) การทำอนุพันธ์ลำดับที่สอง (2nd derivative, D2) เพื่อแก้ปัญหการเลื่อนขึ้นและ

การที่มีพีคซ้อนทับกัน (overlapping peaks) การปรับเป็นค่ามาตรฐาน (normalization) ทำเพื่อกำจัดความแปรปรวนจากปัจจัยที่ไม่ต้องการการปรับแก้ การกระเจิงแบบผลคูณ (multiplicative scatter correction, MSC) เพื่อแก้ปัญหาการกระเจิงแสงที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่นขนาดอนุภาคหรือผลที่ไม่เท่ากัน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแหล่งแสง เป็นต้นการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard normal variate, SNV) และการปรับแนวโน้ม (detrending) ซึ่งแก้ปัญหาเช่นเดียวกับ MSC

2.5.2 ส่วนประกอบของเครื่องเนียร์อินฟราเรด

ส่วนประกอบหลักเครื่องมือ Spectrometer ส่วนใหญ่มีความคล้ายคลึงกัน ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง ตัวเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการตำแหน่งที่วางตัวอย่าง

1. แหล่งกำเนิดรังสีในช่วงเนียร์อินฟราเรด

ส่วนใหญ่ใช้หลอดทังสเตนเนื่องจากราคาถูกและใช้งานได้ทันที ใช้ฟิลเตอร์ช่วยในการกรองแสงในช่วงความถี่ที่นอกขอบเขตออกเป็นการป้องกันไม่ให้ตัวอย่างร้อนจนเกินไป

2. โมโนโครมาเตอร์ (monocromator)

ช่วยในการกระจายแสงโดยอาศัยเกรตติง และควบคุมให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการด้วยช่องผ่านแสงเข้า (entrance Slit) และช่องผ่านแสงออก (exit Slit)

3. ตำแหน่งที่วางตัวอย่าง

ควรได้รับการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบการวิเคราะห์และปริมาณอนุภาคที่ใช้วิเคราะห์ เซลล์สำหรับใส่ตัวอย่างต้องทำจากวัสดุที่ยอมให้แสงในช่วง NIR สามารถทะลุผ่านได้ เช่น แก้วหรือควอทซ์ และมีระยะทางเดินของแสงที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่าง

4. อุปกรณ์ตรวจวัด (detector)

อุปกรณ์สำหรับตรวจวัดปริมาณแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการทาง Photoconductive effect การเลือกเครื่องตรวจวัดนั้นขึ้นกับช่วงความยาวคลื่นและการออกแบบตัวแปรต่างๆ ของ Spectrometer

2.5.3 การวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม NIR

ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ การสร้างสมการที่ใช้ทำนาย (calibration) เพื่อให้ได้สมการมาตรฐานที่ใช้ในการทำนายคุณลักษณะหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทราบ และขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้นมา (validation) เพื่อทดสอบสมการที่ได้ในขั้นตอน calibration มีความแม่นยำหรือเหมาะสมเพียงใด เมื่อได้ผลทดสอบในระดับที่น่าเชื่อถือจึงสามารถใช้สมการที่สร้างขึ้นมาทำนายคุณลักษณะที่ต้องการศึกษาจากสเปกตรัมจาก NIR ที่ทำการวัดมา

2.5.3.1 การทำแคลิเบรชัน (Calibration)

1.กำหนดตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม ตัวแปรอิสระที่นำมาใช้ในการสร้างสมการ คือ สเปกตรัมที่อ่านได้จากเครื่อง NIR เช่น ค่า $\log (1/R)$ เป็นต้น ส่วนตัวแปรตาม คือค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานที่ตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ (reference laboratory method) เช่น ความวัดค่าเพอร์ออกไซด์ โดยการไตเตรดด้วยโซเดียมไฮโอซัลเฟต

2.การสร้างสมการ Calibration การสร้างสมการนั้นสิ่งสำคัญคือการหาตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับค่าของตัวแปรตามที่ทำกรวิเคราะห์ สามารถแบ่งได้ วิธีหลัก คือ 2 Wavelength selection เป็นวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม เทคนิคในการคัดเลือกมีหลายรูปแบบ เช่น (1) เลือกจากความรู้ความชำนาญ เอกสารอ้างอิงที่บ่งบอกถึงช่วงความยาวคลื่นที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าที่วิเคราะห์ ใช้เทคนิคทางสถิติในการคัดเลือกความยาวคลื่นที่คาดว่าจะสัมพันธ์กัน เช่น Multiple regression หรือการสร้าง Correlation diagram ซึ่งเป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกน X ความยาวคลื่น และแกน Y ค่า Correlation ง่ายของความสัมพันธ์ระหว่าง Optical data ความยาวคลื่นกับค่าวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานการสร้างสมการแบบ Wavelength selection อาศัยหลักและวิธีการทางสถิติเป็นเครื่องมือในการสร้างสมการ ได้แก่ Simple Linear Regression, 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 การใช้วิธีทางสถิติช่วยจัดกลุ่มแยกประเภทตัวแปรที่มีความข้องเกี่ยวกัน และสร้างตัวแปรใหม่จาก ตัวแปรเดิมสามารถช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ วิธีการทางสถิติที่นิยมใช้ได้แก่

1. Principle Component Regression (PCR) เริ่มจากการทำ Principle Component Analysis (PCA) กับข้อมูลที่เป็นตัวแปรอิสระที่ได้มาจากข้อมูลของสเปกตรัม เพื่อสร้างองค์ประกอบหรือตัวแปรใหม่ New Factors แล้วนำค่าตัวแปรใหม่ที่สร้างขึ้นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตามเพื่อสร้างสมการ Calibration โดยใช้หลักการของ MLR

2. Principle Component Analysis (PCA) เป็นเทคนิคการลดจำนวนตัวแปรอิสระ โดยแบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่เรียกว่า Factor หรือองค์ประกอบ Factor ที่สร้างขึ้น อีกนัยหนึ่งคือผลรวมของค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นที่มีน้ำหนักแตกต่างกัน ค่าสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งประกอบกันเป็น Factor นั้นๆ Factor แรกจะถูกสร้างให้สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าสเปกตรัมได้มากที่สุด Factor ที่สองใช้อธิบายความแปรปรวนที่เหลือ ซึ่งทำให้ระหว่าง Factor ไม่มีความสัมพันธ์กัน (Non-Collinearity) ซึ่งเป็นข้อดีสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ เมื่อ

หา Factor เรียบร้อยแล้ว นำ Factor ที่ได้มาทำ Regression กับค่าทางเคมีโดยใช้กำลังสองน้อยที่สุด ทำให้ได้ค่า Chemical loading หรือ Calibration coefficient

3. Partial Least Square (PLS) Regression เป็นเทคนิคการลดจำนวนตัวแปรเช่นเดียวกับวิธี PCR กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมเป็นอิสระจากกระบวนการทำสมการถดถอยของการทำนาย ซึ่งใน PLS ทั้งสองกระบวนการจะถูกเชื่อมโยงเข้าไว้ด้วยกัน โดยมีการนำค่าองค์ประกอบทางเคมีมาคิดในกระบวนการหา Factor ด้วย ซึ่งได้อธิบายถึง PLS ว่าเป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบหลายตัวแปร โดยการสร้าง Factor แบบสมการเชิงเส้นตรงจากข้อมูลของสเปกตรัมเริ่มต้น และนำ Factor ที่ได้ไปใช้ในการสร้างสมการถดถอย โดย Factor ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยวิธีสถิติ PLS ต้องสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล และเกี่ยวข้องกับ การประเมินค่าทางเคมีในเวลาเดียวกัน วัตถุประสงค์ของ PLS เพื่อต้องการลดจำนวนข้อมูลสเปกตรัม เพื่อให้ได้สเปกตรัมที่มีความสำคัญกับการทำนายค่าทางเคมีที่น่าสนใจเท่านั้น เพื่อให้สามารถประเมินค่าทางเคมีได้ ถูกต้องมากขึ้น

2.5.3.2 การทำแวลิดเรชั่น (Calibration)

จากการสร้างสมการ Calibration แล้ว ต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพของสมการก่อนมีการนำไปใช้งานจริง การทดสอบสมการมี 2 วิธีคือ

1.Full cross validation เป็นการทดสอบสมการภายในความหมายคือ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบเป็นตัวอย่างชุดมาตรฐานทั้งหมด ที่ใช้สร้างสมการประเมินค่าทางเคมีนั่นเอง

2.Prediction testing หรือ การทดสอบผลการประเมินวิธีนี้ทดสอบสมการแบบภายนอก โดยเตรียมชุดตัวอย่างใหม่มาทำการวิเคราะห์ในสภาวะการทดลอง เช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐาน เรียกชุดตัวอย่างที่นำมาทดสอบนี้ว่า ชุดทดสอบ (Testing set) ตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวในการประมาณค่าตัวแปรตาม สิ่งที่ต้องระวังคือ ปริมาณค่าทางเคมีที่ใช้ทดสอบต้องอยู่ในช่วงมาตรฐาน หลังจากได้สเปกตรัมจากชุดทดสอบนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณทางเคมีจากสมการ จากนั้นดูผลการคำนวณที่ได้จากค่าทางสถิติ ซึ่งค่าทางสถิติที่พิจารณาคือ ค่า Bias ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธี NIR กับค่าที่ได้จากวิธีมาตรฐาน และค่า Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP) หรือค่า Standard error of prediction (SEP)

2.5.4 การประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของแบบจำลอง

การทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายสมบัติที่ต้องการวัดทำได้โดยวิธีทางสถิติโดยคำนวณค่าที่จำเป็นในการประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของแบบจำลองได้แก่

1. ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of correlation, R)

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) แสดงระดับซึ่งข้อมูล 2 ชุดข้อมูลตัวเลข X และ Y ในที่นี้ข้อมูล X คือข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิง ข้อมูล Y คือข้อมูลจาก

การวัดด้วยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี) สอดคล้องหรือมีสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ความสอดคล้องที่สมบูรณ์จะไม่มี ความแตกต่างกันเลยระหว่าง 2 ชุดข้อมูลผลของค่า R จะเท่ากับ 1.00 ในทางปฏิบัติ นั้นเป็นไปได้ และ X และ Y อาจจะมี ความสัมพันธ์เป็นเชิงบวกหรือลบก็ได้

2. ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2)

เป็นค่าที่แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดย ความแปรปรวนในข้อมูล Y ค่าของ R^2 มีค่าระหว่าง 0.00-1.00 และเป็น บวกเสมอ เช่น ถ้า $R = 0.97$ แล้ว $R^2 = 0.941$ หมายความว่า 94.1% ของ ความแปรปรวนในข้อมูล X และ 5.9% ของความแปรปรวนในข้อมูล X เกิดขึ้นจากตัวแปรอื่นเช่นการเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดลองอ้างอิง และ อื่นๆ ค่า R^2 เป็นบวกเสมอโดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของ R ในทางปฏิบัติ R^2 ให้ข้อมูลมากกว่า R และใช้กันมากกว่า R การแปลความหมายของค่า R และ R^2 แสดงดังตารางที่ 2.1

3. ความผิดพลาดมาตรฐานของการจำลอง (Standard error of calibration, SEC)

SEC คือ ค่า SD ของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์ อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงในชุดตัวอย่างที่ ใช้สร้างแบบจำลอง Calibration set ถ้าใช้ MLR จะพบว่า R และ SEC จะ ดีขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรต้นมากขึ้น สิ่งนี้เรียกว่า over-fitting ของข้อมูล ตามหลักค่า SEP (ดูข้อ 5) ควรจะสูงกว่า SEC เสมอ

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

Cross-validation สามารถใช้ตัวอย่างชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการสร้าง แบบจำลองเพื่อการทำการพิสูจน์แบบจำลอง สิ่งนี้ทำโดยชักตัวอย่างออก หนึ่งตัวอย่างหรือกลุ่มของหลายตัวอย่างจากชุดสร้างแบบจำลองและสร้าง แบบจำลองด้วยตัวอย่างที่เหลืออยู่แล้วทำนายตัวอย่างที่ถูกกำจัดออกไป และบันทึกค่าความผิดพลาดแล้วนำตัวอย่างที่ถูกกำจัดออกไปนั้นกลับมา แล้วชักตัวอย่างอื่นออกไปและทำซ้ำกระบวนการจนกระทั่งตัวอย่าง ทั้งหมดถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองและทำนายจะไม่มีตัวอย่างที่ถูก ทำนายถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองซึ่งได้ใช้ในการทำนายถ้าเอาออกเพียง ทีละ 1 ตัวอย่างจะเรียกว่า "Full" หรือ "One-out" cross-validation

ตารางที่ 2.1 การแปลความหมายของค่า R และ R²
(ที่มา Williams, 2007)

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

5. ความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนาย (Standard error of prediction, SEP หรือ SEV) SEP ย่อมาจาก Standard error of prediction หรือ Standard error of performance แสดงสมรรถนะของการทำนาย บางครั้งใช้เทอม SEV (Standard error of validation) SEP เป็นค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงซึ่งไม่เหมือนกับ RMSEP (Root mean square of the prediction) ซึ่งจะอธิบายต่อไปโดย SEP ไม่เกี่ยวข้องกับ Bias ค่า SEP คำนวณจากผลการทำนายของชุดตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองชุดตัวอย่างนี้เรียกว่า ชุดทำนาย

6. ความผิดพลาด (Bias)

เมื่อทำนายค่าตัวแปรที่ต้องการของข้อมูลในชุดตัวอย่างทดสอบแบบจำลอง (Validation set) ค่า Bias หมายถึงความแตกต่างระหว่างค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงและค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และเป็นการวัดความแม่นยำโดยรวมของแบบจำลอง (Calibration model) ในโลกความเป็นจริงของทางการค้าและอุตสาหกรรม Bias เป็น

หนึ่งในสิ่งที่สำคัญมาก ในทางสถิติ Bias สามารถเกิดขึ้นได้แม้เมื่อค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และ SEP ที่แสดงว่าแบบจำลอง นั้นดีเยี่ยม

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

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) กับ อัตราส่วนของค่าความผิดพลาดมาตรฐานการทำนาย (SEP) ของข้อมูลของค่าอ้างอิงของชุดทำนาย ค่า SEP ควรต่ำกว่า SD มากๆ ซึ่งอัตราส่วนควรเท่ากับ 5 หรือมากกว่า บางกรณีตัวอย่างมีความสม่ำเสมอมากค่า SD จึงไม่สูง ซึ่ง RPD อาจจะไม่สูง ดังนั้น RPD เท่ากับ 2.5-3.0 ก็อาจแสดงถึงการวิเคราะห์ที่แม่นยำถ้า SD มีค่าเพียง 0.4-0.5

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

RER คือ อัตราส่วนของช่วงกว้างของข้อมูลอ้างอิงของชุดทำนาย ต่อ SEP ค่า RER ควรจะสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตารางที่ 2.2 แสดงการอธิบายผลของค่า RPD และ RER

ตารางที่ 2.2 การอธิบายผลของค่า RPD และ RER
(ที่มา Williams, 2007)

| 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 |

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ

ตัวอย่างเป็นผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ (crispy fried-food) งานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบที่ได้มาจากหลายสถานที่ เพื่อที่จะได้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบที่มีปริมาณความชื้น (moisture content, %wb) ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (water activity, a_w) ปริมาณไขมัน (Fat content, %) และค่าเพอร์ออกไซด์ (Peroxide value, P.V.) หลากหลายค่า เพื่อให้ได้ค่าปัจจัยคุณภาพกว้างมากที่สุด สถานที่เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบที่ใช้ในงานวิจัย

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | ชื่อตลาด |
|-------------|---------------------------------------|---|
| 1 | มันฝรั่งทอด ยี่ห้อ Makado รส original | ท็อป ซูเปอร์ ลาดกระบัง |
| 2 | เทสโต รส คาราเมล | ท็อป ซูเปอร์ ลาดกระบัง |
| 3 | ข้าวเกรียบกุ้ง คาลบี้ | ท็อป ซูเปอร์ ลาดกระบัง |
| 4 | เลย์ รสออริจินัล | ท็อป ซูเปอร์ ลาดกระบัง |
| 5 | ข้าวแต๋น | ร้านขายอาหาร คณะอุตสาหกรรม เกษตร |
| 6 | มันอะลู | ห้องปฏิบัติการ ทดลอง ภาควิชา วิศวกรรมอาหาร ชั้น 3 โรงอาหารซี |
| 7 | ข้าวเกรียบปลา | ร้านขายของชำ ตลาดพระโขนง |

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | ชื่อตลาด |
|-------------|---|---|
| 8 | ข้าวเกรียบส้ม | ร้านโชน์ห่วย ลาดกระบัง |
| 9 | ถั่วทอด | ร้านขายอาหาร คณะอุตสาหกรรม เกษตร |
| 10 | กล้วยเบรคแตก | พาราไดซ์ พาร์ค ถนนศรีนครินทร์ |
| 11 | กล้วยเคลือบน้ำตาล | พาราไดซ์ พาร์ค ถนนศรีนครินทร์ |
| 12 | โลตัสขนมน้องไก่อรสบาร์บีคิวเกาหลีผสม สาหร่าย | ท็อป ซูเปอร์ ลาดกระบัง |
| 13 | ข้าวเกรียบปลา งาน | ร้านขายอาหาร คณะอุตสาหกรรม เกษตร |
| 14 | ยำยำจัมโบ้ ผัดขี้เมา | เซเว่นลาดกระบัง |
| 15 | มาม่าหมูสับต้มยำ | เซเว่นลาดกระบัง |
| 16 | รากบัวทอด | ห้องปฏิบัติการ ทดลอง ภาควิชา วิศวกรรมอาหาร ชั้น 3 โรงอาหารซี |
| 17 | แคบหมู | ร้านขายของฝาก จ.ฉะเชิงเทรา |
| 18 | แคบหมูกรอบ | ร้านขายของฝาก จ.ฉะเชิงเทรา |
| 19 | แคบหมู | ร้านขายของฝาก ตลาดหนองมน |

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | ชื่อตลาด |
|-------------|----------------------------------|---|
| 20 | ไวไว wai wai | ร้านขายของชำ ตลาดเอี่ยมสมบัติ ถ.ศรีนครินทร์ |
| 21 | nissin รสตั๋มยำกุ้งแซ่บ | ร้านขายของชำ ตลาดพระโขนง |
| 22 | เลย์ รสกระเพรากรอบ | ร้านขายของชำ ซอยสุขุมวิท 62 |
| 23 | ซีโตส | แม็กซ์แวลู่ คอนโด ideo mobi ซอยสุขุมวิท 81 |
| 24 | ปาปริก้า | ร้านขายของชำ ซอยอ่อนนุช 50 |
| 25 | คอนเน่ รส original | ห้างสรรพสินค้า โลตัสอ่อนนุช |
| 26 | ซันไอร์แลนด์ รสoriginal | ร้านขายของฝาก จ.ชลบุรี |
| 27 | ทวิสโก้ | ร้านขายของชำ ตลาดพระโขนง |
| 28 | แจ็กซ์ ซอสตูโอ ซอสมะเขือเทศ พริก | ร้านขายของชำ ตลาดพัฒนาการ |
| 29 | ขนม ritz bit sandwich | ร้านขายของชำ ตลาดพัฒนาการ |
| 30 | ขนมปังกรอบรสชีส ตราok | ร้านขายของชำ ตลาดพระโขนง |
| 31 | ขนมทอดกรอบ ตราไดโนพาร์ค | ห้างสรรพสินค้า โลตัสอ่อนนุช |

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | ชื่อตลาด |
|-------------|---|--|
| 32 | ข้าวแต๋น ไรซ์เบอร์รี่ | ห้างสรรพสินค้า โลตัส สาขาซีคอน ศรีนครินทร์ |
| 33 | ซีตส์ ขนมมะขี้กิ้งสำเร็จรูป | ร้านขายของชำ ตลาดเอี่ยมสมบัติ |
| 34 | ข้าวเกรียบ ตราพรานกึ่ง | ร้านโชห่วย ลาดกระบัง |
| 35 | ข้างน้อย | ร้านโชห่วย |
| 36 | ขนมไก่ย่าง | ร้านขายของชำ ตลาดเอี่ยมสมบัติ |
| 37 | อาริงาโต๊ะ | ร้านขายของชำ ชอยอ่อนนุช 50 |
| 38 | มาม่ารสหมูสับ | ห้างสรรพสินค้า โลตัสอ่อนนุช |
| 39 | มาม่ารสแกงเขียวหวาน | ร้านขายของฝาก จ.ชลบุรี |
| 40 | มาม่ารสหอยลายผัดฉ่า | ร้านขายของชำ ตลาดพระโขนง |
| 41 | โรลเลอร์โคสเตอร์ รสชีสต้นตำรับ | ร้านขายของชำ ตลาดพัฒนาการ |
| 42 | โลตัสขนมถั่วบัก รสสาหร่าย | ร้านขายของชำ ตลาดพัฒนาการ |
| 43 | มันฝรั่งแท้ทอดกรอบ real potato stick รสพริกไทยดำ | ร้านขายของชำ ชอยอ่อนนุช 50 |

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | ชื่อตลาด |
|-------------|--|-------------------------------------|
| 44 | coconut butter cracker with sesame | เซเว่น ชอยอ่อนนุช 52 |
| 45 | ทวิสตี รสเอ็กซ์ตรีมชีส | ท๊อป ชุปเปอร์ ลาดกระบัง |
| 46 | มันฝรั่งทอด ยี่ห้อ Makado รส บาร์บีคิว | ท๊อป ชุปเปอร์ ลาดกระบัง |
| 47 | โฮมมี่ รส nori seaweed | ท๊อป ชุปเปอร์ ลาดกระบัง |
| 48 | โฮมมี่ รส sesame | ท๊อป ชุปเปอร์ ลาดกระบัง |
| 49 | โฮมมี่ รส coconut | เซเว่น ชอยอ่อนนุช 52 |
| 50 | โรลเลอร์โคสเตอร์ รสสไปซี่ บาร์บีคิว | ร้านขายของชำ ชอยสุขุมวิท 62 |
| 51 | โลตัสขนมปังไก่ รสสวีทบานาน่า | ร้านขายของชำ ตลาดพระโขนง |
| 52 | คอนพัฟฟ์ | วิลล่า มาร์เก็ต พาซิโอ ลาดกระบัง |
| 53 | โฮมมี่ รส black sesame | ห้างสรรพสินค้าบิ๊ก ซี ลาดพร้าว |
| 54 | ยำยำจัมโบ้ ต้มแซ่บต้นตำหรับอีสาน | ร้านขายของชำ ชอยกรุงเทพกรีฑา |
| 55 | ยำยำจัมโบ้ รสหมูกระเทียม | ร้านขายของชำ ตลาดพระโขนง |

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | ชื่อตลาด |
|-------------|----------------------------------|--|
| 56 | ข้าวแต๋น ธัญพืช | ร้านขายของชำ ตลาดพัฒนาการ |
| 57 | โคคา บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป | ร้านสะดวกซื้อ Family mart ซอย เก๊กงาม 2 |
| 58 | คารามูจี้ รสฮอตซิลลี่ | ร้านขายของชำ ซอยเก๊ก 2 |
| 59 | เลย์ maxx กลิ่นซีโครงหมูอเมริกัน | ท็อปส์ ซูเปอร์มาร์ เก็ต ห้างสรรพสินค้า ธัญญาพาร์ค |
| 60 | แจ๊กซ์ มันสำหรั่งซอสญี่ปุ่น | ร้านขายของชำ ตลาดหัวตะเข้ |
| 61 | ปาร์ตี้ มันเทศผสมทอดกรอบ | ร้านขายของชำ ตลาดหัวตะเข้ |
| 62 | ซันไบร์ท รสสาหร่ายซอสญี่ปุ่น | ร้านขายของชำ ตลาดหัวตะเข้ |
| 63 | โปเต้ | ร้านสะดวกซื้อ 108 shop ถนนศรี นครินทร์ |
| 64 | ป๊อปไรซ์ รสเขตต้าซีส | ห้างสรรพสินค้า โลตัส ซอยอ่อนนุช |
| 65 | อาริงาโต | ร้านขายของชำ ซอยกรุงเทพกรีฑา |
| 66 | ควิก รสกุ้งนึ่งมะนาว | ร้านขายของชำ ตลาดพระโขนง |

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | ชื่อตลาด |
|-------------|-----------------------------------|---|
| 68 | nissin รสหมูมะนาว | ร้านสะดวกซื้อ Family mart ซอย เก็กงาม 2 |
| 69 | nissin รสหมูสับ | ร้านขายของชำ ซอยเก็ก 2 |
| 70 | Pringles sour cream onion | ท็อปส์ซูเปอร์มาร์ เก็ต ธิญญะพาร์ค |
| 71 | testo รส strawberry | ร้านสะดวกซื้อ RNP ลาดกระบัง |
| 72 | oriental kitchen hot&spicy | ห้างสรรพสินค้า โลตัสสาขา ซีคอนสแควร์ |
| 73 | Funfries ตรามามี | ร้านขายของชำ ตลาดพระโขนง |
| 74 | เนลี เครกเกอร์ มีนฝรั่งรสชาวนคริม | ร้านขายของชำ ตลาดหัวตะเข้ |
| 75 | ย่าย่า รสสุกี้ | ร้านขายของชำ ตลาดหัวตะเข้ |
| 76 | มาม่า รสเปิดโพะโล้ | ตลาดหัวตะเข้ |
| 77 | ย่าย่า รสต้มข่าไก่ | ร้านขายของ ซอย เก็ก 2 |
| 78 | Malkist seaweed cracker | ตลาดเอี่ยมสมบัติ |
| 79 | โรลเลอร์โคสเตอร์รสชีส | เซ่เว่น ใต้โรงอาหาร ซี |
| 80 | ทาโร่ทอดกรอบ | ร้านขายของฝาก จ.ฉะเชิงเทรา |

3.2 การสแกนผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ ถูกนำมาสแกนด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด แบบสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse reflectance) ด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, broker, Germany) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ที่ช่วงความยาวคลื่น 800-2500 นาโนเมตร (เลขคลื่น $12500-4000\text{ cm}^{-1}$) โดยใช้ความละเอียด 16 cm^{-1} 64 สแกนต่อสเปกตรัมเฉลี่ย 1 สเปกตรัม ทำการสแกน 1 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างบรรจุอยู่ในถ้วยที่กันทำด้วยแผ่นควอทซ์ ทั้งนี้โดยสแกนที่ตำแหน่งกันถ้วยควอทซ์ ในการสแกนทั้งหมดทำที่อุณหภูมิห้อง 25 ± 1 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.1 FT-NIR spectrometer

3.3 การวัดปัจจัยคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยวิธีอ้างอิง

3.3.1 ปริมาณความชื้น (AOAC, 2005)

เครื่องมือ

- 1) ตู้อบลมร้อน (Mettler , Germany)
- 2) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Yamato HB-120 Capacity max 120 g
d=0.0001 g)
- 3) ถ้วยอลูมิเนียม
- 4) เดซิเคเตอร์ (Desiccator) หรือโถดูดความชื้น

การวิเคราะห์

- 1) อบถั่วอัลูมิเนียม ในตู้อบอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 2) นำไปใส่เตชิตเตอร์ทิ้งไว้ให้เย็น
- 3) ชั่งน้ำหนักถั่วอัลูมิเนียมคงที่ คือมีน้ำหนักต่างกันน้อยกว่า 2%
- 4) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 3 กรัม เกลี่ยตัวอย่างให้มีความสม่ำเสมอ
- 5) นำไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส อบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่
- 6) ปิดฝา นำมาทำให้เย็นในเตชิตเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนัก
- 7) หาน้ำหนักที่หายไป วิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากสมการ

$$\text{ร้อยละความชื้นฐานเปียก} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100 \quad (3.1)$$

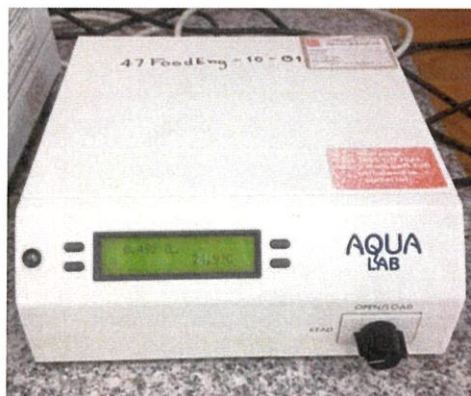
3.3.2 ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w)

เครื่องมือ

เครื่องมือวัดค่า a_w อัตโนมัติ AQUA LAB MODEL SERIES 3 TE

การวิเคราะห์

โดยการอ่านค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.2 เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ

3.3.3 ปริมาณไขมัน (AOAC, 2005)

เครื่องมือ

- 1) อุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน (soxhlet apparatus) ประกอบด้วย ขวดกั่นกลม (สำหรับใส่ตัวทำละลาย) ซอคเลต (soxhlet) อุปกรณ์ควบแน่น (condenser) และเตาให้ความร้อน (heating mantle)
- 2) หลอดใส่ตัวอย่าง (extraction thimble)
- 3) ตู้อบลมร้อน (Mettler , Germany)
- 4) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Yamato HB-120 Capacity max 120 g d=0.0001 g)
- 5) เดซิเคเตอร์ (Desiccator) หรือโถดูดความชื้น



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน

การวิเคราะห์

- 1) อบขวดกั่นกลมสำหรับหาปริมาณไขมันในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงและทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
- 2) ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนัก 3-5 กรัม ห่อให้มิดชิดแล้วใส่ลงในหลอดสำหรับใส่ตัวอย่าง
- 3) นำหลอดตัวอย่างใส่ลงในซอคเลต เติมนิโตรเลียมอีเทอร์ประมาณ 150 มิลลิลิตร แล้ววางบนเตา ประกอบอุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน พร้อมทั้งเปิดน้ำหล่อ อุปกรณ์ควบแน่นและเปิดสวิทซ์ให้ความร้อน

- 4) ใช้เวลาในการสกัดไขมันนาน 2 ชั่วโมง เมื่อครบ 2 ชั่วโมงนำตัวอย่างออกจากช็อคเลต ทิ้งให้ตัวทำละลายไหลจากช็อคเลตลงในขวดกั้นกลมจนหมด
- 5) ระเหยตัวทำละลายออกด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนแห้ง ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
- 6) คำนวณหาปริมาณไขมันจากสมการ

$$\text{ร้อยละปริมาณไขมัน} = \frac{\text{น้ำหนักไขมัน}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนสกัด}} \times 100$$

(3.2)

3.3.4 ค่าเพอร์ออกไซด์ (AOAC, 2005)

เครื่องมือ

- 1) เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Shimadzu UX3200G Capacity max 3200 g d=0.01 g)
- 2) ขวดรูปชมพู่
- 3) กระจกตวง
- 4) หลอดฉีดยา
- 5) บิวเรต



รูปที่ 3.4 สารเคมีที่ใช้ในการไตเตรดหาปริมาณเพอร์ออกไซด์ในน้ำมัน

การวิเคราะห์

- 1) ชั่งน้ำหนักน้ำมันประมาณ 5 กรัม
- 2) เติมสารละลายคลอโรฟอร์มผสมกับกรดอะซิติก 30 มิลลิลิตร
- 3) เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 0.5 มิลลิลิตร
- 4) เติมน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร
- 5) เติมน้ำแข็ง 0.5 มิลลิลิตร
- 6) เขย่าให้สารละลายเข้ากันแล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 normal

$$\text{ค่าเปอร์ออกไซด์} = \frac{(s-b) \times N \times 1000}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \quad (3.3)$$

- เมื่อ N = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (normal)
 S = ปริมาณของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 b = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต blank (มิลลิลิตร)

3.4 การวิเคราะห์สเปกตรัม

สเปกตรัมดิบของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ ถูกนำมาวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของพันธะต่างๆและคำนวณสเปกตรัมอนุพันธ์อันดับสองและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของพันธะต่างๆ โดยใช้ osbourne et al. (1993) เป็นเอกสารอ้างอิง

3.5 การสร้างแบบจำลอง

นำข้อมูลสเปกตรัมและค่าอ้างอิงมาสร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นฐานเปียก ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ปริมาณไขมัน และค่าเปอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบกับข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, germany) โดยวิธีการทางเคโมเมตริกซ์ แบบ Partial least squares regression โดยแบ่งข้อมูลเป็นสองชุดคือชุดแคลิเบรชัน (Calibration) และชุดแวลิดเรชัน (Validation) โดยมีอัตราส่วนข้อมูล 4:1 วิเคราะห์โดยโปรแกรม OPUS 7.0.129 (Bruker, Germany) โดยไม่มีหรือมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นโดยวิธี constant offset elimination, straight line subtraction, vector normalization (SNV), min-

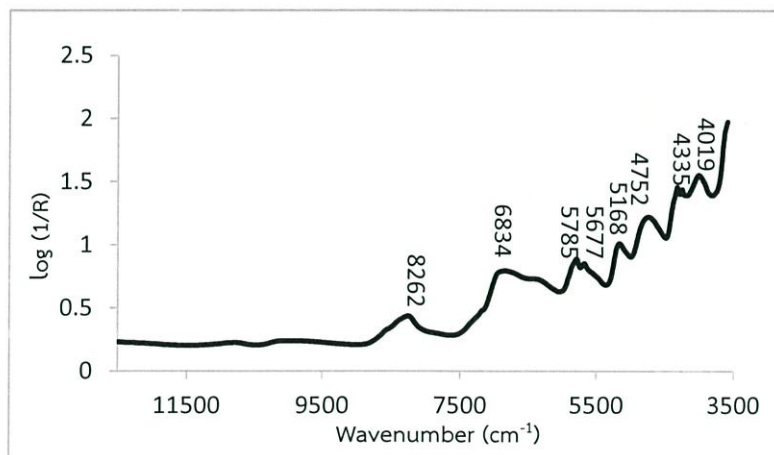
max normalization, multiplicative scattering correction (MSC), first derivative, second derivative, first derivative+straight line subtraction, first derivative+SNV และ first derivative+MSC การคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2) ที่สูงที่สุดหรือค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย (Root Mean Square Error of Prediction, RMSEP) และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Bias) ต่ำสุด

บทที่ 4

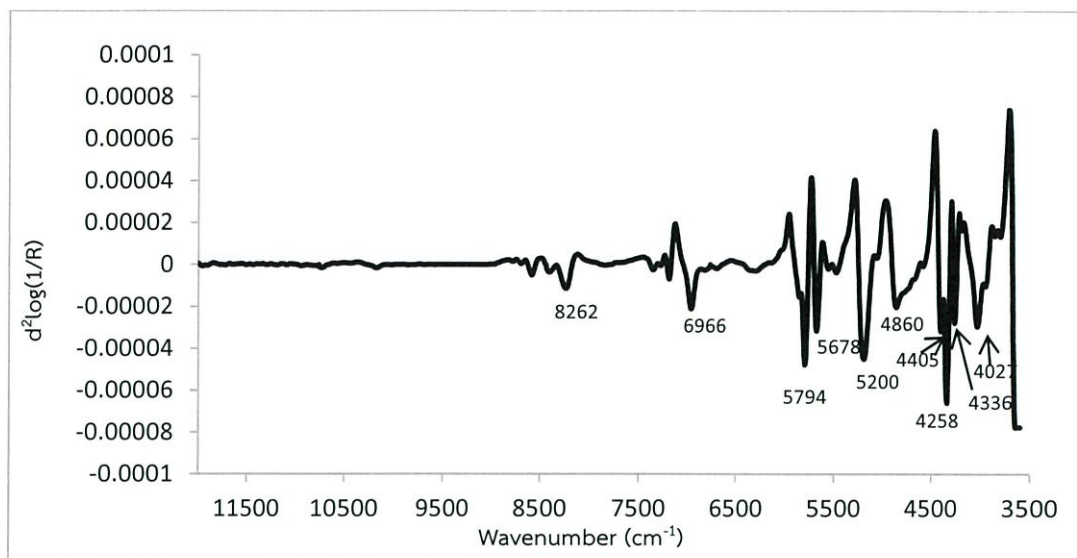
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1. ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม

จากการตรวจวัดสเปกตรัมของเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) สเปกตรัมเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ (รูปที่ 4.1) พบว่ามีพีคเกิดขึ้นในช่วงเลขคลื่น 8800-8100 cm^{-1} , 7151-6750 cm^{-1} และ 6050-3880 cm^{-1} ในช่วงเลขคลื่น 8800-8100 cm^{-1} มีพีคเกิดขึ้นที่เลขคลื่น 8262 cm^{-1} (1211 nm) ซึ่งเป็นพีคของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ในช่วงเลขคลื่น 7151-6750 cm^{-1} มีพีคเกิดขึ้นที่เลขคลื่น 6834 cm^{-1} (1463 nm) ซึ่งเป็นพีคของสารประกอบเอมีน สารประกอบเอไมด์ และโปรตีน เมื่อนำเอาสเปกตรัมเฉลี่ยมาทำอนุพันธ์อันดับสอง (รูปที่ 4.2) จะพบพีคเพิ่มเติมในช่วงเลขคลื่น 8640-8162 cm^{-1} และ 7440-6600 cm^{-1} ประกอบด้วยพีคของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน, สารประกอบคาร์บอนิล, คีโตน, กรดไขมันอิ่มตัวและเอสเทอร์ ที่เลขคลื่น 6966 cm^{-1} (1436 nm) เป็นพีคของซูโครสและสตาร์ช ที่เลขคลื่น 5794 cm^{-1} เป็นพีคของเมทิล ที่เลขคลื่น 5678 cm^{-1} (1761 nm) เป็นพีคของเมทิล ที่เลขคลื่น 5200 cm^{-1} (1932 nm) เป็นพีคของน้ำ ที่เลขคลื่น 4860 cm^{-1} (2058 nm) เป็นพีคของสตาร์ช ที่เลขคลื่น 4405 cm^{-1} (2270 nm) เป็นพีคของสตาร์ช ที่เลขคลื่น 4336 cm^{-1} (2306 nm) เป็นพีคของเมทิล ที่เลขคลื่น 4258 cm^{-1} (2349 nm) เป็นพีคของเมทิล และที่เลขคลื่น 4336 cm^{-1} (2306 nm) เป็นพีคของเมทิล ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์สเปกตรัมแสดงการสั่นสะเทือนของพันธะที่ปรากฏเป็นพีคในสเปกตรัมเฉลี่ย และสเปกตรัมอนุพันธ์อันดับของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ



รูปที่ 4.2 อนุพันธ์อันดับสองของสเปกตรัมเฉื่อยของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ

ตารางที่ 4.1 สเปกตรัมแสดงการสั่นสะเทือนของพันธะที่ปรากฏเป็นพีคในสเปกตรัมเฉื่อยและสเปกตรัมอนุพันธ์อันดับสองของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ

| Wavenumbers (cm ⁻¹) | Functional Group | Spectra-structure | Material Type |
|---------------------------------|--|---|------------------------------|
| 8262 | C-H methylene (CH ₂) | C-H (3v),methylene C-H | Hydrocarbons,aliphatic |
| 6835 | N-H amide. NH or NH ₂ | N-H (2v), CONH ₂ | Amide/protein |
| 5785 | C-H methylene (CH ₂)(asymmetric) | C-H (2v), methylene | Hydrocarbons,aliphatic |
| 5677 | C-H methylene (CH ₂)(symmetric) | C-H (2v), methylene C-H (symmetric) | Hydrocarbons,aliphatic |
| 5168 | Si-O-H stretch + Si-O-Si combination from silicone | Si-O-H stretch + Si-O-Si deformation combination from silicone | Silicone (dimethyl siloxane) |

ตารางที่ 4.1 สเปกตรัมแสดงการสั่นสะเทือนของพันธะที่ปรากฏเป็นพีคในสเปกตรัมเฉลี่ยและสเปกตรัมอนุพันธ์อันดับสองของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ (ต่อ)

| Wavenumbers (cm ⁻¹) | Functional Group | Spectra-structure | Material Type |
|---------------------------------|-------------------------|---|---------------|
| 4258 | C-H aromatic C-H (aryl) | CH _v +CH _δ (12+17), benzene band assignment | C-H aryl |
| 4019 | C-H/C-C (C-Hand C-C) | C-H stretching and C-C stretching combination | Cellulose |

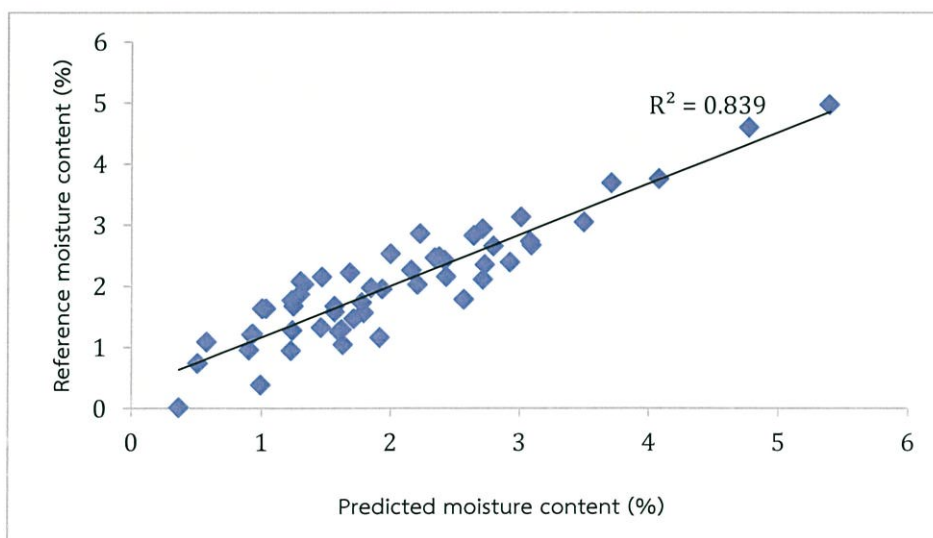
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลทางสถิติของผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบจากการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

| Parameters | Validation | | | | | calibration | | | | |
|-------------------------|------------|---------|---------|---------|--------|-------------|--------|---------|---------|--------|
| | N | Min | Max | mean | SD | N | Min | Max | mean | SD |
| Moisture content (%) | 65 | 0.5039 | 5.1534 | 2.4997 | 1.2805 | 14 | 0.3673 | 5.3996 | 2.0310 | 1.0309 |
| Water activity | 64 | 0.1290 | 0.5850 | 0.3037 | 0.1540 | 15 | 0.1090 | 0.5190 | 0.2534 | 0.1085 |
| Fat content (%) | 55 | 11.3201 | 37.4352 | 25.0884 | 7.0160 | 21 | 8.9547 | 38.8433 | 24.0105 | 7.5631 |
| Peroxide value (mEq/kg) | 63 | 0.147 | 3.5985 | 1.9135 | 1.1239 | 14 | 0.1090 | 3.4982 | 1.3239 | 0.9117 |

4.2 ผลการทำนายแบบจำลอง

4.2.1 ผลการทำนายแบบจำลองของปริมาณความชื้นฐานเปียก

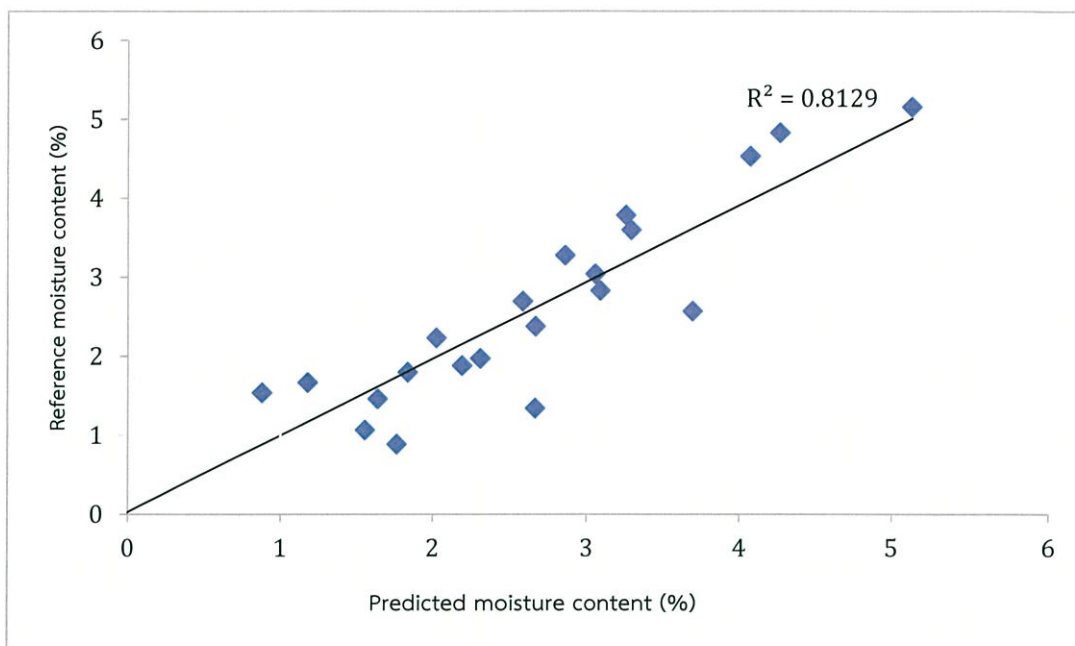
ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลทางสถิติของปริมาณความชื้นฐานเปียกจากเครื่อง FT-NIR spectrometer โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุดคือชุดแคลิเบรชัน (Calibration) และแวลิดเรชัน (Validation) ตารางที่ 4.3 คือผลของการทำ Partial Least Square regression สำหรับวิเคราะห์ปริมาณความชื้นฐานเปียกในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer พบว่าแบบจำลองที่ดีที่สุดถูกพัฒนาสเปกตรัมด้วยวิธี Min-Max normalization ในการวัดปริมาณความชื้นฐานเปียกในผลิตภัณฑ์อาหารทอด 9828-8038.3 cm^{-1} , 7158.9-6256.3 cm^{-1} และ 5376.9-3594.9 cm^{-1} โดยมี PLS factor – 6 จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นฐานเปียกระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแวลิดเรชัน (Validation) และแคลิเบรชัน ตามลำดับ โดยชุดแวลิดเรชัน (validation) มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2), ค่าเฉลี่ยกำลังสองของการทำนาย (Root mean square of prediction, RMSEP), ค่าอัตราส่วนระหว่างความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนายกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of SEP to the SD, RPD) และ ค่าความผิดพลาด (Bias) เท่ากับ 0.8110, 0.544, 2.31 และ -0.0449ตามลำดับ สำหรับชุดแคลิเบรชัน (Calibration) มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2), ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSEE) และค่าอัตราส่วนระหว่างความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนายกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of SEP to the SD, RPD) เท่ากับ 0.8390, 0.44 และ 2.49 ตามลำดับ



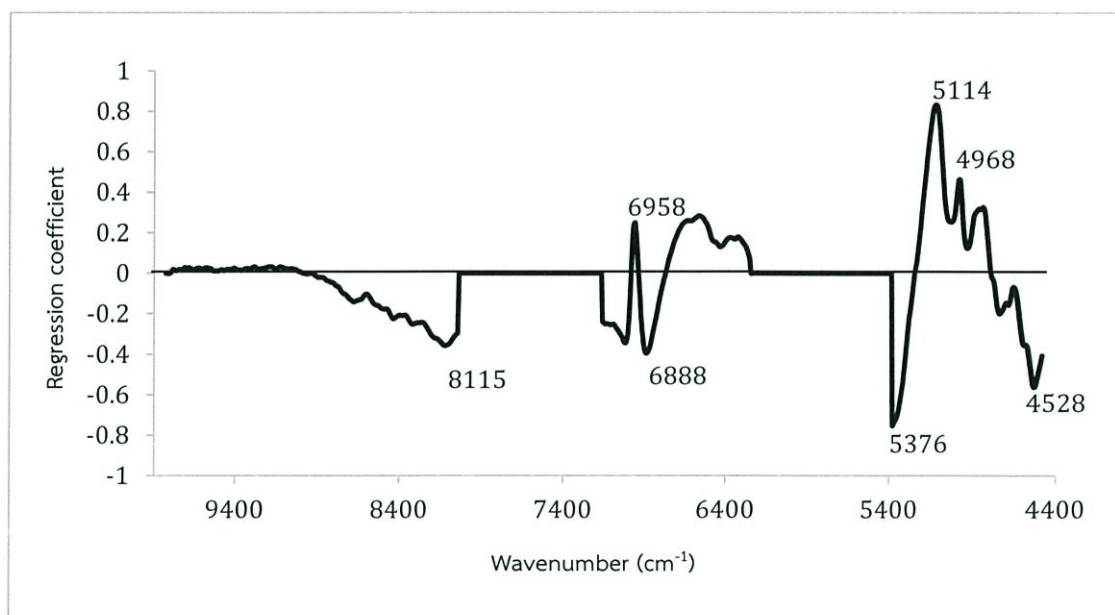
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นฐานเปียกระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแคลิเบรชัน

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ด้วย PLS regression

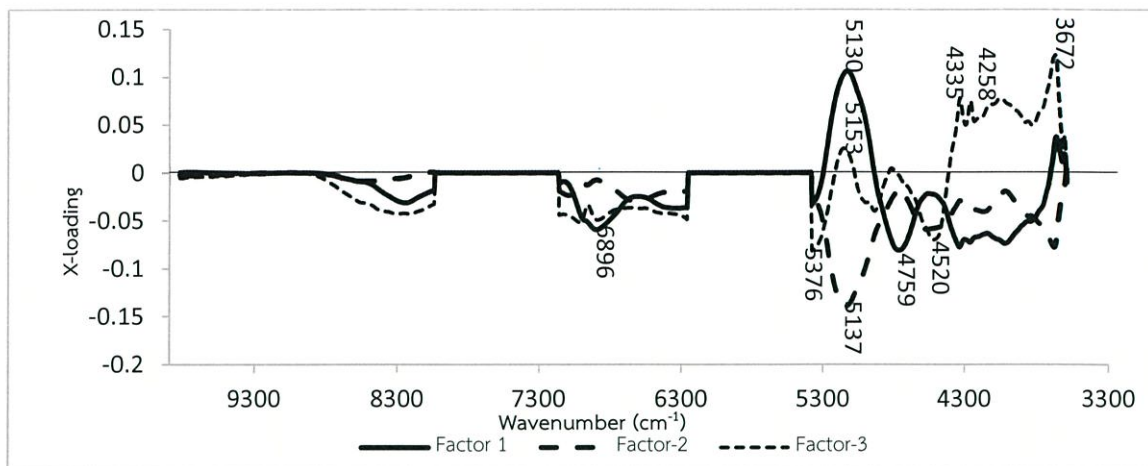
| Parameter | Optimization method | Rank | Wavenumber (cm ⁻¹) | Preprocessing | calibration | | | validation | | | |
|---------------------------|---------------------|------|---|---------------------------|----------------|--------|------|----------------|--------|------|--------|
| | | | | | R ² | RMSE E | RPD | R ² | RMSEP | RPD | Bias |
| Moisture content (% , MC) | NIR | 6 | 9403.8 – 4597.7 | Straight line subtraction | 0.8370 | 0.4510 | 2.43 | 0.6489 | 0.7410 | 1.72 | -0.145 |
| | General A | 7 | 11602.3 - 9820.3 8933.2 - 8038.3 7158.9 - 6256.3 5376.9 - 3594.9 | Min-Max normalization | 0.8558 | 0.4210 | 2.63 | 0.8086 | 0.5470 | 2.29 | -0.011 |
| | General B | 6 | 9828 - 8038.3 7158.9 - 6256.3 5376.9 - 3594.9 | Min-Max normalization | 0.8390 | 0.4400 | 2.49 | 0.8129 | 0.5440 | 2.31 | -0.045 |



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นฐานเปียกระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุด แวลิดเรชั่น



รูปที่ 4.5 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการวัดปริมาณความชื้นฐานเปียกใน ผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer



รูปที่ 4.6 X-loading plot ของแบบจำลองการวัดปริมาณความชื้นฐานเปียกในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

จากรูปที่ 4.5 แสดง Regression coefficient plot ของแบบจำลองการวัดปริมาณความชื้นฐานเปียกในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer พบพีคที่เลขคลื่นต่างๆ โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4 แสดงเลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายค่าอวอเตอร์แอกติวิตี จาก Regression coefficient plot เป็นการสั่นสะเทือนของพันธะ C=O str. third-overtone มีอิทธิพลต่อการทำนายปริมาณความชื้นฐานเปียกมากที่สุด เนื่องจากมีค่า Regression coefficient สูงที่สุด (รูปที่ 4.5)

สำหรับ X-loading plot ของแบบจำลองการวัดปริมาณความชื้นฐานเปียกในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6 ถ้าเลขคลื่นมีค่า X-loading มาก แสดงว่ามีความสำคัญต่อการทำนายของสมการซึ่งทั้ง 3 factor มีพีคที่สำคัญที่เลขคลื่นต่างๆ สรุปดังตารางที่ 4.4 เลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายปริมาณความชื้นฐานเปียกจาก X-loading plot จะเห็นว่า การดูดซับคลื่นของอะโรเมติกเอมีน, สตาร์ซ, แอลกอฮอล์, สารประกอบไฮโดรคาร์บอน, ความชื้น, เอสเตอร์, พอลิเอไมด์และพอลิแซคคาไรด์ มีอิทธิพลต่อการทำนายปริมาณความชื้นฐานเปียกในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบมาก

ตารางที่ 4.4 เลขคลื่นที่พบใน Regression plot และ X-loading plot ของแบบจำลองปริมาณความชื้นฐานเปียกในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนของเครื่อง FT-NIR spectrometer

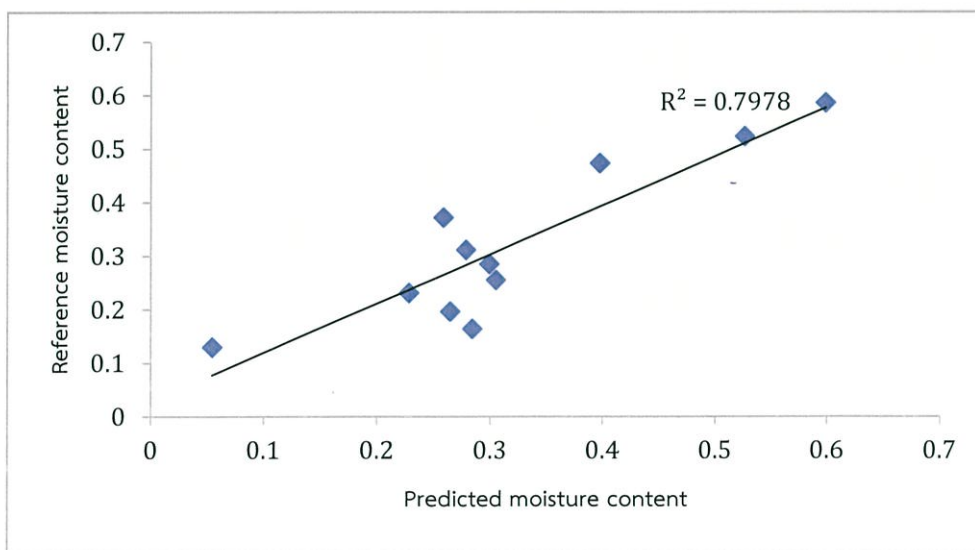
| Wavenumber (cm ⁻¹) | Wavenumber (nm) | Nearest (nm) | Functional Group | Spectra-structure | Material Type |
|--------------------------------|-----------------|--------------|---|--|--------------------------|
| 6958 | 1437 | 1432 | N-H primary aromatic amine (o-NO ₂) | N-H (2v) asymmetric, primary aromatic amine in CCL ₄ as ortho-NO ₂ substituent | Aromatic amine |
| 6896 | 1450 | 1450 | O- polymeric (O-H) | O-H (2v), O-H | Starch/polymeric alcohol |
| 6888 | 1451 | 1450 | O- polymeric (O-H) | O-H (2v), O-H | Starch/polymeric alcohol |
| 5376 | 1860 | 1860 | C-Cl chlorinated organics (C-Cl group) | C-Cl (7v), C-Cl | Chlorinated hydrocarbons |
| 5153 | 1940 | 1940 | OH-classic filter instrument | Classic filter instrument | Moisture (classic) |
| 5137 | 1946 | 1950 | C=O esters and acids (.C=OOR) | C=O (3v), C=OOR | Acids and esters |
| 5130 | 1949 | 1950 | C=O esters and acids | C=O (3v), C=OOR | Acids and esters |

ตารางที่ 4.4 เลขคลื่นที่พบใน Regression plot และ X-loading plot ของแบบจำลองปริมาณความชื้นฐานเปียกในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนของเครื่อง FT-NIR spectrometer (ต่อ)

| Wavenumber (cm^{-1}) | Wavenumber (nm) | Nearest (nm) | Functional Group | Spectra-structure | Material Type |
|------------------------------------|--------------------|-----------------|--|---|------------------|
| 5114 | 1955 | 1950 | C=O esters and acids (.C=OOR) | C=O (3v), C=OOR | Acids and esters |
| 4968 | 2012 | 2012 | N-H/C-O combination from polyamide 11 | N-H/C=O (bonded NH stretching and amide I (2vC=O stretching) combination) from polyamide 11 | polyamide 11 |
| 4759 | 2101 | 2100 | C=O-O polymeric (C=O and C-O stretching) | C=O-O (4v) | Polysaccharides |
| 4258 | 2348 | 2348 | C-H (C-H bending) | C-H (3 θ) | Amides |

4.2.2 ผลการทำนายแบบจำลองของวอเตอร์แอกติวิตี

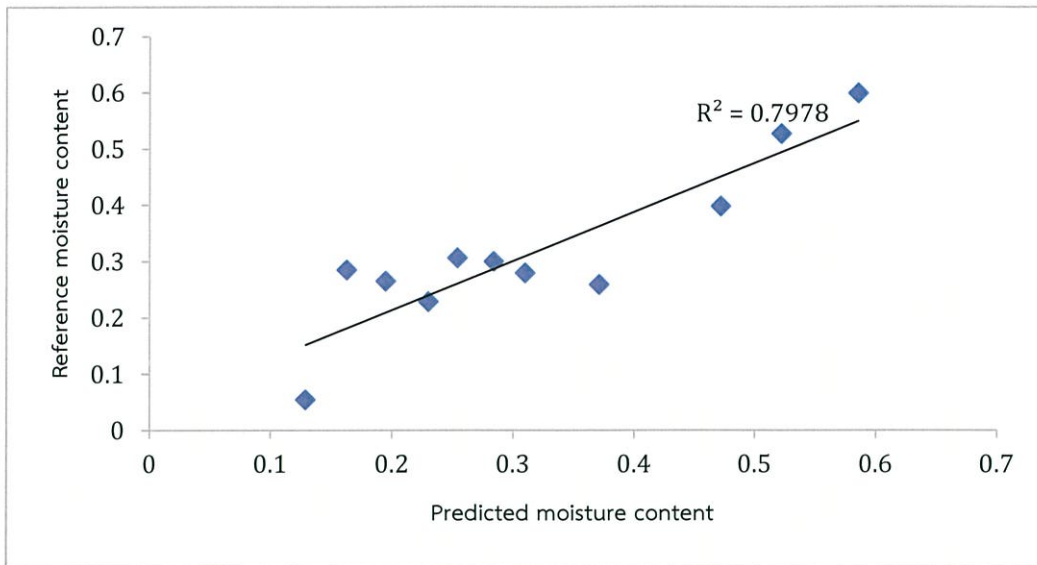
ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลทางสถิติของค่าวอเตอร์แอกติวิตีจากเครื่อง FT-NIR spectrometer โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุดคือชุดแคลิเบรชัน (Calibration) และแวลิเดรชัน (Validation) ตารางที่ 4.5 คือผลของการทำ (PLS regression) สำหรับวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer พบว่าแบบจำลองที่ดีที่สุดถูกพัฒนาสเปกตรัมด้วยวิธี Vector normalization (SNV) ในการวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอด 10715.2-9820.3 cm^{-1} และ 6264-5369.2 cm^{-1} โดยมี PLS factor = 8 จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าวอเตอร์แอกติวิตีระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแวลิเดรชัน (Validation) และแคลิเบรชัน ตามลำดับ โดยชุดแวลิเดรชัน (validation) มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2), ค่าเฉลี่ยกำลังสองของการทำนาย (Root mean square of prediction, RMSEP), ค่าอัตราส่วนระหว่างความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนายกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of SEP to the SD, RPD) และ ค่าความผิดพลาด (Bias) เท่ากับ 0.7910, 0.0657, 2.19 และ 0.00167 ตามลำดับ สำหรับชุดแคลิเบรชัน (Calibration) มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2), ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSEE) และค่าอัตราส่วนระหว่างความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนายกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of SEP to the SD, RPD) เท่ากับ 0.9043, 0.0375 และ 3.23 ตามลำดับ



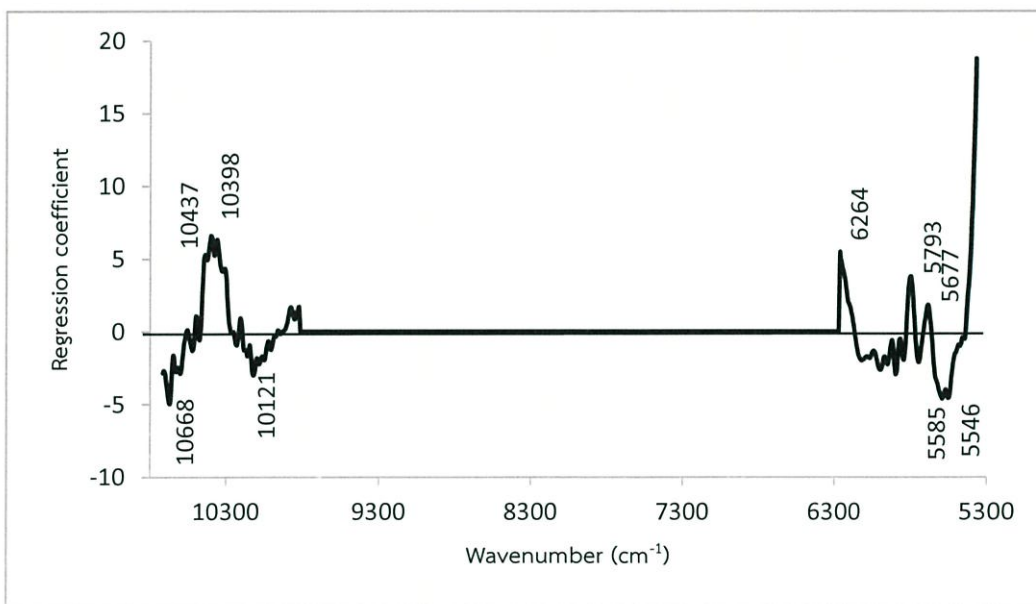
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าวอเตอร์แอกติวิตีระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแคลิเบรชัน

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ด้วย PLS regression

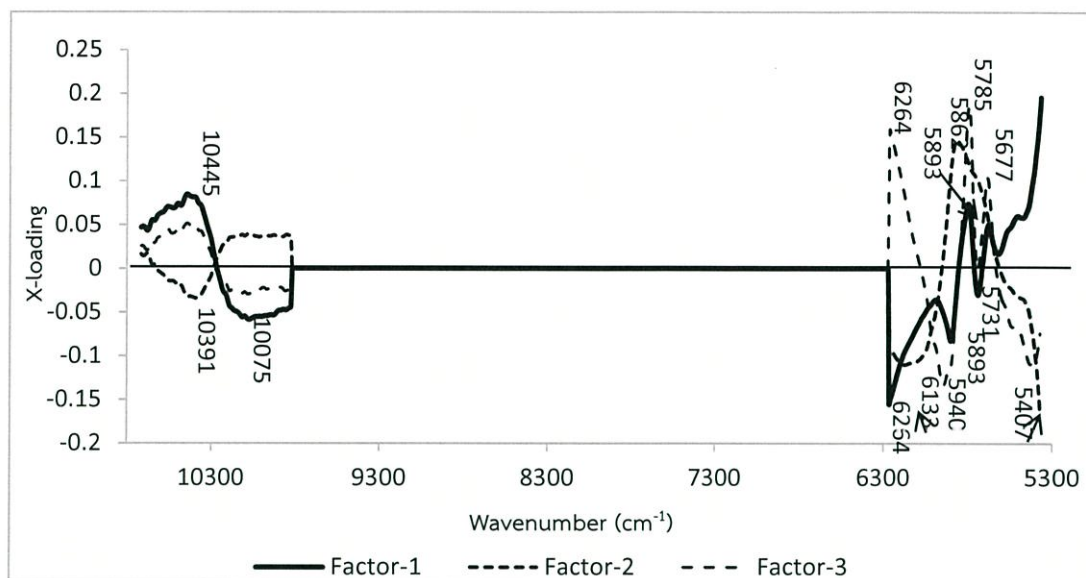
| Parameters | Optimization method | Rank | Wavenumber (cm ⁻¹) | Preprocessing | calibration | | | validation | | | |
|----------------|---------------------|------|------------------------------------|-----------------------|----------------|--------|------|----------------|--------|------|---------|
| | | | | | R ² | RMSEE | RPD | R ² | RMSEP | RPD | Bias |
| Water activity | NIR | 8 | 9403.8 - 4597.7 | Min-Max normalization | 0.7661 | 0.0409 | 2.92 | 0.7661 | 0.0695 | 2.08 | 0.00683 |
| | General A | 10 | 12489.5 - 4482 10715.2 - 9820.3 | Min-Max normalization | 0.9113 | 0.0367 | 3.36 | 0.7726 | 0.0686 | 2.14 | 0.0131 |
| | General B | 8 | 6264 - 5369.2 | Vector normalization | 0.9043 | 0.0375 | 3.23 | 0.7910 | 0.0657 | 2.19 | 0.00167 |



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตรแอกติวิตีระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแวลิตเดชั่น



รูปที่ 4.9 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการวัดค่าอัตรแอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer



รูปที่ 4.10 X-loading plot ของแบบจำลองการวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

จากรูปที่ 4.9 แสดง Regression coefficient plot ของแบบจำลองการวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer พบพีคที่เลขคลื่นต่างๆ โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.6 แสดงเลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายค่าวอเตอร์แอกติวิตี จาก Regression coefficient plot เป็นการสั่นสะเทือนของพันธะ O-H str. third-overtone มีอิทธิพลต่อการทำนายปริมาณไขมันมากที่สุด เนื่องจากมีค่า Regression coefficient สูงที่สุด (รูปที่ 4.9)

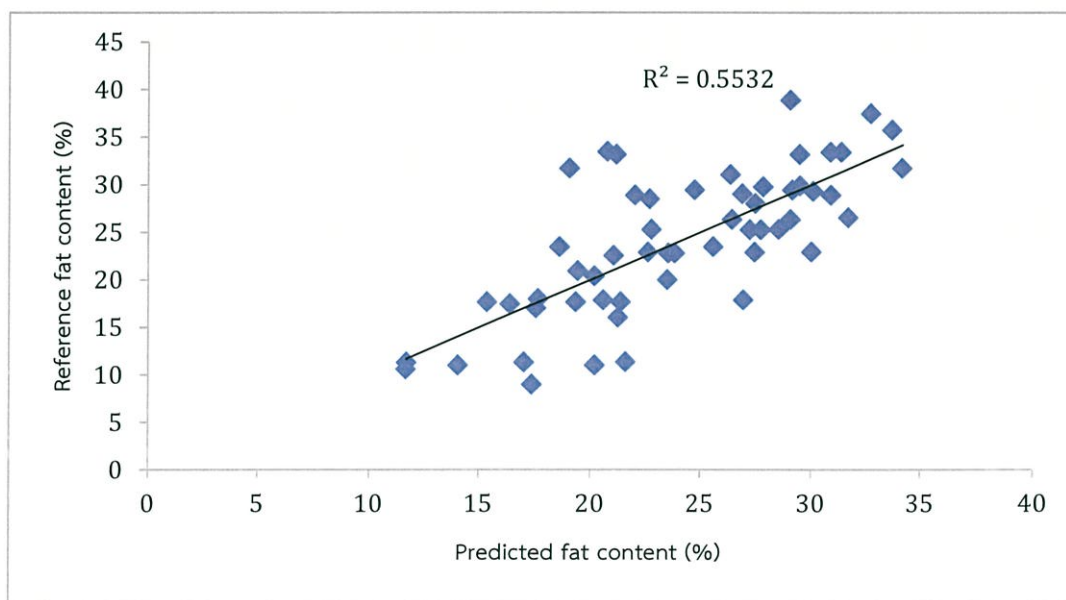
สำหรับ X-loading plot plot ของแบบจำลองการวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.10 ถ้าเลขคลื่นมีค่า X-loading มาก แสดงว่ามีความสำคัญต่อการทำนายของสมการซึ่งทั้ง 3 factor มีพีคที่สำคัญที่เลขคลื่นต่างๆ สรุปดังตารางที่ 4.6 เลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายค่าวอเตอร์แอกติวิตีจาก X-loading plot จะเห็นว่า การดูดซับคลื่นของแอลกอฮอล์, พอลิเอไมด์และคีโตน มีอิทธิพลต่อการทำนายค่าวอเตอร์แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบมาก

ตารางที่ 4.6 เลขคลื่นที่พบใน Regression plot และ X-loading plot ของแบบจำลองค่าวอเตอร์แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนของเครื่อง FT-NIR spectrometer

| Wavenumber (cm ⁻¹) | Wavenumber (nm) | Nearest (nm) | Functional Group | Spectra-structure | Material Type |
|--------------------------------|-----------------|--------------|---|--|----------------|
| 10437 | 958 | 962 | O-H alkyl alcohols O-H with no hydrogen bonding (R-C-OH) in CCl ₄ | O-H (3v) from nonhydrogen bonded shot-chain alkyl alcohols | Alkyl alcohols |
| 10398 | 961 | 962 | O-H alkyl alcohols O-H with no hydrogen bonding (R-C-OH) in CCl ₄ | O-H (3v) from nonhydrogen bonded shot-chain alkyl alcohols | Alkyl alcohols |
| 6264 | 1596 | 1598 | C=O/N-H combination from polyamide 11 | C=O/N-H (amide I (2v _s C=O stretching) and 3 × amide II (N-H in-plane bending) combination) from polyamide 11 | Polyamide 11 |
| 5940 | 1683 | 1682 | C-H methyl C-H, carbonyl associated as one C removed(C=OCH ₂ CH ₃) | C-H methyl, carbonyl associated as one C removed(C=CCH ₂ CH ₃) | Ketones |
| 5893 | 1696 | 1695 | C-H methyl C-H, carbonyl adjacent as (C=OCH ₃) | C-H methyl, carbonyl adjacent as (C=OCH ₃) | Ketones |

4.2.3 ผลการทำนายแบบจำลองของปริมาณไขมัน

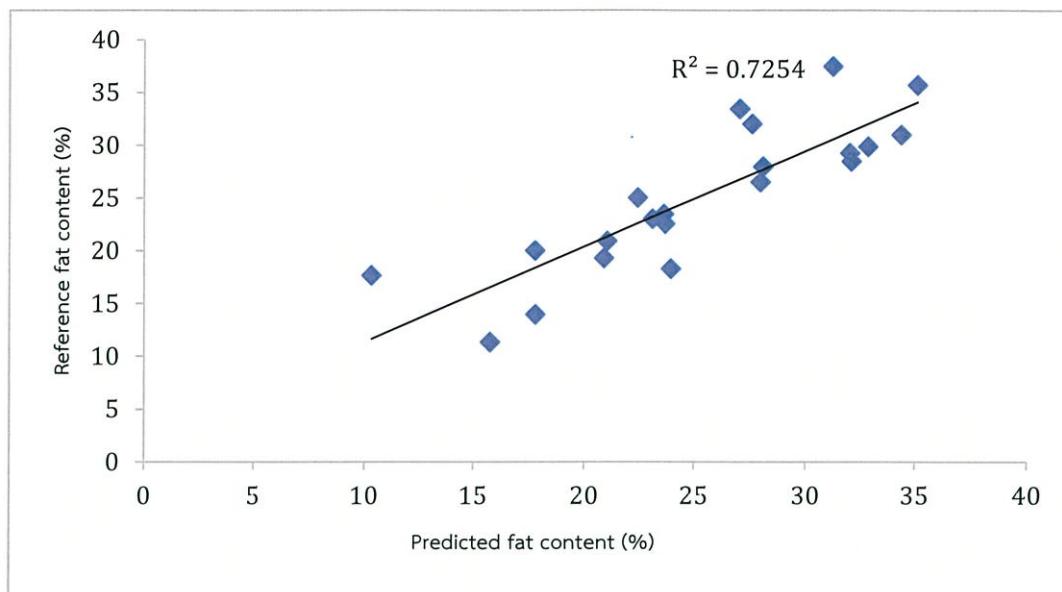
ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลทางสถิติของปริมาณไขมันจากเครื่อง FT-NIR spectrometer โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุดคือชุดแคลิเบรชัน (Calibration) และชุดตรวจสอบ (Validation) ตารางที่ 4.7 คือผลของการทำ (PLS regression) สำหรับวิเคราะห์ปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer พบว่าแบบจำลองที่ดีที่สุดถูกพัฒนาสเปกตรัมด้วยวิธี Multiplicative scattering correction ในการวัดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอด 12489.5-11594.6 cm^{-1} , 10715.2-9820.3 cm^{-1} , 8046-7151.2 cm^{-1} , 5376.9-4487 cm^{-1} โดยมี PLS factor = 8 จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไขมันระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดตรวจสอบ (Validation) และชุดแคลิเบรชัน ตามลำดับ โดยชุดตรวจสอบ (validation) มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2), ค่าเฉลี่ยกำลังสองของการทำนาย (Root mean square of prediction, RMSEP), ค่าอัตราส่วนระหว่างความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนายกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of SEP to the SD, RPD) และค่าความผิดพลาด (Bias) เท่ากับ 0.7175, 3.64, 1.88 และ -0.0947 ตามลำดับ สำหรับชุดแคลิเบรชัน (Calibration) มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2), ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSEE) และค่าอัตราส่วนระหว่างความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนายกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of SEP to the SD, RPD) เท่ากับ 0.5531, 5.48 และ 1.5 ตามลำดับ



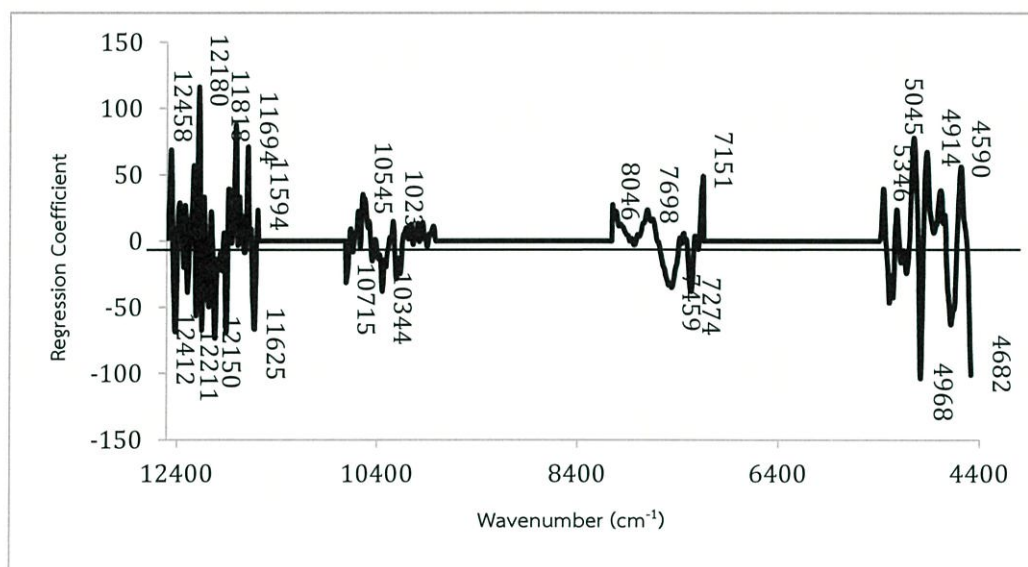
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไขมันระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแคลิเบรชัน

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ด้วย PLS regression

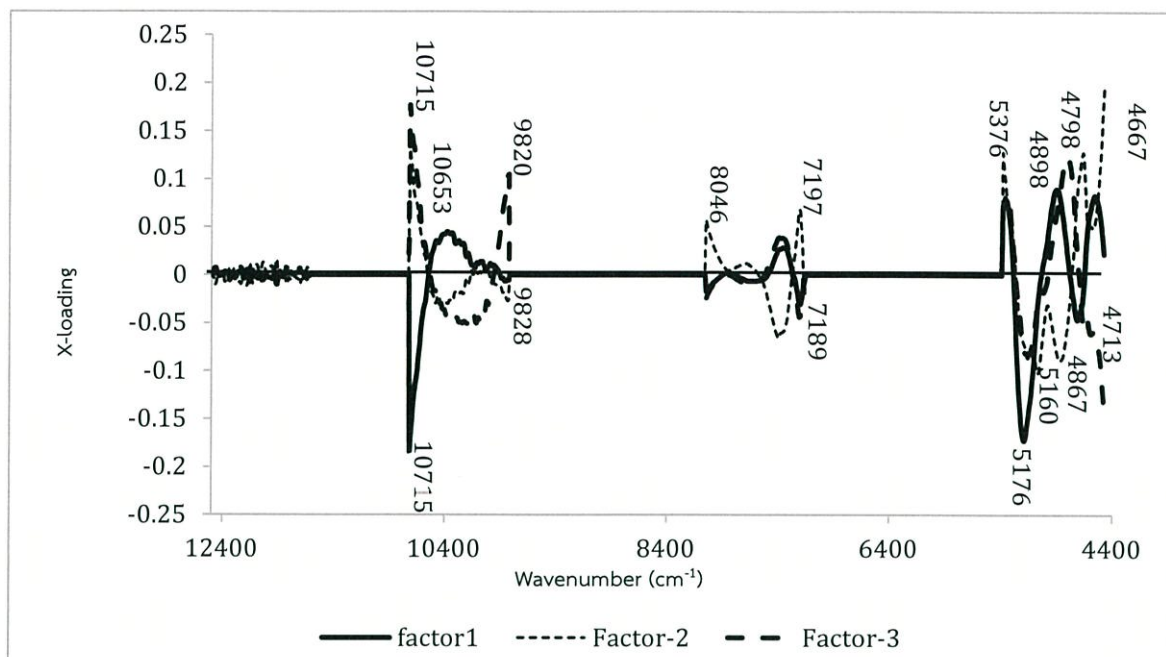
| Parameter | Optimization method | Rank | Wavenumber (cm ⁻¹) | Preprocessing | calibration | | | validation | | | |
|-----------------|---------------------|------|---|--|----------------|-------|------|----------------|-------|------|---------|
| | | | | | R ² | RMSEE | RPD | R ² | RMSEP | RPD | Bias |
| Fat content (%) | NIR | 6 | 9403.8 – 4597.7 | First Derivative ,Straight | 0.4207 | 6.11 | 1.31 | 0.6329 | 4.15 | 1.65 | -0.0506 |
| | General A | 7 | 10715.2 – 8038.8 7158.9 - 4482 | Multiplicative scattering correction | 0.4868 | 5.81 | 1.4 | 0.6333 | 4.15 | 1.69 | -0.828 |
| | General B | 8 | 12489.5 - 11594.6 10715.2 – 9820.3 8046 - 7151.2 5376.9 - 4487 | Multiplicative scattering correction | 0.5531 | 5.48 | 1.5 | 0.7175 | 3.64 | 1.88 | -0.0947 |



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไขมันระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดเวกเตอร์



รูปที่ 4.13 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการวัดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหาร ทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer



รูปที่ 4.14 X-loading plot ของแบบจำลองการวัดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

จากรูปที่ 4.13 แสดง Regression coefficient plot ของแบบจำลองการวัดค่าปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer พบพีคที่เลขคลื่นต่างๆ โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.8 แสดงเลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายปริมาณไขมัน จาก Regression coefficient plot เป็นการสันสะเหือนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีอิทธิพลต่อการทำนายปริมาณไขมันมากที่สุด เนื่องจากมีค่า Regression coefficient สูงที่สุด (รูปที่ 4.13)

สำหรับ X-loading plot ของแบบจำลองการวัดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.14 ถ้าเลขคลื่นมีค่า X-loading มาก แสดงว่ามีความสำคัญต่อการทำนายของสมการซึ่งทั้ง 3 factor มีพีคที่สำคัญที่เลขคลื่นต่างๆ สรุปดังตารางที่ 4.8 เลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายปริมาณไขมันจาก X-loading plot จะเห็นว่าการดูดซับคลื่นของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน, แอลกอฮอล์และสารประกอบอะโรมาติกเอมีน มีอิทธิพลต่อการทำนายปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบมาก

ตารางที่ 4.8 เลขคลื่นที่พบใน Regression plot และ X-loading plot ของแบบจำลองปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนของเครื่อง FT-NIR spectrometer

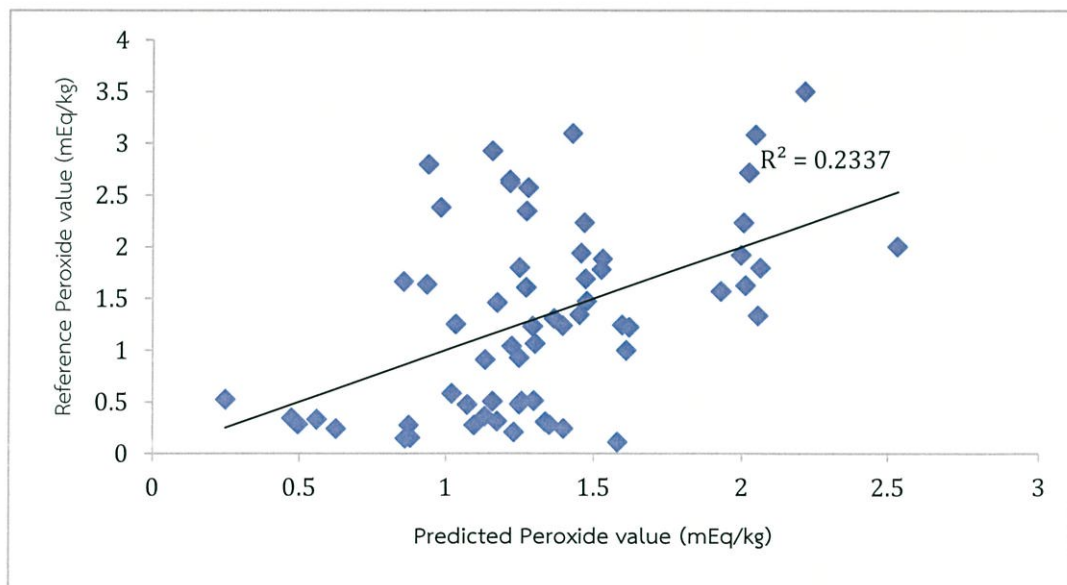
| Wavenumber (cm ⁻¹) | Wavenumber (nm) | Nearest (nm) | Functional Group | Spectra-structure | Material Type |
|--------------------------------|-----------------|--------------|---|--|-------------------------|
| 12458 | 802 | 803 | C-H methyl C-H, associated with aromatic (ArCH ₃) | C-H (4vCH ₃ and δ CH ₃) combination | Hydrocarbons, aliphatic |
| 12412 | 805 | 803 | C-H methyl C-H, associated with aromatic (ArCH ₃) | C-H (4vCH ₃ and δ CH ₃) combination | Hydrocarbons, aliphatic |
| 12018 | 832 | 836 | C-H methylene C-H, associated with branched aliphatic RC(CH ₃) ₃ or R(CH ₃) ₃ | C-H (4vCH ₃ and δ CH ₃) combination | Hydrocarbons, aliphatic |
| 10715 | 933 | 930 | C-H methylene (CH ₂) | C-H (4v), methylene C-H | Hydrocarbons, aliphatic |
| 10344 | 976 | 962 | O-H alkyl alcohols O-H with no hydrogen bonding (R-C-OH) in CCl ₄ | O-H (3v) from nonhydrogen-bonded short-chain alkyl alcohols in CCl ₄ as (R-C-OH) | Alkyl alcohols |
| 9828 | 1018 | 1017.5 | N-H primary aromatic amine (<i>ortho</i> -Cl) | N-H (3v) asymmetric, primary aromatic amine in CCl ₄ as <i>ortho</i> -Cl grouping | Aromatic amine |

ตารางที่ 4.8 เลขคลื่นที่พบใน Regression plot และ X-loading plot ของแบบจำลองปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนของเครื่อง FT-NIR spectrometer (ต่อ)

| Wavenumber (cm^{-1}) | Wavenumber (nm) | Nearest (nm) | Functional Group | Spectra-structure | Material Type |
|------------------------------------|--------------------|-----------------|--|---|----------------------------|
| 9820 | 1242 | 1018.5 | N-H primary aromatic amine (<i>m</i> -Cl) | N-H (3v) asymmetric, primary aromatic amine in CCl_4 as <i>meta</i> - Cl substituent | Aromatic amine |
| 7197 | 1391 | 1390 | C-H methyl C-H, associated with Linear aliphatic CH_3 (CH_2) CH_3 | C-H combination | Hydrocarbons, aliphatic |
| 7189 | 1391 | 1390 | C-H methyl C-H, associated with Linear aliphatic CH_3 (CH_2) CH_3 | C-H combination | Hydrocarbons, aliphatic |

4.2.4 ผลการทำนายแบบจำลองของค่าเพอร์ออกไซด์

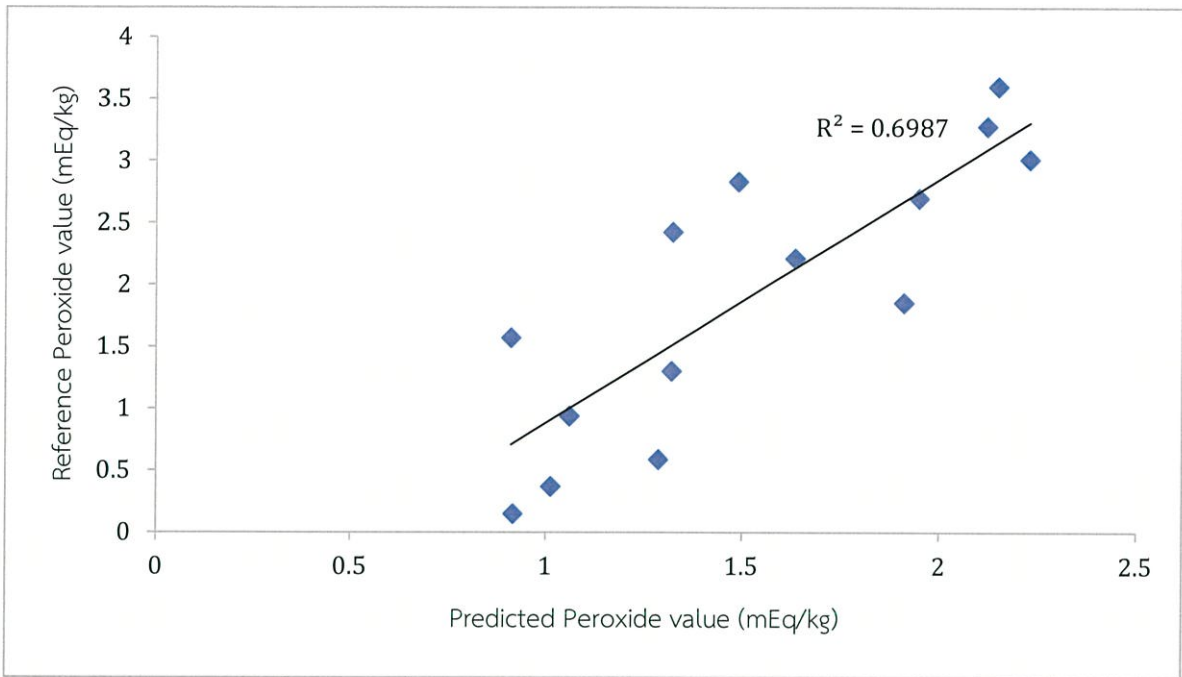
ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลทางสถิติของค่าเพอร์ออกไซด์จากเครื่อง FT-NIR spectrometer โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุดคือชุดแคลิเบรชัน (Calibration) และชุดตรวจสอบ (Validation) ตารางที่ 4.10 คือผลของการทำ (PLS regression) สำหรับวิเคราะห์ค่าเพอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer พบว่าแบบจำลองที่ดีที่สุดถูกพัฒนาสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative+MSC ในการวัดค่าเพอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอด $12489.5-8038.3 \text{ cm}^{-1}$, $7158.9-6256.3 \text{ cm}^{-1}$, $5376.9-4482 \text{ cm}^{-1}$ โดยมี PLS factor = 4 จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเพอร์ออกไซด์ระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดตรวจสอบ (Validation) และชุดแคลิเบรชัน ตามลำดับ โดยชุดตรวจสอบ (validation) มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2), ค่าเฉลี่ยกำลังสองของการทำนาย (Root mean square of prediction, RMSEP), ค่าอัตราส่วนระหว่างความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนายกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of SEP to the SD, RPD) และ ค่าความผิดพลาด (Bias) 0.3994, 0.839, 1.46 และ 0.391 ตามลำดับ สำหรับชุดแคลิเบรชัน (Calibration) มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2), ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSEE) และค่าอัตราส่วนระหว่างความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนายกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of SEP to the SD, RPD) เท่ากับ 0.2338, 0.825 และ 1.14 ตามลำดับ



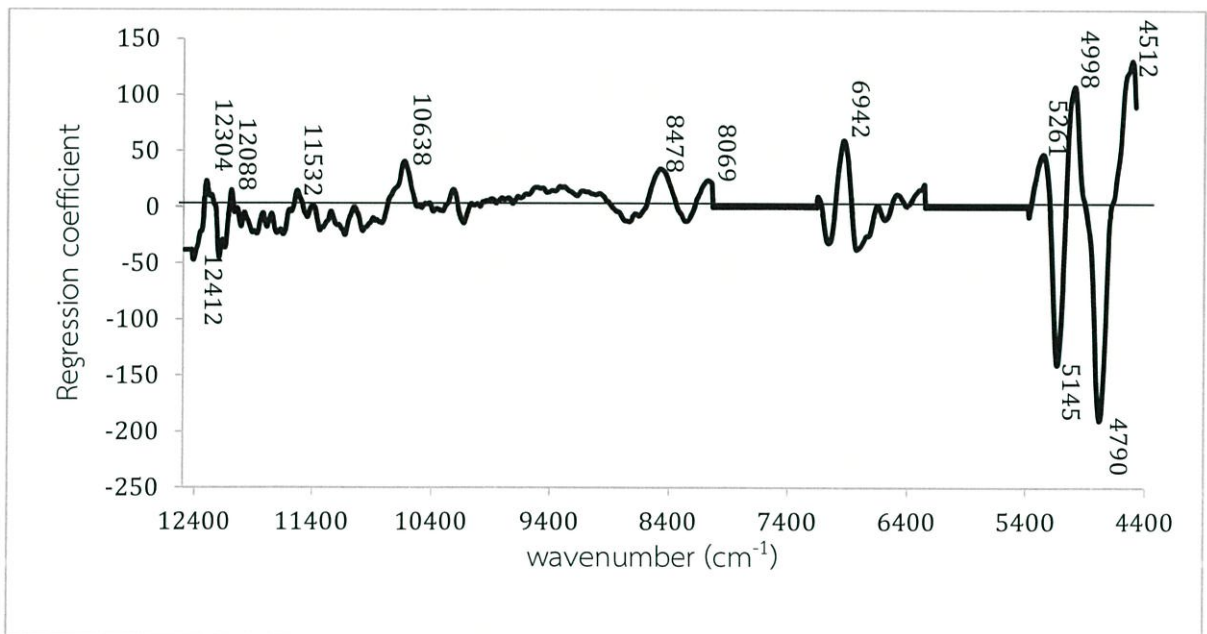
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไขมันระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดแคลิเบรชัน

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ด้วย PLS regression

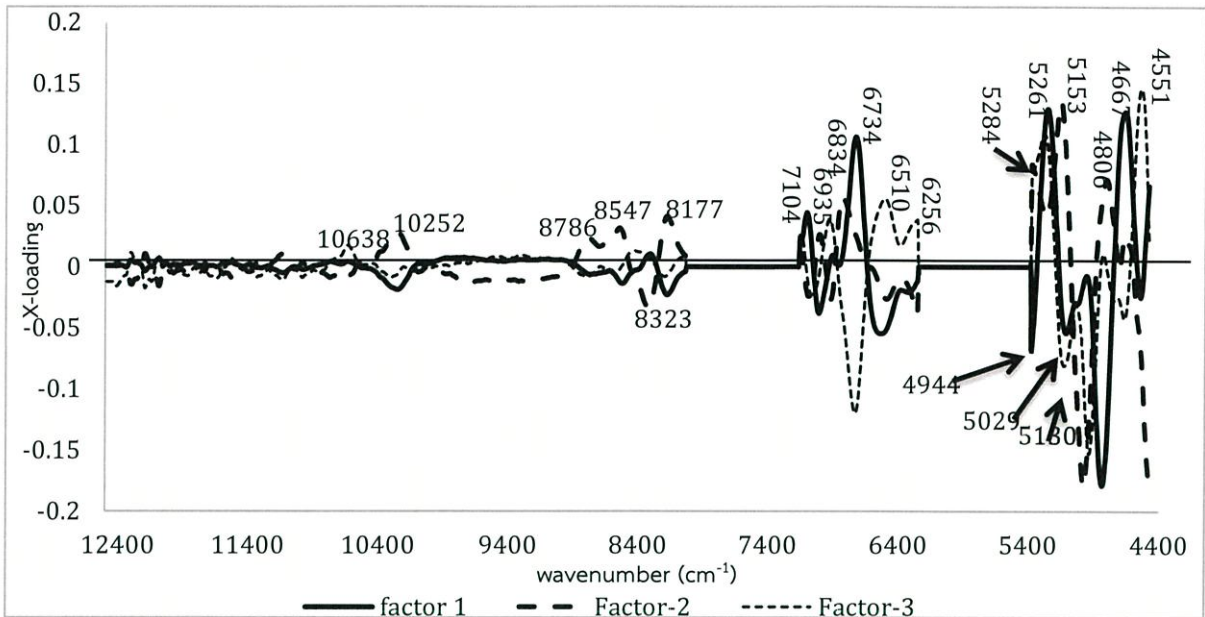
| Parameter | Optimization method | Rank | Wavenumber (cm ⁻¹) | Preprocessing | calibration | | | validation | | | |
|-------------------------|---------------------|------|--|--------------------------------|----------------|-------|------|----------------|-------|------|-------|
| | | | | | R ² | RMSEE | RPD | R ² | RMSEP | RPD | Bias |
| Peroxide value (mEq/kg) | NIR | 9 | 9403.8-4242.9 | No spectral data preprocessing | 0.4550 | 0.728 | 1.35 | 0.3631 | 0.864 | 1.69 | 0.58 |
| | General A | 4 | 12489.5-8038.3 7158.9-6256.3 5376.9-4482 | First derivative+MSC | 0.2338 | 0.825 | 1.14 | 0.3994 | 0.839 | 1.46 | 0.391 |
| | General B | 4 | 12489.5-8038.3 7158.9-6256.3 5376.9-4482 | First derivative+MSC | 0.2338 | 0.825 | 1.14 | 0.3994 | 0.839 | 1.46 | 0.391 |



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าเปอร์ออกไซด์ระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงของชุดเวลิเดชัน



รูปที่ 4.17 Regression coefficient plot ของแบบจำลองการวัดค่าเปอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer



รูปที่ 4.18 X-loading plot ของแบบจำลองการวัดค่าเปอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบ โดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer

จากรูปที่ 4.17 แสดง Regression coefficient plot ของแบบจำลองการวัดค่าเปอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer พบพีคที่เลขคลื่นต่างๆ โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.10 แสดงเลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายค่าเปอร์ออกไซด์ จาก Regression coefficient plot เป็นการสันนิษฐานของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีอิทธิพลต่อการทำนายปริมาณไขมันมากที่สุด เนื่องจากมีค่า Regression coefficient สูงที่สุด (รูปที่ 4.17)

สำหรับ X-loading plot ของแบบจำลองการวัดค่าเปอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.18 ถ้าเลขคลื่นมีค่า X-loading มาก แสดงว่ามีความสำคัญต่อการทำนายของสมการซึ่งทั้ง 3 factor มีพีคที่สำคัญที่เลขคลื่นต่างๆ สรุปดังตารางที่ 4.10 เลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายค่าเปอร์ออกไซด์จาก X-loading plot จะเห็นว่า การดูดซับคลื่นของพันธะ O-H มีอิทธิพลต่อการทำนายค่าเปอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบมาก

ตารางที่ 4.10 เลขคลื่นที่พบใน Regression plot และ X-loading plot ของแบบจำลองค่าเปอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนของเครื่อง FT-NIR spectrometer

| Wavenumber (cm^{-1}) | Wavenumber (nm) | Nearest (nm) | Functional Group | Spectra-structure | Material Type |
|------------------------------------|--------------------|-----------------|---|--|--|
| 12412 | 805 | 803 | C-H methyl C-H, associated with aromatic (ArCH_3) | C-H (4v CH_3) combination | Hydrocarbons, Aromatic (Ar CH_3) |
| 12304 | 812 | 813 | C-H methyl C-H, associated with branched aliphatic $\text{RC}(\text{CH}_3)_3$ or $\text{RCH}(\text{CH}_3)_2$ | C-H (4v CH_3) combination | Hydrocarbons, Aliphatics |
| 12088 | 827 | 830 | C-H methylene C-H, associated with linear aliphatic $\text{R}(\text{CH}_2)_N\text{R}$ | C-H(4v CH_3) combination | Hydrocarbons, Aliphatics |
| 8478 | 1179 | 1170 | C-H Alkene ($.\text{HC}=\text{CH}$) | C-H(3v), $.\text{HC}=\text{CH}$ | Alkenes, polyenes |
| 8547 | 1170 | 1170 | C-H Alkene ($.\text{HC}=\text{CH}$) | C-H(3v), $.\text{HC}=\text{CH}$ | Alkenes, polyenes |
| 7104 | 1426 | 1408 | O-H methanol O-H with hydrogen bonding | O-H (2v) from nonhydrogen- bonded methanol in CCl_4 as ($\text{CH}_3\text{-OH}$) | O-H from methanol (nonhydrogen- bonded) |

ตารางที่ 4.10 เลขคลื่นที่พบใน Regression plot และ X-loading plot ของแบบจำลองค่าเปอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนของเครื่อง FT-NIR spectrometer (ต่อ)

| Wavenumber (cm^{-1}) | Wavenumber (nm) | Nearest (nm) | Functional Group | Spectra-structure | Material Type |
|------------------------------------|--------------------|-----------------|---|--|---|
| 6942 | 1463 | 1440 | C-H methylene (.CH ₂) | C-H combination, . C- H ₂ | Hydrocarbons, Aliphatics |
| 6834 | 1485 | 1463 | N-H amide .NH or .NH ₂ | N-H(2v), .CONH ₂ | Amide/Protein |
| 6734 | 1530 | 1485 | N-H band from urea (NH ₂ -C=O- NH ₂) | N-H (2v) symmetric stretching from urea | Urea |
| 6534 | 1598 | 1530 | N-H amide .NH or. NH ₂ | N-H(2v), R NH ₂ | Acetylene or methyne C-H, Amide/Protein |
| 6256 | 1900 | 1598 | C=O/N-H combination from polyamide 11 | C=O/N-H (amide land 3 x amide II combination) form polyamide 11 | polyamide 11 |
| 5261 | 1940 | 1900 | C=O carbonyl (.C=OOH) | C=O (3v), .C=OOH | Acids, carboxylic |
| 5153 | 1943 | 1940 | O-H (H-O-H) water | O-H stretching and H- O-H bending combination | Moisture, water, polyvinyl alcohol OH |

ตารางที่ 4.10 เลขคลื่นที่พบใน Regression plot และ X-loading plot ของแบบจำลองค่าเพอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบโดยการสแกนของเครื่อง FT-NIR spectrometer (ต่อ)

| Wavenumber (cm^{-1}) | Wavenumber (nm) | Nearest (nm) | Functional Group | Spectra-structure | Material Type |
|------------------------------------|--------------------|-----------------|---|--|---|
| 5145 | 1943 | 1940 | O-H (H-O-H) water | O-H stretching and H-O-H bending combination | Moisture, water, polyvinyl alcohol OH |
| 5137 | 1946 | 1950 | C=O esters and acids (.C=OOR) | C=O (3ν), ,C=OOR | Acids and esters |
| 5029 | 1988 | 1990 | N-H amide: $\text{NH}_2\text{-C=ONH}_2$ | N-H stretching and N-H bending combination | Urea |
| 4836 | 2067 | 2070 | N-H amide: (N-H deformation) | N-H | Urea |
| 4806 | 2080 | 2080 | O-H and C-O stretching and bending combination from methanol | O-H broad band, due to $\nu\text{O-H}$ and O- H combination | Polyols, alcohols, water |
| 4790 | 2087 | 2090 | N-H from gamma-valerolactam | N-H[NH stretching and amide II deformation for gamma valerolactam | Gamma- valerolactam |

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิเคราะห์สเปกตรัม

การตรวจวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer พบว่ามีพีคเด่นที่เลขคลื่น 8262 cm^{-1} และ 6834 cm^{-1} (1211 nm และ 1463 nm) ซึ่งเป็นพีคของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและสารประกอบเอมีน สารประกอบเอไมด์ และโปรตีน เมื่อนำสเปกตรัมมาหาอนุพันธ์อันดับสอง Second derivative มีพีคเพิ่มเติมปรากฏขึ้นคือ 4258 cm^{-1} (2349 nm) เป็นพีคของเมทิล

5.2 สรุปผลการทำนายของแบบจำลอง

จากการศึกษาข้อมูลของตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารทอดกรอบที่สเปกตรัมที่วัดโดยเครื่อง FT-NIR Spectrometer เพื่อใช้หาปริมาณความชื้นฐานเปียก ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ ปริมาณไขมันและค่าเพอร์ออกไซด์ พบว่ามีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการตรวจวัดปริมาณความชื้นฐานเปียก ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ และปริมาณไขมัน ซึ่งเมื่อนำมาสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายปริมาณความชื้นฐานเปียก ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้และปริมาณไขมัน มีค่า R^2 เท่ากับ 0.8390, 0.9043 และ 0.5531 ตามลำดับ ในส่วนของค่าเพอร์ออกไซด์เมื่อนำมาสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายปริมาณไขมันและค่าเพอร์ออกไซด์มีค่า R^2 เท่ากับ 0.2338 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่แย่นี้เนื่องมาจากความผิดพลาดของผู้ทำการทดลองในระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีอ้างอิง

5.3 ข้อเสนอแนะ

ผู้ปฏิบัติการทดลองควรมีความเชี่ยวชาญและมีประสบการณ์ในการปฏิบัติการเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดในระหว่างทำการทดลอง และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยควรมีจำนวนมากกว่านี้ เพื่อให้แบบจำลองและการทำนายมีความถูกต้องและความแม่นยำมากขึ้น

บรรณานุกรม

- กุลริศา เกตุนาถ และคณะ. 2556. การหาปริมาณ ความชื้นในกาแฟเมล็ดพันธุ์อะราบิกาด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี. Postharvest Newsletter, 3, 4.
- ธงชัย ยันตรศรี และคณะ. 2546. โครงการประเมิน NIR เทคนิคที่สัมพันธ์กับดัชนีกำหนดคุณภาพของส้มเขียวหวาน. [online]. Available : <http://www.phtnet.org/download/9.pdf>.
- ธงชัย สุวรรณสิขณณ์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช. 2552. “การวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ.” ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นิธิยา รัตนพานนท์. 2549. เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ.
- นิชาภา ชัยธนบูรณ์ และคณะ. 2555. “การผลิตแคนตาลูปผงด้วยกรรมวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย.” ปฏิญานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- รณฤทธิ์ ฤทธิธรมและคณะ. 2556. การประเมินคุณภาพภายในและความบริสุทธิ์ของมะพร้าวอ่อน น้ำหอมอย่างไม่ทำลายด้วยเทคนิค NIR. Postharvest Newsletter, 3, 1-3.
- พัลลภ ทองเนียม และคณะ. 2554. “การตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุดโดยวิธีการไม่ทำลาย ตัวอย่าง” ปฏิญานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- สุนันทา บุญช่วย และคณะ. มปป. “การประเมินค่าเปอร์ออกไซด์ ค่ากรดไขมันและค่าแอนิซิตินของน้ำมันปลาโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี” ภาควิชาผลิตภัณฑ์ประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- A.O.A.C. 1990. Official method of analysis 15th ed. George Banta Co., Inc, Washington, D.C. 1298 p.
- Birth, G.S. and Hecht, H.G. 2001. The physics of near-infrared reflectance. In Williams, P. and Norris, K. (eds), Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries, 2nd Edn; American Association of cereal chemists; St Paul, MN; pp. 1-15
- Cozzolino, D. (2005). Multivariate determination of free fatty acids and moisture in fish oils by partial least-squares regression and near-infrared spectroscopy. LWT-Food Science and Technology, 38, 821-828.
- Delwiche, S.R., Hruschka, W.R. 2000. Protein content of bulk wheat from near-infrared reflectance of individual kernels. Cereal Chem., 77, 86-88.
- Hruschka W. R. 1987. Data analysis: Wavelength selection methods. In: William P. and Norris

K. eds. Near infrared technology in the agricultural and food industry. Minnesota: American Association of Cereal Chemists, pp. 35-55.

Man, C.M.D. and Jones, A.A. 2000. Shelf life evaluation of foods. Aspen: Gaithersburg, MD.

Martinez, L., Djenane, D. and Cilla, I. 2004. Effect of varying oxygen concentrations on shelf life of fresh pork sausage packaged in modified atmosphere. *Food Science and Technology*, 94, 219-225.

Osborne, B.G., Fearn, T. and Hindle, P.H. (1983). *Practical NIR Spectroscopy with Applications In Food and Beverage Analysis*. Longman Scientific and Technical. 227p.

Stark, E., Luchter, K. and Margoshes, M, "Near-Infrared Analysis (NIRA): A Technology for Quantitative and Qualitative Analysis," *Appl. Spectrosc. Reviews* 1986, 22(4), 335-399.

Williams, P.C., Sobering, D.C. 1993. Comparison of commercial near-infrared transmittance and reflectance instruments for analysis of whole grains and seeds. *J. Near-Infrared Spectrosc.*, 1, 25-32.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีอ้างอิง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการมาตรฐาน

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|--|----------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 1 | มันฝรั่งทอด ยี่ห้อ Makado รส original | ท็อปลาดกระบัง | 3.1996 | 0.390 | 17.9701 | 7.9523 |
| | | | 2.5405 | 0.292 | | 9.9404 |
| | | | 2.6495 | - | | 10.8108 |
| 2 | เทสโต รส คาราเมล | ท็อปลาดกระบัง | 1.4621 | 0.198 | 29.2462 | 7.9681 |
| | | | 1.658 | 0.213 | | 11.2782 |
| | | | 1.783 | - | | 8.4034 |
| 3 | ข้าวเกรียบกุ้ง คาลบี้ | ท็อป ซุปเปอร์ ลาดกระบัง | 1.7645 | 0.158 | 20.8919 | 10.0000 |
| | | | 1.6678 | 0.149 | | 13.8122 |
| | | | 1.7161 | - | | 5.7143 |
| 4 | เลย์ รสออริจินัล | ท็อป ซุปเปอร์ ลาดกระบัง | 1.6299 | 0.144 | 23.4379 | 14.6520 |
| | | | 1.4381 | 0.152 | | 12.9482 |
| | | | 1.6271 | - | | 11.9284 |
| 5 | ข้าวแต๋น | ร้านขายอาหาร | 2.4896 | 0.255 | 25.2449 | 13.8614 |
| | | คณะอุตสาหกรรม | 2.3102 | 0.294 | | 11.9522 |
| | | เกษตร | 2.4955 | - | | 9.7847 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|---------------|--|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 6 | มันอะลู | ห้องปฏิบัติการ | 6.2730 | 0.499 | 8.2847 | 16.1290 |
| | | ทดลอง | 6.0505 | 0.507 | | 15.5340 |
| | | โรงอาหารซี | 6.0342 | - | | 3.9293 |
| 7 | ข้าวเกรียบปลา | ตลาดพระโขนง | 4.9787 | 0.463 | 22.5303 | 2.0080 |
| | | | 4.7757 | 0.490 | | 15.6863 |
| | | | 4.7188 | - | | 16.4093 |
| 8 | ข้าวเกรียบส้ม | ร้านโชห่วย ลาดกระบัง | 3.9532 | 0.469 | 17.8257 | 13.6719 |
| | | | 3.5986 | 0.473 | | 16.1905 |
| | | | 3.5783 | - | | 13.2576 |
| 9 | ถั่วทอด | ร้านขายอาหาร คณะอุตสาหกรรม เกษตร | 3.1313 | 0.362 | 20.8919 | 7.7670 |
| | | | 2.9521 | 0.353 | | 5.9406 |
| | | | 3.0409 | - | | 16.9133 |
| 10 | กล้วยเบรคแตก | พาราไดซ์ พาร์ค ถนนศรีนครินทร์ | 2.7527 | 0.284 | 23.4379 | 16.6016 |
| | | | 2.8670 | 0.284 | | 15.8103 |
| | | | 2.5649 | - | | 5.8594 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|---|--|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 11 | กล้วยเคลือบน้ำตาล | พาราไดซ์ พาร์ค ถนนศรีนครินทร์ | 4.6353 | 0.582 | 22.8541 | 4.0241 |
| | | | 4.4203 | 0.588 | | 13.6187 |
| | | | 4.6154 | - | | 3.8388 |
| 12 | โลตัสขนมมองโกรส บาร์บีคิวเกาหลีผสม สำหรับ | ท็อป ซูเปอร์ ลาดกระบัง | 2.1312 | 0.308 | 8.2847 | 5.8480 |
| | | | 2.1875 | 0.311 | | 3.7453 |
| | | | 2.1679 | - | | 9.4340 |
| 13 | ข้าวเกรียบปลา งาน | ร้านขายอาหาร คณะอุตสาหกรรม เกษตร | 4.5225 | 0.301 | 28.4517 | 5.3400 |
| | | | 3.5745 | 0.308 | | 5.3000 |
| | | | 4.1317 | - | | 4.7300 |
| 14 | ยำยำจัมโบ้ ผัดซี๊เม่า | เซเว่นลาดกระบัง | 4.0310 | 0.279 | 26.4841 | 5.1200 |
| | | | 4.0142 | 0.276 | | 10.4258 |
| | | | 4.1689 | - | | 13.2100 |
| 15 | มาม่าหมูสับต้มยำ | เซเว่นลาดกระบัง | 3.3553 | 0.149 | 17.6300 | 12.5000 |
| | | | 1.7400 | 0.145 | | 18.4100 |
| | | | 2.6050 | - | | 4.0241 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|--------------|------------------|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 16 | รากบัวทอด | ห้องปฏิบัติการ | 5.0022 | 0.516 | 29.8512 | 18.2300 |
| | | ทดลอง ภาควิชา | 5.3371 | 0.527 | | 25.1000 |
| | | วิศวกรรมอาหาร | 5.1208 | - | | 16.0000 |
| 17 | แคบหมู | ร้านขายของฝาก | 8.8323 | 0.268 | 10.5728 | 11.0000 |
| | | จ.ฉะเชิงเทรา | 2.6954 | 0.280 | | 15.3321 |
| | | | 2.7793 | | | 18.4540 |
| 18 | แคบหมูกรอบ | ร้านขายของฝาก | 0.6775 | 0.331 | 33.3851 | 9.5410 |
| | | จ.ฉะเชิงเทรา | 0.9207 | 0.329 | | 8.5321 |
| | | | 1.0530 | - | | 7.4120 |
| 19 | แคบหมู | ร้านขายของฝาก | 1.9685 | 0.245 | 35.6866 | 6.8700 |
| | | ตลาดหนองมน | 1.9395 | 0.237 | | 11.0251 |
| | | | 2.0066 | - | | 17.0000 |
| 20 | ไวไว wai wai | ตลาดเอี่ยมสมบัติ | 0.1217 | 0.110 | 26.2942 | 14.5214 |
| | | ถ.ศรีนครินทร์ | 1.4689 | 0.108 | | 19.8451 |
| | | | 1.4275 | - | | 15.1041 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|------------------------|-------------------------------------|----------------|-------------------|-----------------|---------------------------|
| 21 | nissin รสต้มยำกุ้งแซ่บ | ตลาดพระโขนง | 2.7864 | 0.240 | 8.9547 | 9.5121 |
| | | | 2.7018 | 0.238 | | 7.4151 |
| | | | 2.6559 | - | | 6.5789 |
| 22 | เลย์ รสกระเพรากรอบ | ร้านขายของชำ ซอยสุขุมวิท 62 | 1.5128 | 0.182 | 33.4294 | 4.3141 |
| | | | 1.5120 | 0.178 | | 5.2314 |
| | | | 1.8760 | - | | 5.0000 |
| 23 | ซีโอส | แม็กซ์แวลู ideo mobi ซอยสุขุมวิท 81 | 1.0198 | 0.158 | 33.1476 | 3.6200 |
| | | | 0.9245 | 0.179 | | 5.2500 |
| | | | 1.0408 | - | | 5.4600 |
| 24 | ปาปริก้า | ร้านขายของชำ ซอยอ่อนนุช 50 | 1.9685 | 0.245 | 25.2166 | 10.5414 |
| | | | 1.9395 | 0.237 | | 18.5414 |
| | | | 2.0066 | - | | 16.4235 |
| 25 | คอนเน่ รส original | ห้างสรรพสินค้า โลตัสอ่อนนุช | 0.1217 | 0.110 | 37.4352 | 5.1000 |
| | | | 1.4689 | 0.108 | | 5.1800 |
| | | | 1.4275 | - | | 7.5140 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 26 | ชั้นไบรท์ รสoriginal | ร้านขายของชำ ซอยอ่อนนุช 50 | 2.7864 | 0.240 | 37.4352 | 10.1546 |
| | | | 2.7018 | 0.238 | | 11.2321 |
| | | | 2.6559 | - | | 9.5541 |
| 27 | ทวิสโก้ | ห้างสรรพสินค้า โลตัสอ่อนนุช | 1.5128 | 0.182 | 28.8421 | 12.4514 |
| | | | 1.5120 | 0.178 | | 10.1121 |
| | | | 1.8760 | - | | 12.4564 |
| 28 | แจ็กซ์ ซอสคูโอ ซอส มะเขือเทศ พริก | ร้านขายของชำ ตลาดพัฒนาการ | 1.0198 | 0.158 | 27.9668 | 18.9523 |
| | | | 0.9245 | 0.179 | | 19.9404 |
| | | | 1.0408 | - | | 20.8108 |
| 29 | ขนม ritz bit sandwich | ร้านขายของชำ ตลาดพัฒนาการ | 1.9685 | 0.245 | 22.7539 | 10.9681 |
| | | | 1.9395 | 0.237 | | 11.2782 |
| | | | 2.0066 | - | | 12.4034 |
| 30 | ขนมปังกรอบรสชีส ตราok | ร้านขายของชำ ตลาดพระโขนง | 0.1217 | 0.110 | 10.4233 | 10.0430 |
| | | | 1.4689 | 0.108 | | 9.8122 |
| | | | 1.4275 | - | | 10.7143 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|-----------------------------------|---|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 31 | ขนมทอดกรอบ ตราได โนพาร์ค | ห้างสรรพสินค้า โลตส์อ่อนนุช | 2.7864 | 0.240 | 11.3201 | 14.6520 |
| | | | 2.7018 | 0.238 | | 12.9482 |
| | | | 2.6559 | - | | 11.9284 |
| 32 | ข้าวแต่น ไรซ์เบอร์รี่ | ห้างสรรพสินค้า โลตส์ สาขาซีคอนส แควร์ | 1.5128 | 0.182 | 38.8433 | 13.8614 |
| | | | 1.5120 | 0.178 | | 11.9522 |
| | | | 1.8760 | - | | 9.7847 |
| 33 | ซีสต์ ขนมมะพร้าวกึ่ง สำเร็จรูป | ร้านขายของชำ ตลาดเอี่ยมสมบัติ | 1.0198 | 0.158 | 29.4119 | 16.1290 |
| | | | 0.9245 | 0.179 | | 15.5340 |
| | | | 1.0408 | - | | 3.9293 |
| 34 | ข้าวเกรียบ ตราพราน กุ่ม | ร้านโชห่วย ลาดกระบัง | 1.9685 | 0.245 | 17.6147 | 2.0080 |
| | | | 1.9395 | 0.237 | | 15.6863 |
| | | | 2.0066 | - | | 16.4093 |
| 35 | ข้างน้อย | ร้านโชห่วย ลาดกระบัง | 0.1217 | 0.110 | 31.6724 | 13.6719 |
| | | | 1.4689 | 0.108 | | 16.1905 |
| | | | 1.4275 | - | | 13.2576 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากกาวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|-----------------------------------|---|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 36 | ขนมทอดกรอบ ตราได โนพาร์ค | ห้างสรรพสินค้า โลตัสอ่อนนุช | 2.7864 | 0.240 | 29.7268 | 5.9406 |
| | | | 2.7018 | 0.238 | | 16.9133 |
| | | | 2.6559 | - | | 16.6016 |
| 37 | ข้าวแต่น ไรซ์เบอร์รี่ | ห้างสรรพสินค้า โลตัส สาขาซีคอนส แควร์ | 1.5128 | 0.182 | 19.9556 | 15.8103 |
| | | | 1.5120 | 0.178 | | 5.8594 |
| | | | 1.8760 | - | | 4.0241 |
| 38 | ซีสต์ ขนมมะพร้าวกึ่ง สำเร็จรูป | ร้านขายของชำ ตลาดเอี่ยมสมบัติ | 1.0198 | 0.158 | 35.6866 | 13.6187 |
| | | | 0.9245 | 0.179 | | 3.8388 |
| | | | 1.0408 | - | | 5.8480 |
| 39 | ข้าวเกรียบ ตราพราน กุ่ม | ร้านโชห่วย ลาดกระบัง | 1.9685 | 0.245 | 26.2942 | 3.7453 |
| | | | 1.9395 | 0.237 | | 9.4340 |
| | | | 2.0066 | - | | 5.3400 |
| 40 | ข้างน้อย | ร้านโชห่วย ลาดกระบัง | 0.1217 | 0.110 | 8.9547 | 5.3000 |
| | | | 1.4689 | 0.108 | | 4.7300 |
| | | | 1.4275 | - | | 5.1200 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|--|-------------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 41 | โรลเลอร์โคสเตอร์ รส ชีสต้นตำรับ | ร้านขายของชำ ตลาดพัฒนาการ | 2.7864 | 0.240 | 33.4294 | 10.4258 |
| | | | 2.7018 | 0.238 | | 13.2100 |
| | | | 2.6559 | - | | 12.5000 |
| 42 | โลตัสขนมปังไก่ปีก รสสาหร่าย | ร้านขายของชำ ตลาดพัฒนาการ | 1.5128 | 0.182 | 33.1476 | 18.4100 |
| | | | 1.5120 | 0.178 | | 18.2300 |
| | | | 1.8760 | - | | 25.1000 |
| 43 | มันฝรั่งแท้อดกรอบ real potato stick รส พริกไทยดำ | ร้านขายของชำ ซอยอ่อนนุช 50 | 1.0198 | 0.158 | 25.2166 | 16.0000 |
| | | | 0.9245 | 0.179 | | 11.0000 |
| | | | 1.0408 | - | | 15.3321 |
| 44 | coconut butter cracker with sesame | เซเว่น ซอยอ่อนนุช 52 | 1.9685 | 0.245 | 37.4352 | 18.4540 |
| | | | 1.9395 | 0.237 | | 9.5410 |
| | | | 2.0066 | - | | 8.5521 |
| 45 | ทวิสตี รสเอ็กซ์ตรีมชีส | ท็อป ลาดกระบัง | 0.1217 | 0.110 | 28.8421 | 17.4120 |
| | | | 1.4689 | 0.108 | | 16.8700 |
| | | | 1.4275 | - | | 11.0251 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|---|--|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 46 | มันฝรั่งทอด ยี่ห้อ Makado รส บาร์บีคิว | ท็อป ลาดกระบ้ง | 2.7864 | 0.240 | 27.9668 | 17.0000 |
| | | | 2.7018 | 0.238 | | 14.5214 |
| | | | 2.6559 | - | | 19.8451 |
| 47 | โสมมี รส nori seaweed | ท็อป ลาดกระบ้ง | 1.5128 | 0.182 | 22.7539 | 15.1041 |
| | | | 1.5120 | 0.178 | | 8.7898 |
| | | | 1.8760 | - | | 7.4151 |
| 48 | โสมมี รส sesame | ท็อป ลาดกระบ้ง | 1.0198 | 0.158 | 10.4233 | 6.5789 |
| | | | 0.9245 | 0.179 | | 4.3141 |
| | | | 1.0408 | - | | 5.2314 |
| 49 | โสมมี รส coconut | ร้านขายอาหาร คณะอุตสาหกรรม เกษตร | 1.9685 | 0.245 | 11.3201 | 5.0000 |
| | | | 1.9395 | 0.237 | | 3.6200 |
| | | | 2.0066 | - | | 5.2500 |
| 50 | โรลเลอร์โคสเตอร์ รส spicy bar-b-q | ร้านขายของชำ ซอยสุขุมวิท 62 | 0.1217 | 0.110 | 38.8433 | 5.4600 |
| | | | 1.4689 | 0.108 | | 10.5414 |
| | | | 1.4275 | - | | 18.5414 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 51 | โลตัสขนมปังไก่ รสสวีทบานาน่า | ท็อป ลาดกระบ้ง | 2.7864 | 0.240 | 29.4119 | 16.4235 |
| | | | 2.7018 | 0.238 | | 5.1000 |
| | | | 2.6559 | - | | 5.1800 |
| 52 | คอนพัฟฟ์ | ท็อป ลาดกระบ้ง | 1.5128 | 0.182 | 17.6147 | 7.5140 |
| | | | 1.5120 | 0.178 | | 10.1546 |
| | | | 1.8760 | - | | 11.2321 |
| 53 | โฮมมี่ รส black sesame | ท็อป ลาดกระบ้ง | 1.0198 | 0.158 | 31.6724 | 9.5541 |
| | | | 0.9245 | 0.179 | | 12.4514 |
| | | | 1.0408 | - | | 30.1121 |
| 54 | ยำยำจัมโบ้ ต้มแซ่บต้น ตำหรับอีสาน | ร้านขายอาหาร | 1.9685 | 0.245 | 29.7268 | 16.4235 |
| | | คณะอุตสาหกรรม เกษตร | 1.9395 | 0.237 | | 5.1000 |
| | | | 2.0066 | - | | 5.1800 |
| 55 | ยำยำจัมโบ้ รสหมู กระเทียม | ร้านขายของชำ ซอยสุขุมวิท 62 | 0.1217 | 0.110 | 19.9556 | 7.5140 |
| | | | 1.4689 | 0.108 | | 10.1546 |
| | | | 1.4275 | - | | 11.2321 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|-------------------------------------|---|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 56 | ข้าวแต่น ธัญพืช | ตลาดพัฒนาการ | 2.7864 | 0.240 | 29.8512 | 19.8451 |
| | | | 2.7018 | 0.238 | | 15.1041 |
| | | | 2.6559 | - | | 8.7898 |
| 57 | โคคา บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป | ร้านสะดวกซื้อ Family mart ซอย เก๊กงาม 2 | 1.5128 | 0.182 | 10.5728 | 7.4151 |
| | | | 1.5120 | 0.178 | | 6.5789 |
| | | | 1.8760 | - | | 4.3141 |
| 58 | โสมมี รส black sesame | ร้านขายของชำ ซอยเก๊กงาม 2 | 1.0198 | 0.158 | 33.3851 | 5.2314 |
| | | | 0.9245 | 0.179 | | 5.0000 |
| | | | 1.0408 | - | | 3.6200 |
| 59 | ย่ำย่ำจัมโบ้ ต้มแช่บตัน ตำหรับอีสาน | ท็อปส์ ซูเปอร์มาร์เก็ต ธัญญาพาร์ค | 1.9685 | 0.245 | 35.6866 | 5.2500 |
| | | | 1.9395 | 0.237 | | 5.4600 |
| | | | 2.0066 | - | | 10.5414 |
| 60 | ย่ำย่ำจัมโบ้ รสหมู กระเทียม | ตลาดหัวตะเข้ | 0.1217 | 0.110 | 26.2942 | 11.9284 |
| | | | 1.4689 | 0.108 | | 13.8614 |
| | | | 1.4275 | - | | 11.9522 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|----------------------------------|--|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 61 | ปาร์ตี้ มันเทศผสมทอด กรอบ | ตลาดหัวตะเข้ | 2.7864 | 0.240 | 8.9547 | 15.9013 |
| | | | 2.7018 | 0.238 | | 12.9474 |
| | | | 2.6559 | - | | 11.6651 |
| 62 | ชั้นโปรท รสสหาร่าย ซอสญี่ปุ่น | ตลาดหัวตะเข้ | 1.5128 | 0.182 | 33.4294 | 16.3893 |
| | | | 1.5120 | 0.178 | | 16.0295 |
| | | | 1.8760 | - | | 13.7263 |
| 63 | โปเต้ | ร้านสะดวกซื้อ 108 shop ถนนศรี นครินทร์ | 1.0198 | 0.158 | 33.1476 | 15.9196 |
| | | | 0.9245 | 0.179 | | 14.1187 |
| | | | 1.0408 | - | | 11.7001 |
| 64 | ป๊อปโรซ์ รสเขตดำซีส | ห้างสรรพสินค้า โลตัส | 1.9685 | 0.245 | 25.2166 | 13.1790 |
| | | | 1.9395 | 0.237 | | 13.8157 |
| | | | 2.0066 | - | | 11.3624 |
| 65 | อาริงาโต | ร้านขายของชำ ซอยกรุงเทพกรีฑา | 0.1217 | 0.110 | 37.4352 | 5.8828 |
| | | | 1.4689 | 0.108 | | 6.2460 |
| | | | 1.4275 | - | | 5.9401 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|------------------------------|--|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 66 | ควิก รสกุ้งนึ่งมะนาว | ตลาดหัวตะเข้ | 2.7864 | 0.240 | 28.8421 | 5.4867 |
| | | | 2.7018 | 0.238 | | 5.4774 |
| | | | 2.6559 | - | | 5.9195 |
| 67 | ยำยำ รสหมูต้มยำ พริกเผา | ตลาดหัวตะเข้ | 1.5128 | 0.182 | 27.9668 | 15.7174 |
| | | | 1.5120 | 0.178 | | 15.7752 |
| | | | 1.8760 | - | | 11.4583 |
| 68 | nissin รสหมูมะนาว | ร้านสะดวกซื้อ 108 shop ถนนศรี นครินทร์ | 1.0198 | 0.158 | 22.7539 | 11.1009 |
| | | | 0.9245 | 0.179 | | 13.0807 |
| | | | 1.0408 | - | | 13.8760 |
| 69 | nissin รสหมูสับ | ห้างสรรพสินค้า โลตัส | 1.9685 | 0.245 | 10.4233 | 10.9173 |
| | | | 1.9395 | 0.237 | | 13.8709 |
| | | | 2.0066 | - | | 12.5808 |
| 70 | Pringles sour cream onion | ร้านขายของชำ ซอยกรุงเทพกรีฑา | 0.1217 | 0.110 | 32.4421 | 15.8827 |
| | | | 1.4689 | 0.108 | | 15.9998 |
| | | | 1.4275 | - | | 15.9733 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|-------------------------------|--|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 71 | testo รส strawberry | ร้านสะดวกซื้อ RNP ลาดกระบัง | 2.7864 | 0.240 | 35.6658 | 11.2882 |
| | | | 2.7018 | 0.238 | | 11.2154 |
| | | | 2.6559 | - | | 15.7642 |
| 72 | oriental kitchen hot&spicy | ห้างสรรพสินค้า โลตัสสาขาซีคอนส แควร์ | 1.5128 | 0.182 | 34.4736 | 11.0178 |
| | | | 1.5120 | 0.178 | | 11.0790 |
| | | | 1.8760 | - | | 11.3469 |
| 73 | Funfries ตราمامี่ | ตลาดพระโขนง | 1.0198 | 0.158 | 30.1245 | 13.3174 |
| | | | 0.9245 | 0.179 | | 10.9855 |
| | | | 1.0408 | - | | 15.7282 |
| 74 | เนลี เครกเกอร์ มันฝรั่ง | ตลาดหัวตะเข้ | 1.9685 | 0.245 | 27.1110 | 11.0649 |
| | | | 1.9395 | 0.237 | | 16.0539 |
| | | | 2.0066 | - | | 15.9284 |
| 75 | ย่ำย่ำ รสสุกี้ | ตลาดหัวตะเข้ | 0.1217 | 0.110 | 25.0000 | 13.7616 |
| | | | 1.4689 | 0.108 | | 13.9777 |
| | | | 1.4275 | - | | 11.4440 |

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (ต่อ)

| ตัวอย่างที่ | ผลิตภัณฑ์ | แหล่งที่ซื้อ | ความชื้น (%wb) | วอเตอร์ แอกติวิตี | ปริมาณไขมัน (%) | ค่าเพอร์ ออกไซด์ (mEq/kg) |
|-------------|---------------------------|--|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 76 | มาม่า รสเปิดโพะโล้ | ร้านสะดวกซื้อ RNP ลาดกระบัง | 2.7864 | 0.240 | 12.8105 | 13.0220 |
| | | | 2.7018 | 0.238 | | 12.9720 |
| | | | 2.6559 | - | | 10.3423 |
| 77 | ยำยำ รสต้มซ่าไก่ | ห้างสรรพสินค้า โลตัสสาขาซีคอนส แควร์ | 1.5128 | 0.182 | 10.4233 | 12.8165 |
| | | | 1.5120 | 0.178 | | 8.0133 |
| | | | 1.8760 | - | | 12.4125 |
| 78 | malkist seaweed | ตลาดพระโขนง | 1.0198 | 0.158 | 11.3201 | 8.0971 |
| | | | 0.9245 | 0.179 | | 12.7418 |
| | | | 1.0408 | - | | 10.0493 |
| 79 | โรลเลอร์โคสเตอร์รส ชีส | ตลาดหัวตะเข้ | 1.9685 | 0.245 | 38.8433 | 15.9303 |
| | | | 1.9395 | 0.237 | | 11.4174 |
| | | | 2.0066 | - | | 15.8665 |
| 80 | ทาโร่ทอดกรอบ | ตลาดหัวตะเข้ | 0.1217 | 0.110 | 29.4119 | 15.9196 |
| | | | 1.4689 | 0.108 | | 14.1187 |
| | | | 1.4275 | - | | 11.7001 |

ภาคผนวก ข.

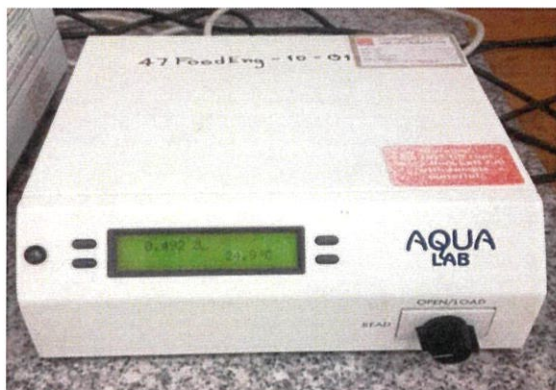
รูปอุปกรณ์และตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ข.1 FT-NIR spectrometer
(MPA, Bruker, germany)



รูปที่ ข.2 ตู้อบลมร้อน



รูปที่ ข.3 เครื่องวัดวอเตอร์แอกติวิตี

(AQUA LAB MODEL SERIES 3 TE)



รูปที่ ข.4 ถ้วยที่ใช้ในการบรรจุตัวอย่าง