

การทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเค้กมาม่อนระหว่างการเก็บรักษาด้วย
การวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด

PREDICTION OF QUALITY CHANGES IN MAMÓN CAKE DURING
STORAGE USING NEAR INFRARED HYPERSPECTRAL IMAGING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการความปลอดภัยอาหาร

คณะอุตสาหกรรมอาหาร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ KMUTL-2020-FI-M-054-376 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PREDICTION OF QUALITY CHANGES IN MAMÓN CAKE DURING
STORAGE USING NEAR INFRARED HYPERSPECTRAL IMAGING**



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

2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับคนที่ขอยืมเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2020

FACULTY OF FOOD-INDUSTRY

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

คณะอุตสาหกรรมอาหาร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเค้กมาม่อนระหว่างการเก็บรักษาด้วยการ
วิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด
PREDICTION OF QUALITY CHANGES IN MAMÓN CAKE DURING
STORAGE USING NEAR INFRARED HYPERSPECTRAL IMAGING

ชื่อนักศึกษา นางสาวมัญญา ศรีจรูญรัตน์

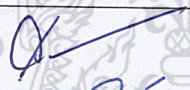
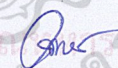
รหัสนักศึกษา 61608015

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา การจัดการความปลอดภัยอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สนธิสุข ชีระชัยชยดี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สนธิสุข ชีระชัยชยดี	
ผศ.ดร.อพัชชา จินดาประเสริฐ	
ผศ.ดร.วริพัทธ์ อารีกุล	
รศ.ดร.อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล	

วัน / เดือน / ปีที่สอบ 30 พฤศจิกายน 2563 เวลา 13.00-15.00 น.

ณ ห้องประชุม 1 อาคารเรียนและปฏิบัติการแปรรูปอาหาร คณะอุตสาหกรรมอาหาร

คณะอุตสาหกรรมอาหารรับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ ปิ่นศิริโรตม)

คณบดีคณะอุตสาหกรรมอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วันที่... 7 ...เดือน... ๗๐... พ.ศ. ๒๕๖๓
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเค้กมาม่อนระหว่างการเก็บรักษาด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด
นักศึกษา	นางสาวมนัญชยา ศรีจรูญรัตน์
รหัสประจำตัว	61608015
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	การจัดการความปลอดภัยอาหาร
พ.ศ.	2563
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สนธิสุข ชีระชัยชยติ

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพของเค้กระหว่างการเก็บรักษา เช่น คุณภาพทางจุลินทรีย์ที่เป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียในเค้ก ทำให้อายุการเก็บรักษาของเค้กสั้นลง และอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภคเนื่องจากไม่สามารถมองเห็นจุลินทรีย์ได้ด้วยตาเปล่า และยังมี การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีและกายภาพของเค้ก ได้แก่ วอเตอร์แอกทิวิตีซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และเนื้อสัมผัส โดยวิธีการตรวจวัดทั่วไปจะเป็นวิธีที่มีการทำลายตัวอย่าง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared hyperspectral imaging, NIR-HSI) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่มีการทำลายตัวอย่างในช่วงความยาวคลื่น 935-1,720 นาโนเมตร นำมาใช้ในการทำนายค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ค่าความแข็ง และอายุของเค้กมาม่อนขณะเก็บรักษา ทำการสร้างสมการด้วยวิธี partial least squares regression (PLSR) นอกจากนี้ได้นำเทคนิค NIR-HSI มาใช้คัดแยกอายุของเค้ก 2 กลุ่มคือกลุ่มเค้กไม่หมดอายุ และกลุ่มเค้กหมดอายุ ใช้วิธี partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) ในการสร้างสมการ จากผลการทำนายเมื่อทดสอบกับตัวอย่างกลุ่มสำหรับใช้ทดสอบสมการพบว่า สมการทำนายค่าวอเตอร์แอกทิวิตีที่มีการปรับแต่งสเปกตราด้วยวิธี smoothing มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R) เท่ากับ 0.77 และค่า root mean square errors of prediction (RMSEP) เท่ากับ 0.01 การทำนายค่าความแข็งของเค้กด้วยการปรับแต่งสเปกตราแบบ smoothing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ค่า R เท่ากับ 0.45, RMSEP เท่ากับ 0.33 นิวตัน และสมการทำนายอายุของเค้ก มีค่า R เท่ากับ 0.84, RMSEP เท่ากับ 1.24 วัน ส่วนการทำนายการคัดแยกเค้กที่หมดอายุออกจากเค้กปกติที่มีการปรับแต่งสเปกตราแบบ smoothing ได้สมการทำนายที่มีความถูกต้องแม่นยำในการคัดแยก 91.3% ดังนั้นเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดสามารถนำมาใช้ทำนายค่าวอเตอร์แอกทิวิตี อายุวันและคัดแยกของเค้กมาว่อน และมีความเป็นไปได้ในการที่จะประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพและความปลอดภัยในอุตสาหกรรมการผลิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **IT** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Prediction of quality changes in mamón cake during storage using water near infrared hyperspectral imaging
Student	Ms. Manunchaya Sricharoonratana
Student ID	61608015
Degree	Master of Science
Program	Food Safety Management
Year	2020
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Sontisuk Teerachaichayut

ABSTRACT

Changes in the quality of cake during storage such as microbial quality which are a major problem in cake degradation, shorten the shelf life of the cake and it can be harmful to the health of consumers because the microorganism cannot be seen with the naked eye. There is also a change in the chemical and physical quality of cake such as water activity, which is an important factor affecting the growth of microorganisms, and texture. The general measurement method is the method that destroys the sample. This thesis used the near infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI) technique as a nondestructive method at the wavelength range of 935-1,720 nm. It was used to predict water activity, hardness, and storage time of mamón cakes. The equations were constructed using partial least squares regression (PLSR) method. In addition, NIR hyperspectral imaging was used to classify the age of two groups of cakes, namely, non-expired cake groups and expired cake groups. Classification equation using partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) was created. The results showed that the equation for predicting water activity with the smoothing pretreatment had a correlation coefficient (R) of 0.77 and the root mean square errors of prediction (RMSEP) of 0.01. The equation for predicting hardness by using the smoothing pretreatment obtained R of 0.45, RMSEP of 0.33 N. As well as the equation for predicting the cake's storage time obtained R of 0.84, RMSEP of 1.24 day. The equation for classifying expired cakes from normal cakes with smoothing pretreatment obtained 91.3% accuracy by testing

samples in the prediction set. Therefore, NIR hyperspectral imaging can be used to predict water activity, storage time and sorting of mamón cakes and also can be possible to apply as a quality and safety inspection device in the manufacturing industry.



กิติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษา
รองศาสตราจารย์ ดร. สนธิสุข ชีระชัยชยติ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจน
ให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อพัชชา
จินดาประเสริฐ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรพัทธ์ อารีกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณา
ให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะที่เป็นประโยชน์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธงชัย
พุดทองศิริ และศาสตราจารย์ ดร. Anthony Keith Thompson ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ
ตลอดจนให้ความรู้ที่ดีแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คณาจารย์ เจ้าหน้าที่และเพื่อนนักศึกษาปริญญาโท คณะอุตสาหกรรมอาหาร
สาขาการจัดการความปลอดภัยอาหาร คุณศิริพร แทนแก้ว และคุณกัณห์กริชย์ เครือศรี ที่ให้คำแนะนำ
ความช่วยเหลือและการอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยให้สำเร็จ

ขอขอบคุณเพื่อนของข้าพเจ้า คุณดวงกมลรัตน์ คำโสภา คุณรัชชชนก วรรณกุลสุนทร
คุณสวรส เข้มคงเมือง และคุณ วรนิษฐา สหชัยรุ่งเรือง ที่ให้ความช่วยเหลืออย่างดีและคอย
สนับสนุนข้าพเจ้ามาโดยตลอด

สุดท้ายต้องขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ
ที่ดีตลอดมา

สำหรับประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดา มารดา ซึ่งเป็น
ที่รักและเคารพ ตลอดจนอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอด
ประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

มณัญชยา ศรีจรูญรัตน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพอาหารระหว่างการเก็บรักษา	3
2.2 เค้ก	3
2.3 การเสื่อมเสียทางจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่	4
2.4 วอเตอร์แอกทีวิตี้	6
2.6 เนื้อสัมผัสอาหาร	9
2.7 สเปกโทรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด	11
2.8 เทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัม	13
2.9 การปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัม	14
2.10 การวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม	15
2.11 ค่าผลทางสถิติที่ใช้พิจารณาในการสร้างสมการ	15
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	21
3.1 ตัวอย่างเค้ามาม่อน	21
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	21
3.3 อาหารเลี้ยงเชื้อและสารเคมี.....	22
3.4 วิธีการทดลอง	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	28
4.1 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางจุลินทรีย์ของเค้ก.....	28
4.2 สเปกตรัมของเค้ก	29
4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอกทิวิตีและค่าความแข็งของเค้ก	30
4.4 สมการทำนายค่าวอเตอร์แอกทิวิตี.....	31
4.5 สมการทำนายค่าความแข็ง.....	34
4.6 สมการทำนายอายุของเค้ก.....	37
4.7 สมการคัดแยกอายุเค้ก.....	39
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	43
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	44
บรรณานุกรม	45
ภาคผนวก	54
ภาคผนวก ก	55
ภาคผนวก ข	58
ภาคผนวก ค	66
ภาคผนวก ง.....	67
ประวัติผู้เขียน	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เกณฑ์จุลินทรีย์ของขนมอบ	5
2.2 ช่วงค่าวอเตอร์แอกทिवิตี้ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่บางชนิด	8
2.3 ค่าวอเตอร์แอกทिवิตี้ขั้นต่ำสุดกับการเจริญของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ	9
2.4 การแปลความหมายของค่า R	16
4.1 ผลการวิเคราะห์จุลินทรีย์ทั้งหมด, ยีสต์, รา และ <i>Bacillus cereus</i> ของเค้กที่อุณหภูมิ 24-26 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 วัน	29
4.2 ผลค่าวอเตอร์แอกทिवิตี้และค่าความแข็งของเค้กที่อุณหภูมิ 24-26 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 วัน	31
4.3 ผลทางสถิติค่าวอเตอร์แอกทिवิตี้ของเค้กในกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการ	32
4.4 ผลการสร้างสมการทำนายค่าวอเตอร์แอกทिवิตี้	32
4.5 ผลการทำนายค่าวอเตอร์แอกทिवิตี้	33
4.6 ผลทางสถิติค่าความแข็งของเค้กในกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการ	35
4.7 ผลการสร้างสมการทำนายค่าความแข็ง	35
4.8 ผลการทำนายค่าความแข็ง	36
4.9 ผลทางสถิติอายุของเค้กในกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการ	37
4.10 ผลการสร้างสมการทำนายอายุของเค้ก	37
4.11 ผลการทำนายอายุของเค้ก	38
4.12 ผลทางสถิติของเค้กในกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการ	40
4.13 ผลการสร้างสมการคัดแยกเค้ก	40
4.14 ผลการคัดแยกเค้กหมดอายุและเค้กที่ไม่หมดอายุ	41

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 กราฟ texture profile analysis	11
2.2 รูปแบบการสั้นของโมเลกุล.....	12
4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนเฉลี่ยของเค้ก 200 ตัวอย่าง.....	30
4.2 ความสัมพันธ์ของค่าจริงและค่าทำนายของวอเตอร์แอกทिवิตีในกลุ่มสร้างสมการ (a) และกลุ่มทดสอบสมการ (b).....	33
4.3 ภาพแสดงตัวอย่างการทำนายค่าวอเตอร์แอกทिवิตี	34
4.4 ความสัมพันธ์ของค่าจริงและค่าทำนายของความแข็งในกลุ่มสร้างสมการ (a) และกลุ่มทดสอบสมการ (b).....	36
4.5 ความสัมพันธ์ของค่าจริงและค่าทำนายของอายุเค้กในกลุ่มสร้างสมการ (a) และกลุ่มทดสอบสมการ (b).....	38
4.6 ภาพแสดงตัวอย่างการทำนายอายุ	39
4.7 ความสัมพันธ์ของค่าจริงและค่าทำนายของการคัดแยกเค้กในกลุ่มสร้างสมการ (a) และกลุ่มทดสอบสมการ (b).....	42
4.8 ภาพแสดงตัวอย่างการทำนายการคัดแยกเค้ก.....	42
ก.1 ตัวอย่างเค้กมาอ่อน.....	55
ก.2 เครื่อง NIR hyperspectral imaging (Specim Fx17e, Spectral Imaging Ltd, Oulu, Finland)	55
ก.3 เครื่องวัดวอเตอร์แอกทिवิตี (Aqualab 4TE, Decagon Device, Inc., Pullman, WA, USA)	56
ก.4 เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (texture analyzer รุ่น TA.XT Plus, Stable Micro systems, Surrey, UK)	56
ก.5 ส่วนประกอบของเครื่อง NIR hyperspectral imaging	57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เค้กเป็นผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมนับประทานเป็นอาหารว่างหรือของหวาน เค้กมาม่อนจัดอยู่ในกลุ่มประเภทเค้กสปันจ์ มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่นุ่มและเบาเป็นเอกลักษณ์ ได้รับความนิยมนานและมีวางขายอยู่ทั่วไปในร้านเบเกอรี่ทั่วไป โดยปกติทั่วไปผลิตภัณฑ์เบเกอรี่จะมีการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรีย ยีสต์ และรา ในระหว่างการเก็บรักษา ทำให้อายุการเก็บของผลิตภัณฑ์สั้นลงและเนื่องจากผู้บริโภคไม่สามารถมองเห็นจุลินทรีย์ได้ด้วยตาเปล่าอาจส่งผลกระทบต่อความไม่ปลอดภัยจากการได้รับสารพิษหรือเชื้อก่อโรคที่ปนเปื้อนมากับผลิตภัณฑ์ได้ ที่ประเทศออสเตรเลียมีข่าวเกี่ยวกับการพบเชื้อราภายในเค้กวันเกิดที่ซื้อมา (Fox news channel, 2020) ในปัจจุบันความปลอดภัยของอาหารเป็นเรื่องสำคัญสำหรับผู้ผลิตในการควบคุมการผลิต ตั้งแต่กระบวนการผลิตขึ้นต้นจนถึงผู้บริโภค และเพื่อที่ผู้บริโภคจะมั่นใจได้ว่าอาหารนั้นปลอดภัย ในระหว่างการเก็บรักษา ผลิตภัณฑ์จะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านจุลินทรีย์ เคมี เช่น ค่าวอเตอร์แอกทิวิตีเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์และกายภาพ เช่น เนื้อสัมผัส โดยทั่วไปการตรวจสอบผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่จะเป็นวิธีการตรวจสอบที่ต้องทำลายตัวอย่างทำให้เกิดการสูญเสียตัวอย่าง มีการใช้สารเคมี ใช้เวลานาน และมีค่าใช้จ่ายสูง

เทคนิควิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด (NIR hyperspectral imaging) เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมใช้ในการตรวจสอบ วิเคราะห์ตัวอย่าง เนื่องจากไม่ทำลายตัวอย่าง มีความรวดเร็ว ไม่ซับซ้อน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เทคนิค NIR hyperspectral imaging เป็นเทคนิคที่รวมการถ่ายภาพและเทคนิคสเปกโทรสโกปีเข้าด้วยกัน (นิมมิตรา, 2560) ภาพที่ได้จะมีข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรด ซึ่งได้มีการศึกษาในการนำมาใช้ตรวจสอบวิเคราะห์อาหารหลากหลายประเภททั้งในด้านคุณภาพและปริมาณ ได้แก่ ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ ธัญพืช (Teerachaichayut and Suktanarak, 2017) ดังนั้นจึงมีความสนใจที่จะนำเทคนิค NIR hyperspectral imaging มาใช้ในการทำนายอายุ ค่าวอเตอร์แอกทิวิตีและลักษณะเนื้อสัมผัสของเค้กมาม่อน รวมถึงการคัดแยกอายุเค้กมาม่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางจุลินทรีย์ ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี และค่าความแข็งของเค็มาม่อนระหว่างการเก็บรักษา

1.2.2 เพื่อให้ได้สมการในการทำนายค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ค่าความแข็ง และอายุของเค็มาม่อน โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด

1.2.3 เพื่อให้ได้สมการสำหรับใช้คัดแยกอายุของเค็มาม่อนโดยใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพทางจุลินทรีย์ในเค็มาม่อนระหว่างการเก็บรักษาที่ระยะเวลา 5 วัน ได้แก่ เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์ รา และ *Bacillus cereus* ซึ่งการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์จะนำมากำหนดอายุการเก็บรักษา และศึกษการเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอกทิวิตี และเนื้อสัมผัสของเค็มาม่อนในระหว่างการเก็บรักษา 8 วัน แล้วทำการสร้างสมการทำนายวอเตอร์แอกทิวิตี ความแข็ง อายุของเค็มาม่อน และสมการคัดแยกอายุเค็มาม่อนโดยใช้การวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 935-1,720 นาโนเมตร รวมถึงทดสอบความแม่นยำของสมการ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางจุลินทรีย์ ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี และค่าความแข็งของเค็มาม่อนระหว่างการเก็บรักษา

1.4.2 ทำให้ได้สมการจากเทคนิควิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดที่มีความแม่นยำสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ค่าความแข็ง อายุของเค็มาม่อน และการคัดแยกอายุของเค็มาม่อน

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพอาหารระหว่างการเก็บรักษา

ในระหว่างการเก็บรักษาจะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะคุณภาพของอาหารและส่งผลให้อาหารเสื่อมคุณภาพ การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารในช่วงการเก็บรักษามีหลายประเภท ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การได้รับหรือสูญเสียความชื้น การถ่ายเทของไอน้ำ การสูญเสียกลิ่นรส ซิเนอร์จีซิส (syneresis) การแยกชั้นของอิมัลชัน การเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและชีวเคมี เช่น การไฮโดรไลซ์ของกรดไขมัน การออกซิเดชันของไขมัน โปรตีน วิตามิน การเกิดสีน้ำตาลที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ หรือการเปลี่ยนแปลงทางจุลินทรีย์ เช่น การเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรค การเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ ซึ่งปัจจัยในการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพอาหารอาจเกิดจากปัจจัยภายใน เช่น ส่วนผสมอาหาร วอเตอร์แอกทีวิตี พีเอช จุลินทรีย์ เอนไซม์ หรือเกิดจากปัจจัยภายนอก เช่น สภาพการเก็บรักษา บรรจุกัณฑ์ (Galanakis, 2019)

2.2 เค้ก

เค้กเป็นผลิตภัณฑ์อาหารหวานที่มีการอบ (Konstantas et al., 2019) ส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเค้ก คือ แป้งสาลี น้ำตาล ไข่ และไขมันหรือน้ำมัน (Wilderjans et al., 2013) จิตรนา และอรอนงค์ (2539) แบ่งประเภทของเค้กได้ตามลักษณะของเนื้อเค้กและการผสมออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

2.2.1 เค้กเนยหรือบัตเตอร์เค้ก (butter type cake)

เค้กเนยเป็นเค้กที่มีปริมาณไขมันสูงจากเนยที่เป็นส่วนผสมหลัก การขึ้นฟูเกิดจากการตีเนยให้ไขมันเก็บอากาศและขยายตัวในขั้นตอนการอบ ลักษณะเนื้อเค้กจะละเอียด แน่น มีความชุ่มชื้น เค้กประเภทนี้ ได้แก่ ไวท์เค้ก ช็อคโกแลตเค้ก ฟรุตเค้ก เป็นต้น (จิตรนา และอรอนงค์, 2539)

2.2.2 เค้กไข่ (foam type cake)

เค้กไข่เป็นเค้กที่มีไข่เป็นส่วนผสมหลัก มีปริมาณของไขมันค่อนข้างน้อยหรือไม่มีไขมัน ลักษณะเนื้อเค้กจะเบาและนุ่ม การขึ้นฟูของเค้กจะขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศที่เก็บไว้ในจากการตีไข่ ไม่ว่าจะเป็นวิธีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น เค้กเมอแรงค์จะใช้เฉพาะไข่ขาว เค้กสปันจ์จะใช้ไข่ทั้งฟอง ซึ่งในเค้กจะมาจากไข่แดงที่ใช้การทำเค้กสปันจ์จะแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ การตีไข่และน้ำตาลให้เป็นโฟม แล้วจากนั้นนำแป้งผสมลงในโฟมไข่ให้เข้ากัน (Gisslen, 2016)

2.2.3 ชิฟฟอนเค้ก (chiffon cake)

ชิฟฟอนเค้กเป็นเค้กที่มีผสมระหว่างเค้กเนยและเค้กไข่ (โดยมีส่วนผสมที่ขึ้นฟูของการตีไข่ขาวผสมกับส่วนผสมของไขมัน ไข่แดง น้ำตาล และแป้งอีกส่วนหนึ่ง นิยมใช้น้ำมันพืชเป็นส่วนของไขมันแทนเนย ดังนั้น เนื้อเค้กที่ได้จะมีความฟูเบา และมีความมันเงา (จิตรณา และอรอนงค์, 2539)

เค้กมามอน เป็นเค้กสปันจ์ซึ่งจัดอยู่ในประเภทเค้กไข่ โดยมีต้นกำเนิดในประเทศฟิลิปปินส์ (filipino sponge cake) (ณัฐพร, 2552) มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่นุ่ม นิยมรับประทานเป็นอาหารว่าง (Bankston, 2014)

2.3 การเสื่อมเสียทางจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่

การเสื่อมเสียทางจุลินทรีย์เป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่มีความชื้นปานกลางและความชื้นสูง สามารถแบ่งการเสื่อมเสียทางจุลินทรีย์ได้ออกเป็น 3 กลุ่มได้แก่

2.3.1 การเสื่อมเสียจากแบคทีเรีย

แบคทีเรียที่สำคัญของการเสื่อมเสียคือ *Bacillus* sp. ได้แก่ *B. subtilis*, *B. licheniformis*, *B. cereus* เป็นแบคทีเรียแกรมบวก รูปแท่ง สร้างสปอร์ ผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมเสียจะมีลักษณะเป็นยางเหนียว (rope) เช่น การเกิดยางเหนียวในขนมปัง ขนมปังจะมีกลิ่นรสคล้ายแคนดาดูปหรือสับประรดสุก เนื้อขนมปังจะเปลี่ยนสีและมีลักษณะเหนียว (Pereira et al., 2020) แบคทีเรียชนิดนี้สามารถพบได้ในวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ เช่น แป้ง สปอร์ที่สร้างขึ้นมีความทนต่อความร้อนและสามารถรอดได้จากกระบวนการอบ (Pepe et al., 2003) และบางชนิดสามารถทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษจากการบริโภคผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่ปนเปื้อน เช่น *B. cereus* (Tewari and Abdullah, 2015)

2.3.2 การเสื่อมเสียจากยีสต์

การเสื่อมเสียจากยีสต์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ การเจริญของยีสต์ที่มองเห็นได้บนผิวของผลิตภัณฑ์ เช่น chalk mold จาก *Pichia burtonii* และการเสื่อมเสียจากการหมัก ซึ่งผล

จากการหมักจะได้เป็นแอลกอฮอล์ หรือ เอสเทอร์ (Legan and Voysey, 1991) โดยจะพบในผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำตาลสูง เช่น เค้กผลไม้ (Smith et al., 2004)

2.3.3 การเสื่อมเสียจากรา

การเจริญของราเป็นปัญหาที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่มีอายุการเก็บรักษาที่จำกัดในผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงและปานกลาง ราวส่วนใหญ่จะสามารถเจริญได้ที่ค่าวอเตอร์แอกทิวิตีมากกว่า 0.8 (Saranraj and Geetha, 2012) โดยปกติแล้วเซลล์และสปอร์ของราจะถูกทำลายได้จากความร้อนในขั้นตอนการอบ แต่เราสามารถปนเปื้อนกลับในผลิตภัณฑ์ได้ภายหลังจากกระบวนการอบ เช่น การปนเปื้อนจากอากาศ พื้นผิววัสดุอุปกรณ์ วัตถุดิบ หรือขั้นตอนการทำให้เย็นลง การหั่น สไลด์ การบรรจุ (Patil and Kukade, 2020) นอกจากนี้การบรรจุผลิตภัณฑ์ในขณะที่อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ยังสูงอยู่ จะให้เกิดหยดน้ำด้านในของภาชนะบรรจุและที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเอื้อต่อการเจริญของรา ราที่สามารถพบได้ในเค้กได้แก่ *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp. ซึ่งสามารถสร้างสารพิษ (mycotoxins) ได้ (Morassi et al., 2018)

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์จุลินทรีย์ของขนมอบ

จุลินทรีย์	ขนมอบที่ไม่มีไส้หรือเติมไส้หรือส่วนผสมอื่นก่อนอบ	ขนมอบที่เติมไส้หรือส่วนผสมอื่นหลังอบ
จำนวนจุลินทรีย์ (cfu/กรัม)	น้อยกว่า 1×10^4	น้อยกว่า 1×10^5
จำนวนยีสต์และรา (cfu/กรัม)	น้อยกว่า 100	น้อยกว่า 500
<i>Escherichia coli</i> (MPN/กรัม)	น้อยกว่า 3	น้อยกว่า 3
<i>Clostridium perfringens</i> (cfu/กรัม)	น้อยกว่า 100	น้อยกว่า 100
<i>Bacillus cereus</i> (cfu/กรัม)	น้อยกว่า 100	น้อยกว่า 100
<i>Staphylococcus aureus</i> (cfu/กรัม)	น้อยกว่า 10	น้อยกว่า 10
<i>Salmonella</i> spp./25 กรัม	ไม่พบ	ไม่พบ

ที่มา: สำนักคุณภาพและความปลอดภัยอาหาร (2560)

กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ได้กำหนดเกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของอาหารและภาชนะสัมผัสอาหาร ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2560 ของผลิตภัณฑ์เบเกอรี่จะแบ่งผลิตภัณฑ์ออกเป็น 2 กลุ่มคือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มขนมอบที่ไม่มีไส้หรือเติมไส้หรือส่วนผสมอื่นก่อนอบ เช่น คุกกี้ บิสกิต แครกเกอร์ เวเฟอร์ ขนมเปี๊ยะ ขนมโมจิ ขนมไหว้พระจันทร์ ขนมปัง และพาย เป็นต้น และกลุ่มขนมอบที่เติมไส้หรือส่วนผสมอื่นหลังอบ เช่น เอแคลร์ แยม โรด ขนมเค้กหน้าต่างๆ และบิสกิตหรือแครกเกอร์หรือเวเฟอร์ไส้ต่างๆ เป็นต้น โดยมีเกณฑ์มาตรฐานดังตามตารางที่ 2.1

2.4 วอเตอร์แอกทิวิตี้

2.4.1 ประเภทของน้ำในอาหาร สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

2.4.1.1 น้ำอิสระ (free water) เป็นน้ำส่วนใหญ่ที่อยู่ในอาหาร อยู่ในเซลล์และช่องว่างของอาหาร สามารถเคลื่อนที่และระเหยออกได้ มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายของสารต่างๆ ในอาหาร ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีและจุลินทรีย์นำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ ซึ่งมีผลต่อคุณภาพและการเสื่อมเสียของอาหาร (Joardder et. al, 2019)

2.4.1.2 น้ำที่จับหรือยึดเกาะกับโมเลกุลของสารอื่นๆ ในอาหาร (bound water) เป็นน้ำที่จับหรือยึดเกาะกับโมเลกุลของสารอื่นๆ ด้วยพันธะเคมีที่แข็งแรง น้ำประเภทนี้กำจัดออกได้ยาก ไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลาย ไม่เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -40 องศาเซลเซียส (Elvers, 2017)

วอเตอร์แอกทิวิตี้หรือปริมาณน้ำอิสระในอาหาร (a_w) หาได้จากอัตราส่วนความดันไอของน้ำในอาหารต่อความดันไอน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน (Berk, 2018)

$$a_w = P / P_o \quad (2.1)$$

หมายเหตุ P = ความดันไอของน้ำในอาหาร (Pa)

P_o = ความดันไอน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน (Pa)

นอกจากนี้สามารถหาค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ได้จากความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุล (equilibrium relative humidity, E.R.H.) (Berk, 2018)

$$a_w = E.R.H. / 100 \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ประเภทอาหารตามวอเตอร์แอกทิวิตี้

วอเตอร์แอกทิวิตี้แสดงค่าตั้งแต่ 0-1 สามารถแบ่งประเภทอาหารตามวอเตอร์แอกทิวิตี้ได้เป็น 3 กลุ่ม (Barbosa-Cánovas et. al., 2003) ดังนี้

2.4.2.1 อาหารสด (fresh food) มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้มากกว่า 0.9 เช่น เนื้อสัตว์ ผัก ผลไม้

2.4.2.2 อาหารกึ่งแห้ง (intermediate moisture food) มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้อยู่ที่ 0.6-0.9 เช่น เค้ก ผลไม้แช่อิ่ม แยม เป็นต้น

2.4.2.3 อาหารแห้ง (dried food) มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้น้อยกว่า 0.6 เช่น นมผง ผลไม้อบแห้ง แป้ง เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วเค้กจัดอยู่ในกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความชื้นปานกลาง เนื่องจากปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เค้กทั่วไปประมาณ 18-28% ความชื้นดังกล่าวของเค้กจะทำให้มีความเสี่ยงต่อการเน่าเสียของจุลินทรีย์ได้ง่าย สามารถเก็บรักษาได้ภายในระยะเวลาสั้น อย่างไรก็ตามค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ของผลิตภัณฑ์เค้กจะเป็นตัวควบคุมอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์จากการเจริญของจุลินทรีย์มากกว่าปริมาณความชื้นเพียงอย่างเดียว (Cauvain, 2003) ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่สามารถจำแนกตามค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ได้ออกเป็น 3 กลุ่ม (Smith et al., 2003) ตามในตารางที่ 2.2

วอเตอร์แอกทิวิตี้ เป็นปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญทั้งทางด้านคุณภาพ ความปลอดภัย อายุการเก็บรักษา วอเตอร์แอกทิวิตี้มีความสำคัญในการควบคุมการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรคที่ทำให้อาหารไม่ปลอดภัย หรือจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหาร และวอเตอร์แอกทิวิตี้สามารถบ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะต้องการปริมาณน้ำเพื่อใช้ในการเจริญที่แตกต่างกัน วอเตอร์แอกทิวิตี้ที่ต่ำที่สุดของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.3 แบคทีเรียส่วนใหญ่จะเจริญได้ที่ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ตั้งแต่ 0.91 แต่มีแบคทีเรียที่ชอบความเข้มข้นของเกลือสูงสามารถเจริญได้ที่ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ 0.75 ยีสต์ส่วนใหญ่จะเจริญได้ที่ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ขั้นต่ำ 0.8 ส่วนราเจริญที่ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ 0.80 เพราะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่าแบคทีเรียและยีสต์ ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดสำหรับอาหารบางประเภทเพื่อใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยสำหรับการผลิตอาหาร เช่น อาหารชนิดที่มีความเป็นกรดต่ำในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท คืออาหารที่มีค่าความเป็นกรดต่ำกว่า 4.6 และค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้มากกว่า 0.85 ต้องดำเนินการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด หรือเดิมมีการเติมกรดเพื่อปรับสภาพความเป็นกรดต่ำ (กระทรวงสาธารณสุข,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2546) โดยค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ที่ 0.85 เป็นค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ที่ต่ำที่สุดที่แบคทีเรียก่อโรคสามารถเจริญเติบโตได้ (Snyder et al., 2019)

ตารางที่ 2.2 ช่วงค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่บางชนิด

ผลิตภัณฑ์	วอเตอร์แอกทิวิตี้
ปริมาณความชื้นต่ำ	
คุกกี้	0.2-0.3
แครกเกอร์	0.2-0.3
ปริมาณความชื้นปานกลาง	
โดนัทเคลือบช็อกโกแลต	0.82-0.83
เคนนิชเพสตรี	0.82-0.83
เค้กสอดไส้ครีม	0.78-0.81
ซอฟต์คุกกี้	0.5-0.78
ปริมาณความชื้นสูง	
ขนมปัง	0.96-0.98
ขนมปังพิต้า	0.9
พายผลไม้	0.95-0.98
แครอทเค้ก	0.94-0.96
ชีสเค้ก	0.91-0.95
แป้งพิชซ่า	0.94-0.95
พิชซ่า	0.99

ที่มา: Smith et al. (2003)

นอกจากวอเตอร์แอกทิวิตี้มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แล้วนั้น วอเตอร์แอกทิวิตี้ยังส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและกิจกรรมของเอนไซม์ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพของอาหาร ได้แก่ การออกซิเดชันของไขมัน กิจกรรมของเอนไซม์ และปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ เช่น ปฏิกิริยามอลลาร์ด (Zeece, 2020)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ค่าวอเตอร์แอกทิวิตีขั้นต่ำสุดกับการเจริญของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ

จุลินทรีย์	วอเตอร์แอกทิวิตี
แบคทีเรีย	0.91
ยีสต์	0.88
รา	0.80
แบคทีเรียที่ชอบเกลือ	0.75
ราที่ชอบความแห้ง	0.65
ยีสต์ที่ชอบแรงดันออสโมติก	0.60

ที่มา: Samadelli et al. (2013)

2.5 เนื้อสัมผัสอาหาร

เนื้อสัมผัสเป็นคุณลักษณะทางกายภาพ และมีคุณสมบัติเชิงรีโอโลยี (Bourne, 2002) สามารถรับรู้ได้ด้วยความรู้สึกลสัมผัสในปากด้วยฟัน ลิ้น เช่น การเคี้ยว การกัด เป็นต้น หรือรับรู้จากการสัมผัสด้วยมือ เช่น การจับ การบีบ เป็นต้น ซึ่งเนื้อสัมผัสจะมีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างในอาหารที่เป็นของแข็ง หรืออาหารกึ่งแข็งเมื่อมีแรงกระทำกับอาหาร ในอาหารที่เป็นของเหลวจะใช้คำว่าความหนืดในการอธิบายลักษณะของอาหารเหลว ในระหว่างการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ โมเลกุลในสตาร์ชจะมีการจัดเรียงตัวใหม่และเกิดเป็นลักษณะแบบผลึก เรียกว่ารีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ทำให้มีเนื้อสัมผัสแน่นแข็งขึ้น (นราธิป, 2556) หรือการที่น้ำเคลื่อนที่จากบริเวณเนื้อซึ่งมีปริมาณความชื้นสูง ไปยังบริเวณเปลือกของขนมปังที่มีปริมาณความชื้นต่ำ ทำให้เปลือกของขนมปังไม่กรอบและนิ่ม (Cauvain and Young, 2008)

2.6.1 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (texture analysis) สามารถทำการทดสอบได้ 2 ประเภท

2.6.1.1 การทดสอบเชิงวัตถุวิสัย (objective method) เป็นการทดสอบเนื้อสัมผัสโดยการใช้เครื่องมือวัด เช่น เครื่องตรวจวัดเนื้อสัมผัส (texture analyser) ซึ่งจะมีหัววัดลักษณะแบบต่างๆ ที่จำลองตามลักษณะการรับแรงของวัสดุ (ปานมนัส, 2558) การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยเครื่องมือวัดสามารถทำการทดสอบได้หลายวิธี เช่น การทดสอบแรงกด (compression test) ที่ทำให้อาหารเสียรูป การทดสอบความยืดหยุ่น (elasticity) ของเส้นพาสต้า โดยการวัดแบบ tensile test ใช้แรงดึงทำ

ให้ตัวอย่างขาดออกจากกัน การทดสอบความเปราะของตัวอย่าง (fracture test) เป็นแรงที่ใช้ในการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ตัวอย่างแตกร้าว การทดสอบแบบตัดและเฉือน (cutting and shearing test) นิยมใช้ทดสอบกับเนื้อสัตว์ ผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ หัววัดที่ใช้จะเป็นใบมีดตัดหรือเฉือนลงไปยังตัวอย่าง การทดสอบแบบเจาะ (puncture test) วัดแรงที่ใช้ในการกดเจาะเข้าไปในอาหาร ปกติแล้วจะใช้ทดสอบความกับผักและผลไม้ เป็นต้น (Vishwakarma et al., 2014)

2.6.1.2 การทดสอบทางประสาทสัมผัส (sensory evaluation, subjective method) เป็นการวิเคราะห์และตีความการตอบสนองต่อผลิตภัณฑ์ที่รับรู้ผ่านประสาทการมองเห็น การดม การสัมผัส การชิม และการได้ยิน โดยที่ชิมมนุษย์เป็นผู้ทำการประเมิน การประเมินทางประสาทสัมผัสสามารถทำการประเมินความชอบหรือการยอมรับผลิตภัณฑ์ ส่วนวิธีทดสอบเชิงวัตถุวิสัยจะวัดคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร ได้เพียงด้านเดียว แต่การทดสอบประเภทนี้จะมีค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลาในการทดสอบนาน และข้อมูลผลการทดสอบที่ได้ อาจมีความแปรปรวนเนื่องจากการตอบสนองและอคติของผู้ทดสอบ (Singham et al., 2015)

2.6.2 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยวิธี texture profile analysis

การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยวิธี texture profile analysis (TPA) เป็นการทดสอบแบบแรงกด (compression test) ลงบนตัวอย่างด้วยการกดทั้งหมด 2 ครั้ง เป็นการจำลองการเลียนแบบการบดเคี้ยวโดยใช้ฟัน ดังภาพที่ 2.1 วิธีนี้สามารถใช้ได้กับอาหารหลากหลายชนิด ค่าลักษณะเนื้อสัมผัสที่ได้มีทั้งหมด 7 ค่าดังนี้ (ชัยญ์ภรณ์, 2549)

2.6.2.1 *fracturability* คือความเปราะหรือความกรอบของอาหาร เป็นแรงที่จุดยอดแรกของกราฟ ซึ่งทำให้ตัวอย่างแตกในการกดครั้งแรก

2.6.2.2 *hardness* คือความแข็งหรือแรงที่สูงสุดจากการกดครั้งแรก

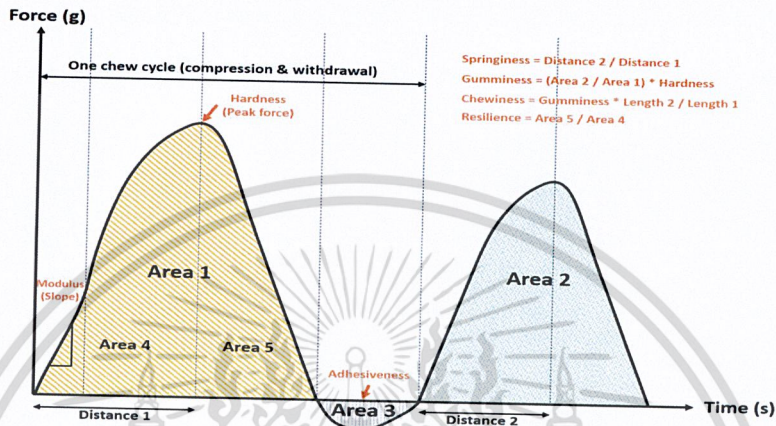
2.6.2.3 *cohesiveness* คือการเกาะติด ความสามารถในการเกาะตัวกันภายในเนื้ออาหาร หาได้จากอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟการกดครั้งที่ 2 กับครั้งที่ 1 ($\text{area 2}/\text{area 1}$)

2.6.2.4 *adhesiveness* คือการเกาะตัวกันของอาหาร แสดงการยึดติดของอาหารกับวัตถุอื่นหรืองานที่ใช้ในการดึงหัววัดออกจากตัวอย่าง คือพื้นที่ใต้กราฟที่เป็นค่าลบในการกดครั้งแรก (area 3)

2.6.2.5 *springiness* คือความสามารถของอาหารในการคืนตัวกลับสู่ภาวะเดิม หลังจากการกดครั้งแรก ซึ่งวัดจากระยะของกราฟในการกดครั้งที่ 2 เริ่มต้นตั้งแต่หัวกดสัมผัสกับตัวอย่าง จนถึงจุดที่ค่าแรงสูงที่สุด *springiness* สามารถอธิบายความยืดหยุ่น (*elasticity*) ของอาหารได้อีกด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2.6 gumminess คือแรงที่ทำให้อาหารกึ่งของแข็งแตกออกจนถึงขั้นพร้อมที่จะกลืนได้จากผลคูณของ hardness กับ cohesiveness

2.6.2.7 chewiness คือแรงที่ใช้ในการบดเคี้ยวอาหาร หาได้จากผลคูณของ gumminess กับ springiness หรือผลคูณของ hardness, cohesiveness และspringiness



ภาพที่ 2.1 กราฟ texture profile analysis

ที่มา: Wee et al. (2018)

2.6 สเปกโทรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด

สเปกโทรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด (near infrared spectroscopy) เป็นคลื่นแสงที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วงย่านใกล้อินฟราเรด ประมาณ 780-2,500 นาโนเมตร (Osborne, 2006) หลักการคือเมื่อส่องแสงไปยังตัวอย่าง พลังงานของคลื่นแสงจะถูกดูดกลืนไว้โดยโมเลกุลของตัวอย่างแล้วมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากสถานะพื้น (ground state) ไปเป็นสถานะกระตุ้น (excited state) ทำให้เกิดการสั่นของพันธะของโมเลกุล ในขณะเดียวกันแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบางส่วนอาจทะลุผ่าน (transmitted) หรือเกิดการสะท้อนกลับ (reflected) สเปกตรัมที่ได้จะแสดงในรูปของค่าการดูดกลืนและความยาวคลื่น ซึ่งปริมาณการดูดกลืนแสงจะเป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert) กล่าวคือพลังงานของคลื่นแสงเมื่อผ่านเข้าไปในตัวอย่าง พลังงานจะถูกดูดกลืนไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง ความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืน โดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีนั้น (Osborne et al., 1993) โดยพันธะแต่ละพันธะในโมเลกุลจะดูดกลืนช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

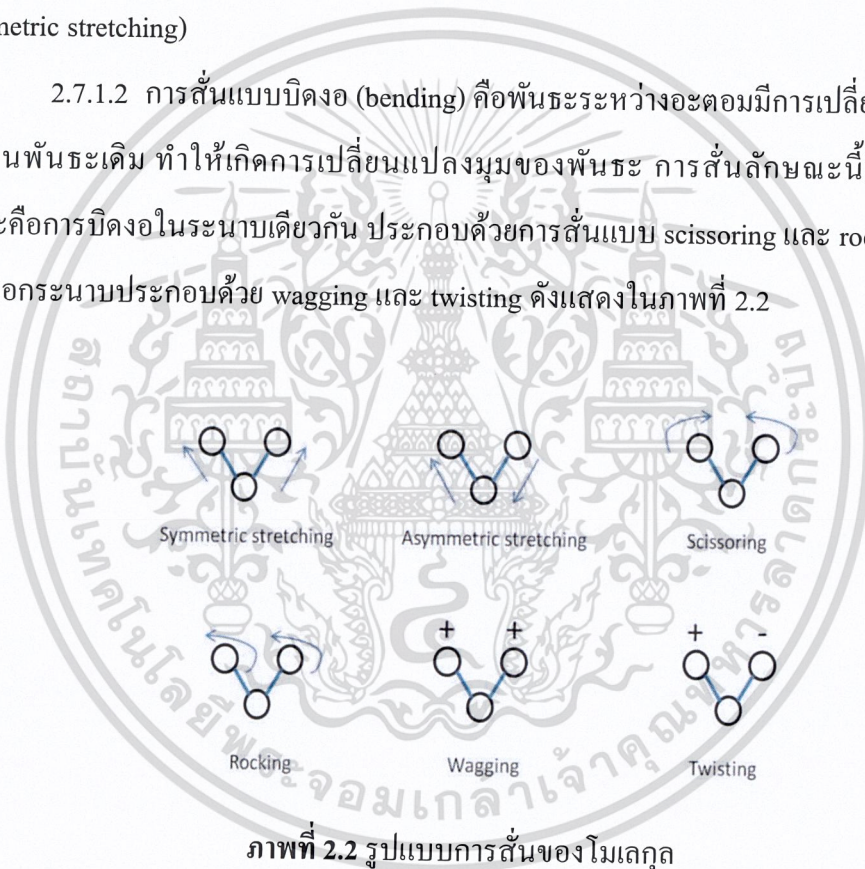
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันธะที่มีการดูดกลืนแสงในช่วง NIR จะมีไฮโดรเจนอะตอมเป็นองค์ประกอบ เช่น O-H พบในน้ำ N-H พบในโปรตีน C-H พบในน้ำมัน (ณรงค์พันธุ์, 2009) ซึ่งเทคนิค NIR สามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณ เช่น ตรวจวัดปริมาณสาร และเชิงคุณภาพ เช่น การจำแนกกลุ่ม

2.7.1 การสั่นของโมเลกุล สามารถจำแนกเป็น 2 รูปแบบ (จิราพร และคณะ, 2560)

2.7.1.1 การสั่นแบบยืดหด (stretching) เป็นการสั่นในแนวแกนพันธะ พันธะระหว่างอะตอมจะยืดออกหรือหดตามแกน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวของพันธะ สามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะคือการยืดหดแบบสมมาตร (symmetric stretching) และการยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching)

2.7.1.2 การสั่นแบบบิดงอ (bending) คือพันธะระหว่างอะตอมมีการเปลี่ยนตำแหน่งไปจากแกนพันธะเดิม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมุมของพันธะ การสั่นลักษณะนี้แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือการบิดงอในระนาบเดียวกัน ประกอบด้วยการสั่นแบบ scissoring และ rocking และการบิดงอนอกระนาบประกอบด้วย wagging และ twisting ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 รูปแบบการสั่นของโมเลกุล

ที่มา: จิราพร และคณะ (2560)

2.7.2 การวัดด้วยเทคนิค NIR สามารถวัดได้หลายแบบ ได้แก่ (สุมาพร, 2545)

2.7.2.1 การวัดแบบการส่องทะลุผ่าน (transmission) สำหรับตัวอย่างที่โปร่งใส โดยวัดปริมาณแสงที่ทะลุผ่านออกมาจากตัวอย่าง

2.7.2.2 การวัดแบบการสะท้อน (reflection) เป็นการวัดแสงที่สะท้อนกลับมาจากตัวอย่าง ใช้สำหรับตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ผง หรือเม็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2.3 การวัดแบบการส่องผ่านสะท้อน (transflection) เป็นการรวมกันของ transmission และ reflection เหมาะสำหรับตัวอย่างที่เป็นของเหลวชั้น กิ่งของแข็ง หรืออิมัลชัน

2.7.2.4 interactance เป็นวิธีการใช้สาย fiber optic เป็นตัวนำแสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุ ไปยังเครื่องตรวจจับ

ในการตรวจวัดด้วยเทคนิค NIR ข้อมูลจะในรูปแบบของสเปกตรัมของค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และความยาวคลื่น (wavelength; nm) เนื่องจากเทคนิค NIR เป็นวิธีการวิเคราะห์ลำดับที่ 2 (secondary method) จึงต้องมีข้อมูลทางวิธีทดสอบมาตรฐานเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิง (Osborne, 2006) โดยจะต้องนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ ทางกายภาพ เคมี หรือจุลินทรีย์ และทำการวัดด้วยเทคนิค NIR จากนั้นข้อมูลสเปกตรัมและค่าจากวิธีมาตรฐานจะถูกนำมาสร้างสมการ และทำการทดสอบเพื่อยืนยันความแม่นยำของสมการ แล้วนำสมการที่ได้ไปทำนายค่าต่างๆ ของตัวอย่างทั้งด้านคุณภาพและปริมาณ เช่น สิ่งแปลกปลอม เชื้อรา สี ความชื้น โปรตีน ไขมัน

2.7 เทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัม

เทคนิคการถ่ายภาพเชิงสเปกตรัม (hyperspectral imaging, HSI) เป็นเทคนิคที่รวมการถ่ายภาพและเทคนิคสเปกโทรสโกปี ซึ่งเทคนิค HSI จะได้ข้อมูลภาพถ่ายและข้อมูลเชิงสเปกตรัม โดยภาพถ่ายจะได้ข้อมูลเป็นภาพถ่าย 3 มิติ เรียกว่า hypercube ประกอบไปด้วยข้อมูลเชิงพื้นที่ 2 มิติ แสดงภาพถ่ายที่มีความกว้างและความยาวเท่ากับจำนวนพิกเซลในแนวแกน X และแกน Y ตามลำดับ และภาพถ่ายในแต่ละความยาวคลื่น (แกน λ) ซึ่งในแต่ละพิกเซลของภาพถ่ายจะมีข้อมูลสเปกตรัมที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา เทคนิค HSI สามารถวิเคราะห์ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพได้ มีการสร้างสมการซึ่งคล้ายกับเทคนิค NIR แต่เทคนิค HSI จะต้องมีการสกัดข้อมูลสเปกตรัมจากตำแหน่งของภาพถ่าย โดยเลือกตำแหน่งที่สนใจ (region of interest, ROI) เพื่อให้ได้สเปกตรัมเฉลี่ยในช่วงความยาวคลื่นของการถ่ายภาพ จากนั้นจึงนำข้อมูลสเปกตรัมที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากวิธีมาตรฐาน เพื่อสร้างสมการทำนาย (นิมมิตรา, 2560)

2.8 การปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัม

ก่อนทำการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมจะมีการนำไปปรับแต่ง (pretreatment) ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ก่อนเพื่อช่วยให้สมการทำนายที่สร้างมีความแม่นยำมากขึ้น และลดความคลาดเคลื่อนจากปัจจัยต่างๆ เช่น ขนาดของอนุภาค อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น (กัญญาพัชร, 2555) ที่มีผลต่อข้อมูลสเปกตรัมให้น้อยลง ซึ่งวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับความนิยมในการใช้ปรับแต่งสเปกตรัมได้แก่

2.9.1 smoothing เป็นวิธีที่ช่วยลดปัญหาของสัญญาณรบกวนแบบสุ่มจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและทำให้สเปกตรัมมีความเรียบมากขึ้น โดยที่ในแต่ละความยาวคลื่นค่าดูดกลืนแสงจะถูกแทนค่าด้วยค่าเฉลี่ยของค่าดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีจุดศูนย์กลางของช่วงความยาวคลื่นตรงกับจุดที่ถูกแทนที่ (อนุพันธ์, 2545)

2.9.2 derivative สามารถแบ่งได้เป็นสองวิธีคืออนุพันธ์อันดับที่หนึ่งและอนุพันธ์อันดับที่สอง ซึ่งวิธีอนุพันธ์จะใช้ในการแก้ไขปัญหาการซ้อนทับกันของพีค (overlapping) และช่วยกำจัดการยกตัวของเส้นสเปกตรัม (base line shift) (Nicolai et al., 2007) วิธีอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งจะเป็นการหาค่าความชันของสเปกตรัม ส่วนวิธีอนุพันธ์อันดับที่สองจะหาการเปลี่ยนแปลงของความชัน ช่วยลดปัญหาที่สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแนวแกน y และแยกพีคที่ซ้อนทับกันให้ออกจากกัน ได้ชัดเจนกว่าอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง แต่เส้นสเปกตรัมจะกลับหัวอยู่ด้านตรงกันข้าม (ศุภวรรณ, 2555)

2.9.3 multiplicative scattering correction (MSC) เป็นการหาค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมทั้งหมดเพื่อลดผลกระทบจากการกระเจิงของแสง (Li et al., 2018) โดยจะใช้ในการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากการวัดแบบการสะท้อนหรือแบบการส่องทะลุผ่านของตัวอย่าง ซึ่งวิธีนี้มีการพัฒนาเพื่อลดผลรบกวนจากการกระเจิงของแสง (Varmuza and Filzmoser, 2009)

2.9.4 standard normal variate (SNV) มีความคล้ายกับวิธี MSC คือใช้ลดผลที่เกิดจากการกระเจิงของแสง แต่มีความแตกต่างกันคือจะไม่ใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลสเปกตรัมจากสเปกตรัมทั้งหมด ใช้เพียงข้อมูลสเปกตรัมแต่ละสเปกตรัมเท่านั้น (Huang et al., 2018)

2.9 การวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม

การวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัม ข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มสร้างสมการทำนาย (calibration set) และกลุ่มทดสอบความแม่นยำของสมการ (prediction set) ซึ่งจำนวนตัวอย่างข้อมูลของกลุ่มสร้างสมการทำนายจะต้องมีจำนวนตัวอย่างมากกว่ากลุ่มทดสอบสมการ (Teerachaichayut and Ho, 2017) โดยขั้นตอนการสร้างสมการทำนายจะมีการนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการสร้างสมการทำนาย ได้แก่ การวิเคราะห์การถดถอยแบบ multiple linear regression (MLR) เป็นวิธีการทางสถิติในหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม โดยอาศัยตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวในการทำนายตัวแปรตาม (Peter et al., 2019) การวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้ส่วนประกอบหลัก หรือ principal components regression (PCR) เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีการสร้างส่วนประกอบหรือตัวแปรใหม่ หรือที่เรียกว่า principal components analysis (PCA) จากกลุ่มของตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กัน แล้วจึงนำมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม และวิธีการวิเคราะห์การถดถอยแบบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (partial least squares, PLS) จะมีวิธีการคล้ายกับการวิเคราะห์การถดถอยส่วนประกอบหลักคือมีการสร้างตัวแปรใหม่จากกลุ่มตัวแปรอิสระ วิธีนี้ใช้สำหรับการวิเคราะห์หลายตัวแปรเพื่อสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและกลุ่มตัวแปรอิสระโดยอาศัยตัวแปรใหม่ที่สร้างขึ้น (นพมาศ และกิดาการ, 2560)

2.10 ค่าผลทางสถิติที่ใช้พิจารณาในการสร้างสมการ

ในขั้นตอนการสร้างสมการจะทำการเลือกสมการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนาย สามารถพิจารณาได้จากค่าทางสถิติต่างๆ ดังนี้

2.11.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient; R) เป็นค่าที่แสดงระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ถ้าค่า R เท่ากับ +1 จะหมายถึงมีความสัมพันธ์เชิงบวก ส่วนค่า R จะเท่ากับ -1 หมายถึงมีความสัมพันธ์เชิงลบ (Sharma, 2005) การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์คำนวณได้ตามสูตร 2.3 (Asuero, 2006) และสามารถแปลความหมายของค่า R ได้ตามตารางที่ 2.4

$$R = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.3)$$

หมายเหตุ \bar{x} = ค่าเฉลี่ยของตัวแปร x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ \bar{y} = ค่าเฉลี่ยของตัวแปร y เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 การแปลความหมายของค่า R

R	ความหมาย
น้อยกว่าเท่ากับ 0.5	ไม่สามารถใช้งานได้ใน NIR calibration
0.51-0.70	ความสัมพันธ์ไม่ดี ควรศึกษาหาเหตุผล
0.71-0.80	ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกแบบหยาบมากถึงหยาบ
0.81-0.90	ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกและประมาณค่าแบบหยาบ
0.91-0.95	ใช้งานได้ด้วยความระมัดระวัง สำหรับการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย
0.96-0.98	ใช้งานได้สำหรับการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
มากกว่าเท่ากับ 0.99	ดีเยี่ยม ใช้ได้ทุกการประยุกต์ใช้

ที่มา: Williams (2019)

2.11.2 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการสร้างสมการ (standard error of calibration, SEC) เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างค่าที่วัดได้จริงด้วยวิธีมาตรฐานอ้างอิงและค่าที่ทำนายได้ของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการ (Mark and Workman, 1991) ส่วนค่าเฉลี่ยกำลังสองของการสร้างสมการ (root mean square error of the calibration, RMSEC) เป็นการรวมค่า SEC และ bias สามารถหาค่า root mean square error (RMSE) ได้จากสูตร 2.4 (Williams, 2019)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x_n - y_n)^2}{N}} \quad (2.4)$$

หมายเหตุ x_n = ข้อมูลอ้างอิงตั้งแต่ 1 ถึง N

y_n = ข้อมูลทำนายตั้งแต่ 1 ถึง N

2.11.3 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการทำนาย (standard error of prediction, SEP) เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างค่าจริงที่ได้จากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงและค่าที่ทำนายได้ของกลุ่มที่ใช้ทดสอบ (Mark and Workman, 1991) เมื่อรวมกับค่า bias จะได้เป็นค่าเฉลี่ยกำลังสองของการทำนาย (root mean square of the prediction, RMSEP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.4 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการ cross validation (standard error of cross validation, SECV) เป็นค่าที่เหมือนกับค่า SEP โดยการ cross validation เป็นการทดสอบความแม่นยำของสมการที่สร้างขึ้น โดยใช้ข้อมูลตัวอย่างกลุ่มสร้างสมการมาทดสอบ (Mark and Workman, 1991)

2.11.5 ค่าความคลาดเคลื่อน (bias) คือความแตกต่างระหว่างข้อมูลสองกลุ่มคือค่าที่ทำนายได้และค่าจริงที่วัดได้ (Mark and Workman, 1991)

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคนิควิเคราะห์สเปกโทรสโกปีสามารถใช้ตรวจสอบและวิเคราะห์ด้านกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะดังต่อไปนี้

2.12.1 การตรวจวิเคราะห์อาหารเชิงคุณภาพ (qualification)

Yuan และคณะ (2011) ได้คัดแยก sodium hydroxymethanesulfonate ในแป้งสาเก 300 ตัวอย่าง มีการตรวจสอบว่าตัวอย่างไม่มีสาร sodium hydroxymethanesulfonate จากนั้นผสม sodium hydroxymethanesulfonate (ความบริสุทธิ์มากกว่า 99%) แบบสุ่ม 150 ตัวอย่าง ในปริมาณแตกต่างกัน แล้วทำการวัดด้วยเทคนิค NIR spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 12,500-4,000 เซนติเมตร⁻¹ และวิเคราะห์ด้วยวิธี partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) และ least squares support vector machine (LS-SVM) มีค่าความแม่นยำในการคัดแยกเท่ากับ 90% และ 100% ตามลำดับ

Brito และคณะ (2013) ได้คัดแยกซีเรียลบาร์สามประเภทคือ แบบปกติ แบบไลท์ (เมื่อปริมาณแคลอรีหรือสารอาหารน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ทั่วไปอย่างน้อย 25%) และแบบไดเอต (ไม่มีซูโครสหรือกลูโคส) โดยใช้ NIR spectroscopy และทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี linear discriminant analysis (LDA)/successive projection algorithm (SPA), linear discriminant analysis (LDA)/Genetic Algorithm (GA) และ linear discriminant analysis (LDA)/stepwise (SW) ตัวอย่างทั้งหมด (ปกติ 44 ตัวอย่าง, ไลท์ 42 ตัวอย่าง และไดเอต 35 ตัวอย่าง) นำมาบดและร่อน แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนพลังงานแสงที่ความยาวคลื่น 10,000-4,000 เซนติเมตร⁻¹ จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า วิธี LDA/SW มีความแม่นยำในการทำนาย 61%, วิธี LDA/SPA 81% และวิธี LDA/GA

90% แสดงให้เห็นว่า NIR spectroscopy มีความเป็นไปได้ในการคัดแยกซีเรียลบาร์ทั้งสามประเภทออกจากกัน

Shao และคณะ (2018) ได้คัดแยกการปลอมปนในแป้งข้างฟางด้วย hyperspectral imaging ที่ความยาวคลื่น 865-1,711 นาโนเมตร ตัวอย่าง 4 กลุ่มได้แก่ แป้งข้างฟาง, แป้งถั่วเหลือง, แป้งข้าวฟ่างที่ผสมแป้งถั่วเหลือง 15% และแป้งข้าวฟ่างที่ผสมแป้งถั่วเหลือง 25% กลุ่มละ 180 ตัวอย่างนำไปวิเคราะห์โดย hyperspectral imaging วัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 865-1,711 นาโนเมตร สร้างสมการด้วยวิธี least squares support vector machine (LS-SVM) โดยใช้ข้อมูลการดูดกลืนของความยาวคลื่นทั้งหมด และบางความยาวคลื่นเลือกจากการใช้วิธี principal component analysis (PCA) (935, 968, 1,011, 1,117, 1,207, 1,297, 1,416, 1,567 นาโนเมตร), successive projection algorithm (SPA) (1,084, 1,130, 1,207, 1,230, 1,330, 1,426, 1,552 นาโนเมตร), competitive adaptive reweighted sampling (CARS) (1,184, 1,204, 1,323, 1,393, 1,420, 1,479, 1,479, 1,556 นาโนเมตร) ในการสร้างสมการพบว่าสมการที่ได้จากการใช้ความยาวคลื่นทั้งหมดและวิธี CARS มีความแม่นยำในการคัดแยกการปลอมปนของแป้งข้าวฟ่าง 100%

2.12.2 การตรวจวิเคราะห์อาหารเชิงปริมาณ (quantification)

Bedini และคณะ (2013) ได้ทำนายปริมาณของสาร xanthines และ polyphenols ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดรสขมในบิสกิต 11 ประเภท ด้วยเทคนิค Fourier transform-near infrared (FT-NIR) spectroscopy ตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์สารกลุ่ม xanthines และ polyphenols ด้วยวิธี liquid chromatography (LC)-mass spectrometry (MS) จากนั้นนำมาบดละเอียดแล้ววัดด้วย FT-NIR spectroscopy ที่ 10,000-4,000 เซนติเมตร⁻¹ พบว่าสมการจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLSR และปรับแต่งด้วยวิธี first derivative มีค่า R^2 ของ xanthines เท่ากับ 0.97 และ R^2 ของ polyphenols เท่ากับ 0.96 เมื่อนำสมการไปทดสอบ มีค่า R^2 การทำนายของ xanthines และ polyphenols เท่ากับ 0.96 สมการทำนายที่ได้จากเทคนิค NIR spectroscopy สามารถใช้ในการทำนายปริมาณสาร xanthines และ polyphenols ได้

Morsy และคณะ (2014) ได้ทำนายเชื้อราบนขนมปังโดยใช้ NIR hyperspectral imaging ตัวอย่างขนมปังหั่นสไลด์ที่มีความหนา 1 เซนติเมตร เก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ 20 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70% เป็นระยะเวลา 7 วัน นำตัวอย่างในแต่ละวันมาเสกนด้วยเทคนิค NIR hyperspectral imaging ที่ 900-1,700 นาโนเมตร จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อว่าเพื่อเป็นค่าอ้างอิง พบว่าสมการทำนายปริมาณเชื้อราโดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมของความยาวคลื่นทั้งหมดได้ค่า R^2_c เท่ากับ 0.97 และ SEC เท่ากับ 0.49 log cfu/เซนติเมตร⁻² และเมื่อนำไปทดสอบความแม่นยำพบว่า R^2_p เท่ากับ 0.94 และ SEP เท่ากับ 0.65 log cfu/เซนติเมตร⁻²

Achata และคณะ (2015) ได้ทำนายปริมาณน้ำและวอเตอร์แอกทิวิตีในกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำ ได้แก่ เม็ดกาแฟสำเร็จรูป เวเฟอร์ และถั่วเหลืองออร์แกนิก โดยกาแฟและเวเฟอร์จะนำไปชั่งน้ำหนักและบรรจุใน โถปิดสนิทที่มีสารละลายอิ่มตัวของ NaCl เก็บเป็นระยะเวลาดังนี้ กาแฟเก็บเป็นระยะเวลา 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 และ 5 ชั่วโมง ส่วนเวเฟอร์เก็บ 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง สำหรับถั่วเหลืองทำการชั่งน้ำหนักแล้วแบ่งเป็น 6 กลุ่ม กลุ่มละ 20 เมล็ด แช่น้ำ 10 มิลลิลิตร เป็นเวลา 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที หลังจากนั้นซับให้แห้งและทิ้งไว้เป็นเวลา 10-15 นาทีก่อนวัดน้ำหนักสุดท้าย แล้วนำไปวัดด้วยเทคนิค NIR hyperspectral imaging ที่ความยาวคลื่น 950-1664 นาโนเมตร แล้ววัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตีและปริมาณความชื้น ทำการปรับแต่งข้อมูลวิธี standard normal variate (SNV), multiplicative scatter correction (MSC), first derivative และ second derivative แล้วสร้างสมการด้วยวิธี PLSR พบว่าตัวอย่างกาแฟได้สมการทำนายปริมาณความชื้นที่ปรับแต่งด้วย MSC มีค่า R^2 ที่สูงถึง 0.99 RMSEP เท่ากับ 0.1% และสมการทำนายวอเตอร์แอกทิวิตีปรับแต่งด้วย SNV มีค่า R^2 เท่ากับ 0.72 RMSEP เท่ากับ 0.038 ตัวอย่างเวเฟอร์ได้สมการทำนายความชื้นที่ปรับแต่งโดยใช้วิธี MSC หรือ SNV ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.98 RMSEP เท่ากับ 0.4% ที่เหมือนกัน สมการทำนายวอเตอร์แอกทิวิตีไม่มีการปรับแต่งข้อมูล มีค่า R^2 เท่ากับ 0.97 RMSEP เท่ากับ 0.058 ตัวอย่างถั่วเหลืองได้สมการทำนายความชื้นที่ไม่ปรับแต่งข้อมูล ได้ค่า R^2 0.95 RMSEP เท่ากับ 0.3% สมการทำนายวอเตอร์แอกทิวิตีใช้การปรับแต่งวิธี MSC หรือ SNV ได้ค่า R^2 และ RMSEP ที่เหมือนกันคือ 0.91 และ 0.029 ตามลำดับ

Chakravartula และคณะ (2019) ทำการวิเคราะห์ความชื้นและลักษณะเนื้อสัมผัสจากสารเคลือบบริโกลได้บนขนมปังระหว่างการเก็บรักษา โดยใช้ NIR spectroscopy ตัวอย่างจะถูกนำมาเคลือบสารเคลือบ 1 ชั้น และ 2 ชั้น (ห่างจากเคลือบชั้นแรก 3 นาที) ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที และ 35 นาที ตามลำดับ เก็บรักษาที่ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ไม่มีการบรรจุในบรรจุภัณฑ์ นำตัวอย่างที่เก็บรักษา 0, 2, 4, 6, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง มาวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป (%) ปริมาณความชื้น และลักษณะเนื้อสัมผัส texture profile analysis วัดการดูดกลืนด้วยเทคนิค NIR spectroscopy ช่วงความยาวคลื่น 800-2,500 นาโนเมตร ทำการสร้างสมการด้วยวิธี PLSR พบว่า สมการทำนายความชื้นที่การค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งบน ล่างและกลางของขนมปังที่ดีที่สุดคือ ขนมปังที่เคลือบด้วยสารเคลือบ 1 ชั้น มีค่า R^2 เท่ากับ 0.938, 0.947, 0.946 และค่า root mean square error test set (RMSET) เท่ากับ 0.9% , 0.85% , 1.52% ส่วนการทำนายเนื้อสัมผัสของขนมปังที่เคลือบสารเคลือบ 2 ชั้นมีความแม่นยำมากกว่าขนมปังที่เคลือบสารเคลือบ 1 ชั้น โดยค่า hardness มีค่า R^2 เท่ากับ 0.915 ค่า RMSET เท่ากับ 10.7 นิวตัน ค่า chewiness มีค่า R^2 และ RMSET เท่ากับ 0.892 และ 3.7 นิวตัน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเทคนิค NIR spectroscopy มีความสามารถที่จะทำนายความชื้นและลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ตัวอย่างเค้กมาม่อน

เค้กมาม่อนที่ผลิตจากร้านมาม่อนเบเกอรี่แห่งหนึ่ง (ลาดพร้าว, กรุงเทพฯ) ในรุ่นการผลิตเดียวกันจำนวน 250 ชิ้น น้ำหนักประมาณ 35-45 กรัมต่อชิ้น บรรจุในกล่องพลาสติกใสกล่องละชิ้น

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่อง NIR hyperspectral imaging (Specim Fx17e, Spectral Imaging Ltd, Oulu, Finland) (ภาพภาคผนวกที่ ก.1)

3.2.2 เครื่องวัดความชื้นแอกทีวิตี (Aqualab 4TE, Decagon Device, Inc., Pullman, WA, USA) (ภาพภาคผนวกที่ ก.2)

3.2.3 เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (texture analyzer รุ่น TA.XT Plus, Stable Micro Systems, Surrey, UK) (ภาพภาคผนวกที่ ก.3)

3.2.4 ซอฟต์แวร์ UmBio Evince hyperspectral image analysis software (Prediktera Evince, version 2.7.5, Sweden)

3.2.5 ซอฟต์แวร์ Unscrambler software (version 9.8, CAMO, Osla, Norway)

3.2.6 ซอฟต์แวร์ SPSS program (IBM SPSS Statistics version 20, America)

3.2.7 เครื่องนึ่งทำลายเชื้อ (autoclave)

3.2.8 เครื่องตีแป้ง (stomacher)

3.2.9 ตู้บ่ม (incubator)

3.2.10 เครื่องชั่ง (Balance)

3.2.11 ตะเกียงแอลกอฮอล์

3.2.12 จานเพาะเชื้อ

3.2.13 ปีเปต

เอกสารนี้ 3.2.14 แสงแก้วสามเหลี่ยม การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.15 กล่องพลาสติกใส

3.3 อาหารเลี้ยงเชื้อและสารเคมี

3.3.1 อาหารเลี้ยงเชื้อ

3.3.1.1 dichloran rose bengal chloramphenicol (DRBC) agar (Himedia, USA)

3.3.1.2 lysozyme broth (Himedia, USA)

3.3.1.3 mannitol egg yolk polymyxin (MYP) agar (Himedia, USA)

3.3.1.4 modified VP medium (Himedia, USA)

3.3.1.5 motility medium (Himedia, USA)

3.3.1.6 nitrate broth (Himedia, USA)

3.3.1.7 nutrient agar (Himedia, USA)

3.3.1.8 plate count agar (PCA) (Himedia, USA)

3.3.1.9 phenol red glucose broth (Himedia, USA)

3.3.1.10 tyrosine agar (Himedia, USA)

3.3.1.11 trypticase soy-sheep blood agar (Himedia, USA)

3.3.2 สารเคมีและเอนไซม์

3.3.2.1 enzymatic digest of casein (Himedia, USA)

3.3.2.2 nitrate detection reagents (Becton Dickinson USA)

3.3.2.3 polymyxin B solution, 0.1% (Himedia, USA)

3.3.2.4 potassium dihydrogen phosphate (KH₂PO₄) (Merck, Germany)

3.3.2.5 sodium chloride (NaCl) (Merck, Germany)

3.3.2.6 sodium hydroxide (NaOH) (Merck, Germany)

3.3.2.7 TB carbofuchsin ZN stain (Difco, USA)

3.3.2.8 Voges-Proskauer test reagents (Becton Dickinson USA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางจุลินทรีย์ของเค็กมาม่อนระหว่างการเก็บรักษา

3.4.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

เค็กมาม่อนที่ผลิตจากร้านมาม่อนเบเกอรี่แห่งหนึ่ง (ลาดพร้าว, กรุงเทพฯ) ในรุ่นการผลิตเดียวกันจำนวน 50 ชิ้น น้ำหนักประมาณ 35-45 กรัมต่อชิ้น บรรจุในกล่องพลาสติกโพลีสไตรีนใส (oriented polystyrene) กล่องละชิ้น เก็บรักษาเป็นเวลา 8 วัน ที่อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $60 \pm 5\%$ สุ่มตัวอย่างจำนวนวันละ 10 ชิ้น บรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิท ขนส่งด้วยรถยนต์นำไปวิเคราะห์จุลินทรีย์ที่ห้องปฏิบัติการทางจุลชีววิทยา โดยวันแรกทำการตรวจวิเคราะห์นับเป็นวันที่ 1 และตรวจวิเคราะห์ทุก 24 ชั่วโมงจนครบ 5 วัน

3.4.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ตามวิธี bacteriological analytical manual chapter 3 (FDA, 2001)

นำตัวอย่าง 50 กรัม ทำให้เจือจางด้วยสารละลาย Butterfield's phosphate-buffered ให้ได้ระดับเจือจาง 10^{-1} - 10^{-3} คูดตัวอย่างที่แต่ละระดับความเจือจางใส่ลงในจานเพาะเชื้อ เทอาหารเลี้ยงเชื้อ plate count agar (PCA) หมุนงานให้ผสมเข้ากัน ทิ้งให้อาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง บ่มที่ 35 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง นับปริมาณเชื้อในช่วง 25-250 โคโลนี รายงานผลเป็น cfu/กรัม ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

3.4.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณปริมาณยีสต์และรา ตามวิธี bacteriological analytical manual chapter 18 (FDA, 2001)

นำตัวอย่าง 25-50 กรัม ทำให้เจือจางด้วยสารละลายเปปโตน 0.1% ให้ได้ระดับเจือจาง 10^{-1} - 10^{-3} คูดตัวอย่างที่แต่ละระดับความเจือจางใส่ลงในจานอาหารเลี้ยงเชื้อ DRBC agar เกลี่ยให้ทั่วจนผิวหน้าอาหารแห้ง บ่มที่ 25 องศาเซลเซียส 5 วัน นับปริมาณเชื้อในช่วง 10-150 โคโลนี รายงานผลเป็น cfu/กรัม ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

3.4.1.4 การวิเคราะห์ปริมาณ *Bacillus cereus* ตามวิธี bacteriological analytical manual chapter 14 (FDA, 2001)

นำตัวอย่าง 50 กรัม ทำให้เจือจางด้วยสารละลาย Butterfield's phosphate-buffered ให้ได้ระดับเจือจาง 10^{-1} - 10^{-3} คูดตัวอย่างที่แต่ละระดับความเจือจาง 0.1 มิลลิลิตร ลงบน MYP agar เกลี่ยให้ทั่วจนผิวหน้าอาหารแห้ง 30 องศาเซลเซียส 18-24 ชั่วโมง นับปริมาณเชื้อในช่วง 15-150 โคโลนี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุ่มเลือกโคโลนีสีชมพูและมีสีขาวขุ่นล้อมรอบ อย่างน้อย 5 โคโลนี เจ็ยเชื้อลงบน nutrient agar slant นำไปบ่มที่ 30 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง ทำการทดสอบยืนยัน โดยทำการย้อม แกรม, การย่อย glucose, tyrosine และเมื่อดัดแดง, การสร้าง nitrite, acetyl methyl carbinol, rhizoid และ protein toxin crystals, การเจริญในอาหารที่มี lysozyme, การเคลื่อนที่ของเชื้อ รายงานผลเป็น cfu/กรัม ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

นำผลเชื้อทั้งสามกลุ่มที่วิเคราะห์ได้มาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานขนมอบของ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ฉบับที่ 3 พ.ศ.2560 (สำนักคุณภาพและความปลอดภัยอาหาร, 2560) เพื่อกำหนดอายุเก็บก้าม่อน

3.4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอกทีวิตีและค่าความแข็งของเก็บก้าม่อนระหว่างการเก็บรักษา และการทำนายค่าวอเตอร์แอกทีวิตี ค่าความแข็ง อายุของเก็บก้าม่อน และคัดแยกอายุเก็บก้าม่อนโดยใช้การวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด

3.4.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

เก็บก้าม่อนที่ผลิตจากร้านมาม่อนเบเกอรี่ในรุ่นการผลิตเดียวกัน จำนวน 200 ชิ้น น้ำหนักประมาณ 35-45 กรัมต่อชิ้น บรรจุในกล่องพลาสติกโพลีเอทิลีนไทรไนไคกล่องละชิ้น เก็บรักษาเป็นเวลา 8 วัน ที่อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $60 \pm 5\%$ โดยตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์แต่ละวันคือ วันที่ 1-4 ใช้ตัวอย่างวันละ 40 ชิ้น วันที่ 5-8 ใช้ตัวอย่างวันละ 10 ชิ้น

3.4.2.2 การวัดการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค NIR hyperspectral imaging

นำตัวอย่างแต่ละวันมาวัดสเปกตรัมที่ละชิ้นด้วยเครื่อง NIR hyperspectral imaging (Specim Fx17e, Spectral Imaging Ltd, Oulu, Finland) (ภาพภาคผนวกที่ ก.4) ทำการวัดแบบสะท้อนกลับที่ความยาวคลื่น 935-1720 นาโนเมตร จำนวนความยาวคลื่น 224 ความยาวคลื่น กำหนดความความเร็วของถาดวางตัวอย่าง 20 มิลลิเมตร/วินาที ความเร็วในการสแกน 22.97 มิลลิเมตร/วินาที ในแต่ละครั้งที่สแกนตัวอย่างจะมีภาพอ้างอิง 2 ภาพคือ ภาพอ้างอิงสีดำจากการปิดไฟและปิดเลนส์กล้องด้วยฝาสีดำ ภาพอ้างอิงสีขาวจากแท่ง spectralon สีขาว จากนั้นนำภาพถ่ายการดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรดของตัวอย่างมาทำการเลือกบริเวณที่สนใจ (region of interest, ROI) โดยการตัดภาพพื้นหลังออก ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป UmBio Evinced hyperspectral image analysis software (Prediktera Evinced, version 2.7.5, Sweden) จะได้ข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.3 การวัดค่าความแข็ง

ทำการวัดความแข็งของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (texture analyzer รุ่น TA.XT Plus, Stable Micro systems, Surrey, UK) ตัดด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างออกให้มีความสูงที่ 2.5 เซนติเมตร โดยการทดสอบแบบ TPA ใช้หัววัดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร (P/75) ตัวอย่างถูกกดลง 50% ของความสูงเริ่มต้น ความเร็วในการกดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร/วินาที (Martínez-Cervera et al., 2013) รายงานผลเป็นค่าความแข็ง (hardness)

3.4.2.4 การวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี

นำตัวอย่างบดละเอียดประมาณ 2 กรัม แล้วนำไปใส่ในภาชนะบรรจุ นำไปวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตีด้วยเครื่องวัดวอเตอร์แอกทิวิตี (Aqualab 4TE, Decagon Device, Inc., Pullman, WA, USA) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (สิริพร และคณะ, 2560) ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

วิเคราะห์ผลการทดลองข้อ 3.4.1.2-3.4.1.4 และ 3.4.2.3-3.4.2.4 ที่มีการวางแผนการทดลองแบบวางแผนการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) นำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติแบบ ANOVA (analysis of variance) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test โดยใช้โปรแกรม SPSS (IBM SPSS Statistics version 20, America)

3.4.2.5 การสร้างสมการทำนายเชิงปริมาณ

1) สมการทำนายค่าวอเตอร์แอกทิวิตี

แบ่งกลุ่มข้อมูลของตัวอย่างบนพื้นฐานของค่าวอเตอร์แอกทิวิตีออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสร้างสมการ (calibration set) สำหรับสร้างสมการ จำนวนไม่เกิน 70% ของข้อมูลทั้งหมด และกลุ่มทดสอบสมการ (prediction set) จำนวนไม่ต่ำกว่า 30% ของข้อมูลทั้งหมด ซึ่งข้อมูลกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการจะต้องมีค่าครอบคลุมทั้งค่าสูงสุดและต่ำสุด จากนั้นนำข้อมูลสเปกตรัมของกลุ่ม calibration มาปรับแต่งด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ smoothing, first derivative, second derivative, multiplicative scatter correction (MSC) และ standard normal variate transformation (SNV) แล้วสร้างสมการหาความสัมพันธ์กับค่าได้จากการวัดวิธีมาตรฐาน โดยใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติสำเร็จรูป Unscrambler software (version 9.8, CAMO, Osla, Norway) และทดสอบประสิทธิภาพของสมการ โดยวิธี cross validation คัดเลือกสมการที่ดีที่สุดโดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R) ที่มีค่าสูงสุด และค่า root mean square errors of cross validation (RMSECV) ที่ต่ำสุด จากนั้นนำสมการที่ได้มาทำนายกลุ่มทดสอบสมการ เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการ แสดงค่า

เอ็กสเปนดิบเอนซ์ของข้อมูล และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R) และค่า root mean square errors of prediction (RMSEP)

2) สมการทำนายค่าความแข็ง

แบ่งกลุ่มข้อมูลของตัวอย่างบนพื้นฐานของค่าความแข็งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสร้างสมการจำนวน 70% และกลุ่มทดสอบสมการ จำนวน 30% ซึ่งข้อมูลกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการจะต้องมีค่าครอบคลุมทั้งค่าสูงสุดและต่ำสุด จากนั้นข้อมูลของกลุ่มสร้างสมการจะนำมาปรับแต่งด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ smoothing, first derivative, second derivative, multiplicative scatter correction (MSC) และ standard normal variate transformation (SNV) แล้วสร้างสมการหาความสัมพันธ์กับค่าได้จากการวัดวิธีมาตรฐาน โดยใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Unscrambler software (version 9.8, CAMO, Osla, Norway) และทดสอบประสิทธิภาพของสมการ โดยวิธี cross validation คัดเลือกสมการที่ดีที่สุดโดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R) ที่มีค่าสูงสุด และค่า root mean square errors of cross validation (RMSECV) ที่ต่ำสุด จากนั้นนำสมการที่ได้มาทดสอบในกลุ่มสำหรับทดสอบสมการเพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการ แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R) และค่า root mean square errors of prediction (RMSEP)

3) สมการทำนายอายุ

แบ่งกลุ่มข้อมูลของตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม calibration สำหรับสร้างสมการจำนวน 70% และกลุ่ม prediction สำหรับทดสอบสมการ จำนวน 30% ซึ่งในแต่ละกลุ่มข้อมูลจะต้องมีค่าครอบคลุมทั้งค่าสูงสุดและต่ำสุด จากนั้นปรับแต่งข้อมูลสเปกตรากลุ่ม calibration ด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ smoothing, first derivative, second derivative, multiplicative scatter correction (MSC) และ standard normal variate transformation (SNV) แล้วสร้างสมการหาความสัมพันธ์โดยใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) ด้วยโปรแกรม Unscrambler software (version 9.8, CAMO, Osla, Norway) และทดสอบประสิทธิภาพของสมการโดยวิธี cross validation คัดเลือกสมการที่ดีที่สุดโดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R) ที่มีค่าสูงสุด และค่า root mean square errors of cross validation (RMSECV) ที่ต่ำสุด จากนั้นนำสมการที่ได้มาทดสอบความถูกต้องของการทำนายกับกลุ่ม prediction

3.4.2.6 การสร้างสมการเชิงคุณภาพ

จากข้อมูลตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการทำนายเชิงปริมาณ นำตัวอย่างมาแบ่งกลุ่มออกเป็นสองกลุ่มคือ เค้กปกติที่ไม่หมดอายุและเค้กที่หมดอายุ โดยใช้ผลการวิเคราะห์จูลินทรีย์เป็นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่มตัวอย่างที่ไม่หมดอายุและหมดอายุ แล้วทำการกำหนดให้เค้กปกติที่ไม่หมดอายุคือ 0 และเค้กที่หมดอายุคือ 1 แล้วทำการสุ่มแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสร้างสมการมีจำนวนไม่เกิน 70% ของข้อมูล และกลุ่มทดสอบสมการมีจำนวนไม่ต่ำกว่า 30% ของข้อมูล กลุ่มข้อมูลจะต้องมีการกระจายครอบคลุมเท่ากัน แล้วปรับแต่งสเปกตร้าข้อมูลกลุ่ม calibration ด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ smoothing, first derivative, second derivative, multiplicative scatter correction (MSC) และ standard normal variate transformation (SNV) ทำการสร้างสมการโดยใช้วิธี partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) และวิธี cross validation ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Unscrambler software (version 9.8, CAMO, Osla, Norwa) จากนั้นเลือกสมการที่ดีที่สุดพิจารณาค่าร้อยละของความแม่นยำ (percent of total accuracy) ที่สูงสุด โดยมีเกณฑ์กำหนดอยู่ที่ 0.5 หากค่าการทำนายเค้กปกติที่ไม่หมดอายุได้ค่าน้อยกว่าเท่ากับ 0.5 คือทำนายถูก แต่ถ้าทำนายได้ค่ามากกว่า 0.5 คือทำนายผิด และในการทำนายเค้กหมดอายุ ถ้าหากค่าที่ได้มากกว่า 0.5 จะทำนายถูก แต่ถ้าทำนายได้น้อยกว่า 0.5 จะทำนายผิด แล้วนำไปทดสอบความแม่นยำของสมการในตัวอย่างกลุ่มทดสอบสมการ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางจุลินทรีย์ของเค้ก

การตรวจวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด, *Bacillus cereus*, ยีสต์และรา เพื่อกำหนดอายุการเก็บรักษาของเค้ก (ตารางที่ 4.1) พบว่าตัวอย่างวันที่ 1 ตรวจไม่พบยีสต์และรา วันที่ 2 พบการเจริญของรา $1.15 \log \text{ cfu/กรัม}$ และในวันที่ 4 สามารถมองเห็นเส้นใยราสีขาวขนาดเล็กที่ผิวหน้าของเค้กซึ่งอาจเป็นเส้นใยของ *Penicillium sp.*, *Aspergillus sp.* ปกติขั้นตอนการอบให้ความร้อนในระดับที่สามารถฆ่าเชื้อยีสต์และราได้ แต่จะมีการปนเปื้อนกลับในผลิตภัณฑ์ได้จากอากาศ อุปกรณ์เครื่องมือที่สัมผัส (Saranraj and Geetha, 2012) และการตรวจวิเคราะห์เชื้อ *Bacillus cereus* พบเชื้อ *Bacillus cereus* ในตัวอย่างเค้ก เนื่องจากโดยปกติแล้วสามารถพบเอนโดสปอร์ของ *Bacillus sp.* ได้ในแป้ง และเอนโดสปอร์ทนต่อความร้อนและสามารถอยู่รอดได้ในระหว่างกระบวนการอบ (Rosenkvist and Hansen, 1995) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าวันที่ 1-5 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และ *Bacillus cereus* มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์พบว่าการเจริญเพิ่มจำนวนขึ้นในทุกวันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ได้แก่ ค่าอุณหภูมิที่ต่ำ อุณหภูมิในการเก็บรักษา สารอาหารในเค้ก เป็นต้น (Grundy, 1996) จากเกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของอาหารและภาชนะสัมผัสอาหาร ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2560) ของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ (สำนักคุณภาพและความปลอดภัยอาหาร, 2560) ขนมอบที่ไม่มีไส้ กำหนดจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด น้อยกว่า $1 \times 10^4 \text{ cfu/กรัม}$ *Bacillus cereus* น้อยกว่า 100 cfu/กรัม และจำนวนยีสต์และรา น้อยกว่า 100 cfu/กรัม จากผลการวิเคราะห์พบว่าในวันที่ 4 จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ มีจำนวนเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดตามเกณฑ์ของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ดังนั้นเค้กมีอายุเก็บรักษาได้ 3 วัน และวันหมดอายุในวันที่ 4

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์จุลินทรีย์ทั้งหมด, ยีสต์, รา และ *Bacillus cereus* ของเค้กที่อุณหภูมิ 24-26 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 วัน

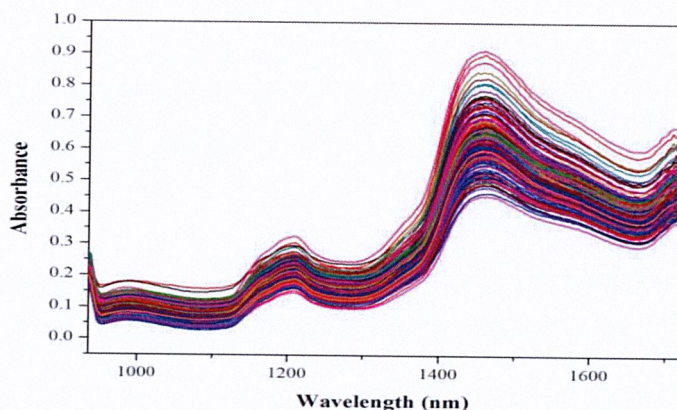
วันที่เก็บรักษา	เชื้อจุลินทรีย์ (log cfu/กรัม)			
	จุลินทรีย์ทั้งหมด	ยีสต์	รา	<i>Bacillus cereus</i>
วันที่ 1	1.90±0.05 ^a	ND	ND	1.15±0.15 ^a
วันที่ 2	2.60±0.02 ^b	ND	1.15±0.15 ^a	1.54±0.06 ^b
วันที่ 3	3.57±0.02 ^c	1.39±0.09 ^a	1.54±0.06 ^b	1.90±0.05 ^c
วันที่ 4	4.34±0.04 ^d	1.69±0.09 ^a	1.84±0.06 ^b	2.81±0.03 ^d
วันที่ 5	5.28±0.05 ^e	2.83±0.02 ^b	2.90±0.04 ^c	3.87±0.04 ^e

หมายเหตุ: ND หมายถึง ตรวจไม่พบ (not detected)

ตัวอักษร a, b, c, d และ e ในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4.2 สเปกตรัมของเค้ก

จากการนำตัวอย่างมาสแกนด้วยเครื่อง NIR hyperspectral imaging ที่ความยาวคลื่น 935-1,720 นาโนเมตร ได้สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรดเฉลี่ยแต่ละตัวอย่าง ดังภาพที่ 4.1 พบว่าที่ความยาวคลื่น 1,202 นาโนเมตรเป็นพีคการดูดกลืนของแป้งจากพันธะ O-H (Osborne et al., 1993) และพีคการดูดกลืนที่ 1210 นาโนเมตรของพันธะ C-H ในไขมัน (He et al., 2014) และตัวอย่างมีจุดยอดสูงสุดการดูดกลืนพลังงานที่สำคัญอยู่ที่ความยาวคลื่น 1,200 นาโนเมตร และ 1,450 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการดูดกลืนพลังงานของน้ำเกิดจากการสั่นของพันธะ O-H (Workman and Weyer, 2012) (He et al., 2013) ซึ่งมีความสอดคล้องกับส่วนผสมของเค้กที่มีน้ำ แป้ง และไขมัน



ภาพที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนเฉลี่ยของเค้ก 200 ตัวอย่าง

4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้และค่าความแข็งของเค้ก

การวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ และค่าความแข็งของเค้กมาอ่อนตลอดระยะเวลาการเก็บ 8 วัน ดังตารางที่ 4.2 พบว่าค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้มีค่าลดลงตามระยะเวลาการเก็บ ในวันที่ 1 มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ที่ 0.91 และลดลงอย่างมีนัยสำคัญจนวันที่ 8 ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ลดลงถึง 0.86 โดยระยะเวลาในการเก็บรักษาที่นานขึ้นมีแนวโน้มทำให้ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ลดลง เนื่องจากน้ำในตัวอย่างสามารถระเหยออกสู่บรรยากาศรอบตัวอย่าง (Cauvain, 2016) และภาชนะบรรจุภัณฑ์ที่ใช้เป็นพลาสติกโพลีไทรเอทิลีนซึ่งมีคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและความชื้นได้ดี (Tajeddin et al., 2018) และจากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ของตัวอย่างในระหว่างการเก็บรักษามีค่ามากกว่า 0.8 ซึ่งจุลินทรีย์ทั้งแบคทีเรีย ยีสต์ และราสามารถเจริญได้ (Samadelli et al., 2013) แสดงให้เห็นว่าค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ของเค้กมีความสัมพันธ์กับผลวิเคราะห์จุลินทรีย์ในตารางที่ 4.1 ที่จุลินทรีย์สามารถเจริญเพิ่มจำนวนขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา

จากตารางที่ 4.2 การวัดค่าความแข็งซึ่งเป็นหนึ่งในลักษณะของเนื้อสัมผัส แสดงให้เห็นว่าความแข็งของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.40 ถึง 5.20 หลังจากการเก็บเป็นเวลา 8 วัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับความนุ่มของตัวอย่างที่ลดลง โดยระยะเวลาการเก็บมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของความแข็ง ซึ่งระยะเวลาเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 ผลค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้และค่าความแข็งของเค้กที่อุณหภูมิ 24-26 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 วัน

วันที่เก็บรักษา	water activity	hardness (นิวตัน)
วันที่ 1	0.914±0.007 ^a	4.397±0.287 ^a
วันที่ 2	0.914±0.003 ^a	4.415±0.325 ^a
วันที่ 3	0.892±0.011 ^b	4.663±0.285 ^b
วันที่ 4	0.893±0.009 ^b	4.864±0.287 ^{bc}
วันที่ 5	0.874±0.009 ^c	4.839±0.184 ^{bc}
วันที่ 6	0.864±0.010 ^{dc}	5.020±0.256 ^{cd}
วันที่ 7	0.868±0.008 ^d	5.083±0.200 ^d
วันที่ 8	0.861±0.011 ^c	5.204±0.225 ^d

หมายเหตุ: ตัวอักษร a, b, c, d และ e ในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4.4 สมการทำนายค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้

ข้อมูลทางสถิติของค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้กลุ่มที่ใช้สร้างสมการและกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการแสดงดังตารางที่ 4.3 มีตัวอย่างทั้งหมด 178 ตัวอย่าง ซึ่งได้ทำการตัดข้อมูลที่ผิดปกติที่เกิดจากปัจจัยอื่นระหว่างการวัดการดูดกลืนแสงหรือจากการวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้แล้ว ทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการ ในกลุ่มที่ใช้สร้างสมการใช้ตัวอย่างจำนวน 119 ตัวอย่าง มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้อยู่ที่ 0.84-0.93 ส่วนกลุ่มทดสอบสมการมีตัวอย่างจำนวน 59 ตัวอย่าง มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้อยู่ที่ 0.85-0.92 ซึ่งข้อมูลกลุ่มทดสอบสมการจะมีช่วงค่าอยู่ในกลุ่มสร้างสมการ จากนั้นทำการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมของข้อมูลด้วยวิธีการต่างๆ ได้ผลดังตารางที่ 4.4 จากตารางจะพบว่าวิธี smoothing เป็นวิธีที่ดีที่สุดในการสร้างสมการคือมีค่า R สูงสุดและค่า RMSECV ต่ำสุด ได้ค่า $R = 0.66$, $RMSECV = 0.2$

จากนั้นข้อมูลที่ผ่านการปรับแต่งข้อมูลด้วยวิธี smoothing นำมาสร้างสมการโดยวิธี partial least squares regression (PLSR) ในกลุ่มที่ใช้สร้างสมการ และทำการทดสอบสมการกับข้อมูลในกลุ่มทดสอบสมการ ได้ผลดังตารางที่ 4.5 สมการทำนาย มีค่า $R = 0.77$, $RMSEC = 0.01$ และเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบความแม่นยำของสมการในกลุ่มทดสอบสมการพบว่าได้ค่า $R = 0.77$, $RMSEP = 0.01$ ซึ่งสมการทำนายสามารถยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกแบบหยาบตามเกณฑ์ของ William (2019)

ตารางที่ 4.3 ผลทางสถิติค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ของเค้กในกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการ

sample set	number	range	average	standard deviation
calibration set	119	0.84-0.93	0.90	0.02
prediction set	59	0.85-0.92	0.90	0.02

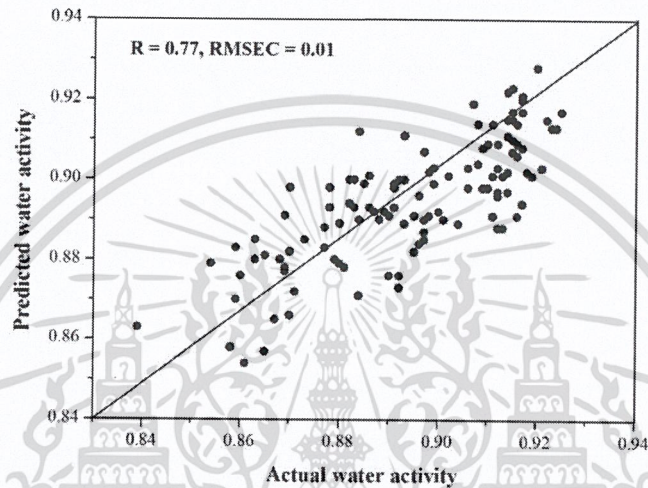
ตารางที่ 4.4 ผลการสร้างสมการทำนายค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้

spectral pretreatmeants	number	factor	R	RMSECV
original	119	5	0.42	0.02
smoothing	119	8	0.66	0.02
1 st derivative	119	4	0.63	0.02
2 nd derivative	119	5	0.53	0.02
MSC	119	3	0.33	0.02
SNV	119	3	0.34	0.02
smoothing +1 st derivative	119	7	0.64	0.02
smoothing +2 st derivative	119	4	0.58	0.02

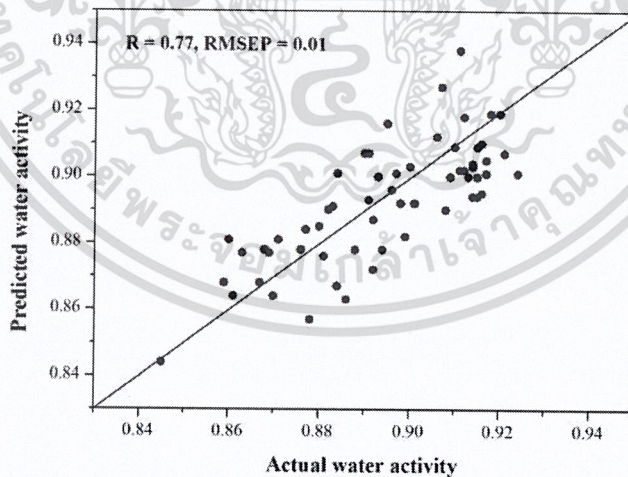
เมื่อนำข้อมูลค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ที่ได้จากการทำนายกับค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ที่วัดได้จริงในกลุ่มที่ใช้สร้างสมการมาแสดงเป็นกราฟจะได้ดังภาพที่ 4.2 (a) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้จากการทำนายกับค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ที่วัดได้จริงในกลุ่มทดสอบสมการแสดงตามภาพที่ 4.2 (b) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวค่อนข้างเข้าใกล้กับเส้น 45 องศา แสดงถึงประสิทธิภาพการทำนายของสมการที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.5 ผลการทำนายค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้

spectral pretreatment	factor	calibration set			prediction set		
		number	R	RMSEC	number	R	RMSEP
smoothing	8	119	0.77	0.01	59	0.77	0.01



(a)

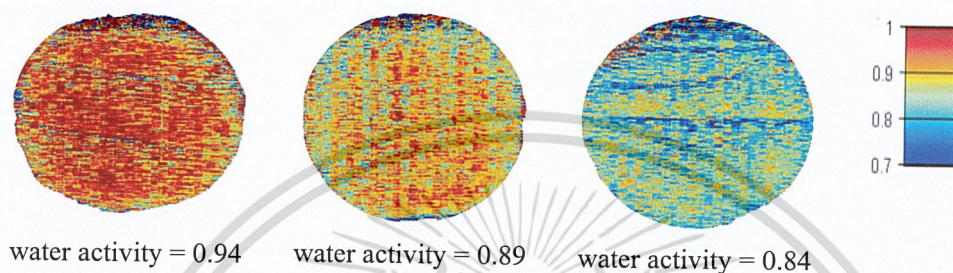


(b)

ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของค่าจริงและค่าทำนายของวอเตอร์แอกทิวิตี้ในกลุ่มสร้างสมการ (a) และกลุ่มทดสอบสมการ (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิค NIR hyperspectral imaging สามารถสร้างภาพทำนายของค่าวอเตอร์แอกทวิตี้ได้โดยใช้โปรแกรม UmBio Evinco hyperspectral image analysis software (Prediktera Evinco, version 2.7.5, Sweden) ภาพที่สร้างได้จะมีสีที่แตกต่างกันตามระดับสีที่บ่งบอกค่าวอเตอร์แอกทวิตี้ดังภาพที่ 4.3 ภาพทำนายที่มีเฉดสีแดง หมายถึงมีค่าวอเตอร์แอกทวิตี้ที่สูง และภาพที่มีเฉดสีฟ้า หมายถึงมีค่าวอเตอร์แอกทวิตี้ที่ต่ำ



ภาพที่ 4.3 ภาพแสดงตัวอย่างการทำนายค่าวอเตอร์แอกทวิตี้

4.5 สมการทำนายค่าความแข็ง

การทำนายเนื้อสัมผัสของเค้กจะทำนายเป็นค่าความแข็ง (hardness) ของเค้ก ในตารางที่ 4.6 แสดงค่าทางสถิติของกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการ โดยมีตัวอย่างจำนวน 178 ตัวอย่าง หลังจากตัดข้อมูลออกแล้ว และทำการสุ่มแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ใช้สร้างสมการจำนวน 119 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการ 59 ตัวอย่าง กลุ่มสำหรับสร้างสมการมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 3.87-5.54 นิวตัน กลุ่มสำหรับทดสอบสมการมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 3.81-5.37 นิวตัน แล้วทำการสร้างสมการในการทำนายความแข็งโดยใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) และมีการปรับแต่งข้อมูลด้วยเทคนิคต่างๆ ดังตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า วิธี smoothing ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ พิจารณาจากค่า R ที่สูงที่สุด และ RMSECV ที่ต่ำสุด ซึ่งวิธี smoothing ให้ค่า $R = 0.427$, $RMSECV = 0.352$ นิวตัน จึงเลือกข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี smoothing มาสร้างสมการและทดสอบสมการ

ตารางที่ 4.6 ผลทางสถิติค่าความแข็งของเค้กในกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการ

sample set	number	range (นิวตัน)	average	standard deviation
calibration set	119	3.87-5.54	4.67	0.39
prediction set	59	3.81-5.37	4.71	0.37

ตารางที่ 4.7 ผลการสร้างสมการทำนายค่าความแข็ง

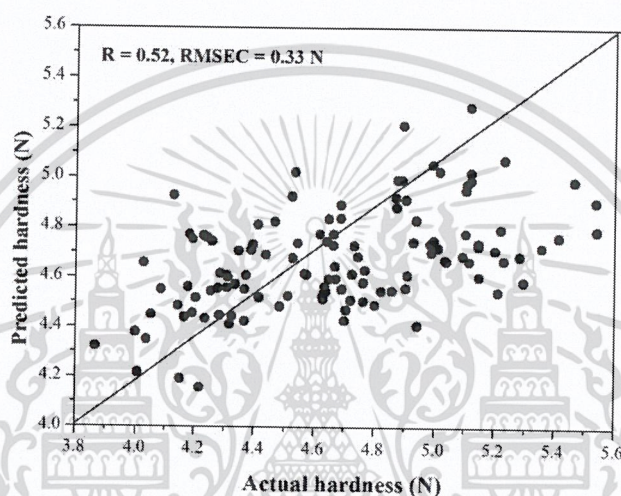
spectral pretreatmeants	number	factor	R	RMSECV (นิวตัน)
original	119	4	0.42	0.35
smoothing	119	5	0.43	0.35
1 st derivative	119	2	0.35	0.37
2 nd derivative	119	1	0.26	0.38
MSC	119	3	0.23	0.38
SNV	119	3	0.20	0.38
smoothing +1 st derivative	119	3	0.38	0.36
smoothing +2 st derivative	119	2	0.33	0.37

การสร้างสมการที่ใช้ทำนายความแข็งของเค้กจากกลุ่มที่ใช้สร้างสมการแล้วนำสมการที่ได้มาทดสอบในกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการพบว่าได้ผลดังนี้ โมเดลสมการที่สร้างได้มีค่า $R = 0.52$, $RMSEC = 0.33$ นิวตัน และเมื่อทดสอบในกลุ่มทดสอบสมการได้ $R = 0.45$, $RMSEP = 0.33$ นิวตัน ตามที่แสดงในตารางที่ 4.8 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายในกลุ่มที่ใช้สร้างสมการและกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการดังภาพที่ 4.4 (a) และ 4.4 (b) ตามลำดับ ข้อมูลมีการกระจายตัวออกจากเส้นเป้าหมายค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณาถึงความแม่นยำของสมการ สมการที่ได้นี้มีความสัมพันธ์ที่ไม่ดีตามการแปลความหมายค่า R ของ William (2019) อาจเกิดจากที่ความแข็งไม่ได้เป็นองค์ประกอบภายในเค้กเป็นเพียงการทำนายทางอ้อมที่ความแข็งอาจมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบต่างๆภายในเค้ก มีผลทำให้ความแข็งแต่ละจุดอาจไม่สม่ำเสมอ และตัวอย่างมีการกระจายตัวของข้อมูลค่าความแข็งที่น้อยเกินไป ทำให้สมการที่ได้มีค่า R ต่ำ เนื่องจากสมการทำนายที่ได้มีความแม่นยำที่ต่ำจึงไม่เหมาะสมที่จะนำสมการมาใช้ในการสร้างภาพทำนาย

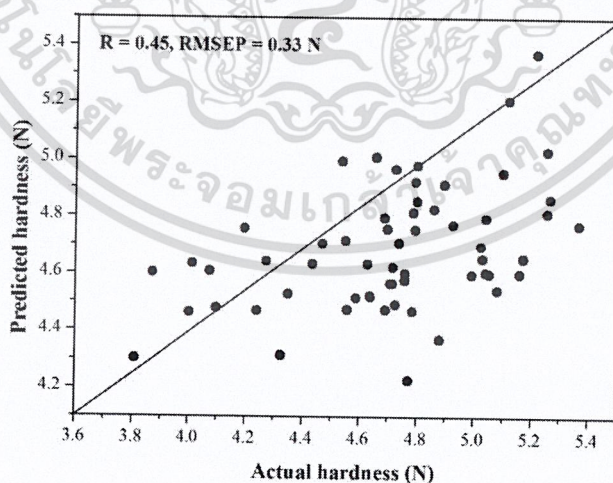
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการทำนายค่าความแข็ง

spectral factor	pretreatment	calibration set			prediction set		
		number	R	RMSEC (นิวตัน)	number	R	RMSEP (นิวตัน)
smoothing	5	119	0.52	0.33	59	0.45	0.33



(a)



(b)

ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของค่าจริงและค่าทำนายของความแข็งในกลุ่มสร้างสมการ (a) และกลุ่มทดสอบสมการ (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 สมการทำนายอายุของเค้ก

ในการสร้างสมการทำนายอายุของเค้กจะใช้ตัวอย่างจำนวน 130 ตัวอย่างที่มีการตัดข้อมูลผิดปกติจากการทดลองแล้ว แบ่งเป็นกลุ่มสำหรับสร้างสมการ จำนวน 84 ตัวอย่าง และกลุ่มสำหรับทดสอบสมการจำนวน 46 ตัวอย่าง มีค่าทางสถิติของเค้กทั้งกลุ่มที่ใช้สร้างสมการและกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการ แสดงในตารางที่ 4.9 กลุ่มที่ใช้สร้างสมการและกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการมีอายุอยู่ระหว่าง 1-8 วัน จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR) เพื่อสร้างสมการทำนายและประเมินความแม่นยำของสมการ

ตารางที่ 4.9 ผลทางสถิติอายุของเค้กในกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการ

sample set	number	range (วัน)	average	standard deviation
calibration set	84	1-8	3.12	2.04
prediction set	46	1-8	3.39	2.21

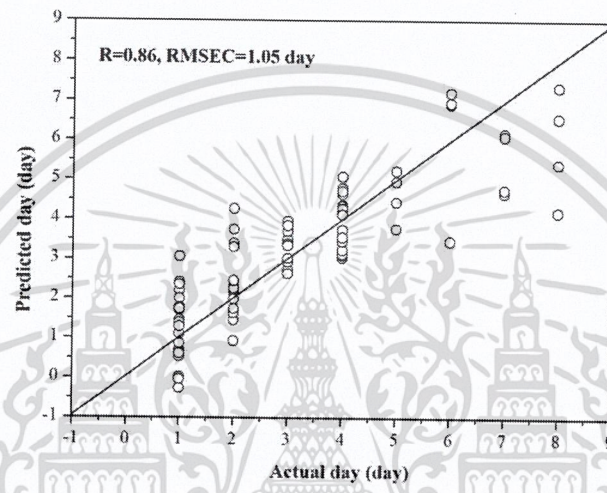
ตารางที่ 4.10 ผลการสร้างสมการทำนายอายุของเค้ก

spectral pretreatments	number	factor	R	RMSECV (วัน)
original	84	5	0.81	1.19
smoothing	84	5	0.80	1.24
1 st derivative	84	4	0.81	1.20
2 nd derivative	84	4	0.74	1.37
MSC	84	3	0.59	1.66
SNV	84	4	0.62	1.60
smoothing +1 st derivative	84	3	0.76	1.31
smoothing +2 st derivative	84	4	0.80	1.23

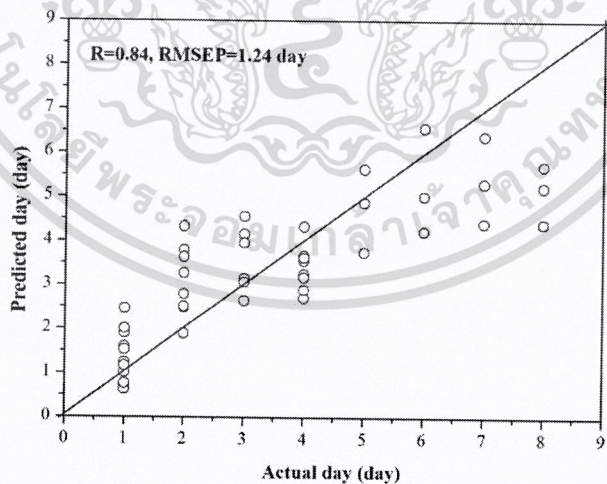
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ผลการทำนายอายุของเค็ก

spectral pretreatment	factor	calibration set			prediction set		
		number	R	RMSEC (วัน)	number	R	RMSEP (วัน)
original	5	84	0.86	1.05	46	0.84	1.24



(a)



(b)

ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของค่าจริงและค่าทำนายของอายุเค้กในกลุ่มสร้างสมการ (a) และกลุ่มทดสอบสมการ (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสร้างสมการทำนายอายุในกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ รวมถึงการปรับแต่งข้อมูลในแบบต่างๆ ดังแสดงตามตารางที่ 4.10 พบว่าสมการที่ใช้สเปกตรัมเริ่มต้นที่ไม่มีการปรับแต่งให้ค่า R สูงสุด และค่า RMSECV ต่ำสุด นำสมการทำนายที่ได้มาทดสอบกับกลุ่มสำหรับทดสอบสมการ ได้ผลตาม ตารางที่ 4.11 สมการทำนายอายุเด็กมีค่า $R = 0.86$, $RMSEC = 1.05$ วัน และเมื่อนำสมการมาทดสอบกับกลุ่มสำหรับทดสอบสมการ ให้ค่า $R = 0.84$, $RMSEP = 1.24$ วัน แสดงถึงประสิทธิภาพของสมการว่ายอมรับได้สำหรับการคัดเลือกและประมาณค่าแบบหยาบ (William, 2019) ในการทำนายอายุวันของเค้กรหว่างเก็บรักษา

ภาพที่ 4.5 (a) แสดงความสัมพันธ์ของค่าจริงและค่าทำนายของอายุเด็กในกลุ่มที่ใช้สร้างสมการ และภาพที่ 4.5 (b) แสดงความสัมพันธ์ของค่าจริงและค่าทำนายของอายุเด็กในกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการ สำหรับภาพทำนายอายุของเค้กสามารถแสดงได้ตามภาพที่ 4.6 โดยภาพทำนายแต่ละภาพจะมีระดับสีที่แสดงความสัมพันธ์กับอายุของเค้ก เค้กที่มีอายุวันน้อยภาพทำนายที่ได้จะแสดงเฉดสีเหลือง เมื่อจำนวนวันเพิ่มขึ้นสีเหลืองจะลดลงและมีสีแดงเข้มมากขึ้น ภาพที่แสดงเฉดสีแดงนั้นคือมีอายุวันการเก็บมาก



ภาพที่ 4.6 ภาพแสดงตัวอย่างการทำนายอายุ

4.7 สมการคัดแยกอายุเด็ก

การศึกษาการทำนายการหมดอายุของเค้ก ใช้ตัวอย่างที่มีการตัดข้อมูลออกแล้วเช่นเดียวกับสมการทำนายอายุเด็กคือจำนวน 130 ตัวอย่าง ประกอบด้วย 2 กลุ่มคือ กลุ่มเค้กที่หมดอายุจำนวน 75 ตัวอย่าง และกลุ่มเค้กที่ปกติยังไม่หมดอายุจำนวน 55 ตัวอย่าง โดยใช้ผลการวิเคราะห์จูลินทรีย์เป็นเกณฑ์กำหนดวันหมดอายุของเค้ก ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ทางจูลินทรีย์พบว่าเค้กหมดอายุวันที่ 4 จากนั้นทำการกำหนดให้กลุ่มตัวอย่างที่ปกติยังไม่หมดอายุคือ 0 และกลุ่มตัวอย่างที่หมดอายุคือ 1 แล้วทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลออกเป็นกลุ่มสำหรับใช้สร้างสมการจำนวน 84 ตัวอย่าง และกลุ่มสำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือแจกจ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ทดสอบสมการจำนวน 46 ตัวอย่าง ในการประเมินความแม่นยำของการคัดแยกตัวอย่างทั้งหมดอายุออกจากตัวอย่างปกติที่ยังไม่หมดอายุ แสดงค่าทางสถิติตามตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลทางสถิติของเค้กในกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการ

sample set	number	range	average	standard deviation
calibration set	84	0-1	0.40	0.49
prediction set	46	0-1	0.46	0.50

ตารางที่ 4.13 ผลการสร้างสมการคัดแยกเค้ก

spectral pretreatments	number	factor	correct	% total accuracy
original	84	4	76	90.48
smoothing	84	5	77	91.67
1 st derivative	84	3	75	89.29
2 nd derivative	84	5	70	83.33
MSC	84	4	71	84.52
SNV	84	4	71	84.52
smoothing +1 st derivative	84	3	75	89.29
smoothing +2 st derivative	84	3	76	90.48

จากการนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการและทดสอบความแม่นยำของสมการในการคัดแยกด้วยเทคนิค partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) และทำการปรับแต่งสเปกตรัมแบบต่างๆ พบว่าการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี smoothing ได้ผลความแม่นยำสูงสุดที่ 91.67 % สามารถทำนายตัวอย่างได้ถูกต้อง 77 ตัวอย่างจาก 84 ตัวอย่าง แสดงในตารางที่ 4.13 โดยใช้ค่าเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่มอยู่ที่ 0.5 หากทำนายได้ค่าน้อยกว่า 0.5 จะจัดเป็นเค้กปกติ และถ้าได้ค่ามากกว่า 0.5 จะจัดเป็นเค้กหมดอายุ แล้วนำสมการที่สร้างได้ไปทดสอบกับกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการที่มีการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมแบบเดียวกับกลุ่มที่ใช้สร้างสมการ ได้ผลการคัดแยกดังตารางที่ 4.14 ความแม่นยำของสมการที่สร้างได้จัดว่าเป็นสมการทำนายที่มีความแม่นยำสูง สมการมีความถูกต้อง

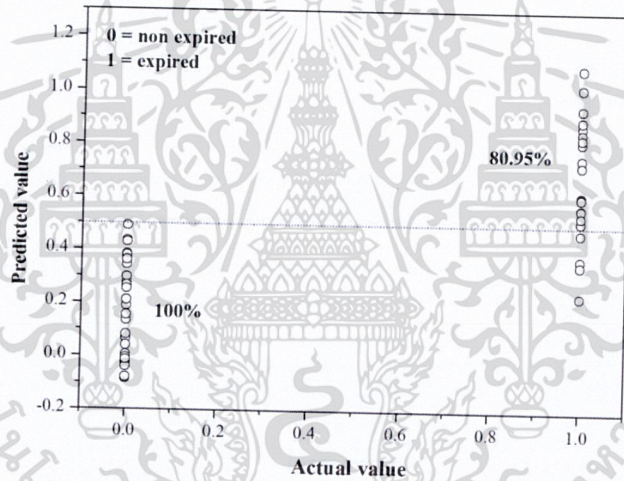
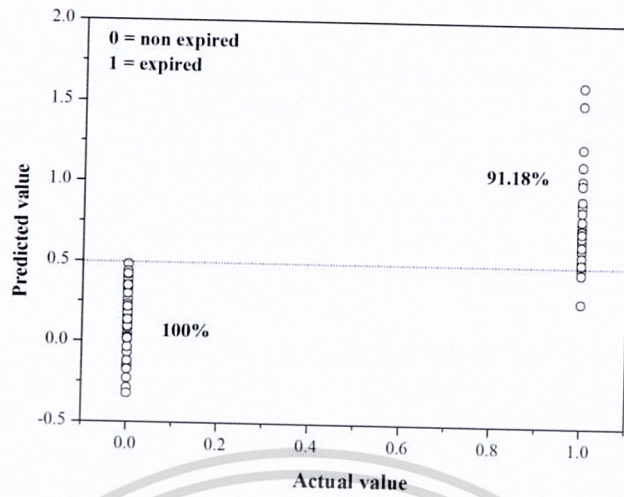
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำนายตัวอย่างปกติที่ยังไม่หมดอายุได้ถูกต้อง 100% (50 ตัวอย่างจาก 50 ตัวอย่าง) และในกลุ่มตัวอย่างหมดอายุสามารถคัดแยกได้ถูกต้อง 91.18% (31 ตัวอย่างจาก 34 ตัวอย่าง) ความแม่นยำรวมทั้งหมดคิดเป็น 96.43% เมื่อทดสอบในกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการได้ผลการทำนายตัวอย่างกลุ่มปกติถูกต้อง 25 ตัวอย่างจากจำนวน 25 ตัวอย่าง (100%) และสามารถคัดแยกตัวอย่างที่หมดอายุออกจากตัวอย่างปกติได้ถูกต้อง 17 ตัวอย่างจาก 21 ตัวอย่าง (80.95%) ผล%ความถูกต้องแม่นยำโดยรวมคิดเป็น 91.3% ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า สมการคัดแยกแก้วมีประสิทธิภาพที่ดีสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบได้

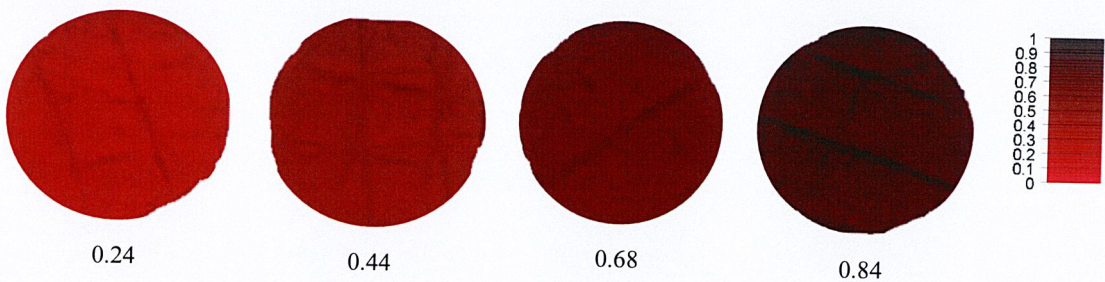
ตารางที่ 4.14 ผลการคัดแยกแก้วหมดอายุและแก้วที่ไม่หมดอายุ

sample set	spectral pretreatment	factor	number	non expired samples		expired samples		% total accuracy
				correct	incorrect	correct	incorrect	
				calibration set	smoothing	5	84	
prediction set	smoothing	5	46	25/25	0/25	17/21	4/21	91.30%

ภาพความสัมพันธ์ของค่าจริงและค่าที่ทำนายได้ในการคัดแยกของสมการในกลุ่มที่ใช้สร้างสมการและกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการแสดงได้ดังภาพที่ 4.7 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำนายของสมการว่ามีความแม่นยำของการทำนายค่าใกล้เคียงกับค่าจริง และสำหรับการสร้างภาพการทำนายในการคัดแยกแก้วหมดอายุและไม่หมดอายุ แสดงตามภาพที่ 4.8 ภาพแสดงแถบสีแดงโทนสว่างคือมีค่าน้อยกว่า 0.5 ซึ่งหมายถึงยังไม่หมดอายุ ส่วนภาพที่แสดงแถบสีแดงเข้มไปจนถึงสีแดงน้ำตาลคือค่าที่ได้มากกว่า 0.5 หมายถึงแก้วหมดอายุแล้ว



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่าจริงและค่าทำนายของการคัดแยกเหล็กในกลุ่มสร้างสมการ (a) และกลุ่มทดสอบสมการ (b)



ภาพที่ 4.8 ภาพแสดงตัวอย่างการทำนายการคัดแยกเหล็กนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์อื่นใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษากำหนดทำนายด้านปริมาณได้แก่ ค่าวอเตอร์แอกทिवิตี ค่าความแข็ง และอายุของเค้ก มาม่อนที่เก็บรักษาเป็นระยะเวลา 8 วัน ด้วยเทคนิควิเคราะห์ภาพการดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรด ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง ที่ความยาวคลื่น 935-1,720 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าเทคนิควิเคราะห์ภาพการดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรดมีความสามารถทำนายค่าวอเตอร์แอกทिवิตี ค่าความแข็ง และอายุของเค้ก ได้ด้วยการวิเคราะห์ partial least squares regression (PLSR) และมีการปรับแต่งสเปกตรัมแบบวิธี smoothing สำหรับสมการทำนายค่าวอเตอร์แอกทिवิตี ค่าความแข็ง และไม่มีมีการปรับแต่งสเปกตรัมสำหรับสมการทำนายอายุเค้ก โดยสมการทำนายที่ได้มีความแม่นยำสรุปได้ดังนี้ ความแม่นยำของสมการในการทำนายค่าวอเตอร์แอกทिवิตีของเค้กให้ค่า R เท่ากับ 0.77, RMSEP เท่ากับ 0.01 ความแม่นยำของสมการในการทำนายความแข็งของเค้กให้ค่า R เท่ากับ 0.45, RMSEP เท่ากับ 0.33 นิวตัน ความแม่นยำของสมการในการทำนายอายุของเค้กให้ค่า R เท่ากับ 0.84, RMSEP เท่ากับ 1.24 วัน สามารถสรุปได้ว่าสมการที่สร้างได้ในการทำนายค่าวอเตอร์แอกทिवิตี และอายุของเค้ก โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ภาพการดูดกลืนพลังงานแสงย่านใกล้อินฟราเรด มีความแม่นยำในการทำนายค่อนข้างสูง แต่สมการทำนายค่าความแข็งพบว่ามี ความแม่นยำที่ต่ำไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ทำนายความแข็งของเค้ก

การศึกษากำหนดทำนายด้านคุณภาพในการคัดแยกเค้กที่ปกติยังไม่หมดอายุออกจากกลุ่มเค้กที่หมดอายุด้วยวิธีวิเคราะห์ partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) และปรับแต่งสเปกตรัมแบบวิธี smoothing มีความแม่นยำในการคัดแยกเค้กที่หมดอายุและเค้กปกติที่ไม่หมดอายุในกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการที่ดีถึง 91.3%

จากโมเดลสมการทำนายค่าวอเตอร์แอกทिवิตี อายุเค้ก และการคัดแยกเค้กที่ได้นั้นสามารถนำมาสร้างเป็นภาพการทำนายได้เป็นภาพสีที่มีสีที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นประโยชน์ในการตรวจสอบคัดแยก และโมเดลที่ได้มีความเป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เครื่องมือสำหรับการ

ตรวจสอบค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่อายุเด็ก และคัดแยกเด็กที่มีค่าผิดปกติได้โดยที่ไม่ทำลายตัวอย่างและมีความรวดเร็ว

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การวัดการดูดกลืนแสงด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดของเค็กมาม่อน เนื่องจากช่วงเวลากำหนดเวลาการวัดการดูดกลืนแสงของแต่ละเค็กไม่เหมือนกัน ซึ่งอาจทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อน จึงควรมีการกำหนดเวลาการวัดการดูดกลืนแสงของตัวอย่างในช่วงเวลาเหมือนกันของทุกวัน เพื่อให้ได้ค่าการดูดกลืนพลังงานที่ถูกต้อง

5.2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางจุลินทรีย์ของเค็กมาม่อน ควรพิจารณาวิเคราะห์จุลินทรีย์อื่นๆตามเกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของอาหารและภาชนะสัมผัสอาหาร ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2560 ของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ได้แก่ *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens*, *Staphylococcus aureus* และ *Salmonella* spp.

บรรณานุกรม

กระทรวงสาธารณสุข. 2556. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 355 เรื่อง อาหารในภาชนะบรรจุ. กัดจากพระราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 130 ตอนพิเศษที่ 87 ง.

กัญญาพัชร เพชรา. 2555. “การทำนายการเกิดเชื้อราและความผิดปกติของสีภายในผลมะเขือเทศแบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคแสงช่วงสายตามองเห็นและย่านใกล้อินฟราเรด แบบทะลุผ่าน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

จิตธนา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล. 2539. *เบเกอร์เทคโนโลยีเบื้องต้น*. กรุงเทพฯ: บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด

จิราพร จรอนันต์, พัทรี เจียรนัยกูร และพัชรารัตน์ ทิพย์วัฒน์. 2560. “การประยุกต์ใช้เทคนิค FTIR ทางชีวการแพทย์.” *วารสารธรรมศาสตร์เวชสาร*. 17(4): 641-652.

ณรงค์พันธุ์ รัตนปนัดดา. 2552. “การใช้เทคนิค Near Infrared Spectroscopy (NIRS) ในการหาความชื้น และโปรตีนของแป้งสาลี.” *วารสารวิจัย มสค สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 2(1): 1-14.

ณัฐพร สุบรรณมณี. 2552. “การใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ในการป้องกันการเกิดสแตลิงของเค้กมาก่อน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการและบริการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ธัญญาภรณ์ ศิริเลิศ. 2550. “การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสในอาหาร.” *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม*. 3(1): 6-13.

นพมาศ อัครจันทโชติ และกิดาการ สายธนู. 2560. “การใช้การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนในกรณีการละเมิดข้อสมมุติของตัวแบบการถดถอย.” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ*. 3(1): 69-75.

นราธิป ปุณเกษม. 2556. “ผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อสแตลิงในขนมปัง.” *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม* 8(1): 12-20.

นิมิตรา ไชยรัตน์ โชติ. 2559. “การใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้อินฟราเรดและเทคนิคการ

ถ่ายภาพเชิงสเปกตรัมในการติดตามคุณภาพภายในและปริมาณเบต้าแคโรทีนในมะม่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำดอกไม้อีสทอง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ปานมนัส ศิริสมบุญ. 2558. “ภาพรวมเกี่ยวกับเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ผลการเกษตรและอาหาร.”

ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16 และระดับ
นานาชาติ ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.

ศิริพร อังคนากุล, มนตรา ศรีชะแย้ม และเอกภพ จันทร์สุคนธ์. 2560. “ผลของการทดแทนแป้ง
สาลีด้วยกากสับประรดต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของบิสกิตในระหว่างการเก็บรักษา.”
วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 22: 95-105.

ศุภวรรณ สุขวณิชย์. 2555. “การทำนายอาการไล่สีน้ำตาลในสับประรดแบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิค
แสงย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่าน.” วิทยานิพนธ์วิทยา
ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ศุมาพร เกษมสำราญ. 2545. “ขั้นตอนการสร้างสมการประเมินค่าทางเคมีและทดสอบสมการใน
เทคนิคสเปกโทรสโคปีย่านใกล้อินฟราเรด.” หน้า 131-151. ใน วารุณี ธนะแพสย์,
อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล และ ธงชัย สุวรรณสิขินม์. การอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุม
คุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก.
กรุงเทพฯ: สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักคุณภาพและความปลอดภัยอาหาร. 2560. **เกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของอาหารและ
ภาชนะสัมผัสอาหาร ฉบับที่ 3**. กรุงเทพฯ: บริษัท พิทู ดิไซน์ แอนด์ พรินท์ จำกัด.

อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. 2545. “การปรับแต่งสเปกตรัม.” หน้า 67-86. ใน วารุณี ธนะแพสย์,
อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล และ ธงชัย สุวรรณสิขินม์. การอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุม
คุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก.
กรุงเทพฯ: สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- Achata, E., Esquerre, C., O'Donnell, C. and Gowen, A. 2015. "A Study on the Application of Near Infrared Hyperspectral Chemical Imaging for Monitoring Moisture Content and Water Activity in Low Moisture Systems." **Molecules**. 20: 2611-2621.
- Asuero, A.G., Sayago, A. and Gonz'alez, A.G. 2006. "The correlation coefficient: an overview." **Critical Reviews in Analytical Chemistry**. 36: 41-59.
- Barbosa-Cánovas, G.V., Fernández-Molina, J.J., Alzamora, S.M., Tapia, M.S., López-Malo, A. and Chanes, J.W. 2003. **Handling and preservation of fruits and vegetables by combined methods for rural areas**. Rome: FAO.
- Bankston, J. 2014. **We Visit the Philippines**. Florida: Mitchell Lane Publishers.
- Bedini, A., Zanolli, V., Zanardi, S., Bersellini, U., Dalcanale, E. and Suman, M. 2013. "Rapid and simultaneous analysis of xanthines and polyphenols as bitter taste markers in bakery products by FT-NIR spectroscopy." **Food Analytical Methods**. 6: 17-27.
- Berk Z. 2018. "Physical properties of food materials." 1-29. in Berk, Z. **Food Process Engineering and Technology**. Oxford: Academic Press.
- Bourne M.C. 2002. "Relationship between rheology and food texture." 291-306. in Welti-Chanes, J., Barbosa-Cánovas, G.V. and Aguilera, J.M. **Engineering and food for the 21st century**. Florida: CRC Press.
- Brito, A.L.B., Brito, L.R., Honorato, F.A., Pontes, M.J.C. and Pontes, L.F.B.L. 2013. "Classification of cereal bars using near infrared spectroscopy and linear discriminant analysis." **Food Research International**. 51(2): 924-928.
- Cauvain, S.P. 2003. "Cakes." 751-756. in Caballero, B. **Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition**. Oxford: Academic press.
- Cauvain, S.P. and Young, L.S. 2008. **Bakery Food Manufacture and Quality: Water Control and Effects**. 2nd ed. New Jersey: Wiley-Blackwell.
- Cauvain, S.P. 2016. "Bread and other bakery products." 431-460. in Subramaniam, P. and Wareing, P. **The Stability and Shelf Life of Food**. Cambridge: Woodhead Publishing.

- Chakravartula, S.S.N., Cevoli, C., Balestra, F., Fabbri, A. and Rosa, M.D. 2019. "Evaluation of the effect of edible coating on mini-buns during storage by using NIR spectroscopy." **Journal of Food Engineering**. 263: 46-52.
- Elvers, B. 2017. **Ullmann's Food and Feed, 3 Volume Set**. Weinheim: Wiley-VCH.
- Fodor, M., Woller, A., Turza, S. and Szigedi, T. 2011. "Development of a rapid, non-destructive method for egg content determination in dry pasta using FT-NIR technique." **Journal of Food Engineering**. 107(2): 195-199.
- Fox news channel. 2001. **Woman claims bakery cake was completely green with mold**. [Online]. Available: <https://www.foxnews.com/food-drink/woman-claims-bakery-cake-mold>.
- Galanakis, C.M. 2019. **Food Quality and Shelf Life**. Oxford: Academic Press.
- Gisslen, W. 2016. **Professional Baking**. 7th ed. New Jersey: Wiley-Blackwell.
- Grundy, J.G. 1996. "Preservatives." 189-204. in Hebeda, R. E. and Zobel, H. F. **Baked Goods Freshness: Technology, Evaluation, and Inhibition of Staling**. New York: Marcel Dekker.
- He, H.J., Sun, D.W. and Wu, D. 2014. "Rapid and real-time prediction of lactic acid bacteria (LAB) in farmed salmon flesh using near-infrared (NIR) hyperspectral imaging combined with chemometric analysis." **Food Research International**. 62: 476-483.
- He, H.J., Wu, D. and Sun, D.W. 2013. "Non-destructive and rapid analysis of moisture distribution in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets using visible and near-infrared hyperspectral imaging." **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. 18: 237-245.
- Huang, W., Li, J., Zhang, B. and Fan, S. 2018. "Quality of Vegetable Products: Assessment of Physical, Chemical, and Microbiological Changes in Vegetable Products by Nondestructive Methods." 113-159. in Pérez-Rodríguez, F., Skandamis, P. and Valdramidis, V. **Quantitative Methods for Food Safety and Quality in the Vegetable Industry**. Cham: Springer International Publishing AG.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Joardder, M. U.H., Mourshed, M. and Masud, M.H. 2019. **State of Bound Water: Measurement and Significance in Food Processing**. Cham: Springer Nature.
- Konstantas, A., Stamford, L. and Azapagic, A. 2019. "Evaluating the environmental sustainability of cakes." **Sustainable Production and Consumption**. 19: 169-180.
- Legan, J. and Voysey, P.A. 1991. "Yeast spoilage of bakery products and ingredients." **The Journal of applied bacteriology**, 70(5): 361-371.
- Li, X., Li, R., Wang, M., Liu, Y., Zhang, B. and Zhou, J. 2018. "Hyperspectral Imaging and Their Applications in the Nondestructive Quality Assessment of Fruits and Vegetables." 27-64. in Maldonado, A.I.L., Rodriguez-Fuentes, H. and Contreras, J.A.V. **Hyperspectral Imaging in Agriculture, Food and Environment**. London: IntechOpen.
- Mark, H. and Workman, J. 1991. **Statistics in Spectroscopy**. Oxford: Academic Press.
- Martínez-Cervera, S., Hera, E.D.L., Sanz, T., Gómez, M. and Salvador, A. 2013. "Effect of nutriose on rheological, textural and sensorial characteristics of spanish muffins." **Food Bioprocess Technology**. 6(8): 1990-1999.
- Morassi, L.L.P., Bernardi, A.O., Amaral, A.L.P.M., Chaves, R.D., Santos, J.L.P., Copetti, M.V. and Sant'Ana, A.S. 2018. "Fungi in cake production chain: Occurrence and evaluation of growth potential in different cake formulations during storage." **Food Research International**. 106: 141-148.
- Morsy, N., Mokhtar, S.M. and Youssef, K.M. 2014. "Accurate quantification of fungal growth in bread by using spectral analysis." **Journal of Food and Dairy Sciences**. 5(1): 33-44.
- Nicolaï, B.M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K.I. and Lammertyn, J. 2007. "Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review." **Postharvest Biology and Technology**. 46(2): 99-118.
- Nychas, G-J.E. and Panagou, E. 2011. "Microbiological spoilage of foods and beverages." 3-28. in Kilcast, D. and Subramaniam, P. **Food and beverage stability and shelf life**. Cambridge: Woodhead Publishing.

- Osborne, B.G., Fearn, T. and Hindle, P.H.. 1993. **Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis.** Harlow: Longman Science and Technology.
- Osborne, B.G. 2006. “Near-infrared spectroscopy in food analysis.” 1-13. in Meyers, R.A. **Encyclopedia of analytical chemistry.** New York: John Wiley and Sons.
- Patil, V.S. and Kukade, P.D. 2020. “Fungal spoilage of bakery products and its control measures.” **World Journal of Pharmaceutical and Medical Research.** 6(1): 167-181.
- Pepe, O., Blaiotta, G., Moschetti, G., Greco, T. and Villani, F. 2003. “Rope-producing strains of *Bacillus* spp. from wheat bread and strategy for their control by lactic acid bacteria.” **Applied and environmental microbiology.** 69(4): 2321–2329.
- Peter, S.C., Dhanjal, J.K., Malik, V., Radhakrishnan, N., Jayakanthan, M. and Sundar, D. 2019. “Quantitative Structure-Activity Relationship (QSAR): Modeling Approaches to Biological Applications.” 661-676. in Ranganathan, S., Gribskov, M., Nakai, K. and Schönbach, C. **Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology.** Oxford: Academic Press.
- Pereira, A.P.M., Freire, L., Alvarenga, Verô, O., Crucello, A., Morassi, L.L.P., Silva, F.P., Stradiotto, G.C. and Sant’Ana, A.S. 2020. “Occurrence and enumeration of rope-producing spore forming bacteria in flour and their spoilage potential in different bread formulations.” **LWT.** 133: 110108.
- Rosenkvist, H. and Hansen, A.S. 1995. “Contamination profiles and characterisation of *Bacillus* species in wheat bread and raw materials for bread production.” **International Journal of Food Microbiology.** 26(3): 353-363.
- Samadelli, M., Roselli, G., Fernicola, V.C., Moroder, L. and Zink, A.R. 2013. “Theoretical aspects of physical-chemical parameters for the correct conservation of mummies on display in museums and preserved in storage rooms.” **Journal of Cultural Heritage.** 14(6): 480–484.

- Saranraj, P. and Geetha, M. 2012. "Microbial Spoilage of Bakery Products and Its Control by Preservatives." **International Journal of Pharmaceutical & Biological Archives**. 3(1): 38-48.
- Shao, Y., Xuan, G., Hu, Z. and Gao, X. 2018. "Identification of adulterated cooked millet flour with hyperspectral imaging analysis." **IFAC-PapersOnLine**. 51(17): 96-101.
- Sharma, A.K. 2005. **Text Book of Correlations and Regression**. New Delhi: Discovery Publishing House.
- Singham, P., Birwal, P. and Yadav, B.K. 2015. "Importance of Objective and Subjective Measurement of Food Quality and their Inter-relationship." **Journal of Food Processing and Technology**. 6(9): 1000488.
- Smith, J.P., Daifas, D.P., El-Khoury, W. and Austin, J.W. 2003. "Microbial safety of bakery products." 3-34. in Novak, J.S., Sapers, G.M. and Juneja, V.K. **Microbial Safety of Minimally Processed Foods**. Florida: CRC Press.
- Smith, J.P., Daifas, D.P., El-Khoury, W., Koukoutsis, J. and El-Khoury, A. 2004. "Shelf life and safety concerns of bakery products - a review." **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 44(1): 19-55.
- Snyder, A.B., Churey, J.J. and Worobo, R.W. 2019. "Association of fungal genera from spoiled processed foods with physicochemical food properties and processing conditions." **Food Microbiology**. 83: 211-218.
- Tajeddin, B., Ahmadi, B., Sohrab, F. and Chenarbon, H.A. 2018. "Polymers for Modified Atmosphere Packaging Applications." 457-499. in Grumezescu, A.M. and Holban, A.M. **Food Packaging and Preservation**. Oxford: Academic Press.
- Teerachaichayut, S. and Ho, H.T. 2017. "Non-destructive prediction of total soluble solids, titratable acidity and maturity index of limes by near infrared hyperspectral imaging." **Postharvest Biology and Technology**. 133: 20-25.
- Teerachaichayut, S. and Suktanarak, S. 2017. "Non-destructive quality assessment of hens' eggs using hyperspectral images." **Journal of Food Engineering**. 215: 97-103.

- Tewari, A. and Abdullah, S. 2015. “*Bacillus cereus* food poisoning: international and Indian perspective.” **Journal of food science and technology**. 52(5): 2500–2511.
- U.S. Food and Drug Administration. 2001. **Bacteriological Analytical Manual Chapter 3 Aerobic Plate Count**. [Online]. Available: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-3-aerobic-plate-count>.
- U.S. Food and Drug Administration. 2001. **Bacteriological Analytical Manual Chapter 18 Yeasts, Molds and Mycotoxins**. [Online]. Available: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-18-yeasts-molds-and-mycotoxins>.
- U.S. Food and Drug Administration. 2012. **Bacteriological Analytical Manual Chapter 14 *Bacillus cereus***. [Online]. Available: <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-bacillus-cereus>.
- Varmuza, K. and Filzmoser, P. 2009. **Introduction to Multivariate Statistical Analysis in Chemometrics**. Florida: CRC Press.
- Vishwakarma, R.K., Chavan, R.S., Shivhare, U.S. and Basu, S. 2014. “Texture and Rheological Properties of Fruit and Vegetables.” 1-43. in Cruz, R.M.S., Khmelinskii, I. and Vieira, M. **Methods in Food Analysis**. Florida: CRC Press.
- Wee, M.S.M., Goh, A.T., Stieger, M. and Forde, C.G. 2018. “Correlation of instrumental texture properties from textural profile analysis (TPA) with eating behaviours and macronutrient composition for a wide range of solid foods.” **Food and Function**. 9(10): 5301-5312.
- Wilderjans, E., Luyts, A., Brijs, K. and Delcour, J.A. 2013. “Ingredient functionality in batter type cake making.” **Trends in Food Science and Technology**. 30(1): 6-15.
- Williams, P., Antoniszyn, J. and Manley, M. 2019. **Near-infrared Technology: Getting the best out of light**. Stellenbosch: African Sun Media.
- Workman, J. and Weyer, L. 2012. **Practical guide and spectral atlas for interpretive near-infrared spectroscopy**. 2nd ed. Florida: CRC Press.

Yuan, W., Xiang B., Yu, L. and Xu, J. 2011. “A non-invasive method for screening sodium hydroxymethanesulfonate in wheat flour by near-infrared spectroscopy.” **Food Analytical Methods**. 4: 550-558.

Zeece, M. 2020. **Introduction to the Chemistry of Food**. Oxford: Academic Press.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ก.1 ตัวอย่างเค้กมามูน

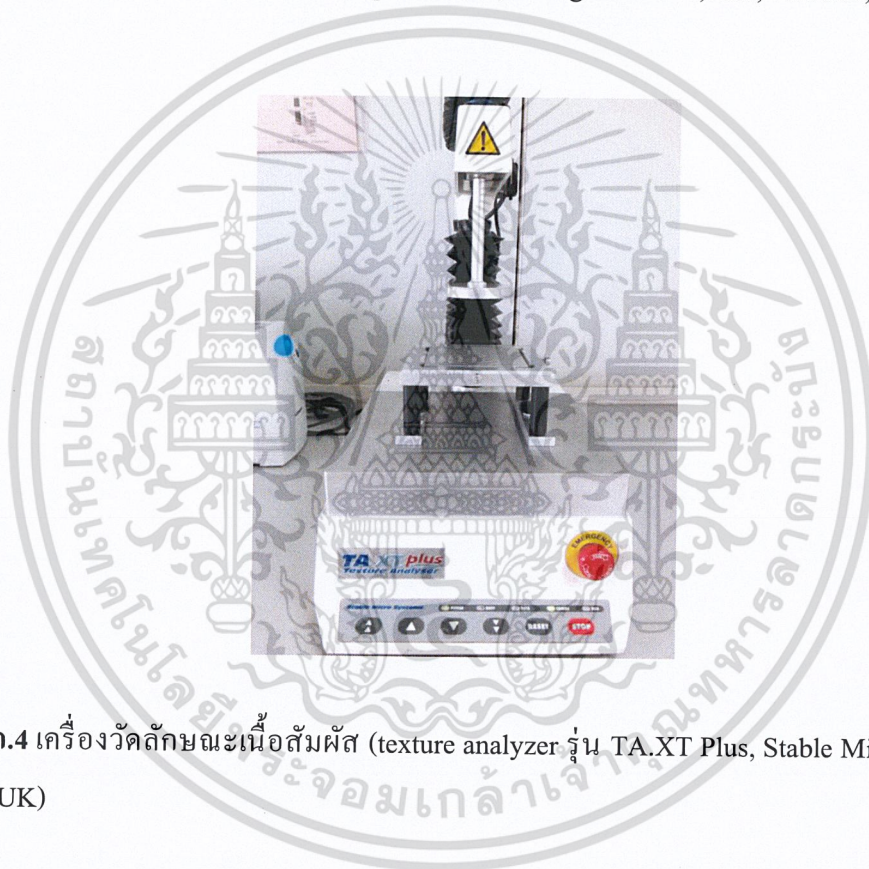


ภาพที่ ก.2 เครื่อง NIR hyperspectral imaging (Specim Fx17e, Spectral Imaging Ltd, Oulu, Finland)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

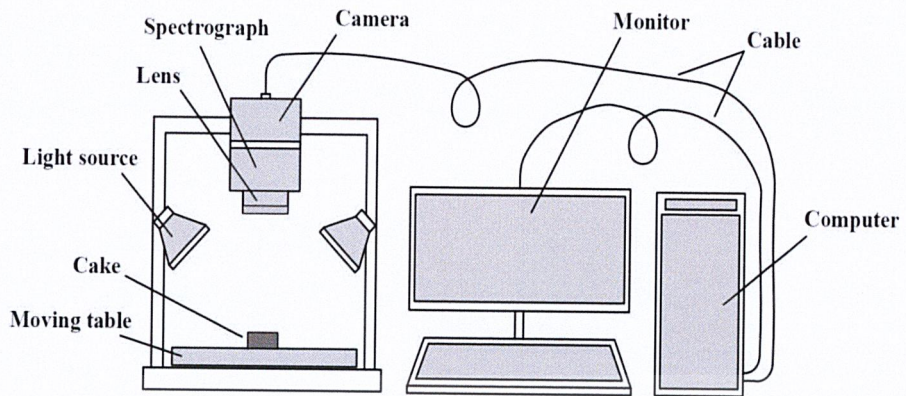


ภาพที่ ก.3 เครื่องวัดวอเตอร์แอกทิวิตี้ (Aqualab 4TE, Decagon Device, Inc., Pullman, WA, USA)



ภาพที่ ก.4 เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (texture analyzer รุ่น TA.XT Plus, Stable Micro Systems, Surrey, UK)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ก.5 ส่วนประกอบของเครื่อง NIR hyperspectral imaging



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ทางจุลินทรีย์

ข.1 การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อและสารเคมี

ข.1.1 Butterfield's phosphate-buffered dilution water

ละลาย KH_2PO_4 (Merck, Germany) จำนวน 34 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ทำการปรับค่าพีเอชด้วย NaOH (Merck, Germany) ความเข้มข้น 1 นอร์มัล ให้ได้ pH เป็น 7.2 เติมน้ำกลั่นให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร นำเข้ามาเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เก็บส่วนนี้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4-8 องศาเซลเซียส ใช้เป็นสารละลายขั้นต้น (stock solution) ตวง stock solution มา 1.25 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ครบ 1,000 มิลลิลิตร กวนให้สารละลายเข้ากัน ตวงสารละลายใส่ขวดขนาด 250 มิลลิลิตร ขวดละ 94 กรัม เพื่อให้ปริมาตรหลังการฆ่าเชื้อต้องได้ 90 ± 1 มิลลิลิตร (โดยเทียบเท่าหน่วยเป็นกรัมของเครื่องชั่ง) และตวงขวดละ 233 กรัม เพื่อให้ปริมาตรหลังการฆ่าเชื้อต้องได้ 225 ± 2 มิลลิลิตร (โดยเทียบเท่าหน่วยเป็นกรัมของเครื่องชั่ง) นำเข้ามาเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที

ข.1.2 plate count agar (PCA) (Biokar Diagnostics, France)

tryptone	5.0	กรัม	glucose	1.0	กรัม
yeast Extract	2.5	กรัม	agar	15.0	กรัม

ชั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 20.5 กรัม ในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนส่วนผสมละลายหมด แบ่งใส่ขวดแก้วทนความร้อนขวดละ 200 มิลลิลิตร ปิดจุกให้สนิท นำเข้ามาเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที

ข.1.3 0.1 % peptone water

enzymatic digest of casein 1.0 กรัม

ละลายส่วนผสมในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ทำการปรับค่าพีเอชให้เป็น 7.1 เติมน้ำกลั่นให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร ตวงสารละลายใส่ขวดขนาด 250 มิลลิลิตร ขวดละ 94 กรัม เพื่อให้ปริมาตรหลังการฆ่าเชื้อต้องได้ 90 ± 1 มิลลิลิตร (โดยเทียบเท่าหน่วยเป็นกรัมของเครื่องชั่ง) และตวงขวดละ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

233 กรัม เพื่อให้ปริมาตรหลังการฆ่าเชื้อต้องได้ 225 ± 2 มิลลิลิตร (โดยเทียบเท่าหน่วยเป็นกรัมของเครื่องชั่ง) นำเข้าฆ่าเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที

ข.1.4 dichloran rose bengal chloramphenicol (DRBC) agar (Himedia, USA)

peptone	5.0	กรัม	potassium dihydrogen phosphate	1.0	กรัม
dextrose	10.0	กรัม	magnesium sulphate	0.5	กรัม
rose bengal	0.025	กรัม	chloramphenicol	0.1	กรัม
dichloran	0.002	กรัม	agar	15.0	กรัม

ชั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 31.6 กรัม ในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนส่วนผสมละลายหมด นำเข้าฆ่าเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ปล่อยให้อุณหภูมิของอาหารเลี้ยงเชื้อ ลดลงที่อุณหภูมิ 45 ± 1 องศาเซลเซียส ในอ่างควบคุมอุณหภูมิก่อนนำไปใช้ เทอาหารเลี้ยงเชื้อลงในจานเพาะเชื้อที่ปราศจากเชื้อให้ความหนาของชั้นวุ้นประมาณ 4 มิลลิเมตร เก็บไว้ในที่เย็นและมีด

ข.1.5 mannitol-egg yolk polymyxin (MYP) agar (Himedia, USA)

HM peptone B powder	1.0	กรัม	peptone	10.0	กรัม
mannitol	10.0	กรัม	sodium chloride	10.0	กรัม
phenol red	0.025	กรัม	agar	15.0	กรัม

ชั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 23.01 กรัม ในน้ำกลั่น 450 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนส่วนผสมละลายหมด นำเข้าฆ่าเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที

ข.1.6 polymyxin B solution, 0.1% (Himedia, USA)

ละลาย 500,000 units Polymyxin B sulfate ในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ทำการฆ่าเชื้อด้วย filter-sterilize และเก็บในที่มืดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปใช้

ข.1.7 egg yolk emulsion, 50%

ล้างไข่สดด้วยแปรงและน้ำ ให้สะอาด แช่ไข่ในเอทานอล 70% นาน 1 ชั่วโมง นำไข่ออกจากเอทานอล มาตากแห้ง ทำเปลือกไข่ให้แตกเป็น 2 ส่วน ด้วยช้อนพลาสติก เชื้อ ค่อยๆ ไล่ไข่ขาวออกจากไข่จนหมด ให้เหลือแต่ไข่แดง อยู่ภายในเปลือกไข่ใส่ไข่แดงลงในภาชนะที่ปราศจากเชื้อ ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วย 0.85% NaCl solution (Merck, Germany) ในปริมาณที่เท่ากันเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปใช้

ข.1.8 final medium

นำส่วนผสม base agar (ข.1.5) 225 มิลลิลิตร polymyxin B solution, 0.1% (ข.1.6) 2.5 มิลลิลิตร egg yolk emulsion, 50% (ข.1.7) 12.5 มิลลิลิตร ผสมเข้าด้วยกัน เทใส่จานเพาะเชื้อ ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องนาน 24 ชั่วโมง

ข.1.9 nutrient agar (Himedia, USA)

peptone	5.0	กรัม	sodium chloride	5.0	กรัม
HM peptone B	1.5	กรัม	yeast extract	1.5	กรัม
agar	15.0	กรัม			

ชั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 28 กรัม ในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนส่วนผสมละลายหมด นำเข้ามาเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที

ข.1.10 phenol red glucose broth (Himedia, USA)

proteose peptone	10.0	กรัม	HM peptone B	1.0	กรัม
sodium chloride	5.0	กรัม	dextrose	5.0	กรัม
phenol red	0.018	กรัม			

ชั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 21.02 กรัม ในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนส่วนผสมละลายหมด นำเข้ามาเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที

ข.1.11 tyrosine agar (Himedia, USA)

beef extract	3.0	กรัม	peptone	5.0	กรัม
agar	15.0	กรัม	tyrosine	5.0	กรัม

ชั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 28 กรัม ในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนส่วนผสมละลายหมด นำเข้ามาเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที แบ่งใส่หลอดทดลองขนาด 13x100 มิลลิเมตร หลอดละ 3.5 มิลลิลิตร นำไปวางเรียงและทำให้เย็นในตู้เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1.12 lysozyme broth

ละลาย lysozyme (Himedia, USA) 0.1 กรัม ใน 0.01 N HCl (Merck, Germany) 65 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนเดือดนาน 20 นาที เจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วย 0.01 N HCl (Merck, Germany) แล้วนำสารละลาย lysozyme 1 มิลลิลิตร เติมลงใน nutrient agar (ข.1.9) 99 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน แบ่งใส่หลอดทดลองขนาด 13x100 มิลลิเมตร หลอดละ 2.5 มิลลิลิตร

ข.1.13 modified VP medium (Himedia, USA)

proteose peptone	7.0	กรัม	glucose	5.0	กรัม
sodium chloride	5.0	กรัม			

ซั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 17 กรัม ในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนส่วนผสมละลายหมด แบ่งใส่หลอดทดลองขนาด 16x150 มิลลิเมตร หลอดละ 5 มิลลิลิตร นำเข้ามาเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที

ข.1.14 nitrate broth (Himedia, USA)

peptic digest of animal tissue	5.0	กรัม	beef extract	3.0	กรัม
potassium nitrate	1.0	กรัม			

ซั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 9 กรัม ในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนส่วนผสมละลายหมด แบ่งใส่หลอดทดลองขนาด 16x150 มิลลิเมตร หลอดละ 5 มิลลิลิตร นำเข้ามาเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที

ข.1.15 motility medium (Himedia, USA)

tryptose	10.0	กรัม	sodium chloride	5.0	กรัม
agar	5.0	กรัม			

ซั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 20 กรัม ในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนส่วนผสมละลายหมด แบ่งใส่หลอดทดลองขนาด 13x100 มิลลิเมตร หลอดละ 2 มิลลิลิตร นำเข้ามาเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที

ข.1.16 trypticase soy-sheep blood agar (Himedia, USA)

tryptose	14.0	กรัม	peptone neutralised	4.5	กรัม
yeast extract	4.5	กรัม	sodium chloride	5.0	กรัม
agar	12.0	กรัม			

ชั่งอาหารเลี้ยงเชื้อ จำนวน 20 กรัม ในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนส่วนผสมละลายหมด แบ่งใส่หลอดทดลองขนาด 13x100 มิลลิเมตร นำเข้ามาเชื้อใน autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที

ข.2 การวิเคราะห์จุลินทรีย์ทั้งหมด (FDA, 2001)

- 1) ชั่งตัวอย่าง 50 กรัม เติมสารละลาย Butterfield's phosphate buffered dilution water 450 มิลลิลิตร โดยที่เติม 225 มิลลิลิตร ลงในถุงพลาสติกปราศจากเชื้อ ตีปั่นนาน 2 นาที จะได้ระดับความเจือจางที่ 1:10
- 2) คูดสารละลายตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ใส่ในสารละลาย sterile Butterfield's phosphate buffered dilution water 90 มิลลิลิตร ทำการเจือจางได้ระดับความเจือจางที่ 1:100 และ 1:1,000 ตามลำดับ
- 3) คูดสารละลายตัวอย่างแต่ละระดับความเจือจางจำนวน 1 มิลลิลิตรลงในจานเพาะเชื้อ ระดับความเจือจางละ 2 ซ้ำ เทอาหารเลี้ยงเชื้อ PCA ลงในจานเพาะเชื้อ 12-15 มิลลิลิตร หมุนจานให้ตัวอย่างและอาหารเลี้ยงเชื้อผสมเข้ากัน ตั้งทิ้งให้อาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง
- 4) บ่มที่ 35 องศาเซลเซียส 48±2 ชั่วโมง โดยคว่ำจานเพาะเลี้ยงเชื้อ
- 5) นับปริมาณเชื้อในจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนโคโลนี 25-250 โคโลนี

ข.3 การวิเคราะห์ยีสต์และรา (FDA, 2002)

- 1) ชั่งตัวอย่าง 25-50 กรัมใส่ในถุงพลาสติกปราศจากเชื้อแล้วเติมสารละลาย 0.1% peptone water ในอัตราส่วน 25 : 225 มิลลิลิตร หรือ 50 : 450 มิลลิลิตร นำไปตีปั่นนาน 2 นาที จะได้ระดับความเข้มข้นที่ 1 : 10
 - 2) คูดสารละลายตัวอย่าง 10 มิลลิลิตรใส่ในสารละลาย 0.1% peptone water 90 มิลลิลิตร ทำการเจือจางได้ระดับความเจือจางที่ 1:100 และ 1:1,000 ตามลำดับ
 - 3) คูดสารละลายตัวอย่างแต่ละระดับความเจือจางจำนวน 0.1 มิลลิลิตร ใส่ลงบนหน้า DRBC เอกส agar ระดับความเจือจางละ 3 ซ้ำ ใช้แท่งแก้วสามเหลี่ยมเกลี่ยให้ทั่วจนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อแห้ง
- ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) บ่มที่ 25 องศาเซลเซียส นาน 5-7 วัน โดยไม่คว่ำงานเพาะเชื้อ หลังจากครบ 5 วัน ถ้าไม่มีการเจริญของเชื้อให้บ่มต่ออีก 48 ชั่วโมง
- 5) นับปริมาณเชื้อในงานเพาะเชื้อที่มีจำนวน โคโลนี 10-150 โคโลนี

ข.4 การวิเคราะห์ *Bacillus cereus* (FDA, 2012)

- 1) ชั่งตัวอย่าง 50 กรัม เติมน้ำละลาย Butterfield's phosphate buffered dilution water 450 มิลลิลิตร โดยที่เติม 225 มิลลิลิตร ลงในถุงพลาสติกปราศจากเชื้อ ตีปั่นนาน 2 นาที จะได้ระดับความเจือจางที่ 1:10
- 2) คูณสารละลายตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ใส่ในสารละลาย sterile Butterfield's phosphate buffered dilution water 90 มิลลิลิตร ทำการเจือจางได้ระดับความเจือจางที่ 1:100 และ 1:1,000 ตามลำดับ
- 2) คูณสารละลายตัวอย่างแต่ละระดับความเจือจางจำนวน 1 มิลลิลิตร ใส่บนหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ MYP agar ระดับความเจือจางละ 2 ซ้ำ ใส่แท่งแก้วสามเหลี่ยมเกลียวให้ทั่วจนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อแห้ง
- 3) บ่มที่ 30 องศาเซลเซียส 18-24 ชั่วโมง โดยคว่ำงานเพาะเลี้ยงเชื้อ หลังจากครบ 18-24 ชั่วโมง ถ้าลักษณะโคโลนีไม่ชัดเจน ให้ทำการบ่มเพิ่มอีก 24 ชั่วโมง
- 4) นับปริมาณเชื้อในงานเพาะเชื้อที่มีจำนวนโคโลนี 15-150 โคโลนี โดยลักษณะโคโลนีของ *B.cereus* บน MYP agar จะมีสีชมพู ล้อมรอบด้วยโซนจุ่น

การทดสอบยืนยัน *B.cereus*

- 1) นำลักษณะโคโลนีของ *B.cereus* ที่พบบน MYP agar plate อย่างน้อย 5 โคโลนี ไปทำการเขี่ยเชื้อบน nutrient agar slant โคโลนีละ 1 หลอด บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง เขี่ยเชื้อจาก nutrient agar slant เพื่อแยกแอมแกรม
- 2) ทำการถ่ายเชื้อจาก nutrient agar slant ลงใน หลอด 13x100 มิลลิเมตร ที่มี phosphate-buffered dilution water 0.5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันไว้ใช้ในการทดสอบดังนี้
 - 2.1) phenol red glucose broth
 - ถ่ายเชื้อลงใน 3 มิลลิลิตร ของ phenol red glucose broth นำเข้าบ่มใน anaerobic jar ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2) nitrate broth

ถ่ายเชื้อลงใน 5 มิลลิลิตร ของ nitrate broth นำเข้าบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง nitrite detection reagents A และ B (Becton Dickinson, USA) อย่างละ 0.25 มิลลิลิตร ตามลำดับ

2.3) modified VP medium

ถ่ายเชื้อลงใน 5 มิลลิลิตร ของ modified VP medium นำเข้าบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 48 ± 2 ชั่วโมง แบ่ง modified VP medium มา 1 มิลลิลิตร เติม Voges-Proskauer test reagents A 0.6 มิลลิลิตร และ Voges-Proskauer test reagents B 0.2 มิลลิลิตร เขย่าหลอดและเติม creatine crystals เล็กน้อย ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 1 ชั่วโมง

2.4) tyrosine agar

ถ่ายเชื้อขีดลงบนผิวหน้า tyrosine agar slant นำเข้าบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง

2.5) lysozyme broth

ถ่ายเชื้อลงใน 2.5 มิลลิลิตร ของ lysozyme broth นำเข้าบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

3) การตรวจเพื่อจำแนก *B. cereus*

3.1) motility test

ถ่ายเชื้อ culture suspension 24 ชั่วโมง โดยการ stab ลงตรงกลางของ motility medium นำเข้าบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 18-24 ชั่วโมง

3.2) rhizoid growth

ถ่ายเชื้อ culture suspension 24 ชั่วโมง บนผิวหน้าบริเวณกลาง nutrient agar นำเข้าบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 48-72 ชั่วโมง

3.3) hemolytic activity

แบ่งส่วนของงานเพาะเลี้ยงเชื้อออกเป็น 6-8 ส่วนเท่าๆกัน ถ่ายเชื้อ culture suspension 24 ชั่วโมง ตะเบาๆ บนผิวหน้า trypticase soy-sheep blood agar plate เข้าบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

3.4) protein toxin crystals

ถ่ายเชื้อ culture suspension 24 ชั่วโมง และบนผิวหน้าบริเวณกลาง nutrient agar ลงบน nutrient agar slant นำเข้าบ่ม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมงและบ่มต่อที่อุณหภูมิห้องอีก 2-3 วัน นำมาเกลี่ยเชื้อบนสไลด์ ทิ้งให้แห้ง ทำการ heat-fix ด้วยการผ่านเปลวไฟอ่อน หยดเมทานอลให้ท่วม นาน 30 วินาที แล้วเททิ้งไป วางให้แห้งแล้วหยด 0.5% basic fuchsin หรือ TB carbofuchsin ZN stain (Difco, USA) ให้ท่วม นำไปลนไฟบนตะเกียงจนเห็นไอน้ำลอยขึ้นมารอ 1-2 นาที ทำการทดสอบซ้ำอีก ทิ้งไว้นาน 30 วินาที เทสีออก ล้างด้วยน้ำประปา ทิ้งให้แห้งส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ในกรณีที่ไม่มีพบ free spore ให้บ่มต่ออีก 2-3 วัน และย้อมดู endotoxin crystals ซ้ำอีกครั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ทางเคมี

ค.1 การหาค่าวอเตอร์แอกทิวิตีตามวิธีการใช้เครื่องบริษัท AQUALAB รุ่น 4TE

- 1) ก่อนทำการวัดทำการวอร์มเครื่องไว้เป็นเวลา 30 นาที ใส่ น้ำ deionized water ในภาชนะบรรจุแล้วนำเข้าสู่เครื่อง ค่าที่วัดได้อยู่ระหว่าง 0.997-1.003 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
- 2) ใส่ตัวอย่างที่บดละเอียดลงในตลับตัวอย่าง ไม่ควรเกินครึ่งหนึ่งของภาชนะบรรจุให้ครอบคลุมพื้นที่ก้นภาชนะบรรจุ
- 3) นำภาชนะบรรจุตัวอย่างเข้าสู่เครื่องวัด ปิดปุ่มจากตำแหน่ง OPEN ไปยังตำแหน่ง READ รอจนกระทั่งมีสัญญาณเตือน เครื่องจะแสดงค่าวอเตอร์แอกทิวิตีที่วัดได้ พร้อมอุณหภูมิของตัวอย่าง
- 4) จบบันทึกค่า นำภาชนะบรรจุตัวอย่างออกแล้วนำภาชนะที่บรรจุตัวอย่างต่อไปมาวัดค่า

ภาคผนวก ง

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

Key Engineering Materials
 ISSN: 1662-9795, Vol. 862, pp 7-11
 doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.862.7
 © 2020 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland

Submitted: 2020-03-06
 Revised: 2020-04-29
 Accepted: 2020-05-08
 Online: 2020-09-09

Prediction of Water Activity in Mamón (*Filipino sponge*) Cakes by near Infrared Hyperspectral Imaging

Manunchaya Sricharoonratana¹ and Sontisuk Teerachaichayut^{2,a*}

¹Department of Food Safety Management, Faculty of Food-Industry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

²Department of Food Process Engineering, Faculty of Food-Industry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

*sontisuk.te@kmitl.ac.th

Keywords: Mamón, Water activity, Spectra, Non-destructive, Prediction, Calibration.

Abstract. Water activity in foods can result in detrimental microbial activity during storage. The usual methods of water activity measurement involve destruction of the sample. Near infrared (NIR) hyperspectral imaging has previously been successfully used as a non-destructive method to determine various physical and chemical characteristics of a variety of foods. Therefore, this method was tested to determine whether it could be used to measure water activity of mamón cakes, a popular sponge cake developed in the Philippines. Individual samples (n = 178) were divided into a calibration set (n=119) and a prediction set (n=59). These samples were tested using NIR hyperspectral imaging (935-1720 nm) with a smoothing spectral pretreatment selected for developing the calibration model. Partial least squares regression was used to establish the model in order to predict the water activity. The results showed the accuracy of the calibration model in prediction that gave a correlation coefficient of 0.767 and the root mean square error of prediction of 0.0130. It was therefore concluded that NIR hyperspectral imaging has a potential for use and application for measuring the water activity of mamón cakes.

Introduction

Mamón are popular traditional sponge cakes that were developed in the Philippines that have a soft, light and fluffy texture and are commonly made in the size of cupcakes. In their review Smith et al. [1] reported that microbiological spoilage, including bacteria, yeast and mold, is the major problem in bakery products that can cause economic loss to bakery manufacturers as well as rendering them unsafe to consumers. They reported that water activity was one of the most important parameters influencing microbiological spoilage of bakery products and as a consequence their shelf life.

Near infrared (NIR) is widely used technique for qualitative and quantitative analysis of foods. It is a non-invasive, non-destructive, rapid, accurate and reliable method. NIR hyperspectral imaging technique can be used to obtain both spatial and spectral information simultaneously from an object and data are saved in a 3D "hypercube" comprising of two spatial and one wavelength dimension [2]. For quantitative analysis, NIR hyperspectral imaging has been used to determine levels of starch in adulterated fresh cheese [3], determination of freshness of hens' eggs [4], determination of total soluble solids, titratable acidity and maturity index of limes [5], determination of texture and total soluble solids in jelly [6], determination of acidity and total soluble solids in guavas [7], determining the level of moisture, color and pH in cooked, pre-sliced turkey hams [8].

Mamón are traditional Filipino chiffon or sponge cakes, typically baked in distinctive cupcake-like molds, which are made in several other countries including Thailand. They have a soft, light and fluffy texture and can have a restricted shelf-life. Hence, the overall aim of this study was to test NIR hyperspectral imaging in order to determine water activity in mamón cakes in order to assess the shelf life of individual cakes.

All rights reserved. No part of contents of this paper may be reproduced or transmitted in any form or by any means without the written permission of Trans Tech Publications Ltd, www.scientific.net. (#542696 181-11/09/20,03:49:10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Experiment Details

Mamón cake samples. Mamón cakes (N=178) were produced in a single lot at a local bakery (Mamon Bakery, Lad Prao, Bangkok, Thailand) and each cake weighed 35-45 g and was approximately 3.5 cm high and 7 cm in diameter. The samples were divided into 8 groups of 38, 30, 35, 39, 9, 8, 9, 10, stored in an air-conditioned room at 25°C and taken for analysis after 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, and 7 days respectively after baking.

NIR Spectral Acquisition. Each cake was scanned using a hyperspectral camera (Specim Fx17, Spectral Imaging Ltd, Oulu, Finland) within the wavelength range of 900 to 1700 nm. The spectral bands were 224 and the spectral resolution was 8 nm. Each cake was placed on a translation stage and moved by a stepper motor through a field of view of the camera that adjusted the position speed at 20 mm/s at a scanning speed at 22.97 mm/s. At each scanning, two references were taken after the image of the cake; the dark reference image that was obtained by turning off the light source and covering the camera lens with a black cap and the white reference image that was obtained from a white Teflon tile.

Water Activity. After scanning, each sample was crumbled and 2 g were used to determine its water activity at 25°C using a water activity meter (Aqualab 4TE, Decagon Device, Inc., Pullman, WA, USA).

Data pre-processing and NIR Spectroscopy Modeling. NIR spectra from the hyperspectral image of both the sample and background of each sample were acquired, but only the actual size of each sample along its edge was the region of interest (ROI), which was achieved by removing the background, was used for analysis. The averaged spectrum of each sample was used for analysis. Samples were divided into two sets as a calibration set (N=119) and a prediction set (N=59). The ratio of the calibration set to the prediction set was 70:30. From the calibration set, spectral data were preprocessed using pretreatment methods including Savitzky-Golay smoothing, Savitzky-Golay first derivative differentiation, Savitzky-Golay second derivative differentiation multiplicative scatter correction (MSC) and standard normal variate transformation (SNV). In order to obtain the best conditions for establishing the model the highest correlation coefficient (R) and the lowest root mean square error of cross validation (RMSECV) were used. The calibration model for predicting water activity was developed using partial least squares regression (PLSR) and then validated. From the prediction set, the accuracy of the calibration model was evaluated in terms of R and RMSEP. UmBio Evince hyperspectral image analysis software (Prediktera Evince, version 2.7.5, Sweden) and The Unscrambler software (CAMO, Oslo, Norway) were used for statistical analysis.

Results and Discussion

The averaged original spectra of the samples of mamón cakes from ROI, excluding spectra of the background in the wavelength of 935 nm to 1720 nm, are shown in Fig. 1 (a). He *et al.* [9] reported that the intensive absorption peak at around 1450 nm is related to water absorption, corresponding to the first overtones of O-H stretching and, in these samples, water molecules contained most of the O-H bonds, which can absorb NIR electromagnetic waves. The changes in absorbance peak of the water using hyperspectral imaging of the mamón cakes during storage would therefore be mainly due to water loss. Deng *et al.* [10] also reported that the water loss, including both non-binding and binding water molecules, required less energy absorbed from electromagnetic waves, reflecting more energy back into the lens of the hyperspectral camera. In order to observe the individual peaks of components in mamón cakes, their average second derivative spectrum was created as shown in Fig. 1 (b), which shows absorption bands at 1161, 1214, 1425 and 1464 nm. As reported above, the wavelength range of 1390-1450 nm is associated with O-H first overtones of water [11]. In addition, the characteristic absorption bands at 1300-1450 nm are also due to the overtones of O-H, corresponding to the moisture content in the samples [12]. The O-H functional group was also shown to be related to starch, which was found at 1464 nm [13]. The main absorbance wavelength region for fats is 1151-1248 nm in the near infrared area [12] and several peaks were identified from 1150 to 1235 nm that associated with C-H stretching second overtone [14].

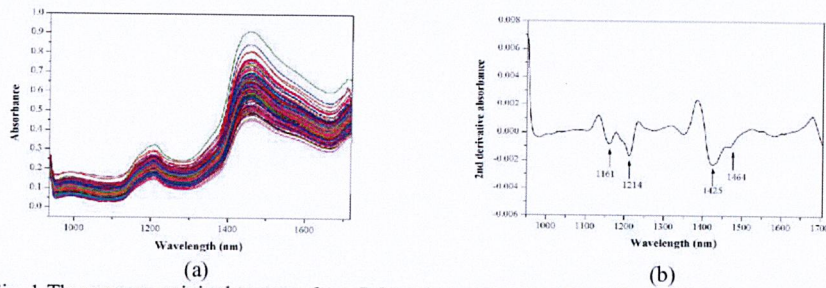


Fig. 1 The average original spectra from ROI of mamón cakes (N=178) (a). The average second derivative spectrum of mamón cakes (b).

Table 1 Characteristics of water activity in the calibration set and the prediction set for establishing the calibration model.

Item	Calibration set	Prediction set
Number of samples	119	59
Range	0.84-0.93	0.84-0.92
Mean	0.90	0.89
Standard deviation	0.02	0.02

Table 2 The results of spectral pretreatments by cross validation in the calibration set.

Pretreatment	N	F	R	RMSECV
Original	178	5	0.420	0.0149
Smoothing	178	8	0.663	0.0146
1 st Derivative	178	4	0.627	0.0152
2 nd Derivative	178	5	0.525	0.0168
MSC	178	3	0.330	0.0185
SNV	178	3	0.340	0.0184
Smoothing + 1 st Derivative	178	7	0.639	0.0152
Smoothing + 2 nd Derivative	178	4	0.581	0.0159

N = number of samples, F = factors, R = correlation coefficient, RMSECV = root mean square error of cross validation, Smoothing = Savitzky-Golay smoothing, 1st derivative = Savitzky-Golay first derivative differentiation, MSC = multiplicative scatter correction, 2nd derivative = Savitzky-Golay second derivative differentiation, SNV = standard normal variate transformation.

The range, mean and standard deviation of water activity in the calibration set and the prediction set are presented in Table 1. The number of samples (n=178) was divided into the calibration set (n=119) and the prediction set (n=59). The values of water activity in the prediction set were in the range of those in the calibration set. The mean of water activity in the calibration set and the prediction set were 0.90 and 0.89. The standard deviation of values was similar in both the calibration set and the prediction set. The distribution value of water activity in the calibration set was appropriate to establish the calibration model for prediction. Table 2, summarizes the results of spectral pretreatments for developing the calibration models by cross validation in the calibration set. The smoothing spectral pretreatment obtained the best result with the highest correlation coefficient and the lowest RMSECV (R = 0.663, RMSECV = 0.0146). Therefore, the smoothing pretreatment method was selected in order to use for establishing the calibration model for water activity.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3 The results of the calibration model in the calibration set and the prediction set for water activity determination.

Sample set	Pretreatment	N	F	R	RMSEC	RMSEP
Calibration	Smoothing	119	8	0.774	0.0123	-
Prediction	Smoothing	59	8	0.767	-	0.0130

F = Factors, N = number of samples, R = correlation coefficient, RMSEC = root mean square error of calibration, RMSEP = root mean square error of prediction.

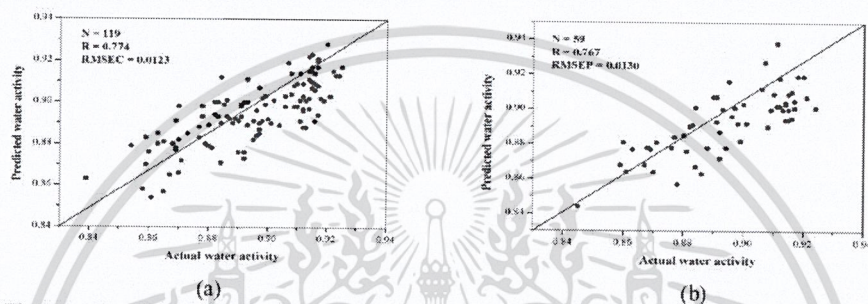


Fig. 2 Scatter plots of the actual water activity and the predicted water activity in the calibration set (a) and in the prediction set (b).

The results of the model in both the calibration set and the prediction set for water activity are shown in Table 3. The model was shown to be robust by the correlation coefficient and the root mean square error. The calibration model provided high correlations in both of the calibration set ($R = 0.774$, $RMSEC = 0.0123$) and the prediction set ($R = 0.767$, $RMSEP = 0.0130$). The results of calibration and prediction were quite similar. The factors that were assumed to influence the prediction accuracy appeared to be depended on the surface, pore structures and color of the samples. In Fig. 3, the scatter plot of the actual water activity versus the predicted water activity is presented for both in the calibration set (Fig. 2.a) and prediction set (Fig. 2.b). The actual water activity and the predicted water activity correspond to the 45-degree line which showed the calibration model could be accurately used for determination of the water activity of mamón cakes.

Conclusions

Sponge cake, including mamón sponge cakes, deteriorate after baking and the rate of deterioration is related to their moisture content. After baking, samples of the cake can be tested destructively for moisture content and the results applied to the rest of the batch. This research demonstrates the application of NIR hyperspectral imaging to measure water activity in mamón sponge cake during storage for the purpose of prediction their rate of deterioration non-destructively. The results show that NIR hyperspectral imaging in the wavelength range of 935-1720 nm had potential to predict water activity in mamón sponge cake. The model developed, using the smoothing pretreatment PLSR, satisfactorily determined water activity, with a predictive result at $R = 0.767$ and $RMSEP = 0.013$, indicating that the model was robust. It was therefore concluded that near infrared hyperspectral imaging can be successfully used as a non-destructive testing method for water activity determination in mamón sponge cakes and thus be used to predict their shelf-life. Furthermore, the NIR hyperspectral imaging technology could be a feasible and useful technique for controlling the quality of various food products. It also has the potential to be applied in online determination systems in the food manufacturing industry to help and speed up process monitoring and inspection systems.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the faculty of Agro-industry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for use of laboratory and equipment. We are grateful to Prof. Panmanas Sirisomboon for technical help and Prof. A K Thompson in preparing this paper.

References

- [1] J.P. Smith, D.P. Daifas, W. El-Khoury, J. Koukoutsis and A. El-Khoury, Shelf life and safety concerns of bakery products-a review, *J. Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 44 (2004) 19-55.
- [2] M.A. Teena, A. Manickavasagan, L. Ravikanth and D.S. Jayas, Near infrared (NIR) hyperspectral imaging to classify fungal infected date fruits, *J. Stored Products Research*. 59 (2014) 306-313.
- [3] A. Barreto, J.P. Cruz-Tirado, R. Siche and R. Quevedo, Determination of starch content in adulterated fresh cheese using hyperspectral imaging, *J. Bioscience*. 21 (2018) 14-19.
- [4] S. Suktanarak and S. Teerachaichayut, Non-destructive quality assessment of hens' eggs using hyperspectral images, *J. Food Engineering*. 215 (2017) 97-103.
- [5] S. Teerachaichayut and H.T. Ho, Non-destructive prediction of total soluble solids, titratable acidity and maturity index of limes by near infrared hyperspectral imaging, *J. Postharvest Biology and Technology*. 133 (2017) 20-25.
- [6] P. Onnom and S. Teerachaichayut, Development of calibration models to predict texture and total soluble solids in jelly using hyperspectral imaging, *J. AIP Conference Proceedings*. 2030 (2018) 020211-1-020211-5.
- [7] N. Klinbumrung and S. Teerachaichayut, Quantification of acidity and total soluble solids in guavas by near infrared hyperspectral imaging *J. AIP Conference Proceedings*. 2030 (2018) 020209-1-020209-5.
- [8] A. Iqbal, D.W. Sun and P. Allen, Prediction of moisture, color and pH in cooked, pre-sliced turkey hams by NIR hyperspectral imaging system, *J. Food Engineering*. 117 (2013) 42-51.
- [9] H.J. He, D. Wu and D.W. Sun, Non-destructive and rapid analysis of moisture distribution in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets using visible and near-infrared hyperspectral imaging, *J. Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 18 (2013) 237-245.
- [10] S. Deng, Y. Xu, X. Li and Y. He, Moisture content prediction in tealeaf with near infrared hyperspectral imaging, *J. Computers and Electronics in Agriculture*. 118 (2015) 38-46.
- [11] F. Westad, A. Schmidt and M. Kermit, Incorporating chemical band-assignment in near infrared spectroscopy regression models, *J. Near Infrared Spectroscopy*. 16 (2008) 265-273.
- [12] J. Yi, Y. Sun, Z. Zhu, N. Liu and J. Lu, Near-infrared reflectance spectroscopy for the prediction of chemical composition in walnut kernel, *J. Food Properties*. 20 (2017) 1633-1642.
- [13] A. Nawrocka and J. Lamorska, Determination of food quality by using spectroscopic methods, in: S. Grundas and A. Stepniowski (Eds.), *Advances in Agrophysical Research*, InTech, Croatia, 2013, pp.347-367.
- [14] L. Rodriguez-Saona, H. Ayvaz and R.L. Wehling, Infrared and raman spectroscopy, in: S.S. Nielsen (Ed.), *Food Analysis*, Springer nature, Cham, 2017, pp.101-127.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Contents lists available at ScienceDirect

LWT

journal homepage: www.elsevier.com/locate/lwt

Use of near infrared hyperspectral imaging as a nondestructive method of determining and classifying shelf life of cakes

Manunchaya Sricharoonratana^a, Anthony Keith Thompson^b, Sontisuk Teerachaichayut^{c,*}

^a Department of Food Safety Management, Faculty of Food-Industry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

^b Cranfield Campus, College Road, Cranfield, Bedford, MK43 0AL, United Kingdom

^c Department of Food Process Engineering, Faculty of Food-Industry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:
NIR-HSI
Discriminant analysis
Sponge cake
Shelf life

ABSTRACT

Many types of cake deteriorated rapidly due to microbial infection, which gives them a short shelf life. Accordingly, near-infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI), in the range of range of 935–1720 nm, was tested to determine whether it could be used as a nondestructive method to determine the shelf life and classify cakes based on microorganism infections during storage. The average spectrum from a region of interest (ROI) in the spectral image of each sample was acquired by NIR-HSI. Partial least squares regression (PLSR) was used to establish the model in order to predict storage time of sponge cakes. The model proved accurate with a correlation coefficient (R) of 0.835 and the root mean square error of prediction (RMSEP) of 1.242 days. Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) was applied to establish the classification model for distinguishing between non-expired and expired of sponge cakes. The results showed the accuracy of prediction was 91.3%. The predictive images showed different colors based on their storage time that could be inspected visually. Therefore NIR-HSI was shown to have potential to be used for predicting storage time of cakes and classifying cakes into expired and non-expired, which has potential for application in the bakery industry.

1. Introduction

After being processed, most foods have a limited period of time when they are safe to consume. For many foods in many countries this period must legally be indicated on the package. However, cakes may be sold directly to the public from the bakery without packaging, therefore there is no indication of their shelf life. In their review Smith, Daifas, El-Khoury, Koukoutsis, and El-Khoury (2004) reported that microbiological spoilage, caused by bacteria, yeast and mold are a major problem in bakery products resulting in economic loss to producers as well as rendering them unsafe to consumers. For example, *Bacillus cereus* and *Staphylococcus aureus* from cream-filled bakery products, have been implicated in foodborne poisoning outbreaks. Also, mycotoxin production from certain mold can be hazardous. Bakery products are commonly spoiled by molds that are visible on their surface, such as *Penicillium* and *Aspergillus*, but bacteria may not be visible. Spoilage by yeast can be divided into two types, visible yeast and fermentative spoilage resulting in alcohol production (Morassi et al., 2018). Microorganisms are

destroyed during baking, but post-baking contamination from the air, product handling and poorly sanitized equipment can result in contamination (Yang, Li, & Mariga, 2017). *Bacillus cereus* is a gram-positive, rod-shaped spore-forming bacterium that has the ability to grow at a variety of temperatures and pH levels (El-Arabi & Griffiths, 2017). It is commonly found in soil, on vegetables and in many raw and processed foods (FDA-BAM online, 2019). *B. cereus* spores are also commonly found in flour and have been implicated in several outbreaks of food-borne illnesses involving bakery products. Their spores are heat resistant and can survive baking, and can increase to levels associated with toxin production (Smith, Daifas, El-Khoury, & Austin, 2003).

Microorganisms, infecting food, produce enzymes that can lead to objectionable by-products rendering the food unacceptable to consumers (Petruzzi, Corbo, Sinigaglia, & Bevilacqua, 2017). Total plate count (TPC) is an indicator of the level of microorganism in the product (FDA-BAM online, 2001a). The contaminated food may be slightly blemished, severely blemished or completely decomposed, with the actual growth manifested by rotting spots of various sizes and colors,

* Corresponding author.

E-mail address: sontisuk.te@kmitl.ac.th (S. Teerachaichayut).

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110369>

Received 19 June 2020; Received in revised form 10 September 2020; Accepted 7 October 2020

Available online 10 October 2020

0023-6438/© 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

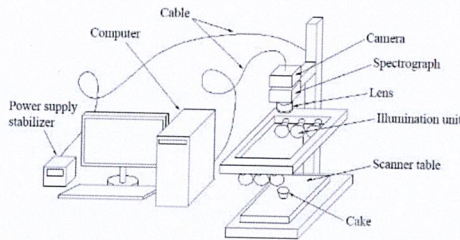


Fig. 1. Experimental equipment and sample presentation.

unsightly scabs, slime, white cottony mycelium and highly colored sporulating mold (FDA-BAM online, 2001b). Fenchel (2013) showed that the number of microorganisms in the bakery products increased with time and may produce toxins that can spoil products, cause poisoning, but cannot be seen by the naked eye. Therefore, a nondestructive technique for predicting the storage time and classifying bakery products, based on the number of microorganisms, would be an important safety asset to both the bakery and for the consumer. Bacteria require certain levels of moisture to survive and grow, therefore bacterial contamination is strongly influenced by water activity (Smith et al., 2004). Smith and Simpson (1995) classified bakery products based on their water activity as: low moisture (≤ 0.6), intermediate moisture (0.6–0.85) and high moisture (> 0.85). Fontana and Campbell (2004) reported that sponge cakes have high water activity that can limit their shelf life due to microbial spoilage. Therefore sponge cakes were selected as a representative of cakes for use in this study. Sponge cake is a foam type cake that contains only a small amount of fat, which comes from the use of whole eggs. The batter is prepared by heating the flour, egg yolks and half of the sugar together. The egg whites and remaining half of the sugar are whipped into foam separately and then added to the batter (Miller, 2016). Therefore sponge cake was selected to use as a representative of cakes in this study.

Hyperspectral imaging (HSI) is a form of spectral imaging that integrates spectroscopy and digital imaging to obtain both spectral and spatial information of an object simultaneously. The data are saved in a 3D "hypercube" comprising of two spatial and one wavelength dimension (Teena, Manickavasagan, Ravikanth, & Jayas, 2014). HSI has been used for determining quantitative levels of chemicals in various kinds of foods including soluble solids content in oranges (Zhang, Zhan, Pan, & Luo, 2020), firmness and total soluble solids of sweet cherries (Pullanagari & Li, 2021), the internal quality of nectarines (Munera et al., 2019), the freshness of hens' eggs (Suktanarak & Teerachaichayut, 2017), total soluble solids, titratable acidity and maturity index of limes (Teerachaichayut & Ho, 2017), deoxynivalenol in wheat (Femenias, Gatiús, Ramos, Sanchis, & Marín, 2020), myoglobin content in nitrite-cured mutton (Wan et al., 2020) and the maturity of long-ripening hard cheeses (Priyashantha et al., 2020). In qualitative analysis, HSI has previously been also used in beef meat (Zhao et al., 2020), lamb meat (Zheng, Li, Wei, & Peng, 2019), honey (Noviyanto & Abdulla, 2020), detection of early decay on citrus fruit (Tian, Fan, Huang, Wang, & Li, 2020) and discrimination of talcum powder and benzoyl peroxide in wheat flour (Fu, Chen, Fu, & Wu, 2020). Also, NIR-HSI has been investigated microorganism infections in foods such as identification of moldy peanuts (Yuan, Jiang, Qiao, Qi, & Wang, 2020), detection of fungi, including classifying maize kernels naturally infected by fungi (Chu, Wang, Ni, Li, & Li, 2020), detection of *Fusarium* sp. infections in wheat kernels (Delwiche, Rodriguez, Rausch, & Graybosch, 2020). Therefore, the aim of this study was to investigate the application of NIR-HSI as a nondestructive technique for predicting shelf life of sponge cakes and classifying them based on their predicted shelf life.

2. Materials and methods

2.1. Sample preparation

One hundred and eighty freshly baked cakes were purchased from a local bakery (Bakery shop, Lad Prao, Bangkok), packed in oriented polystyrene plastic boxes. Each cake was in a paper cup and weighed between 35 and 45 g.

2.2. Sample storage

In this experiment, directly after the cakes had been baked, samples were immediately taken to the laboratory for the measurements, which is referred to as day 1, and samples were subsequently measured every 24 h for 8 days. During that time, the samples were stored in an air conditioned room at about 25 °C and 55–65% RH. For the microbiological spoilage experiment, samples ($N = 50$) were divided randomly between 5 groups of ten with one group removed from the plastic boxes and tested for microbiological spoilage each day. For establishing the calibration and classification models, samples ($N = 130$) were divided at random into 8 groups and one group was removed from the plastic boxes and measured each day.

2.3. Spectral acquisition

Each sample was scanned using a hyperspectral camera (Specim Fx17, Spectral Imaging Ltd, Oulu, Finland) with the wavelength of 935–1720 nm in a reflectance mode (Fig. 1). The spectral bands were 224 with the size of 640×846 pixels. Each sample was placed on the scanner table and moved by a stepper motor through the field of view of the camera with a scanning speed at 22.97 mm/s. The illumination unit had six halogen lamps, three lamps at each side, which were adjusted to the illumination angle at 45° to the sample. At each scanning, the sample and two references were taken, the dark reference image, which was obtained by turning off the light source and covering the camera lens with a black cap, and the white reference image, which was obtained from a white Teflon tile. Then, each sample was scanned, and its spectral image was acquired, as well as the background, in the wavelength ranged 935–1720 nm. Only the spectral image of the sample was required for further analysis therefore the background was removed. The reason for this was because components of the sample and the background were different therefore the spectral information of the sample and the background were different, which meant that the spectral image of the background could be separated and deleted using principle component analysis (Bai, Zhang, Xiao, He, & Bao, 2020). Therefore the region of interest (ROI) of each image was the actual size of each sample after removing the background. The remaining spectra of the sample were averaged and the average spectrum of each sample was used as the representative for analysis.

2.4. Microbiological analysis

Microbiological spoilage was determined, on 10 samples each day for 5 days using the standard methods for total plate count (FDA-BAM online, 2001a), yeast and mold counts (FDA-BAM online, 2001b) and *Bacillus cereus* count (FDA-BAM online, 2019). The results were reported as cfu/g.

2.5. Water activity

After NIR-HSI scanning, each cake sample was crumbled and 2 g used for water activity determination (Decagon Device, Inc., 2008) at 25 °C using Aqualab4TE (Decagon Device, Inc., Pullman, WA, USA).

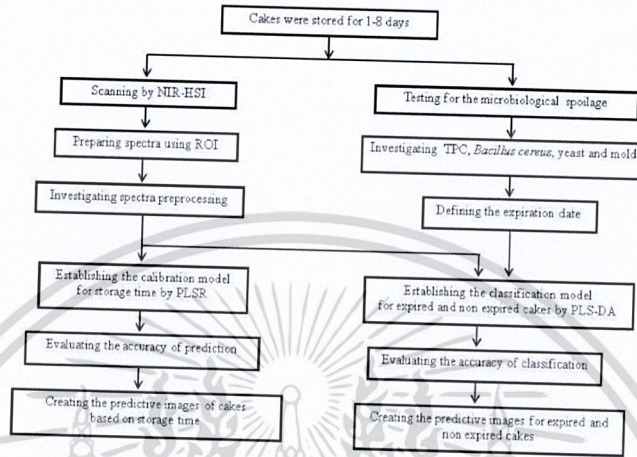


Fig. 2. Diagram of analysis for classification of sponge cakes based on storage time.

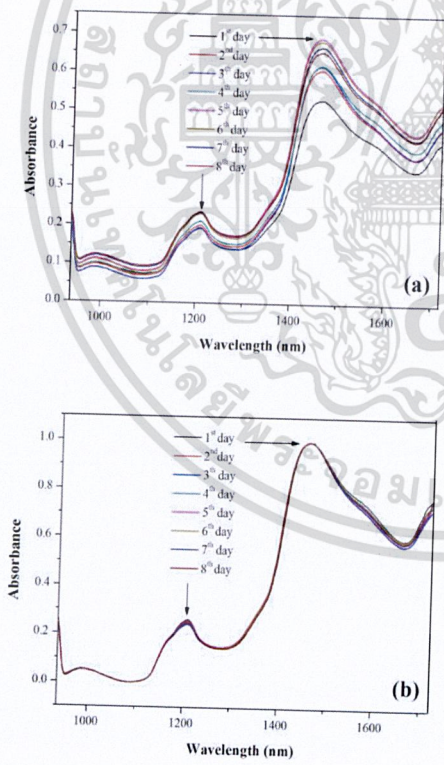


Fig. 3. The average absorbance spectra of the sponge cake in each day of storage time.

2.6. Data pre-processing, modeling and predictive image processing

The spectra of samples were divided between the calibration of 129 and the prediction set of 64 (Fig. 2). The spectral pretreatment algorithms were investigated. These were used for preprocessing in order to improve spectral data such as reduction of noise, base line shift and broadband shift (Teerachachayut & Ho, 2017). The calibration model for the cakes, based on their storage time, was established using partial least squares regression (PLSR). The spectral pretreatments of samples in the calibration set were investigated in order to obtain the calibration model that had the best performance for prediction. The highest R value, the lowest root mean square error of cross validation (RMSECV) and the lowest number of latent variables (LV) were considered, in order to select the best calibration model. The selected calibration model was used for evaluating the accuracy of the model by testing it with the samples in the prediction set (Suktanarak & Teerachachayut, 2017). R and RMSEP were used to evaluate the accuracy of the calibration model for predicting the storage time of cakes.

The calibration model was used to create predictive spectral images of cakes based on their time in storage. The predictive images were achieved by interpolation of the results of the predicted value from the models in each pixel of the spectral image. The predictive images displayed the distribution value of storage time in the different colors from point to point based on the color scale.

The results of the microbiological analyses were used to define the expiration date of cakes based on the outline of criteria of microbiological quality of food and food contact containers (Bureau of quality and safety of food, 2017). Partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA) and cross validation were applied to develop the classification model for expired and non-expired sponge cakes. A value of 0 was defined as non-expired cakes and 1 was defined for expired cakes. The spectral pretreatments were used in the calibration set. The PLS-DA classification models from the various pretreatments were established and cross-validated. The performance of the classification models was determined and compared by considering the predictive value at a cut-off value of 0.5. If a predicted value of a sample was equal to or less than 0.5, it was identified as not expired. If the predicted value was higher than 0.5, it was identified as expired. The performance of the models from various spectral pretreatments was evaluated by considering the correct percentage of cross validation. The classification model, which gave the highest correct percentage of cross validation,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

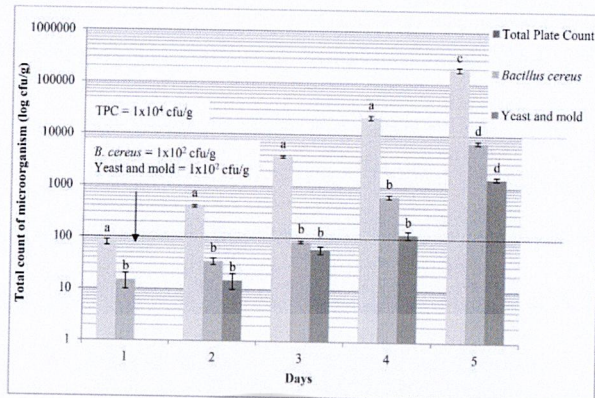


Fig. 4. Microorganism identified in sponge cakes during storage for 5 days: a, b, c, d indicate significant differences ($p < 0.05$) using the Duncan's multiple range test.

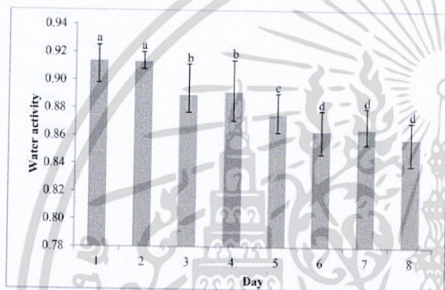


Fig. 5. Water activity of samples during storage at room temperature: a, b, c, d indicate significant differences ($p < 0.05$) using the Duncan's multiple range test.

Table 1 Characteristics of sponge cake's storage time in the calibration set and the prediction set.

Item	Calibration set	Prediction set
Number of samples	84	46
Range	1-8	1-8
Mean	3.12	3.39
Standard deviation	2.04	2.21

Table 2 The results of spectral pretreatments in the calibration set for PLSR model.

Pretreatment	N	LV	R	RMSECV (day)
Original	84	5	0.812	1.187
Smoothing	84	5	0.791	1.243
1 st Derivative	84	4	0.807	1.202
MSC	84	3	0.585	1.655
Smoothing +1 st Derivative	84	3	0.763	1.312

N = number of samples, LV = latent variables, R = correlation coefficient, RMSECV = root mean square error of cross validation, Smoothing = Savitzky-Golay smoothing, 1st derivative = Savitzky-Golay first derivative differentiation, MSC = multiplicative scatter correction.

Table 3 The results of PLSR model for storage time of sponge cake's in the calibration set and the prediction set.

Sample set	Pretreatment	N	LV	R	RMSEC (day)	RMSEP (day)
Calibration	Original	84	5	0.856	1.048	-
Prediction	Original	46	5	0.835	-	1.242

N = number of samples, LV = latent variables, R = correlation coefficient, RMSEC = root mean square error of calibration, RMSEP = root mean square error of prediction.

was selected. The samples in prediction sets were used for testing the accuracy of the selected model.

The classification model was used to create predictive images for classification between the non-expired and the expired sponge cakes. The predictive images were achieved by interpolation of the results from the models to each pixel in the spectral image. The predictive images displayed the predicted value from the classification model by different colors based on the color scale from point to point in the predictive images.

The data were analysed using the SPSS program (IBM SPSS Statistics, America), the Unscrambler software (CAMO, Oslo, Norway) and Umbio Evince hyperspectral image analysis software (Prediktera Evince, version 2.7.5, Sweden).

3. Results and discussion

3.1. Spectra of sponge cakes

NIR spectra show absorbance peaks related to vibration energy of the molecular bonds of O-H, C-H, C=O and N-H. For the cakes, the main absorption peaks were about 1200 nm and 1450 nm (Fig. 3), which are related to water absorption peaks, corresponding to the second overtone and the first overtones of O-H stretching, respectively (He, Wu, & Sun, 2013; Workman & Weyer, 2012). Osborne, Fearn, and Hindle (1993) reported that the absorption peak at 1202 nm was associated with the second overtones of O-H stretching of starch. He, Sun, and Wu (2014) reported that the absorption peak at around 1210 nm was the second overtone of C-H stretching in fat content. It indicated that water, starch and fat content dominated the spectral features due to those being the main components in cakes. The average NIR spectra of cakes varied

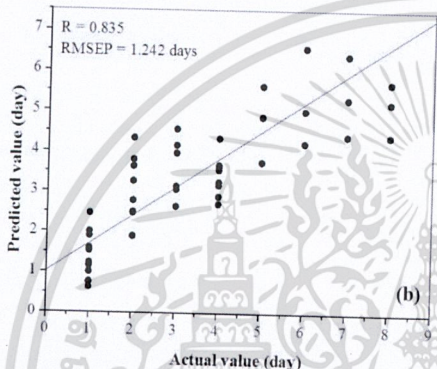
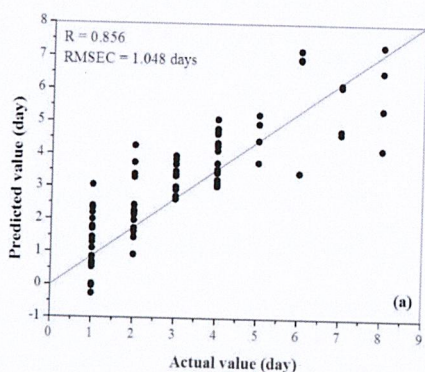


Fig. 6. Scatter plots of the actual and predicted storage time in the calibration set (a) and in the prediction set (b).

during storage, which implied that their components changed during storage, probably due mainly to water loss, which appears to be the main reason for the changes in spectra. However, there was baseline shift in the each spectra therefore they couldn't be directly compared to the value for absorbance of water at 1200 nm and 1450 nm (Fig. 3a). Therefore, the normalized spectra were considered (Fig. 3b), which it showed that the different peaks of the spectra at 1200 nm showed the relation between absorbance and storage time. The peak of spectra at 1200 nm, with the shortest storage time, was higher than cakes with the longest storage time, because of the differences in their moisture

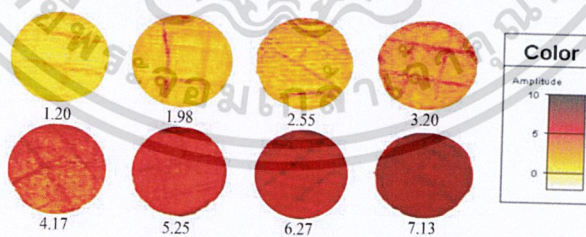


Fig. 7. Predictive images of sponge cakes after different storage times.

content.

3.2. Microbiological analysis

Undesirable microbial growth in cakes and other bakery products might occur, resulting in spoilage, especially when being stored at room temperature (Jarjawaranugoon, 2013). On day 1, there was no yeast or mold in samples because their cells and spores are generally killed by the heat in a baking process (Fig. 4), but the samples could have become contaminated, after baking, from contacts and the environment. However, *B. cereus* was detected in freshly baked samples probably because the methods used in handling ingredients of the products, which can result in fungal and microbial surface contamination from airborne microorganisms (Saranraj & Geetha, 2012). These contaminants include bacteria such as *B. cereus*, which can multiply during storage of cakes at room temperature (Lee, Chung, Shin, Dougherty, & Kangi, 2006). TPC, *B. cereus*, yeast and mold increased each day throughout storage due to the high water activity, relatively high storage temperature and the ingredients in cake, which are excellent sources of nutrients for microorganism (Grundy, 1996). The results showed no significant difference (p

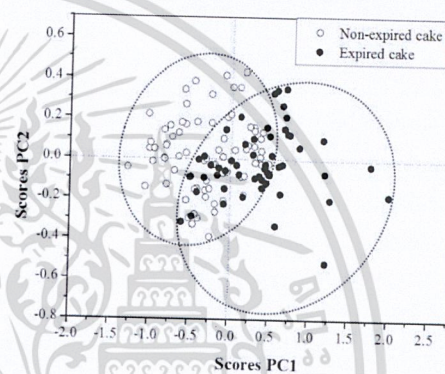


Fig. 8. PCA analysis of the spectral data of expired and non-expired sponge cakes.

Table 4

Characteristics of sponge cakes for discriminant analysis in the calibration set and the prediction set.

Item	Calibration set	Prediction set
Number of samples	84	46
Range	0-1	0-1
Mean	0.40	0.46
Standard deviation	0.49	0.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 5

The results of various spectral pretreatments on the classification of sponge cake using PLS-DA in the calibration set.

Pretreatment	N	LV	Correct	%Total accuracy
Original	84	4	76	90.48
Smoothing	84	5	77	91.67
1 st Derivative	84	3	75	89.29
MSC	84	4	71	84.52
Smoothing +1 st Derivative	84	3	75	89.29

N = number of samples, LV = latent variables, R = correlation coefficient, RMSECV = root mean square error of cross validation, Smoothing = Savitzky-Golay smoothing, 1st derivative = Savitzky-Golay first derivative differentiation, MSC = multiplicative scatter correction.

Table 6

The results of PLS-DA for classifying expired and non-expired sponge cakes.

Items	The calibration set	The prediction set
Number of samples	84	46
Spectral pretreatment	Smoothing	Smoothing
LV	5	5
Model for non-expired samples	Correct 50/50 Incorrect 0/50	25/25 0/25
Model for expired samples	Correct 31/34 Incorrect 3/34	17/21 4/21
%Total accuracy	96.43%	91.30%

> 0.05) in microorganisms in samples in days 1–4 but significant difference ($p < 0.05$) after 5 days storage. However, the maximum tolerance for TPC, *B. cereus*, yeast and mold are 1×10^4 cfu/g, 1×10^2 cfu/g and 1×10^2 cfu/g, respectively according to the Bureau of quality and safety of food (2017) standards therefore samples were still within those limits until the 4th day of storage. Therefore the shelf life of the cakes was considered to have expired on the 4th day and this was used as the expiration date for cakes in this study.

3.3. Water activity

The water activity slightly decreased with time due to moisture loss from samples during storage, showing that free water in samples evaporated from the surfaces of the cakes (Fig. 5) confirming the results of Cauvain (2016). The water activity of samples was significantly different ($p < 0.05$) during storage. This decrease in water activity of samples from 0.914 on the 1st day to 0.858 on the 8th day was still comparatively high. These levels of moisture were sufficient to support the growth of bacteria, yeast and mold that could result in spoilage and gave a short shelf life of the sponge cakes.

3.4. Quantification of cakes based on storage time

3.4.1. Calibration model for storage days

The values and standard deviations for storage time in the calibration (N = 84) and the prediction (N = 46) sets were similar (Table 1) indicating that the samples in the calibration set were appropriate to establish the calibration model and the samples in the prediction set were suitable to use for the prediction, which was confirmed in order to justify the performance of calibration model. The original spectra gave the best results with the lowest RMSECV (day) of 1.187 and the highest R of 0.812 (Table 2). Therefore, the original spectra were selected in order to use for establishing the calibration model for storage time.

The performance and accuracy of the calibration model was presented by considering RMSEC in the calibration set and RMSEP in the prediction set, respectively (Table 3). The calibration model provided sufficiently accurate results in both of the calibration set (R = 0.856, RMSEC = 1.048 day) and the prediction set (R = 0.835, RMSEP = 1.242

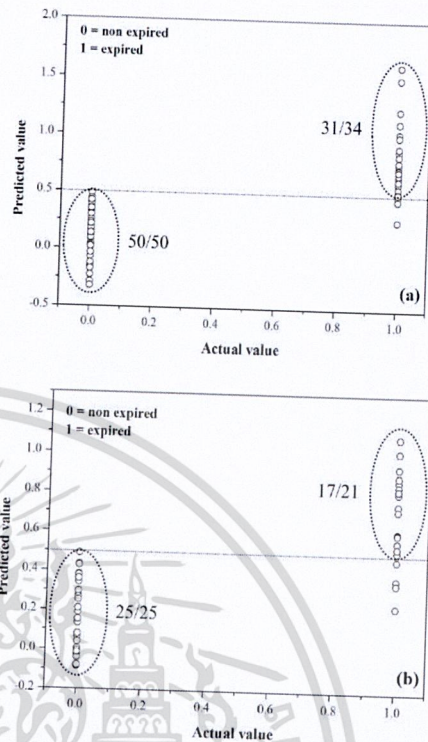


Fig. 9. Scatter plots of the actual value and the predicted value of samples in the calibration set (a), in the prediction set (b).

day). The results of calibration and prediction were quite similar indicating the robustness of the calibration model. The results of both the calibration (Fig. 6a) and prediction by PLSR model were plotted between actual values and predicted values (Fig. 6b). It showed the calibration model could be accurately used for the determination of the storage time of sponge cakes.

3.4.2. Predictive images for cakes based on days in storage

In order to create a predictive image, the spectral images of cakes during storage, were scanned by NIR-HSI. Each pixel of the images contained spectral data that were independent variables, therefore they could be substituted in the calibration model for predicting the storage time. The model was therefore used to predict storage time in each pixel and then to interpret optimum time based on a color scale. The color images of cakes from different storage times were acquired (Fig. 7), where yellow was defined as shorter storage days and brown as longer storage days. These results conformed to those of Priyashantha et al. (2020) who also used the NIR-HSI to predict the maturity of long-ripening hard cheeses. The results showed that the predictive images of cakes could be represented by different colors, which varied with storage time, facilitating nondestructive grading by visualization.

3.5. Qualification of cakes for expired and non-expired date

3.5.1. Classification model for expired and non-expired sponge cakes

For qualitative analysis, cakes were divided between non-expired

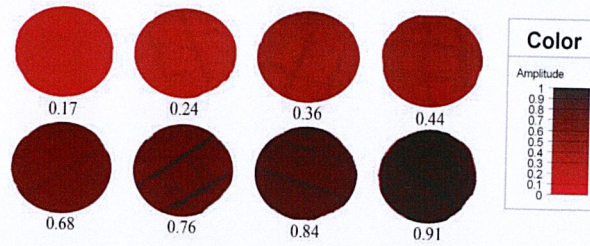


Fig. 10. Predictive images for classification of expired and non-expired sponge cakes.

and expired groups. A principal component analysis (PCA) was performed on the spectra of both groups in the wavelength of 935–1720 nm. The score plot of the first two principal components (PC1 and PC2) were 91% and 8%, indicating that PC1 distinguished the components better (Fig. 8). But the two clusters were not clearly separated, since there was still an overlap between the non-expired and the expired sponge cakes, which conforms to the findings of Zhu, Feng, Zhang, Bao, and He (2019), who used NIR-HSI to classify the freshness of spinach. In order to identify the performance and accuracy of classification between groups a classification model was carried out. The samples were divided into the calibration set ($N = 84$) and the prediction set ($N = 46$) and the expired and non-expired samples were distributed at the same ratio in both sets (Table 4).

The smoothing model showed the best results for the spectral pretreatments in the calibration set, with the highest accuracy (91.67%), when compared with other pretreatments (Table 5). Therefore, the smoothing was chosen in order to use for establishing the classification model for both the expired and non-expired cakes.

The results demonstrate the performance and accuracy of the classification model to classify expired and non-expired samples in the calibration set and the prediction set, respectively (Table 6). The accuracy of the classification model for discrimination between the samples in the prediction set was 100% for non-expired samples and 81% for expired samples, with an overall classification accuracy in the prediction set of 91.3%.

The scatter plot of the actual value versus the predicted value is presented for both in the calibration set (Fig. 9a) and the prediction set (Fig. 9b). The results showed that the model was more accurate for non-expired samples than those of expired samples when using the cut-off value of 0.5 for classification. However, it also shows that the model could be sufficient to use for classifying expired and non-expired sponge cakes.

3.5.2. Classification images of expired and non-expired cakes

The classification images were achieved by applying the results from the PLS-DA model in every pixel of spectral images from NIR-HSI. The predicted values were interpolated to colors in each pixel based on the color scale. For this red was a representative of the non-expired while dark brown was a representative of the expired sponge cake. Fig. 10 shows samples of classification images of expired and non-expired sponge cakes. The color in the predictive images was related to low to high predicted value for classification, which varied from red to dark brown based on the color scale. The images of non-expired cakes that contained low predicted value (≤ 0.5) were displayed in red. The images of expired cakes that contained high predicted value (> 0.5) were displayed in brown and dark brown. The results showed that expired and non-expired cakes could be classified by different colors. Therefore, NIR-HSI was shown to have the capability to be used to create the predictive images of expired and non-expired sponge cakes, and therefore could be used for classification by visualization, nondestructively.

4. Conclusion

This study demonstrated that NIR-HSI has potential for use as a nondestructive technique for predicting the storage life of sponge cakes, as well as differentiating between expired from non-expired cakes. After production means it can check anytime whenever it was a product. That makes us know it is expired or not. It is worth noting some parameters can't see changing by the naked eye such as microorganism, texture (Zielińska et al., 2020), and for differentiating between expired from non-expired cakes. The average spectral data from ROI of sponge cake images that were acquired from NIR-HSI in the wavelength ranged 935–1720 nm was used for quantitative and qualitative analysis. The original spectra were used for establishing the PLSR model for predicting storage time of sponge cake. The smoothing spectral pretreatment obtained the best conditions for establishing the classification model for expired and non-expired cakes using PLS-DA. Furthermore, both the PLSR model and classification model were used to create the predictive images for sponge cakes, which could be represented in different colors. Those different colors could be used to distinguish storage days after production of cakes by visualization. This showed NIR-HSI could be applied for use in predicting storage time of sponge cake and could also be applied for differentiating between expired and non-expired sponge cakes. NIR-HSI has therefore the potential to be useful as a nondestructive technique to determine the storage time and to classify expired and non-expired bakery products by visual inspection. This indicates that NIR-HSI can be developed as a nondestructive device for inspecting and sorting cakes at bakeries, which has the potential to reduce food poisoning and maintain food quality and safety.

CRedit authorship contribution statement

Manunchaya Srirachoonratana: Writing - original draft, preparation, Data curation, Methodology, Visualization. Anthony Keith Thompson: Writing - review & editing. Sontisuk Teerachaichayut: Supervision, Conceptualization, Validation.

Declaration of competing interest

There are no conflicts of interest.

Acknowledgments

This work is supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang: KREF206303. The authors are grateful to Prof. Panmanas Sirisomboon and Asst. Prof. Tongchai Puttongsiri for technical help.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110369>.

References

- Bai, X., Zhang, C., Xiao, Q., He, Y., & Bao, Y. (2020). Application of near-infrared hyperspectral imaging to identify a variety of silage maize seeds and common maize seeds. *RSC Advances*, 10, 11707–11715. <https://doi.org/10.1039/C9RA11047J>
- Bureau of quality and safety of food. (2017). Criteria of microbiological quality of food and food contact containers issue 3 (B.E. 2560). <http://bqsfdmnc.moph.go.th/bqsfdmnc/index.php/bqsfdmnc/>. (Accessed 15 May 2020).
- Carvain, S. P. (2016). Bread and other bakery products. In P. Subramaniam, & P. Wareing (Eds.), *The stability and shelf life of food* (pp. 431–460). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Chu, X., Wang, W., Ni, X., Li, C., & Li, Y. (2020). Classifying maize kernels naturally infected by fungi using near-infrared hyperspectral imaging. *Infrared Physics & Technology*, 105, 103242. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103242>
- Decagon Device. (2008). Inc. *Aqualab water activity meter operator's manual*. <https://www.grainitec.com.au/media/51732/Aqualab4TEV4.pdf>. (Accessed 15 May 2020).
- Delwiche, S. R., Rodriguez, I. T., Rausch, S. R., & Graybosch, R. A. (2019). Estimating percentages of fusarium-damaged kernels in hard wheat by near-infrared hyperspectral imaging. *Journal of Cereal Science*, 87, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.02.008>
- El-Arabi, T. F., & Griffiths, M. W. (2013). *Bacillus cereus*. In J. D. Morris, & M. E. Potter (Eds.), *Foodborne infections and intoxications* (pp. 401–407). London: Academic Press.
- FDA-BAM online. (2001a). Bacteriological analytical manual chapter 3 aerobic plate count. <https://www.fda.gov/oc/ohrt/laboratory-methods-food/bam-aerobic-plate-count/>. (Accessed 15 May 2020).
- FDA-BAM online. (2001b). Bacteriological analytical manual chapter 18 yeasts, molds and mycotoxins. <https://www.fda.gov/oc/ohrt/laboratory-methods-food/bam-yeast-molds-and-mycotoxins/>. (Accessed 15 May 2020).
- FDA-BAM online. (2019). Bacteriological analytical manual chapter 14 *Bacillus cereus*. <https://www.fda.gov/oc/ohrt/laboratory-methods-food/bam-bacillus-cereus/>. (Accessed 15 May 2020).
- Femenias, A., Gatus, F., Ramos, A. J., Sanchis, V., & Marin, S. (2020). Standardisation of near infrared hyperspectral imaging for quantification and classification of DON contaminated wheat samples. *Food Control*, 111, 107074. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.107074>
- Fenchel, T. (2013). Microorganisms (microbes), role of. In S. A. Levin (Ed.), *Encyclopedia of biodiversity* (pp. 299–308). Waltham: Academic Press.
- Fomtana, A. J., & Campbell, C. S. (2004). Water activity. In L. M. T. Nollet (Ed.), *Handbook of food analysis: Physical characterization and nutrient analysis* (pp. 39–54). New York: Marcel Dekker, Inc.
- Fu, X., Chen, J., Fu, F., & Wu, C. (2020). Discrimination of talcum powder and benzoyl peroxide in wheat flour by near-infrared hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*, 190, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.006>
- Grundy, J. G. (1996). Preservatives. In R. E. Hebeda, & H. F. Zobel (Eds.), *Baked goods: Freshness: Technology, evaluation, and inhibition of staling* (pp. 189–204). New York: Marcel Dekker, Inc.
- He, H. J., Sun, D. W., & Wu, D. (2014). Rapid and real-time prediction of lactic acid bacteria (LAB) in farmed salmon flesh using near-infrared (NIR) hyperspectral imaging combined with chemometric analysis. *Food Research International*, 62, 476–483. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.03.064>
- He, H. J., Wu, D., & Sun, D. W. (2013). Non-destructive and rapid analysis of moisture distribution in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets using visible and near-infrared hyperspectral imaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 18, 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.02.009>
- Jariyawarnagoon, U. (2013). Combined effect of honey and oxygen absorber packaging on storage quality of chocolate sponge cake. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 5, 236–243. <https://doi.org/10.19026/ajfst.5.3250>
- Lee, S. Y., Chung, H. J., Shin, J. H., Dougherty, R. H., & Kang, D. H. (2006). Survival and growth of foodborne pathogens during cooking and storage of oriental-style rice cakes. *Journal of Food Protection*, 69, 3037–3042. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-69.12.3037>
- Miller, R. (2016). Cakes: Types of cakes. In B. Caballero, P. M. Finglan, & F. Tolar (Eds.), *Encyclopedia of food and health* (pp. 579–582). London: Academic Press.
- Morassi, L. L. P., Bernardi, A. O., Amaral, A. L. P. M., Chaves, R. D., Santos, J. L. P., Copetti, M. V., et al. (2018). Fungi in cake production chain: Occurrence and evaluation of growth potential in different cake formulations during storage. *Food Research International*, 106, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.075>
- Munera, S., Blasco, J., Amigo, J. M., Cubero, S., Talens, P., & Aleixos, N. (2019). Use of hyperspectral transmittance imaging to evaluate the internal quality of peaches. *Biosystems Engineering*, 182, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.001>
- Noviyanto, A., & Abdulla, W. H. (2020). Honey botanical origin classification using hyperspectral imaging and machine learning. *Journal of Food Engineering*, 265, 109684. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109684>
- Osborne, B. G., Fearn, T., & Hindle, P. H. (1993). *Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis* (2nd ed.). Harlow: Longman Science and Technical.
- Petruzzi, L., Corbo, M. R., Sinigaglia, M., & Bevilacqua, A. (2017). Microbial spoilage of foods: Fundamentals. In A. Bevilacqua, M. R. Corbo, & M. Sinigaglia (Eds.), *The microbiological quality of food* (pp. 1–21). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Priyashantha, H., Höjer, A., Saeden, K. H., Lundh, A., Johansson, M., Bernes, G., et al. (2020). Use of near-infrared hyperspectral (NIR-HS) imaging to visualize and model the maturity of long-ripening hard cheeses. *Journal of Food Engineering*, 264, 109687. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109687>
- Pullanagari, R. R., & Li, M. (2021). Uncertainty assessment for firmness and total soluble solids of sweet cherries using hyperspectral imaging and multivariate statistics. *Journal of Food Engineering*, 289, 110177. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110177>
- Saranraj, P., & Geetha, M. (2012). Microbial spoilage of bakery products and its control by preservatives. *International Journal of Pharmaceutical & Biological Archives*, 3, 38–48.
- Smith, J. P., Daifas, D. P., El-Khoury, W., & Austin, J. W. (2003). Microbial safety of bakery products. In J. S. Novak, G. M. Sapers, & V. K. Juneja (Eds.), *Microbial safety of minimally processed foods* (pp. 3–34). Boca Raton: CRC Press.
- Smith, J. P., Daifas, D. P., El-Khoury, W., Koukoutsis, J., & El-Khoury, A. (2004). Shelf life and safety concerns of bakery products—a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44, 19–55. <https://doi.org/10.1080/10408690490263774>
- Smith, J. P., & Simpson, B. K. (1995). Modified atmosphere packaging of bakery and pasta products. In J. M. Farber, & K. L. Dadds (Eds.), *Principles of modified atmosphere and sous vide product packaging* (pp. 207–242). Lancaster: Technomic Publishing Company, Inc.
- Suktanaraj, S., & Teerachaiyayut, S. (2017). Non-destructive quality assessment of hens' eggs using hyperspectral images. *Journal of Food Engineering*, 215, 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.07.035>
- Teena, M. A., Manickavasagan, A., Ravikanth, L., & Jayas, D. S. (2014). Near infrared (NIR) hyperspectral imaging to classify fungal infected date fruits. *Journal of Stored Products Research*, 59, 306–313. <https://doi.org/10.1016/j.jaspr.2014.09.005>
- Teerachaiyayut, S., & Ho, H. T. (2017). Non-destructive prediction of total soluble solids, titratable acidity and maturity index of limes by near infrared hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology*, 133, 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.07.005>
- Tian, X., Fan, S., Huang, W., Wang, Z., & Li, J. (2020). Detection of early decay on citrus using hyperspectral transmittance imaging technology coupled with principal component analysis and improved watershed segmentation algorithms. *Postharvest Biology and Technology*, 161, 111071. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.11.071>
- Wan, G., Liu, G., He, J., Luo, R., Cheng, L., & Ma, C. (2020). Feature wavelength selection and model development for rapid determination of myoglobin content in nitrated mutton using hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*, 287, 110090. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110090>
- Workman, J., & Weyer, L. (2012). *Practical guide and spectral atlas for interpretive near-infrared spectroscopy* (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Yang, W., Li, D., & Mariga, A. M. (2017). Spoilage microorganisms in cereal products. In Y. Wang, W. Zhang, & L. Fu (Eds.), *Food spoilage microorganisms: Ecology and control* (pp. 9–28). Boca Raton: CRC Press.
- Yuan, D., Jiang, J., Qiao, X., Qi, X., & Wang, W. (2020). An application to analyzing and correcting for the effects of irregular topographies on NIR hyperspectral images to improve identification of moldy peanuts. *Journal of Food Engineering*, 280, 109915. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109915>
- Zhang, H., Zhan, B., Pan, F., & Luo, W. (2020). Determination of soluble solids content in oranges using visible and near infrared full transmittance hyperspectral imaging with comparative analysis of models. *Postharvest Biology and Technology*, 163, 111148. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111148>
- Zhao, Z., Yu, H., Zhang, S., Du, Y., Sheng, Z., Chu, Y., et al. (2020). Visualization accuracy improvement of spectral quantitative analysis for meat adulteration using Gaussian distribution of regression coefficients in hyperspectral imaging. *International Journal for Light and Electron Optics*, 212, 164737. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164737>
- Zheng, X., Li, Y., Wei, W., & Peng, Y. (2019). Detection of adulteration with duck meat in minced lamb meat by using visible near-infrared hyperspectral imaging. *Meat Science*, 149, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.11.005>
- Zhu, S., Feng, L., Zhang, C., Bao, Y., & He, Y. (2019). Identifying freshness of spinach leaves stored at different temperatures using hyperspectral imaging. *Foods*, 8, 356. <https://doi.org/10.3390/foods8090356>
- Zielinska, D., Bilka, B., Marcinia, L., Ukasiak, K., Lepecka, A., Trzaskowska, M., Nefek-Skocinska, E., et al. (2020). Consumer understanding of the date of minimum durability of food in association with quality evaluation of food products after expiration. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 1632. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051632>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวมนัญชยา ศรีจรูญรัตน์ Manunchaya Sricharoonratana
วัน เดือน ปีเกิด	11 กรกฎาคม 2536
ที่อยู่	64/1 ซอยโกสุมรวมใจ 1 แขวงคอนเมือง เขตคอนเมือง กรุงเทพฯ 10210
E-mail	earn_7978@hotmail.com
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2559	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
พ.ศ. 2563	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการความปลอดภัยอาหาร คณะอุตสาหกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ.2559-2560	ตำแหน่ง เจ้าหน้าที่ประกันคุณภาพ บริษัท สกายฟู้ดส์ จำกัด
พ.ศ.2560-2561	ตำแหน่ง เจ้าหน้าที่ประกันคุณภาพ บริษัท ไทเกอร์ เวลท์ จำกัด
พ.ศ.2561-ปัจจุบัน	ตำแหน่ง ผู้ตรวจประเมินฝึกหัดด้านความปลอดภัยอาหาร บริษัท ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์และการเกษตรแห่ง เอเชียจำกัด
ผลงานวิจัย	

1. Sricharoonratana, M. and Teerachaichayut, S. 2020. "Prediction of water activity in mamón (filipino sponge) cakes by near infrared hyperspectral imaging." **Key Engineering Materials**. 862: 7-11.
2. Sricharoonratana, M., Thompson, A.K. and Teerachaichayut, S. 2021. "Use of near infrared hyperspectral imaging as a nondestructive method of determining and classifying shelf life of cakes." **LWT**. 136: 110369.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้