

การตรวจสอบการปลอมปนโดโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังด้วยการวิเคราะห์

ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด

DETECTION OF ADULTERATION OF TAPIOCA STARCH WITH DOLOMITE

BY NEAR INFRARED HYPERSPECTRAL IMAGING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการความปลอดภัยทางอาหาร

คณะอุตสาหกรรมอาหาร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2563

KMITL-2020-FIM-054-377

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DETECTION OF ADULTERATION OF TAPIOCA STARCH WITH DOLOMITE
BY NEAR INFRARED HYPERSPECTRAL IMAGING**



DUANGKAMOLRAT KHAM SOPHA

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN FOOD SCIENCE**

FACULTY OF FOOD INDUSTRY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2020

KMITL-2020-FIM-054-377

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2020

FACULTY OF FOOD INDUSTRY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะอุตสาหกรรมอาหาร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบการปลอมปน โดโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังด้วยการวิเคราะห์
ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด
DETECTION OF ADULTERATION OF TAPIOCA STARCH WITH
DOLOMITE BY NEAR INFRARED HYPERSPECTRAL IMAGING

ชื่อนักศึกษา นางสาวดวงกมลรัตน์ คำโสภา
รหัสนักศึกษา 61608018
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา การจัดการความปลอดภัยอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สนธิสุข ชีระชัยชยุติ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

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

วัน / เดือน / ปีที่สอบ 28 ธันวาคม 2563 เวลา 10.00-12.00 น.

ณ ห้องประชุม 1 อาคารเรียนและปฏิบัติการแปรรูปอาหาร คณะอุตสาหกรรมอาหาร

คณะอุตสาหกรรมอาหารรับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพนธ์ ปิ่นศิริโรดม)

คณบดีคณะอุตสาหกรรมอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา วันที่ 30 เดือน 12 ปี พ.ศ. 2563 ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจสอบการปลอมปนโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด
นักศึกษา	นางสาวดวงกมลรัตน์ คำโสภา
รหัสประจำตัว	61608018
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	การจัดการความปลอดภัยอาหาร
พ.ศ.	2563
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สนธิสุข ธีระชัยชยุติ

บทคัดย่อ

การปลอมปนทางอาหารเป็นปัญหาใหญ่ที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะการปลอมเพื่อลดต้นทุนเพิ่มกำไรรวมทั้งการปลอมปนนั้นที่ยากต่อการตรวจสอบด้วยตาเปล่า โดยงานวิจัยนี้ได้นำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (ปริมาณความชื้น, ปริมาณน้ำอิสระ, ความหนาแน่น, L^* , a^* , b^*) มาใช้ในการคัดแยกและทำนายปริมาณของโคโลไมท์ที่ปลอมปนในแป้งมันสำปะหลังที่ปริมาณ 0 ถึง 100% พบว่าคุณสมบัติทางเคมีกายภาพบางคุณสมบัติสามารถคัดแยกการปลอมปนได้ แต่คุณสมบัติทางเคมีกายภาพไม่สามารถทำนายปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังได้ เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด (NIR hyperspectral image) ซึ่งเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่างสามารถนำมาทำนายทั้งทางด้านคุณภาพและด้านปริมาณในช่วงความยาวคลื่น 935 ถึง 1,720 นาโนเมตร ซึ่งทางด้านคุณภาพใช้ตัวอย่างจำนวน 400 ตัวอย่าง มาแบ่งเป็นกลุ่ม calibration จำนวน 300 ตัวอย่างและกลุ่ม prediction จำนวน 100 ตัวอย่าง จากนั้นใช้ Savitzky-Golay first derivative differentiation ในการปรับปรุงสมการรวมถึงวิธี partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) ในการคัดแยกพบว่าสมการมีความแม่นยำในการคัดแยกกลุ่ม prediction 100% ส่วนทางด้านปริมาณใช้ตัวอย่างจำนวน 201 ตัวอย่าง มาทำนายในกลุ่ม calibration จำนวน 140 ตัวอย่างและกลุ่ม prediction จำนวน 61 ตัวอย่าง จากนั้นใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) พบว่าสมการมีค่า correlation coefficient (R) 0.996 และ root mean square error of prediction (RMSEP) 2.47% ในการทำนายกลุ่ม prediction อีกทั้งยังสามารถสร้างภาพในการทำนายปริมาณในการปลอมปนได้อีกด้วย

คำสำคัญ: ไม่ทำลาย, สารปลอมปน, ทำนาย, สมการ, คัดแยก, ปริมาณ

Thesis	Detection of adulteration of tapioca starch with dolomite by near infrared hyperspectral imaging
Student	Miss Duangkamolrat Khamsopha
Student ID.	61608018
Degree	Master of science
Program	Food safety management
Year	2020
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Sontisuk Teerachaichayut

ABSTRACT

Food adulteration is a huge problem in food industry especially reducing cost and gaining more profit. The food adulteration is difficult to detect by visual inspection. This study using physicochemical properties (moisture content, water activity, bulk density, L^* , a^* , b^*) to separate between pure tapioca starch and adulterated tapioca starch that given the good result from some properties but physicochemical properties cannot indicate adulterant percent in tapioca starch. Therefore this study has been successful to classify with near infrared (NIR) hyperspectral imaging at wavelengths in range of 935 to 1,720 nm as a nondestructive technique in qualitative and quantitative. Pure tapioca starch was adulterated with dolomite at 0.5% intervals over the range of 0.0 to 100.0% (wt/wt). Qualitatively, the samples (n=400) were divided into a calibration set (n=300) and a prediction set (n=100). Spectra were preprocessed with Savitzky-Golay first derivative differentiation and using partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) to establish a classification model. The result showed total accuracy of prediction for classification was 100%. Quantitatively, the samples (n=201) were divided into a calibration set (n=140) and a prediction set (n=61). Partial least squares regression (PLSR) was used to establish a calibration model for predictiong the concentration of dolomite. The result showed correlation coefficient (R) of 0.996 and root mean square error of prediction (RMSEP) of 2.47%. Then, the model used to create the predictive images of pure tapioca starch, adulterated tapioca starch and pure adulterant.

Keywords: nondestructive, adulterant, prediction, model, classification, quantitation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ล่วงไปด้วยดีด้วยการให้คำปรึกษาแก้ไข, ช่วยเหลือและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัยนี้จาก รศ.ดร.สนธิสุข ชีระชัยชยุติ อาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, ผศ.ดร.วิพิศย์ อารีกุล และ ผศ.ดร.อพัชชา จินดาประเสริฐ ที่ให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์และสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งกรุณาตรวจทานและให้คำแนะนำตลอดจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาการจัดการความปลอดภัยอาหาร อีกทั้งนักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการคณะอุตสาหกรรมอาหารท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือและห้องปฏิบัติการตลอดงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณบิดา-มารดาที่ให้การสนับสนุนทางทุนทรัพย์ในการเรียน รวมทั้งรับฟังและให้คำแนะนำในยามที่ข้าพเจ้าท้อ ขอขอบคุณคุณมนัญชยา ศรีจรูญรัตน์ที่ร่วมฝ่าฟันมาด้วยกันตั้งแต่เข้าเรียนจนจบออกมาได้ รวมถึงคุณอุบลรัตน์ คำโสภา, คุณนิริตา เกษางาม และคุณจารุพัชร บวรณจันทร์ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจมาตลอดการศึกษาและการทำงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไปในอนาคต

ดวงกมลรัตน์ คำโสภา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สัญลักษณ์คำย่อและอักษรย่อ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แป้งมันสำปะหลัง.....	3
2.2 การปลอมปนในอาหาร.....	5
2.3 โดโลไมท์.....	8
2.4 การวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด.....	10
2.5 ปริมาณความชื้น.....	15
2.6 ปริมาณน้ำอิสระ.....	16
2.7 ค่าสี L^* , a^* , b^*	17
2.8 ความหนาแน่น.....	19
2.5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	23
3.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	23
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ IV และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	28
4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมัน สำปะหลังที่ถูกปลอมปน.....	28
4.2 การสร้างสมการในการทำนายการปลอมปนของโคโคไมท์ในแป้งมัน สำปะหลัง.....	31
4.3 การสร้างสมการในการทำนายปริมาณของโคโคไมท์ที่ปลอมปนในแป้งมัน สำปะหลัง.....	35
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	41
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	41
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	42
เอกสารอ้างอิง.....	43
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก.....	51
ภาคผนวก ข.....	53
ภาคผนวก ค.....	57
ภาคผนวก ง.....	62
ประวัติผู้วิจัย.....	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณการส่งออกของสินค้าแป้งมันสำปะหลังของประเทศไทยในปีพ.ศ. 2553 - 2563.....	3
2.2 ผลผลิตของมันสำปะหลังของประเทศไทยในปีพ.ศ. 2553 – 2562.....	4
2.3 รายการของอาหารที่ถูกปลอมปนในช่วงเดือนมกราคม – พฤษภาคม พ.ศ. 2563.....	7
2.4 ราคาของผงโคโลไมท์ที่ขนาด 150 และ 500 mesh.....	8
2.5 การแปลความหมายของค่า R และ R ²	13
2.6 การแปลความหมายของค่า RPD สำหรับดัชนีชี้-แป้ง.....	14
3.1 ค่าทางสถิติของความเข้มข้น โคโลไมท์ในกลุ่ม calibration กับกลุ่ม prediction สำหรับการสร้างสมการทำนายการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลัง.....	25
3.2 ค่าทางสถิติของความเข้มข้น โคโลไมท์ในกลุ่ม calibration กับกลุ่ม prediction สำหรับการสร้างสมการทำนายปริมาณความชื้น, ปริมาณน้ำอิสระ, ค่าสี L*, a*, b*, ความหนาแน่นรวม และปริมาณโคโลไมท์.....	25
4.1 ผลความแม่นยำในการทำนายการปลอมปนในแป้งมันสำปะหลังของสมการตัดแยกของกลุ่มCalibration หลังจากผ่านการปรับปรุงสมการด้วยวิธี PLS-DA.....	33
4.2 ผลความแม่นยำในการทำนายการปลอมปนในแป้งมันสำปะหลังของสมการตัดแยกของกลุ่มcalibration และกลุ่ม predictionด้วยวิธี PLS-DA.....	35
4.3 ผลของการปรับปรุงสเปกตรัมจากกลุ่ม calibration แล้ววิเคราะห์ด้วยวิธี PLSR.....	38
4.5 ผลของการทำนายปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังด้วยกลุ่ม calibration และกลุ่ม prediction ด้วยสมการทำนาย.....	39
ค.1 ปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและโคโลไมท์ในตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์.....	57
ค.2 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง, ผงโคโลไมท์ และแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์.....	61

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างอุดมคติของโคโลไมท์.....	9
2.2 แผนภาพเครื่องไฮเปอร์สเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด.....	11
2.3 พื้นที่ของสี CIELAB.....	18
4.1 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์และผงโคโลไมท์.....	29
4.2 principal component analysis ทางด้านคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน.....	30
4.3 principal component analysis ในส่วนของสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน.....	30
4.4 ค่าการดูดกลืนแสงของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนทั้งหมด 400 ตัวอย่าง.....	31
4.5 เส้นสเปกตรัมในการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลัง, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน และโคโลไมท์.....	32
4.6 แผนภาพการกระจายของสมการคัดแยกแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์.....	34
4.7 เส้นสเปกตรัมในการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลัง, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์และผงโคโลไมท์.....	36
4.8 เส้นสเปกตรัมในการดูดกลืนแสงเฉลี่ยที่ผ่านการปรับปรุงด้วย 2^{nd} derivative ของแป้งมันสำปะหลัง, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์และผงโคโลไมท์.....	37
4.9 regression coefficients ของสมการทำนายปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังจากกลุ่ม calibration.....	38
4.10 แผนภาพการกระจายของสมการทำนายปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธี PLSR ในกลุ่ม calibration และกลุ่ม prediction.....	39
4.11 ภาพการทำนายปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังในปริมาณต่างๆ.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ VII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.1 การเตรียมตัวอย่างการปลอมปนของแป้งมันสำปะหลังและโดโลไมท์ใน ถุงพลาสติกใส.....	53
ข.2 ตัวอย่างแป้งมันสำปะหลัง, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน และผงโดโลไมท์.....	53
ข.3 การวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดของแป้งมัน สำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยเครื่องไฮเปอร์สเปกตรัม.....	54
ข.4 ตัวอย่างแป้งมันสำปะหลัง, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน และผงโดโลไมท์.....	54
ข.5 การหาปริมาณความชื้นด้วยเครื่อง Mettler Toledo MJ33.....	55
ข.6 การหาปริมาณน้ำอิสระด้วยเครื่อง Water activity Aqua lab 4TE.....	55
ข.7 การวัดค่าสีด้วยเครื่อง CR-400 Chroma Meter.....	56
ข.8 การวัดค่าความหนาแน่น.....	56
ง.1 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เรื่อง Detection of Adulteration of Tapioca Starch with Dolomite by near Infrared Hyperspectral Imaging หน้าที่ 1.....	62
ง.2 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เรื่อง Detection of Adulteration of Tapioca Starch with Dolomite by near Infrared Hyperspectral Imaging หน้าที่ 2.....	63
ง.3 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เรื่อง Detection of Adulteration of Tapioca Starch with Dolomite by near Infrared Hyperspectral Imaging หน้าที่ 3.....	64
ง.4 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เรื่อง Detection of Adulteration of Tapioca Starch with Dolomite by near Infrared Hyperspectral Imaging หน้าที่ 4.....	65
ง.5 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เรื่อง Detection of Adulteration of Tapioca Starch with Dolomite by near Infrared Hyperspectral Imaging หน้าที่ 5.....	66
ง.6 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เรื่อง Utilizing near infrared hyperspectral imaging for quantitatively predictiong adulteration in tapioca starch.....	67

สัญลักษณ์คำย่อและอักษรย่อ

อักษรย่อ	ความหมาย
LV	latent variables
N	number of samples
MSC	multiplicative scatter correction
PLS-DA	partial least squares - discriminant analysis
PLSR	partial least squares regression
R	correlation coefficient
RMSEC	root mean square error of calibration
RMSECV	root mean square error of cross validation
RMSEP	root mean square error of prediction
RPD	ratio of performance to deviation
SEP	standard error of prediction
SNV	standard normal variate transformation
smoothing	Savitzky-Golay smoothing
1 st derivative	Savitzky-Golay first derivative differentiation
2 nd derivative	Savitzky-Golay second derivative differentiation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อ IXI และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แป้งมันสำปะหลังเป็นสินค้าเศรษฐกิจสำคัญอย่างหนึ่งของไทยมีมูลค่าการส่งออกมากกว่า 20,000 ล้านบาท (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, 2563) อีกทั้งตลาดโลกยังมีความต้องการแป้งมันสำปะหลังจำนวนมาก ทำให้ราคาของแป้งมันสำปะหลังนั้นมีราคาที่สูงกว่าแป้งชนิดอื่นๆ ซึ่งสวนทางกับปริมาณการปลูกมันสำปะหลังในประเทศไทยที่น้อยลงเรื่อยๆ เนื่องจากเกษตรกรหันไปปลูกพืชเศรษฐกิจชนิดอื่นแทน เช่น ยางพารา, อ้อย, ปาล์มน้ำมัน เป็นต้น จึงมีผู้ประกอบการบางรายนำวัตถุดิบอื่นมาผสมลงในแป้งมันสำปะหลัง เพื่อลดราคาต้นทุนการผลิตลงจากเดิม, ทดแทนสัดส่วนของมันสำปะหลังที่มีน้อยลง และเพิ่มน้ำหนักให้แก่สินค้าแป้งมันสำปะหลัง โดยวัตถุดิบที่มักถูกนำมาใช้นั้น คือ โดโลไมท์ หรือ หินฝุ่นเมื่อเปรียบเทียบราคาของแป้งมันสำปะหลังกับ โดโลไมท์จะพบว่าราคาของโดโลไมท์นั้นถูกกว่าแป้งมันสำปะหลัง 10 - 20 เท่าตัว หากมีการนำมาปลอมปนเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้ได้กำไรเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งโดโลไมท์นั้น มีลักษณะเป็นผงสีขาว ครึ้ม ไม่แตกต่างจากลักษณะของแป้งมันสำปะหลัง ทำให้ยากต่อการมองเห็นด้วยตาเปล่า การแยกความแตกต่างของแป้งมันสำปะหลังที่มีการปลอมปนของโดโลไมท์ออกจากแป้งมันสำปะหลังบริสุทธิ์ จึงมีความจำเป็นสำหรับผู้ผลิตในอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องนำแป้งมันสำปะหลังมาใช้ เพื่อที่ผู้ผลิตจะได้รับความไว้วางใจจากผู้บริโภค วิธีการตรวจสอบแบบปกตินั้นมักใช้เวลาและสารตั้งต้นจำนวนมากในการวิเคราะห์หาการปลอมปนนี้ แต่การนำเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดมาใช้ในตรวจสอบการปลอมปนของโดโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังจะทำให้สามารถตรวจสอบได้รวดเร็ว, ไม่ทำลายตัวอย่าง, ประหยัดสารเคมี และสะดวกขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อให้ได้สมการที่ใช้สำหรับการคัดแยกการปลอมปน โดโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด

1.2.2 เพื่อให้ได้สมการที่ใช้สำหรับทำนายปริมาณ โดโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาการวิเคราะห์หาปริมาณและตรวจสอบโคโลไมท์ที่ถูกปลอมปนลงในแป้งมันสำปะหลังในปริมาณ 0 - 100% (w/w) สร้างสมการสำหรับทำนายปริมาณ โคโลไมท์ และคัดแยกการปลอมปนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดโหมดสะท้อนกลับที่ช่วงความยาวคลื่น 900 ถึง 1,700 นาโนเมตรจำนวน 400 ตัวอย่าง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการปลอมปนโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังได้ถูกต้องแม่นยำ

1.4.2 ลดระยะเวลาที่ใช้สำหรับการตรวจสอบการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังให้รวดเร็วขึ้นจากการเดิม ที่ตรวจสอบด้วยสารเคมีตามวิธีการทางเคมี

1.4.3 ลดการใช้สารเคมีในการตรวจสอบการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลัง

บทที่ 2

วรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แป้งมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังถือว่าเป็นพืชที่สำคัญชนิดหนึ่ง เนื่องจากแป้งจัดว่าเป็นแหล่งพลังงานของมนุษย์ที่มนุษย์ใช้ในการบริโภคเพื่อให้พลังงาน 70 ถึง 80% ของพลังงานที่มนุษย์ต้องการ จึงมักนิยมนำมาแปรรูปเป็นแป้งมันสำปะหลังเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับพืชดังกล่าว โดยมีปริมาณในการใช้มากติดอันดับ 1 ใน 5 ของโลก (Panichnumsin et al., 2010; Alcázar & Meireles, 2015) อีกทั้งยังมีการเติบโตที่ต่อเนื่องพิจารณาได้จากข้อมูลการส่งออกแป้งมันสำปะหลังของไทยตั้งแต่ปีพ.ศ. 2553 จนถึงปีพ.ศ. 2563 ดังตารางที่ 2.1 ที่มีปริมาณการส่งออกในทุกปีมากกว่า 20,000 ล้านบาท และยังมีอัตราการขยายตัวมากขึ้นทุกปีตลอดระยะเวลาเกือบ 10 ปีนี้ แต่ในทางกลับกันนั้นจากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรดังตารางที่ 2.2 พบว่าปริมาณผลผลิตของพืชมันสำปะหลัง ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2553 จนถึงปีพ.ศ. 2563 มีปริมาณผลผลิตที่ใกล้เคียงเดิม หรือ มีปริมาณผลผลิตน้อยลงจากเดิม ทำให้แป้งมันสำปะหลังจัดว่าเป็นสินค้าเกษตรที่มีความต้องการสูงในตลาดการซื้อขาย

ตารางที่ 2.1 ปริมาณการส่งออกของสินค้าแป้งมันสำปะหลังของประเทศไทยในปีพ.ศ. 2553 - 2563

ปีพุทธศักราช	มูลค่า (ล้านบาท)	อัตราการขยายตัว (%)
2553	23,070.0	48.10
2554	28,286.1	15.05
2555	30,835.4	9.01
2556	34,964.9	13.39
2557	41,144.5	17.67
2558	41,120.0	-0.06
2559	40,042.7	-2.62
2560	35,305.3	-11.83
2561	44,671.2	26.53
2562 (ม.ค.-ต.ค.)	33,227.0	-8.79
2563 (ม.ค.-ต.ค.)	29,107.1	-12.40

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (2563)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ผลผลิตของมันสำปะหลังของประเทศไทยในปีพ.ศ. 2553 - 2562

ปีพุทธศักราช	ปริมาณผลผลิต (ตัน)	อัตราการขยายตัว (%)
2553	22,005,740	-
2554	21,912,416	0.00
2555	29,848,491	0.36
2556	30,227,542	0.01
2557	30,022,052	-0.01
2558	32,357,741	0.08
2559	31,161,103	-0.04
2560	30,495,190	-0.02
2561	29,368,185	-0.04
2562	31,079,966	0.06

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2563)

การแปรรูปมันสำปะหลังให้เป็นแป้งมันสำปะหลังสามารถทำได้โดยนำมันสำปะหลังที่แห้งแล้วมาบด จากนั้นนำไปแยกใยอาหารออก หากผลิตจากมันสำปะหลังที่มีรสขมจะต้องนำหัวมันสำปะหลังไปแช่น้ำก่อนเพื่อให้รสขมของหัวมันหายไป ก่อนนำไปผ่านกระบวนการตามวิธีปกติ (Codex, 2013) ซึ่งแป้งมันสำปะหลังที่ได้นั้นมีสีขาวและเหลืองเล็กน้อย จากค่า $L^* = 98.1$, ค่า $a^* = -5.8$ และ ค่า $b^* = 7.3$ (Aviles et al., 2016) แป้งมันสำปะหลังมักถูกนำไปใช้ในรูปแบบของแป้งมันสำปะหลังธรรมดา มากกว่าแป้งมันสำปะหลังชนิดดัดแปร

ในส่วนของอุตสาหกรรมอาหารนั้นแป้งมันสำปะหลังถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบเนื้อสัมผัส, สารให้ความหนืด, สารคงความชื้นและสารทำให้เกิดเจล เป็นต้น และนิยมมากในการใช้เป็นแป้งสำหรับทำอาหารกลุ่มเบเกอรี่ เช่น การนำไปผลิตขนมปัง ซึ่งถือว่ามีกระบวนการที่สูง นอกจากนี้แล้วแป้งมันสำปะหลังยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ไม่ใช่อุตสาหกรรมอาหารได้อีกด้วย เช่น อุตสาหกรรมยา ที่มักถูกนำไปใช้เป็นส่วนเชื่อมตัวยาคู่กัน (Panichnumsin et al., 2010; Alcázar & Meireles, 2015) หรือ ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิง และกระดาษ สำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกด้วย (Wang et al., 2018)

ทางด้านประเทศไทยได้มีการกำหนดมาตรฐานของสินค้าแป้งมันสำปะหลังโดยกระทรวงพาณิชย์ (2562) ในประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่องกำหนดให้แป้งมันสำปะหลังเป็นสินค้ามาตรฐานและมาตรฐานสินค้าแป้งมันสำปะหลัง พ.ศ. 2562 โดยมีเนื้อความดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

“ข้อ 3 สินค้ามาตรฐานแป้งมันสำปะหลังตามข้อ 2 ต้องมีมาตรฐานดังต่อไปนี้

- (1) ความเป็นกรด-ด่าง ตั้งแต่ 4.5 ถึง 7.0
- (2) ส่วนของแป้งที่สามารถผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95
- (3) ต้องไม่บูดเน่า หรือขึ้นรา ไม่มีกลิ่นและหรือสีผิดปกติ ไม่มีแมลงและไม่มีวัตถุอื่น เว้นแต่

วัตถุหรือสารอื่นจะพึงมีได้ในกรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลังตามปกติเท่านั้น”

เนื่องมาจากความต้องการของแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้นและปริมาณการปลูกที่ยังคงเดิมจึงทำให้มีการนำโดโลไมท์มาปลอมปนลงไปในแป้งมันสำปะหลัง ดังที่นายปราโมทย์ กงทอง นายกสมาคมโรงงานผู้ผลิตมันสำปะหลังภาคตะวันออกเฉียงเหนือเปิดเผยว่ามีการนำโดโลไมท์มาปลอมปนลงไปในแป้งมันสำปะหลังเพื่อเพิ่มน้ำหนักให้ผู้ซื้อเข้าใจผิด ซึ่งหากนำแป้งมันสำปะหลังที่มีการปลอมปนด้วยโดโลไมท์ไปผลิตเอทานอลก็สามารถทำให้เครื่องจักรเกิดความเสียหายจากสารโดโลไมท์ที่ไปอุดตันในท่อเครื่องจักรและหากนำผลิตอาหารสัตว์จำพวก ไก่, เป็ดและสุกร สามารถทำให้สัตว์ท้องผูกและเสียชีวิตได้ (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2553; โปสเตอร์ยุค, 2553) อีกทั้งยังมีการพบว่ามีผู้นำผงปูนไปปลอมปนในแป้งโดยมีการพบผงปูนในสารฟอสฟอรัสที่ใช้ในแป้งที่นิยมนำไปใช้สำหรับทำบะหมี่, เกี๊ยว, ซาลาเปาในประเทศจีน ซึ่งพบว่ามี การเติมผงปูน 500 กรัมต่อสารฟอสฟอรัส 2 กิโลกรัม (Harrington, 2010)

2.2 การปลอมปนในอาหาร

พระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 ในมาตรา 4 ได้กำหนดว่า “อาหาร หมายความว่าของกินหรือเครื่องสำอางชีวิตได้แก่ (กระทรวงสาธารณสุข, 2563)

(1) วัตถุทุกชนิดที่คนกินดื่มอมหรือนำเข้าสู่ร่างกายไม่ว่าด้วยวิธีใดๆหรือในรูปลักษณะใดๆแต่ไม่รวมถึงยาวัตถุออกฤทธิ์ต่อจิตและประสาทหรือยาเสพติดให้โทษตามกฎหมายว่าด้วยการนั้นแล้วแต่กรณี

(2) วัตถุที่มุ่งหมายสำหรับใช้หรือใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอาหารรวมถึงวัตถุเจือปนอาหารสีและเครื่องปรุงแต่งกลิ่นรส”

แต่ปัจจุบันมีผู้กระทำการปลอมปนบางสิ่งลงในอาหารเพื่อให้เกิดผลประโยชน์ทางการเงิน ซึ่งสร้างความเสียหายทางธุรกิจทุกปีเป็นเงินตั้งแต่ 8 ถึง 12 พันล้านยูโร การปลอมปนในอาหารนั้นในทาง European commission (2020a) ของสหภาพยุโรป ได้ระบุไว้ว่าต้องประกอบไปด้วยปัจจัย 4 ประการ ดังต่อไปนี้

- (1) การละเมิดกฎหมายของสหภาพยุโรป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (2) การจงใจ
- (3) ผลประโยชน์ทางธุรกิจ
- (4) การหลอกลวงผู้ซื้อ

และทาง European commission ได้ระบุลักษณะของอาหารปลอมให้มีลักษณะดังต่อไปนี้ โดยการปลอมปนนั้นสามารถเกิดได้ตั้งแต่หนึ่งลักษณะจนถึงการรวมกันของลักษณะหลายๆลักษณะเข้าด้วยกัน

- (1) การเจือจางผสมส่วนประกอบที่มีราคาสูงด้วยส่วนประกอบที่มีราคาถูกกว่า
- (2) การทดแทนบางส่วน หรือ ทั้งหมดของส่วนประกอบที่มีราคาสูงด้วยส่วนประกอบที่มีราคาถูกกว่า
- (3) การปกปิดอาหารที่มีคุณภาพต่ำ
- (4) การแสดงฉลากไม่ถูกต้อง / การกล่าวอ้างเท็จ
- (5) การแสดงฉลากไม่ครบถ้วน มีการใช้ส่วนประกอบอื่นที่ไม่ได้แสดงบนฉลาก
- (6) การปลอมแปลงคัดลอกแบรนด์, บรรจุภัณฑ์, สูตร เป็นต้น
- (7) การจำหน่ายสินค้าที่ในตลาดมืด

ส่วนทาง U.S. food and drug administration (2020) ได้ระบุอาหารปลอม ในส่วนของ food defense ไว้ว่าเป็นการปลอมที่มีเจตนาในการกระทำที่ตั้งใจทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพในวงกว้าง และเศรษฐกิจหยุดชะงัก โดยอาหารปลอมที่ทางสหภาพยุโรปและสหรัฐอเมริกากำหนดมานั้นสอดคล้องกับพระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 ในมาตรา 27 ที่ได้กำหนดไว้ว่า

“อาหารที่มีลักษณะดังต่อไปนี้ให้ถือว่าเป็นอาหารปลอม

- (1) อาหารที่ได้สับเปลี่ยนใช้วัตถุดิบแทนบางส่วนหรือคัดแยกวัตถุดิบที่มีคุณค่าออกเสียทั้งหมดหรือบางส่วนและจำหน่ายเป็นอาหารแต่อย่างนั้นหรือใช้ชื่ออาหารแต่นั้น
- (2) วัตถุหรืออาหารที่ผลิตขึ้นเทียมอาหารอย่างหนึ่งอย่างใดและจำหน่ายเป็นอาหารแต่อย่างนั้น
- (3) อาหารที่ได้ผสมหรือปรุงแต่งด้วยวิธีใดๆ โดยประสงค์จะปกปิดซ่อนเร้นความชำรุดบกพร่องหรือความด้อยคุณภาพของอาหารนั้น
- (4) อาหารที่มีฉลากเพื่อลวงหรือพยายามลวงผู้ซื้อให้เข้าใจผิดในเรื่องคุณภาพปริมาณประโยชน์หรือลักษณะพิเศษอย่างอื่นหรือในเรื่องสถานที่และประเทศที่ผลิต
- (5) อาหารที่ผลิตขึ้นไม่ถูกต้องตามคุณภาพหรือมาตรฐานที่รัฐมนตรีประกาศกำหนดตามมาตรา 6 (2) หรือ (3) ถึงขนาดจากผลวิเคราะห์ปรากฏว่าส่วนประกอบที่เป็นคุณค่าทางอาหารขาดหรือเกินร้อยละสามสิบจากเกณฑ์ต่ำสุดหรือสูงสุดหรือแตกต่างจากคุณภาพหรือมาตรฐานที่ระบุไว้จนทำให้เกิดโทษหรืออันตราย”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งหากผู้ใดฝ่าฝืน โดยการกระทำอาหารปลอมขึ้นมา ต้องระวางโทษจำคุกตั้งแต่หกเดือนถึงสิบปีและปรับตั้งแต่ห้าพันบาทถึงหนึ่งแสนบาท การปลอมปนในอาหารมีทั้งการกระทำที่ไม่มีผลกระทบต่อร่างกายของผู้บริโภคดังตัวอย่างในตารางที่ 2.3 โดยการปลอมปนที่เกิดขึ้นดังกล่าวมักเกิดจากการทดแทนสารบางอย่างที่มีราคาที่น้อยกว่าลงไปเพื่อมีจุดมุ่งหมายในด้านราคาของสินค้าให้มีราคาต้นทุนลดลง และเหตุการณ์ส่วนใหญ่ที่มีการปลอมปนไม่สามารถตรวจสอบได้โดยง่ายจึงมักพบขึ้นบ่อยๆ

ตารางที่ 2.3 รายการของอาหารที่ถูกปลอมปนในช่วงเดือนมกราคม – พฤษภาคม พ.ศ. 2563

อาหารที่ถูกปลอมปน	สิ่งที้นำมาปลอมปน	แหล่งที่พบ	วัตถุประสงค์
กุ้ง	สารเคมีบางอย่าง	กัมพูชา	เพิ่มน้ำหนัก
เนื้อวัว	เนื้อม้า	เคนมาร์ก	ทดแทนทั้งหมด
แป้งมันฝรั่ง	แป้งมันสำปะหลัง	เนเธอร์แลนด์	ทดแทนบางส่วน
แป้งมันหวาน	แป้งสาลี	จีน	ทดแทนบางส่วน
แป้งข้าวโพด	แป้งสาลี	จีน	ทดแทนบางส่วน
แป้งมันฝรั่ง	แป้งสาลี	จีน	ทดแทนบางส่วน
น้ำมันมะกอกพรีเมียม	น้ำมันมะกอกคุณภาพต่ำ หรือน้ำมันจากพืชกลุ่มอื่น พวคาโนล่า, ถั่วเหลือง, เฮเซลนัท, ดอกทานตะวัน	ยุโรป	ทดแทนบางส่วน
น้ำมันมะกอกพรีเมียม	บีต้า-แคโรทีน และกลีลิน	สหรัฐอเมริกา	ปกปิดคุณสมบัติที่ดูดี

ที่มา: European commission (2020b)

การปลอมปนบางในอาหารบางอย่างที่มีผลกระทบต่อร่างกายของผู้บริโภคจนถึงขั้นเสียชีวิตดังกรณีของประเทศจีนที่มีการเติมเมลามีนลงในนมผงสำหรับทารกเพื่อเพิ่มปริมาณโปรตีน โดยมีทารกเสียชีวิตทั้งหมด 6 คน และมีผู้เจ็บป่วยเกือบ 300,000 คน ในปีพ.ศ. 2546 และมีการเติมเมลามีนในอาหารสัตว์เลี้ยง ทำให้แมวและสุนัขตายเป็นจำนวนมากในสหรัฐอเมริกาในปีพ.ศ. 2550 เป็นต้น (Renée, 2014)

เนื่องจากสารที่ถูกนำมาปลอมปนไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยการมองเห็น และวิธีในการทดสอบมักเป็นวิธีการทดสอบที่ทำลายตัวอย่างและใช้เวลานานในการตรวจสอบ เช่น ใช้การทดสอบด้วยการเผาไหม้เพื่อตรวจหาเมลามีนในนม (Moyer et al., 2017), ใช้การทดสอบแบบ liquid chromatography mass spectrometry (LC-MS) สำหรับตรวจหาแป้ง (Xiao et al., 2006) และการใช้ mass spectrometry (MS) สำหรับตรวจหาโปรตีน (Lichao & Joshua, 2017) ดังนั้นการแสวงหาวิธีการตรวจสอบที่มีประสิทธิภาพและไม่ซับซ้อนจึงเป็นความท้าทายของงานวิจัยด้านความปลอดภัยทางอาหารและวิทยาศาสตร์ทางอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 โดโลไมท์

โดโลไมท์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) หรือ หินฝุ่น (รูปที่ 2.1) คือ หินตะกอนรูปแบบหนึ่งทางธรณีวิทยา เกิดขึ้นอย่างมากในธรรมชาติทำให้มีราคาถูกและหาได้ง่าย (Gregg et al., 2015) ประกอบด้วยแมกนีเซียม (Mg) และแคลเซียม (Ca) แตกต่างจากหินปูน (CaCO_3) ที่มีแมกนีเซียม (Mg) เป็นผลึกที่มีความขาวสูง (Ozdemir et al., 2017) โดยทั่วไปโดโลไมท์มีสีครีม และเทาขาว แตกต่างจากแคลเซียมและแมกนีเซียม ชนิดอื่นที่มีทั้งสีขาว, เหลือง, เขียวและดำ ซึ่งมีค่าความหนาแน่น 2.6 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความแข็ง 3.5 ถึง 4 (Imen et al., 2019)

โดโลไมท์มักถูกนำไปใช้ในการปรับ pH ของหน้าดินให้มีความเป็นกรดน้อยลง จากการใช้ความเป็นด่างของโดโลไมท์ และการใส่ลงไปในน้ำเสียเพื่อกำจัดฟอสเฟต (Huang et al., 2019) นอกจากนี้โดโลไมท์ยังสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งของแคลเซียม และแมกนีเซียมในอาหารเสริม, เครื่องสำอาง, ครีมทาผิว, ยาสำหรับเพิ่มมวลกระดูก และอุปกรณ์ทางทันตกรรมเป็นต้น โดโลไมท์มักถูกบดให้มีขนาดของอนุภาคแตกต่างกันเพื่อให้มีราคาที่ต่างกันดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ราคาของผงโดโลไมท์ที่ขนาด 150 และ 500 mesh

ขนาด (mesh)	ราคา (บาท/ตัน)
150	800
500	1,700

ที่มา: บริษัท นำสรรค จำกัด (2563)

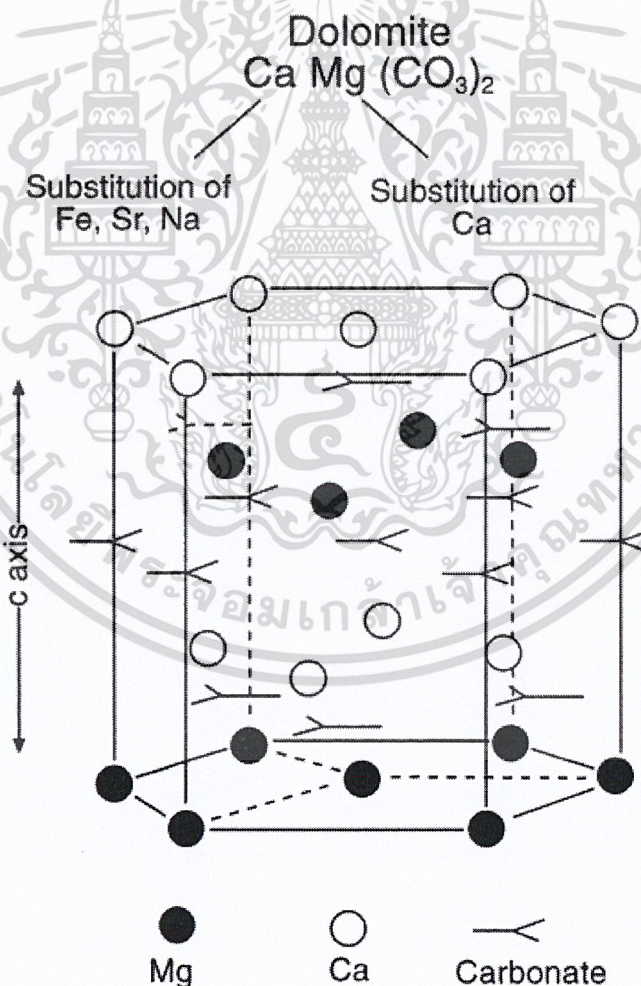
เนื่องจากโดโลไมท์ไม่มีความเป็นพิษต่อมนุษย์หากนำมาใช้ทางด้านทันตกรรม (Dias et al., 2018) จึงมีการนำมาใช้ทางทันตกรรม อีกทั้งงานวิจัยที่ศึกษาโทษของโดโลไมท์เมื่อนำโดโลไมท์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 ไมโครเมตร ปริมาณ 500 และ 1,500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในหนูทดลองที่ตั้งครรภ์ กินเป็นเวลา 6 ถึง 15 วัน กลับพบว่าไม่มีความเป็นพิษต่อมารดาและตัวอ่อนในครรภ์และยังพบว่าตัวอ่อนในครรภ์มีความสามารถในการสร้างกระดูกที่เพิ่มขึ้นจากแคลเซียมและแมกนีเซียมในโดโลไมท์อีกด้วย (Lagarto et al., 2008)

แต่ก็มีบางงานวิจัยที่ระบุว่าโดโลไมท์ขนาดโมเลกุลเล็กระดับนาโน (เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 13 นาโนเมตร) ในระดับความเข้มข้น 10, 20, 40 และ 80 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์มิลลิเมตร สามารถทำให้เซลล์เยื่อบุโพรงจมูกของมนุษย์ลดลงเหลือในปริมาณ 83%, 72%, 60% และ 54% ตามลำดับ รวมถึงเซลล์ตับของมนุษย์ลดลงเหลือในปริมาณ 76%, 69%, 54% และ 46% ตามลำดับ หากได้รับสัมผัสเป็นเวลา 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั่วโมง (Ahamed et al., 2015) รวมถึงการสัมผัสโคโลไมท์ขนาดใหญ่กว่า 5 ไมโครเมตร เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ในปริมาณ 51.7 ± 24.31 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร และโคโลไมท์ขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ในปริมาณ 23.0 ± 18.11 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร ทำให้เกิดอาการไอ, มีเสมหะ, หายใจไม่ออก และหายใจถี่ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญที่ 95% แม้ว่าจะไม่พบความผิดปกติที่บริเวณปอดของผู้ที่ได้รับสัมผัสก็ตาม (Neghab et al., 2012)

นอกจากนี้ยังมีการตรวจพบว่าผงโคโลไมท์ที่ใส่ในอาหารเสริมวิตามินแร่ธาตุ และ แคลเซียมทั่วไปมีปริมาณตะกั่ว, สารหนู, ปรอท และ โลหะหนักอื่นๆที่เป็นพิษอยู่ ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้ทำให้เกิดความผิดปกติต่อระบบประสาท, ระบบทางเดินอาหาร, ผิวหนัง และระบบเลือดของผู้บริโภค ยิ่งหากผู้บริโภคเป็นผู้หญิงที่ตั้งครรภ์, เด็กที่มีความสงสัยว่าแพ้นม และผู้สูงอายุ จะต้องได้รับการประเมินอย่างเป็นพิเศษจากแพทย์ก่อน (Roberts, 1983)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างอุดมคติของโคโลไมท์

ที่มา: Warren (2000)

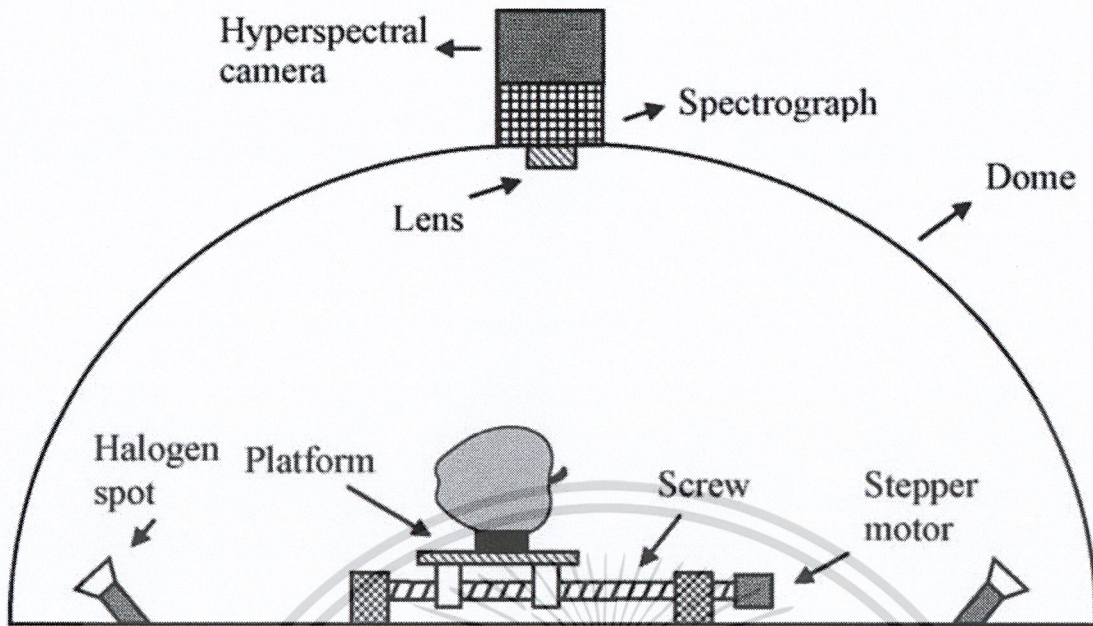
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด

การวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดมีช่วงความยาวคลื่นอยู่ที่ 780 ถึง 2,500 นาโนเมตร ภาพจากไฮเปอร์สเปกตรัมนั้นเป็นการพัฒนามาเพื่อรองรับข้อมูลที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่าง ซึ่งในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงนั้น ไม่ทำลายตัวอย่างในการวิเคราะห์ทำให้การวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้หลากหลาย โดยมักใช้ในการตรวจแยกคุณภาพ และปริมาณของอาหาร (Su & Sun, 2018)

อีกทั้งการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดเป็นการผสมผสานระหว่างการถ่ายภาพแบบดั้งเดิมและวิธีการทางสเปกตรัมซึ่งสามารถจับภาพในช่วงความยาวคลื่นที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งจะได้ภาพเป็น โครงสร้างสามมิติ (x, y, λ) โดยที่ x และ y เป็นข้อมูลเชิงพื้นที่ (จำนวนแถว x คอลัมน์ หน่วยพิกเซล) และ λ แทนจำนวนความยาวคลื่น โดยมักถูกใช้ในการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณของพันธะของพวกโมเลกุลอินทรีย์ C-H, N-H และ O-H ในผลิตภัณฑ์ประเภทธัญพืช โดยเทคนิคนี้มักใช้สำหรับการตรวจสอบการกลายพันธุ์ซึ่งสามารถระบุการเปลี่ยนแปลงของฟิโนไทป์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจีโนไทป์เพราะมีการเปลี่ยนแปลงของพันธะของพวกโมเลกุลอินทรีย์ ภาพเหล่านี้เป็นโครงสร้างสามมิติ (x, y, λ) ของข้อมูลหลายตัวแปรสำหรับการประมวลผลและการวิเคราะห์โดยที่ x และ y เป็นมิติเชิงพื้นที่ (จำนวนแถวและคอลัมน์เป็นพิกเซล) และ λ แทนจำนวนความยาวคลื่น (Feng, 2017)

การทำงานของเครื่อง NIR ดังรูปที่ 2.2 นั้นเกิดจากแหล่งกำเนิดแสงส่องผ่านมากระทบตัวอย่าง แล้วองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเกิดการสั่นและดูดกลืนแสงไว้บางส่วน จากนั้นได้สะท้อนส่วนที่เหลือกลับไปจุดรับแสงก่อนส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแปลงสัญญาณเป็นข้อมูลทางสเปกตรัม (อนุพันธ์, 2545)



รูปที่ 2.2 แผนภาพเครื่องไฮเปอร์สเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด

ที่มา: Nicolaii et al. (2006)

ในการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นต้องมีการนำข้อมูลมาปรับปรุงก่อนวิเคราะห์เพื่อให้ได้ค่าที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยมีวิธีทั้งสิ้น 4 วิธี ดังต่อไปนี้

2.8.1 Savitzky-Golay smoothing คือ วิธีการปรับปรุงสเปกตรัมให้เรียบมากขึ้น โดยการเลื่อนช่วงความยาวคลื่นรอบกวนออกไปช่วงต้นกับช่วงท้ายเท่าๆกันจากการแทนที่ค่าใหม่ที่ได้จากวิธี least square ทดแทนยังค่า $\log(1/R)$ สเปกตรัมที่ได้หลังจากนั้นจะยังคงรูปร่างไม่แตกต่างจากเดิมมาก

2.8.2 multiplicative scatter correction (MSC) คือวิธีการที่ปรับปรุงผลที่เกิดจากการกระเจิงแสง มักนิยมนำไปใช้สำหรับ NIR แบบแพร่และแบบส่องผ่าน ด้วยการหมุนสเปกตรัมให้มีความชันตรงกับสเปกตรัมเฉลี่ย โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยสำหรับนำมาคำนวณการหมุนสเปกตรัม สเปกตรัมที่ได้หลังจากนั้นจะยังคงรูปร่างไม่แตกต่างจากเดิมมาก

2.8.3 derivative transformation คือ การลดการซ้อนทับกันของจุดยอดสเปกตรัมด้วยการแปลงค่าจากวิธีอนุพันธ์ และแบ่งเป็น 2 อย่างดังนี้ (สคูดี, 2558; กรกช, 2553)

ก. 1st derivative คือ วิธีการปรับปรุงที่นิยมใช้สำหรับตัวอย่างที่มีความชันและขนาดไม่เสมอกัน โดยการวิเคราะห์ค่าความชันของสเปกตรัมที่ถูกแบ่งเป็นช่วงๆตลอดความยาวคลื่นของสเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. 2nd derivative คือ วิธีการปรับปรุงที่สเปกตรัมถูกปรับปรุงให้แตกต่างจากเดิม โดยกำหนดช่วงเหมือน 1st derivative แต่เป็นการหาผลลบในทิศทางที่ปฏิสัมพันธ์กันกับวิธี 1st derivative ของช่วงต่างๆตลอดความยาวคลื่นของสเปกตรัม

2.8.4 standard normal variate (SNV) คือ วิธีการปรับปรุงที่นิยมใช้สำหรับ NIR แบบแพร่ ด้วยการเลื่อนขึ้นในแนวตั้งและการหมุนของสเปกตรัม ทำให้เส้นมีความโค้งเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจาก MSC ที่ไม่ต้องใช้สเปกตรัมเฉลี่ยเป็นเส้นอ้างอิง (อนุพันธ์, 2555)

สำหรับการสร้างสมการในการวิเคราะห์ สามารถแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 อย่างดังนี้

ก. การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

ข. การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

โดยการวิเคราะห์ทั้งสองนั้นเริ่มจากการแบ่งกลุ่มข้อมูลออกเป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มตัวอย่างสำหรับสร้างสมการทำนาย (calibration set) และกลุ่มตัวอย่างสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของสมการทำนาย (prediction set) พร้อมทั้งกำหนดให้ข้อมูลสเปกตรัมเป็นตัวแปรต้น (x) กับ ข้อมูลเชิงคุณภาพที่วิเคราะห์ได้เป็นตัวแปรตาม (y) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ ซึ่งมี 2 วิธีใหญ่ๆ ดังนี้ (อนุพันธ์, 2545)

- wavelength selection methods คือ วิธีการคัดเลือกความยาวคลื่นที่ข้อมูลสเปกตรัมส่งผลต่อตัวแปรตามที่ต้องการวิเคราะห์ เช่น simple linear regression (SLR), multiple linear regression (MLR)

- full spectrum method คือ วิธีการคัดเลือกช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม โดยการจัดความยาวคลื่นเป็นกลุ่มๆด้วยวิธีการทางสถิติ เช่น partial least square regression (PLSR) ที่นำข้อมูลมาสร้างสมการถดถอยเพื่อให้สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลและประเมินค่าทางเคมีได้

จากนั้นพิจารณาค่า correlation coefficient (R) หรือ coefficient of determination (R²) ระหว่าง 1 ถึง -1 ให้มีค่าสูงที่สุด ซึ่งแสดงว่าตัวแปรต้นและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันสูงแปลความหมายตามตารางที่ 2.5 อีกทั้งพิจารณา standard error of calibration (SEC) หรือ root mean square error of cross validation (RMSECV) ให้มีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากค่าดังกล่าวเป็นค่าที่แสดงถึงความคลาดเคลื่อนในการทำนายของสมการ โดยค่า R และ SEC มาจากสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ (ชงชัย และปิติพร, 2555)

$$R = \frac{\sum xy - n\bar{X}\bar{Y}}{\sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)(\sum Y^2 - n\bar{Y}^2)}} \quad (2.1)$$

$$SEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - a - bX_i)^2}{n-2}} \quad (2.2)$$

- เมื่อ X = ข้อมูลสเปกตรัม (ตัวแปรต้น)
 Y = ข้อมูลเชิงคุณภาพที่วิเคราะห์ได้ (ตัวแปรตาม)
 n = จำนวนตัวอย่าง
 a = ค่าคงที่ที่จุดตัดแกน Y เมื่อ X เท่ากับ 0
 b = ค่าความชันของกราฟ

ตารางที่ 2.5 การแปลความหมายของค่า R และ R^2

R	R^2	ความหมาย
$< \pm 0.50$	< 0.25	ไม่สามารถใช้งานได้
± 0.51 ถึง ± 0.70	0.26 ถึง 0.49	แย่, ควรศึกษาหาสาเหตุ
± 0.71 ถึง ± 0.8	0.50 ถึง 0.64	ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกแบบหยาบ
± 0.81 ถึง ± 0.90	0.66 ถึง 0.81	ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกและประเมินแบบหยาบ
± 0.91 ถึง ± 0.95	0.83 ถึง 0.90	นำมาใช้ได้ แต่ต้องระวังสำหรับบางงาน
± 0.96 ถึง ± 0.98	0.92 ถึง 0.96	นำมาใช้ได้ สำหรับงานส่วนใหญ่และงานประเมินคุณภาพ
$> \pm 0.99$	> 0.98	ดีเยี่ยม ใช้งานได้กับทุกอย่าง

ที่มา: Williams (2019)

แล้วนำสมการที่ได้มาตรวจสอบความถูกต้องเพื่อวัดประสิทธิภาพของสมการ ด้วยวิธีดังต่อไปนี้

- full cross validation นิยมใช้ในกรณีที่มีตัวอย่างน้อยเพราะเป็นการใช้ข้อมูลกลุ่มเดียวกับกลุ่มที่สร้างสมการในการตรวจสอบ พิจารณาให้มีค่า standard error of prediction (SEP) หรือ หรือ root mean square error of prediction (RMSEP) และค่า bias ไม่แตกต่างกัน แสดงว่าสมการมีประสิทธิภาพสูง

- prediction testing เป็นวิธีที่นำกลุ่มตัวอย่างสำหรับตรวจสอบความถูกต้องมาตรวจสอบ โดยกลุ่มตัวอย่างนี้ต้องผ่านการเตรียมและปรับปรุงเหมือนกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการ อีกทั้งต้องมีค่าเชิงคุณภาพอยู่ในช่วงของกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการอีกด้วย พิจารณาให้มีค่า standard error of prediction (SEP) หรือ หรือ root mean square error of prediction (RMSEP) ต่ำ แสดงว่าสมการมีประสิทธิภาพสูงโดยค่า SEP และ bias มาจากสมการที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกทั้งยังสามารถประเมินสมการด้วยค่า ratio of standard error performance to standard deviation (RPD) ที่เป็นค่าระหว่างค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่า SEP ของกลุ่มตัวอย่างที่นำมาตรวจสอบความแม่นยำ ดังสมการที่ 2.5 (ธงชัย และปิติพร, 2555) และสามารถประเมินประสิทธิภาพจากค่า RPD ตามตารางที่ 2.6

$$SEP = \sqrt{\frac{\sum (X-Y)^2 - \frac{(\sum(X-Y))^2}{n}}{n-1}} \quad (2.3)$$

$$bias = \frac{\sum (X-Y)}{N} \quad (2.4)$$

$$RPD = \frac{SD}{SEP} \quad (2.5)$$

เมื่อ

X = Actual value

Y = Predicted value

n = จำนวนตัวอย่าง

SD = ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 2.6 การแปลความหมายของค่า RPD สำหรับรัฐพีช-แป็ง

RPD	ความหมาย	การนำไปใช้
0.0 – 2.3	แย่มาก	ไม่แนะนำ
2.4 – 3.0	แย่	การคัดแยกแบบหยาบ
3.1 – 4.9	พอใช้	การคัดแยก
5.0 – 6.4	ดี	การควบคุมคุณภาพ
6.5 – 8.0	ดีมาก	การควบคุมกระบวนการ
> 8.1	ดีเยี่ยม	ใช้ได้สำหรับทุกงาน

ที่มา: Williams (2019)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้น หรือ ปริมาณน้ำทั้งหมดในอาหารนั้นมักถูกวัดเป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักเปียก) เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำอิสระ สามารถบ่งชี้ได้ถึงคุณภาพและความปลอดภัยของอาหาร ซึ่งค่าความชื้นในอาหารแต่ละชนิดจะมีค่าที่แตกต่างกันตามชนิดของอาหารเหล่านั้น โดยอาหารส่วนมากมักมีปริมาณต่ำกว่า 10% และอาหารที่มีปริมาณความชื้นมากที่สุดคือ อาหารสด ซึ่งหากสามารถกำจัดน้ำออกจากอาหารได้ จะสามารถถนอมอาหารและลดการเสื่อมเสียของอาหารทำให้สามารถเก็บรักษาอาหารได้ยาวนานขึ้น

ในการหาปริมาณความชื้นสามารถหาได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยการหาปริมาณความชื้นทางตรงนั้นเป็นการหาแบบใช้เวลานาน และทำลายตัวอย่าง (Zambrano et al., 2019; Al-Muhtaseb et al., 2002) เช่น

ก. วิธีการทาง gravimetric ที่เป็นวิธีการหาปริมาณความชื้นอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม รวมถึงอุตสาหกรรมอาหารด้วย โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนทำแห้งจากนั้นนำไปทำให้แห้งเพื่อระเหยน้ำออกจากตัวอย่างแล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง จากนั้นนำมาคำนวณด้วยการนำน้ำหนักก่อนทำให้แห้งลบด้วยน้ำหนักหลังจากทำแห้งแล้ว

ข. วิธีการทางเคมี เช่น Karl Fischer titration เป็นวิธีที่มีการแพร่หลายในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ไม่ใช่อุตสาหกรรมอาหาร แต่เป็นวิธีที่สามารถวัดค่าความชื้นได้ทั้งในของเหลว และของแข็ง ซึ่งวิธีนี้สามารถหาปริมาณความชื้นได้จากการนำตัวอย่างไปละลายในเมทานอล (methanol) และไพริดีน (pyridine) จากนั้นเติมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เพื่อให้มีสีน้ำตาลแล้วไตเตรทไอโอดีน (I_2) ลงไป จนกว่าสีของของสารละลายจะหมดไป นำปริมาณไอโอดีนที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานที่สามารถบ่งชี้ปริมาณความชื้นได้, colorimetric titration ที่ใช้ทั่วไปในการหาปริมาณความชื้น คือ การเติมโคบอลต์คลอไรด์ (CoCl_2) ลงในตัวอย่าง โดยหากสีของตัวอย่างเป็นสีฟ้าอ่อนแสดงว่ามีความชื้นต่ำและหากมีสีชมพูมากขึ้นนั้นจะแสดงว่ามีปริมาณความชื้นมากขึ้นตามไปด้วย

ส่วนการหาปริมาณความชื้นทางอ้อมนั้นถึงแม้ว่าจะใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่า และไม่ทำลายตัวอย่างที่ใช้ในการวัด แต่วิธีการหาทางอ้อมต้องนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการทางตรง รวมถึงต้องควบคุมสภาพแวดล้อมในการวิเคราะห์ควบคู่ไปด้วย (Zambrano et al., 2019; Al-Muhtaseb et al., 2002) เช่น

ก. วิธีการวิเคราะห์โดยใช้แสงพวก infrared spectroscopy ที่ใช้หลักการดูดกลืน หรือ สะท้อนกลับแสงของ โมเลกุลน้ำที่ความยาวคลื่นต่างกันตามความสามารถในการวัดของเครื่องมือ, infrared (IR) thermography ที่ใช้หลักการวัดจากภาพที่แสดงอุณหภูมิที่ปล่อยออกมาแตกต่างกันจากโพตอน ซึ่งน้ำจะให้อุณหภูมิที่สูงกว่าส่วนประกอบอื่นๆ ในตัวอย่าง, hyperspectral imaging เป็นวิธีการหาปริมาณความชื้นที่ไม่ทำลายตัวอย่างเพราะไม่ต้องนำตัวอย่างไปอบแห้ง หรือ ผ่านกระบวนการอื่นๆ ก่อนการวิเคราะห์ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงออกมาในข้อมูลเชิงพื้นที่

ข. วิธีการวิเคราะห์โดยใช้หลักการจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำที่มาจากขั้วคู่ของโมเลกุล เช่น การวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ, การใช้คลื่นไมโครเวฟ หรือ คลื่นอินฟราเรดในการหาปริมาณด้วยการวัดคลื่นที่ถูกสะท้อนกลับหรือคลื่นที่ถูกดูดกลืนไปในตัวอย่าง, การใช้คลื่นวิทยุหาปริมาณความชื้นนั้น นิยมใช้กับตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยการวัดความล่าช้าในการวิ่งผ่านตัวกลางของคลื่นในความถี่เดียวกัน หรือ ความถี่อื่นๆ

ค. วิธีทางนิวเคลียสเป็นวิธีที่นิยมในอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง ซึ่งวัดจากการแผ่รังสีของแม่เหล็กไฟฟ้าต่อมุมของนิวเคลียสในอะตอมทำให้เกิดความถี่สูงตอบกลับมา

ง. วิธีการวิเคราะห์ด้วยการวัดความชื้นสัมพัทธ์ในสถานะสมดุลซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความชื้น จึงหาค่าดังกล่าวแทนปริมาณความชื้น โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์มีอยู่ที่ 20% ถึง 90% และต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมในการวัดไม่ให้เกิน 1 ถึง 1.5 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ข้อมูลการวัดที่แม่นยำ

2.6 ปริมาณน้ำอิสระ

ปริมาณน้ำอิสระ คือ เป็นค่าที่สอดคล้องกับปริมาณความชื้นในด้านการดูด-คายซั ความชื้นของอาหาร อีกทั้งยังเป็นสิ่งที่กำหนดอายุการเก็บรักษาของอาหาร โดยหากอาหารมีปริมาณน้ำอิสระน้อยจะยิ่งชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และเอนไซม์ได้ดี รวมถึงลดการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้อีกด้วย เช่น ปฏิกิริยา browning ที่เกิดจากเอนไซม์สามารถเกิดได้ดีที่ปริมาณน้ำอิสระอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 0.8 แต่หากปริมาณน้ำอิสระอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.3 ปฏิกิริยาจะไม่สามารถเกิดได้, ส่วนเชื้อจุลินทรีย์จะไม่เจริญเติบโตที่ปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.6 จึงมีการวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระตั้งแต่วัตถุดิบจนถึงผลิตภัณฑ์ในอาหารทุกประเภท (ของเหลว, ของแข็ง, ผง, เจล, ไซรัป, อิมัลชัน, เม็ด เป็นต้น) อาหารกลุ่มผลไม้, ผัก, เนื้อสัตว์, น้ำเชื่อม และน้ำผลไม้มีปริมาณน้ำอิสระมากที่สุด ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 1.0 (Labuza & Altunakar, 2007; Fontana, 2007)

สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำอิสระนั้น ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการวัดควรมีตัวอย่างอย่างน้อย 3 ตัวอย่างเป็นตัวแทนของตัวอย่างทั้งหมด โดยในการวัดต้องคำนึงถึงความสะดวกของถ้วยที่ใช้ในการวัดเมื่อต้องวัดตัวอย่างตัวถัดไป จึงควรทำความสะอาดและเช็ดให้แห้งก่อนนำมาใช้งานทุกครั้ง หรือใช้ถ้วยที่สามารถใช้แล้วทิ้งได้ทันที อีกทั้งควรทำการวัดในวันเดียวกับวันที่เก็บตัวอย่างมาจะดีที่สุดเพื่อป้องกันการเพิ่ม หรือ ลดของปริมาณน้ำอิสระ แต่หากไม่สามารถวัดได้ในวันเวลาดังกล่าว จำเป็นต้องเก็บรักษาในภาชนะที่ปิดสนิทมากที่สุด เช่น ฝาพลาสติก, เทป, แผ่นฟิล์ม, ถุง โพลีเอทิลีน, ขวดแก้ว เป็นต้น นอกจากนี้ต้องควบคุมอุณหภูมิในการเก็บรักษาในที่เย็น ภายในภาชนะบรรจุที่มี headspace เล็กน้อย เพื่อให้มีพื้นที่ให้เกิดการระเหยและควบแน่นของน้ำ โดยหากจะนำกลับมาวิเคราะห์ให้นำออกมาวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในอุณหภูมิของค่อยๆ เพิ่มขึ้นทีละน้อย ส่วนตัวอย่างจำพวกอิมัลชัน หรือ ตัวอย่างที่มีการเคลือบ ตัวอย่างต้องเป็นเนื้อเดียวกันไม่แยกชั้น หากตัวอย่างเป็นของแข็งชิ้นใหญ่ให้นำตัวอย่างมาหั่น หรือ บด เป็นชิ้นเล็กๆขนาดเท่าๆกันก่อนทำการวิเคราะห์ เพื่อให้สามารถนำมาทำซ้ำโดยมั่นใจว่าตัวอย่างที่นำมาทำซ้ำยังคงเป็นตัวแทนของตัวอย่างที่ต้องการนำมาวิเคราะห์ (Fontana, 2007)

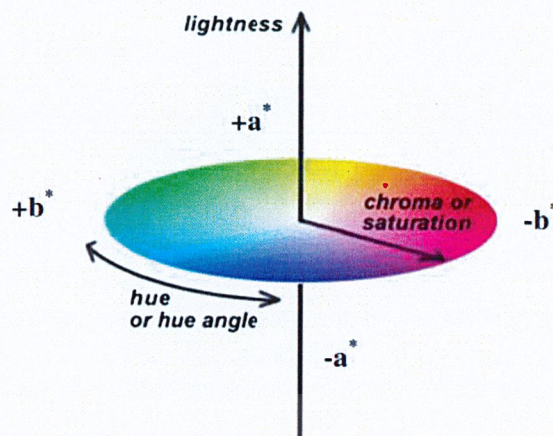
2.7 ค่าสี L^* , a^* , b^*

สีของอาหารเป็นคุณสมบัติทางคุณภาพที่สำคัญและใช้ในการยอมรับต่ออาหารของผู้บริโภค อีกทั้งยังมีอิทธิพลต่อความคิดเห็นทางด้านคุณภาพของผู้บริโภคทั้งวัตถุดิบจนถึงผลิตภัณฑ์ โดยในการวัดค่าสีตามปกติของวิทยาศาสตร์ทางอาหารนั้นใช้ Commission Internationale de l'Eclairage's 1976 L^* , a^* , b^* หรือ CIELAB ซึ่งเป็นวิธีการที่แสดงถึงสี 3 สี คือ สีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามสีที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ จำนวนของสีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงินนั้นเรียกว่า tristimulus values แสดงเป็น X, Y และ Z ตามลำดับ ความหมายของ L^* , a^* , b^* มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (Goñi & Salvador, 2016)

L^* คือ ค่าความสว่างของสี

a^* คือ ค่าของสีแดง (+) สีเขียว (-)

b^* คือ ค่าของสีเหลือง (+) สีฟ้า (-)



รูปที่ 2.3 พื้นที่ของสี CIELAB

ที่มา: Pathare et al. (2012)

การหาค่าสีนั้นสามารถหาได้ 2 วิธีใหญ่ๆ คือ การประเมินด้วยภาพ กับ การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ (Pathare et al., 2012)

2.7.1 การประเมินด้วยภาพเป็นการประเมินโดยประสาทสัมผัสทางสายตาของผู้ทดสอบ ไม่มีเครื่องมือมาเกี่ยวข้องในการทดสอบ แต่ต้องมีการควบคุมความสว่างของห้องทดสอบและต้องมีการอ้างอิงชุดสีมาตรฐานที่ใช้เทียบกับตัวอย่างในการทดสอบเพื่อป้องกันการลืมนของมนุษย์ โดยอาจมีการจัดลำดับความเข้มข้นของสีตัวอย่าง และกำหนดช่วงคะแนนของสีที่ยอมรับได้

2.7.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือเป็นการทดสอบเกิดขึ้นมาเพื่อแก้ไขความเบี่ยงเบนทางการรับรู้ทางประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบ เช่น

ก. colorimeters เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการวัดมากที่สุดเนื่องจากมีความสะดวกต่อการใช้งานและการแปลความหมายของค่าสีที่วัดได้ โดยเป็นเครื่องมือที่วัดรังสีที่ส่งผ่านจากแหล่งกำเนิดรังสี แต่สามารถวัดค่าได้ครั้งละพื้นที่เล็กๆเท่านั้น

ข. spectrophotometers เป็นเครื่องมือที่วัดการกระจายสเปกตรัมของการส่งผ่าน หรือ การสะท้อนของตัวอย่าง และแสดงค่าเป็น X, Y และ Z ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถตรวจสอบและวัดตัวอย่างได้ในมุมต่างๆ

ค. computer vision system เป็นเครื่องมือที่ให้ความแม่นยำในการวัด แต่ต้องขึ้นกับความแม่นยำของอุปกรณ์ที่มี โดยเฉพาะกล้อง ที่ต้องแม่นยำและต้องมีไฟกัสเพื่อให้ได้คอนทราสต์ที่ดีและไม่เบลอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของอาหารที่เป็นผงนั้นมีความสำคัญต่อทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์เกี่ยวกับการซื้อขายของสินค้า โดยหากต้องส่งสินค้าในระยะไกลสินค้าต้องมีความหนาแน่นสูง และด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับการเลือกขนาดบรรจุภัณฑ์ให้สามารถใส่สินค้าได้พอดี ลดต้นทุนของบรรจุภัณฑ์ รวมถึงการเลือกเครื่องจักรที่เหมาะสมกับสินค้าด้วย

ค่าความหนาแน่นของอนุภาคเกิดจากอัตราส่วนระหว่างมวลของอนุภาคกับปริมาตรของอนุภาคนั้น โดยรวมช่องว่างระหว่างอนุภาคทั้งหมด ซึ่งค่าของความหนาแน่นของอนุภาคถูกแบ่งออกเป็น 4 ค่า ได้แก่ (Sharma et al., 2012)

ก. compact density คือ ค่าความหนาแน่นหลังจากมีการอัดมวลของผงด้วยความดันทางเชิงกล, แรงสั่นสะเทือน และแรงกระแทก

ข. tap density คือ ค่าความหนาแน่นที่เกิดจากการแตะหรือสั่นภายใต้สภาวะควบคุม มักใช้ในการอธิบายลักษณะของแป้งระหว่างมีการผสม

ค. loose bulk density คือ ค่าความหนาแน่นหลวมๆของอนุภาคที่ถูกเทลงในภาชนะโดยไม่ถูกแรงกระทำใดๆเลย

ง. aerated bulk density คือ ความหนาแน่นในลักษณะคล้ายของเหลวของอนุภาค กล่าวคืออนุภาคจะถูกเติมอากาศหรือลมให้เกิดการแยกกันของอนุภาค ทำให้เกิดความหนาแน่นที่หลวมที่สุดของอนุภาคเหล่านั้น

ในวงการอื่นๆนอกจากอาหารและวงการอาหารนั้น ค่าความหนาแน่นถูกใช้เป็นตัวกำหนดความสามารถในการกระจายความร้อนและการแทรกผ่านของน้ำ ของโครงสร้างทางชีวภาพและพื้นผิวของผลิตภัณฑ์แห้งหรือผลิตภัณฑ์กึ่งแห้ง โดยค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น, อุณหภูมิของอากาศ และเทคโนโลยีที่ใช้ในการอบ (Martynenko, 2014) ซึ่งค่าความหนาแน่นในอาหารนั้นเกิดจากส่วนประกอบของอาหารที่รวมกันระหว่างน้ำ, อากาศ และวัสดุแห้ง โดยหากผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งอยู่แล้วจะประกอบไปด้วยโปรตีน, ไขมัน, คาร์โบไฮเดรต และเถ้า (Qiu et al., 2015)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมสามารถตรวจสอบได้ทั้งด้านคุณภาพและปริมาณของอาหาร จึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1 การวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดทางด้านคุณภาพ

ก. งานวิจัยของ Jia et al. (2018) สามารถแยกการปนเปื้อนของแป้งชนิดต่างๆออกจากแป้งสาลีออร์แกนิก เช่น แป้งข้าวโพด, แป้งสาลีธรรมดา, แป้งสเปคท์ออร์แกนิกและแป้งมันสำปะหลัง จำนวน 210 ตัวอย่าง (กลุ่ม calibration 140 ตัวอย่าง, กลุ่ม prediction 70 ตัวอย่าง) โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 900 ถึง 1,700 นาโนเมตร และมีการใช้ partial least squares regression (PLSR) เป็นวิธีวิเคราะห์ ผลการทดลองพบว่าได้ค่า the average cross-validation coefficient (R^2_{cv}) เท่ากับ 0.958 และค่า the predicted value (R^2_p) เท่ากับ 0.957

ข. งานวิจัยของ Laborde et al. (2019) สามารถแยกการปลอมปนของผงถั่วลิสงออกจากแป้งสาลีในปริมาณการปลอมปน 0.02%, 0.5%, 1%, 2%, 5%, 10%, และ 20% ด้วยวิธี adaptive matched subspace detector (AMSD) พบว่าได้ค่า coefficient of determination (R^2) เท่ากับ 0.90, 0.90 และ 0.89 จากการทดลองทั้ง 3 ซ้ำ

ค. งานวิจัยของ Zhao et al. (2018) สามารถแยกการปลอมปนของผงถั่วลิสงกับผงวอลนัตที่มีขนาดเล็กกว่า 180 ไมโครเมตรในแป้งสาลี ในปริมาณการปน 0.01%, 0.05%, 0.1%, 0.5%, 1%, 3%, 5%, และ 10% โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 936 ถึง 1,720 นาโนเมตร และมีการใช้เทคนิค SNV กับ 1st derivative เป็นเทคนิคในการปรับปรุง จากนั้นมีการใช้ PLSR เป็นวิธีวิเคราะห์ พบว่าได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.987 และ RMSEP เท่ากับ 0.373%

ง. งานวิจัยของ Zhao et al. (2020) สามารถแยกการปลอมปนของเนื้อไก่ในเนื้อวัวจากตัวอย่างทั้งหมด 11 ตัวอย่าง (เนื้อไก่ล้วน 3 ตัวอย่าง, เนื้อวัวล้วน 3 ตัวอย่าง และเนื้อวัวที่ถูกเนื้อไก่ปลอมปน 5 ตัวอย่าง) และมีการใช้ Gaussian distribution of regression coefficients (GD-RC) เป็นวิธีวิเคราะห์ในการคัดแยก พบว่าได้ค่า R เท่ากับ 0.9831 และ RMSEP เท่ากับ 0.0319% อีกทั้งยังสามารถสร้างภาพการทำนายการปลอมปนได้อีกด้วย

2.9.2 การวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นอื่นทางด้านคุณภาพ

ก. งานวิจัยของ Verdú et al. (2016) สามารถแยกการปลอมปนของข้าวฟ่าง, โธษ และแป้งข้าวโพดในแป้งสาลีที่นำมาทำเป็นขนมปังที่ผ่านการอบที่ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 35 นาที ในปริมาณ 2.5%, 5%, 7.5% และ 10% โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 400 ถึง 1,000 นาโนเมตร จนได้ภาพขนาด 1,312 x 1,082 พิกเซล และมีการใช้เทคนิค SNV กับ 1st derivative เป็นเทคนิคในการปรับปรุง จากนั้นมีการใช้ multivariate statistical process control (MSPC) เป็นวิธีวิเคราะห์ พบว่าสามารถแยกการปลอมปนได้ในระดับความเชื่อมั่นที่ 99%

ข. งานวิจัยของ Barreto et al. (2018) สามารถแยกการปลอมปนของแป้งในซีสต์สด ในปริมาณ 0.0055% ถึง 1.2705% โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 200 ถึง 1,000 นาโนเมตร จากนั้นมีการใช้ PLSR เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นวิธีวิเคราะห์ พบว่ากลุ่ม calibration ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.99915 และ RMSECV เท่ากับ 0.3979% และกลุ่ม prediction ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.8321 และ RMSEP เท่ากับ 1.3515%

ค. งานวิจัยของ Wu et al. (2013) สามารถแยกการปลอมปนของเจลาตินในกุ้ง มีการใช้ Least-squares support vector machines (LS-SVM) เป็นวิธีวิเคราะห์ พบว่ากลุ่ม prediction ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.965 อีกทั้งยังสามารถสร้างภาพการทำนายการปลอมปนได้อีกด้วย

ง. งานวิจัยของ Kamruzzaman et al. (2016) ได้คัดแยกการปลอมปนของเนื้อไก่ในเนื้อวัว ในปริมาณ 0 ถึง 50% (เพิ่มขึ้นทีละ 2%) โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 400 ถึง 1,000 นาโนเมตร จากนั้นมีการใช้ PLSR เป็นวิธีวิเคราะห์เพื่อให้ได้เส้นสเปกตรัม 3 เส้น คือ เส้นของการสะท้อนกลับ, เส้นของการดูดกลืน และเส้น Kubelka–Munck พบว่ากลุ่ม prediction ได้ค่า R^2 ของทั้ง 3 เส้นเท่ากับ 0.97, 0.97 และ 0.96 ตามลำดับ และได้ค่า RMSEP 2.62%, 2.45% และ 3.18% ตามลำดับ

2.9.3 การวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดทางด้านปริมาณ

ก. งานวิจัยของ Su & Sun (2017) สามารถหาปริมาณการปลอมปนของแป้งข้าวโพด, แป้งสาลีธรรมด และแป้งมันสำปะหลังในแป้งสาลีออร์แกนิก มีช่วงในการปลอมปน 3% ถึง 75% โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 900 ถึง 1,700 นาโนเมตร และมีการใช้ 2nd derivative กับ SNV เป็นเทคนิคในการปรับปรุง จากนั้นมีการใช้ PLSR กับ principal component regression (PCR) เป็นวิธีวิเคราะห์ พบว่ากลุ่ม prediction ของแป้งข้าวโพดที่ปลอมปนในแป้งสาลีออร์แกนิก ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.973 และได้ค่า RMSEP เท่ากับ 0.036% ส่วนกลุ่ม prediction ของแป้งมันสำปะหลังที่ปลอมปนในแป้งสาลีออร์แกนิก ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.986 และได้ค่า RMSEP เท่ากับ 0.026% และกลุ่ม prediction ของแป้งสาลีธรรมดา ที่ปลอมปนในแป้งสาลีออร์แกนิก ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.971 และได้ค่า RMSEP เท่ากับ 0.038%

ข. งานวิจัยของ Zhao et al. (2019) สามารถหาปริมาณการปลอมปนของผงถั่วลิสงในแป้งสาลี โดยมีปริมาณการปลอมปน 0.01 ถึง 10% และมีการใช้ SNV กับ 1st derivative เป็นเทคนิคในการปรับปรุง จากนั้นมีการใช้ competitive adaptive reweighted sampling (CARS) กับ PLSR เป็นวิธีวิเคราะห์ พบว่าวิธี CARS ทำให้กลุ่ม prediction ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.993 และได้ค่า RMSEP เท่ากับ 0.251% ส่วน วิธี PLSR ทำให้กลุ่ม prediction ได้ค่า R^2 เท่ากับ 0.991 และได้ค่า RMSEP เท่ากับ 0.285%

ค. งานวิจัยของ Fu et al. (2014) สามารถหาปริมาณการปลอมปนของเมลามีนในนมผงที่ปริมาณการปลอมปนน้อยกว่า 1% โดยไม่ใช้เทคนิคในการปรับปรุง มีการใช้ spectral angle measure (SAM), spectral correlation measure (SCM) และ Euclidian distance measure (EDM) เป็นวิธีวิเคราะห์ พบว่าได้ภาพของการกระจายตัวของอนุภาคเมลามีนภายในตัวอย่างนมผงที่ถูกปลอมปนด้วยเมลามีนในระดับความเข้มข้นต่างๆ

ง. งานวิจัย Forchetti & Poppi (2017) สามารถหาปริมาณการปลอมปนของของแวนีล, แป้ง, ยูเรีย และเมลามีน ในนมผง ในปริมาณ 5% ถึง 30% ส่วนเมลามีนมีปริมาณการปลอมปนที่ 0.05% เป็นต้นไป ผสมกับวิธีวิเคราะห์ multivariate curve resolution (MCR) จนได้ผลลัพธ์ที่สามารถตรวจสอบปริมาณของสารปลอมปนได้ต่ำกว่า 5%

2.9.3 การวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นอื่นทางด้านปริมาณ

ก. งานวิจัยของ Lohumi et al. (2019) ได้ใช้เทคนิครามาน-สเปกโตรสโคปโดยได้ใช้ในการตรวจหาปริมาณของสารปนเปื้อน 3 ชนิด ได้แก่ benzoyl peroxide, alloxan monohydrate, L-cysteine และแบบผสม (อัตราส่วน benzoyl peroxide 1.5 ต่อ alloxan monohydrate 1.65 ต่อ L-cysteine 1.6) ในแป้งสาลี ปริมาณการปนเปื้อน 0.05 ถึง 1.5% โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 360 ถึง 1,800 นาโนเมตร ได้ค่า R เท่ากับ 0.985, 0.985 และ 0.987 อีกทั้งยังสามารถสร้างภาพการทำนายปริมาณการปลอมปนได้อีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมตัวอย่าง

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย

ก. แป้งมันสำปะหลัง (ตรานิวเกรด) ขนาด 120 mesh ที่จำหน่ายในห้างสรรพสินค้าบิ๊กซี สาขาสายไหม, สายไหม, กรุงเทพมหานคร ช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2563

ข. โดโลไมท์ (ตราทีพีเอ) ขนาด 500 mesh ที่จำหน่ายในร้านรักเกษตร, องค์กรักษ์, นครนายก ช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2563

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย

ก. เครื่องไฮเปอร์สเปกตรัม (Specim Fx17, Spectral Imaging Ltd, Oulu, Finland)

ข. เครื่องวัดความชื้น (Mettler Toledo MJ33, Mettler-Toledo AG., Greifensee, Switzerland)

ค. เครื่องวัดน้ำปริมาณน้ำอิสระ (Water activity Aqua lab 4TE, Meter Group, Inc., WA, USA)

ง. เครื่องวัดสี (CR-400 Chroma Meter, Konica Minolta Sensing Americas, Inc., NJ, USA)

จ. กระบอกตวง 100 มิลลิลิตร

ฉ. เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.1.3 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย

ก. microsoft office excel (Microsoft, USA)

ข. the Unscrambler program Ver 9.8 (CAMO, Oslo, Norway)

ค. the UmBio Evince hyperspectral image analysis software (Prediktera Evince, Sweden)

ง. statistical package for the social sciences software (IBM, United States)

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 เตรียมตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการปลอมปนและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. แป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการปลอมปนจำนวน 200 ตัวอย่าง:

สุ่มนำแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการปลอมปนที่ถูกบรรจุในกล่องออกมากล่องละ 1 ถุง ไปละลายในน้ำในปริมาณ 6% (solution) ก่อนนำไปให้ความร้อนจนแป้งสุกแล้วทิ้งให้เย็น จากนั้นเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของแป้งสุกกับตัวอย่างของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการปลอมปน เพื่อยืนยันว่าแป้งมันสำปะหลังดังกล่าวไม่มีการปลอมปน หากแป้งสุกมีสีขาวขุ่นไม่ใสเท่าตัวอย่างแสดงว่ามีการปลอมปน จากนั้นนำมาบรรจุใส่ถุงอะลูมิเนียมฟอยด์ที่มีซีปล็อก (PET12/ALU7/LLDPE80) ซึ่งเป็น การป้องกันไม่ให้ค่าทางเคมีของตัวอย่างมีเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

ข. แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์จำนวน 200 ตัวอย่าง:

ได้มีการปลอมปนในปริมาณตั้งแต่ 0.5 ถึง 100% (ผงโคโลไมท์) โดยมีการเพิ่มปริมาณการปลอมปนขึ้นในทุก 0.5% เตรียมการปลอมปนช่วงละ 1 ตัวอย่าง ปริมาณตัวอย่างละ 100 กรัม (0.5%, 1%, 1.5%, 2%, ..., 99%, 99.5% และ 100% (w/w)) ซึ่งได้มีการผสมแป้งมันสำปะหลังและโคโลไมท์ที่ผ่านการชั่งน้ำหนักตามปริมาณที่กำหนดตามภาคผนวก ค.1 ในถุงพลาสติก polypropylene ขนาด 6 x 9 นิ้ว ซึ่งควบคุมการผสมให้เข้ากัน ทิศทางในการเขย่าตามแนวแกน x จำนวน 40 ครั้ง กับ ทิศทางตามแนวแกน y จำนวน 40 ครั้ง จากนั้นนำมาบรรจุใส่ถุงอะลูมิเนียมฟอยด์ที่มีซีปล็อก (PET12/ALU7/LLDPE80) ซึ่งเป็น การป้องกันไม่ให้ค่าทางเคมีของตัวอย่างมีเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

3.2.2 การแบ่งข้อมูล

นำตัวอย่างมาแบ่งเพื่อสร้างสมการในการทำนายการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลัง โดยการแบ่งข้อมูลออกเป็นจำนวน 2 กลุ่ม ที่มีการกระจายตัวของปริมาณการปลอมปนด้วยโคโลไมท์เท่าๆกัน คือ

ก. ข้อมูลกลุ่ม calibration สำหรับใช้สร้างสมการทำนาย (จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 70% ของตัวอย่างทั้งหมด)

ข. ข้อมูลกลุ่ม prediction สำหรับใช้ทดสอบสมการทำนายที่ถูกสร้างขึ้นมาจากข้อมูลกลุ่ม calibration (จำนวนตัวอย่างเท่ากับ 30% ของตัวอย่างทั้งหมด)

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้างสมการในการทำนาย โดยงานวิจัยนี้ได้สร้างสมการในการทำนายทั้งหมด 2 สมการ คือ

ก. สมการทำนายการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลัง: ใช้ข้อมูลจากตัวอย่างทั้งหมด 400 ตัวอย่าง โดยมีข้อมูลของตัวอย่างที่นำมาใช้ในการสร้างสมการตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าทางสถิติของความเข้มข้นโคโลไมท์ในกลุ่ม calibration กับกลุ่ม prediction สำหรับการ
สร้างสมการทำนายการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลัง

หัวข้อ	กลุ่ม calibration	กลุ่ม prediction
จำนวนตัวอย่าง	300	100
ช่วงข้อมูล	0.0 – 100.0%	0.0 – 99.5%
ค่าเฉลี่ย	25.0%	25.5%
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	32.3%	32.8%

ข. สมการทำนายปริมาณของโคโลไมท์ที่ปลอมปนในแป้งมันสำปะหลัง: ใช้ข้อมูลจาก
ตัวอย่างทั้งหมด 201 ตัวอย่าง โดยมีข้อมูลของตัวอย่างที่นำมาใช้ในการสร้างสมการทำนายตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าทางสถิติของความเข้มข้นโคโลไมท์ในกลุ่ม calibration กับกลุ่ม prediction สำหรับการ
สร้างสมการทำนายปริมาณความชื้น, ปริมาณน้ำอิสระ, ค่าสี L^* , a^* , b^* , ความหนาแน่น
รวม และปริมาณโคโลไมท์

หัวข้อ	กลุ่ม calibration	กลุ่ม prediction
จำนวนตัวอย่าง	140	61
ช่วงข้อมูล	0.0 – 100.0%	2.5 - 98.5%
ค่าเฉลี่ย	49.8%	50.5%
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	29.2%	28.5%

3.2.3 นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด และ วิเคราะห์
คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

ก. ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดโหมดสะท้อนกลับ ที่ช่วงความยาว
คลื่น 935 ถึง 1,720 นาโนเมตร วิธีตามภาคผนวก ก.1

ข. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ วิธีตามภาคผนวก ก.2

ค. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น วิธีตามภาคผนวก ก.3

ง. การวิเคราะห์ความหนาแน่นตาม Caliskan & Dirim (2016) วิธีตามภาคผนวก ก.4

จ. การวิเคราะห์ค่าสี CIE L^* , a^* , b^* วิธีตามภาคผนวก ก.5

3.2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

วิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลปริมาณความชื้น, ปริมาณน้ำอิสระ, ค่าสี L^* , a^* , b^* และความหนาแน่น ของตัวอย่าง 6 ช่วง ดังต่อไปนี้ ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMR) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในโปรแกรม statistical package for the social sciences software

- ก. แป้งมันสำปะหลัง
- ข. แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์ 0.5% - 25.0%
- ค. แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์ 25.5% - 50.0%
- ง. แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์ 50.5% - 75.0%
- จ. แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์ 75.5% - 99.5%
- ฉ. ผงโดโลไมท์

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและสเปกตรัมระหว่างแป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน ด้วยวิธี principal component analysis ใน โปรแกรม the Unscrambler program

3.2.5 สร้างสมการทำนายทั้งสมการทำนายการปลอมปนของโดโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลัง และสมการทำนายปริมาณของ โดโลไมท์ที่ปลอมปนในแป้งมันสำปะหลัง

- ก. สมการทำนายการปลอมปนของโดโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลัง:

นำข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยในกลุ่ม calibration ในช่วงความยาวคลื่น 935 - 1,720 นาโนเมตร มาลบสเปกตรัมของพื้นหลังออกเพื่อให้เหลือแต่ข้อมูลที่แท้จริงของตัวอย่างด้วยโปรแกรม the UmBio Evince hyperspectral image analysis software ดังสมการที่ 3.1 ทำให้ได้ภาพขนาด 640 x 490 พิกเซล จากนั้นนำข้อมูลไปทำการ pretreatment ด้วย the Unscrambler program แล้วนำมาสร้างสมการในการคัดแยกการปลอมปน โดยใช้วิธี partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) เพื่อให้ได้สมการในการคัดแยกการปลอมปนที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด จากการพิจารณาที่ค่าเปอร์เซ็นต์การทำนายที่ได้สูงสุด เมื่อได้สมการ calibration แล้ว ให้นำไปทำนายตัวอย่างข้อมูลในกลุ่ม prediction เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการ calibration ที่ได้

- ข. สมการทำนายปริมาณของโดโลไมท์ที่ปลอมปนในแป้งมันสำปะหลัง:

นำข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยในกลุ่ม calibration มาสร้างสมการทำนายปริมาณปริมาณ โดโลไมท์ โดยการนำข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยในกลุ่ม calibration ในช่วงความยาวคลื่น 935 - 1,720 นาโนเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(R_0) มาลบสเปกตรัมของพื้นหลังออกเพื่อให้เหลือแต่ข้อมูลที่แท้จริง (R) ของตัวอย่างด้วยโปรแกรม the UmBio Evince hyperspectral image analysis software ดังสมการที่ 3.1 (Zhao et al, 2018)

$$R = \frac{R_0 - R_D}{R_w - R_D} \quad (3.1)$$

เมื่อ R = ภาพที่สะท้อนกลับมาสัมพันธ์

R_0 = ภาพที่สะท้อนกลับมาที่ยังไม่ได้แก้ไข

R_w = ภาพที่ได้จาก white reference

R_D = ภาพที่ได้จาก dark reference

ต่อจากนั้นจะได้ภาพขนาด 640 x 490 พิกเซล จากนั้นนำข้อมูลไปทำการ pretreatment ด้วย the Unscrambler program ที่มีเทคนิคดังต่อไปนี้

- original
- smoothing
- 1st derivative
- 2nd derivative
- MSC
- SNV

แล้วนำมาสร้างสมการสำหรับการใช้ในการทำนายปริมาณการปลอมปนของโดโลไมท์ โดยใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) เพื่อให้ได้สมการที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด จากการพิจารณาที่ค่าทางสถิติตามลำดับดังต่อไปนี้

- ค่า RMSECV (root mean square error of cross validation) ให้มีค่าต่ำที่สุด
- ค่า R (correlation coefficient) ให้มีค่าสูงที่สุด
- factor ให้มีค่าต่ำที่สุด

เมื่อได้สมการ calibration แล้วให้นำไปทำนายตัวอย่างข้อมูลในกลุ่ม prediction เพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการ calibration ที่ได้ จากนั้นนำสมการทำนายที่ได้มาสร้างภาพที่ใช้ในการทำนายปริมาณ โดโลไมท์ที่ปลอมปนในแป้งมันสำปะหลังด้วยโปรแกรม the UmBio Evince hyperspectral image analysis software

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน

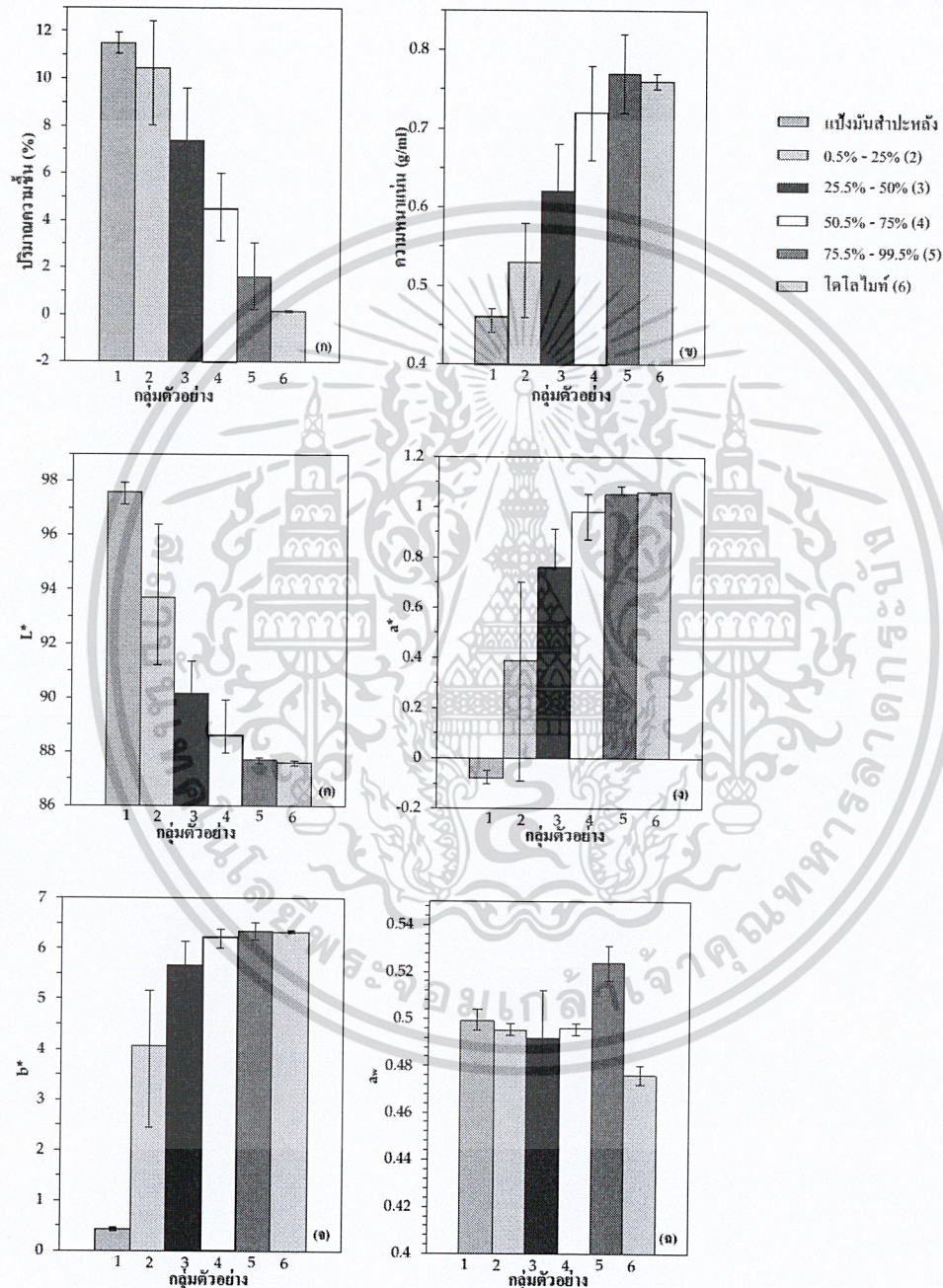
ผลของการวิเคราะห์ค่าทางเคมีกายภาพ (ปริมาณความชื้น, ปริมาณน้ำอิสระ, ความหนาแน่น, ค่าสี L^* , a^* , b^*) ของแป้งมันสำปะหลัง, ผงโดโลไมท์ และแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์ โดยได้แบ่งแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์ออกเป็น 4 กลุ่ม เพื่อให้สะดวกต่อการพิจารณา คือ 0.5% - 25.0%, 25.5% - 50.0%, 50.5% - 75.0% และ 75.5% - 99.5% ตามรูปที่ 4.1

คุณสมบัติทางเคมีกายภาพด้านปริมาณความชื้น, ความหนาแน่น, ค่าสี L^* , a^* , b^* ของแป้งมันสำปะหลัง, ผงโดโลไมท์ และแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์ทั้ง 4 กลุ่ม มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยปริมาณความชื้นของแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณมากที่สุดตรงข้ามกับผงโดโลไมท์ที่มีปริมาณความชื้นน้อยที่สุดเพราะเป็นแร่ที่ไม่มีองค์ประกอบของน้ำในโครงสร้าง ซึ่งการปลอมปนผงโดโลไมท์ลงในแป้งมันสำปะหลังทำให้ปริมาณความชื้นมีค่าผกผันกับปริมาณโดโลไมท์ที่เติมลงไป ในส่วนของความหนาแน่นของแป้งมันสำปะหลังนั้นพบว่ามีค่าที่น้อยที่สุดเนื่องมาจากแป้งมันตรงข้ามกับผงโดโลไมท์ที่มีค่ามากที่สุดเนื่องมาจากผงโดโลไมท์มีโครงสร้างที่แน่นทำให้สามารถรวมตัวกันได้แน่นกว่าแป้งมันสำปะหลัง ค่า L^* ของแป้งมีค่ามากกว่าผงโดโลไมท์แสดงว่าโดโลไมท์มีสีด้านความสว่างของสีน้อยกว่าแป้งมันสำปะหลังอย่างชัดเจน ซึ่งค่า a^* , b^* ของแป้งมันสำปะหลังมีค่าน้อยกว่าผลโดโลไมท์แสดงว่าโดโลไมท์มีสีออกทางเขียวและฟ้ามากกว่าแป้งมันสำปะหลังที่มีสีออกแดงเหลืองมากกว่า สอดคล้องกับสีที่มองด้วยสายตาของแป้งมันสำปะหลังที่มีสีออกขาวครีมโทนเหลือง และโดโลไมท์ที่มีสีออกขาวเทา

คุณสมบัติทางเคมีด้านปริมาณน้ำอิสระพบว่าแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์ 75.5% - 99.5% มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กับกลุ่มอื่นๆ แต่แป้งมันสำปะหลังไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กับผงโดโลไมท์และแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์ (0.5% - 25%, 25.5% - 50%, 50.5% - 75%) ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้แสดงว่าคุณสมบัติทางเคมีกายภาพสามารถนำมาใช้แยกแป้งมันสำปะหลังออกจากการปลอมปนของโดโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังได้ในบางคุณสมบัติและมีบางคุณสมบัติไม่สามารถนำมาใช้ได้ ถึงแม้ว่าคุณสมบัติทางเคมีกายภาพจะสามารถแยกการปลอมปนได้แต่คุณสมบัติทางเคมีกายภาพเหล่านี้ไม่สามารถระบุปริมาณของโดโลไมท์ที่

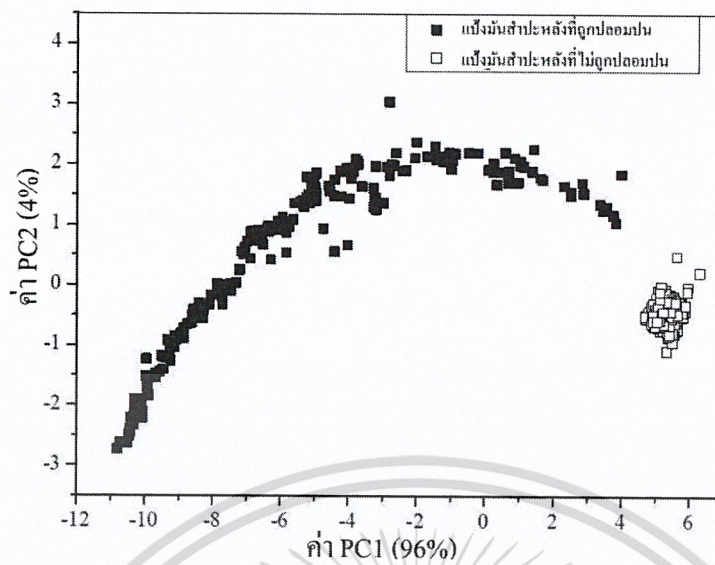
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลอมปนลงไปนในแป้งมันสำปะหลังได้ อีกทั้งบางคุณสมบัติเป็นการทดสอบที่ไม่ใช่การทดสอบแบบไม่ทำลายตัวอย่างและใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่นานกว่าการใช้เครื่องไฮเปอร์สเปกตรัมในการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด การใช้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพจึงยังไม่ใช่ตัวเลือกที่เหมาะสมในการคัดแยกที่ต้องการความรวดเร็วและต้องการเก็บตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ไปใช้ต่อไป

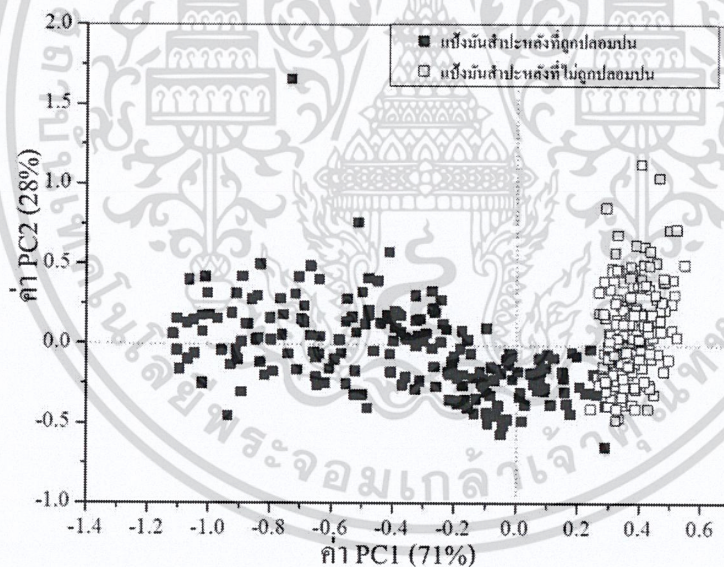


รูปที่ 4.1 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง (1), แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์ ((2), (3), (4), (5) คือ 0.5% - 25.0%, 25.5% - 50.0%, 50.5% - 75.0% และ 75.5% - 99.5%) และผงโดโลไมท์ (6): (ก) ปริมาณความชื้น, (ข) ความหนาแน่น, (ค) L*, (ง) a*, (จ) b*, (ฉ) ปริมาณน้ำอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 principal component analysis ทางด้านคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (ปริมาณความชื้น, ความหนาแน่น, L^* , a^* , b^*) ของน้ำมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนและน้ำมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน



รูปที่ 4.3 principal component analysis ในส่วนของสเปกตรัมของน้ำมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนและน้ำมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน

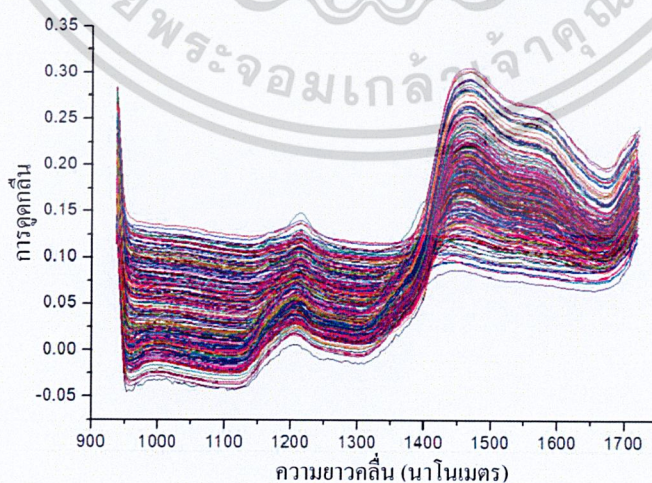
เมื่อนำค่าของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนและน้ำมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนมาวิเคราะห์ด้วย principal component analysis พบว่าข้อมูลถูกแยกเป็นสองกลุ่มอย่าง คือ PC1 และ PC2 ซึ่งค่าของ PC1 และ PC2 เท่ากับ 96% และ 4 % ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2

หากนำค่าทางสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนมาวิเคราะห์ด้วย principal component analysis พบว่าข้อมูลถูกแยกเป็นสองกลุ่มเช่นกัน คือ PC1 และ PC2 ซึ่งค่าของ PC1 และ PC2 เท่ากับ 71% และ 28% ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3 และพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความสะสมโดยรวมเท่ากับ 99% ซึ่งแสดงว่าทั้ง PC1 และ PC2 เป็นตัวแทนที่ดีของข้อมูลทางสเปกตรัมที่ใช้ในการแยกการปลอมปนในแป้งมันสำปะหลัง

จากการนำข้อมูลคุณสมบัติทางเคมีกายภาพในส่วนของข้อมูลจากปริมาณความชื้น, ความหนาแน่น, L^* , a^* , b^* ดังรูปที่ 4.4 กับข้อมูลสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนมาวิเคราะห์ด้วย principal component analysis พบว่าสามารถใช้ทั้ง 2 ข้อมูลในการคัดแยกแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนออกจากแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน แม้ว่าการวิเคราะห์ด้วยคุณสมบัติทางเคมีกายภาพจะสามารถคัดแยกได้ดี แต่การวิเคราะห์ทางด้านคุณสมบัติทางเคมีกายภาพทำลายตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์และใช้เวลานานในการวิเคราะห์ตัวอย่างเป็นจำนวนมาก แต่การวิเคราะห์ทางสเปกตรัมจะใช้เวลาน้อยกว่าและไม่ทำลายตัวอย่าง ดังนั้นข้อมูลสเปกตรัมจึงถูกนำมาใช้ในการพัฒนาสมการคัดแยกในงานวิจัยนี้

4.2 การสร้างสมการในการทำนายการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลัง

จากการวิเคราะห์แป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการปลอมปนจำนวน 200 ตัวอย่าง และแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์ตั้งแต่ 0.5 ถึง 100% (ผงโคโลไมท์) จำนวน 200 ตัวอย่าง เมื่อถูกนำไปผ่านเครื่องไฮเปอร์สเปกตรัมแล้วที่ช่วงความยาวคลื่น 935 ถึง 1,720 นาโนเมตร สเปกตรัมของตัวอย่างทั้ง 400 ตัวอย่าง ปรากฏดังรูปที่ 4.4 พบว่าสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นใกล้เคียงกันแบบไล่ระดับ



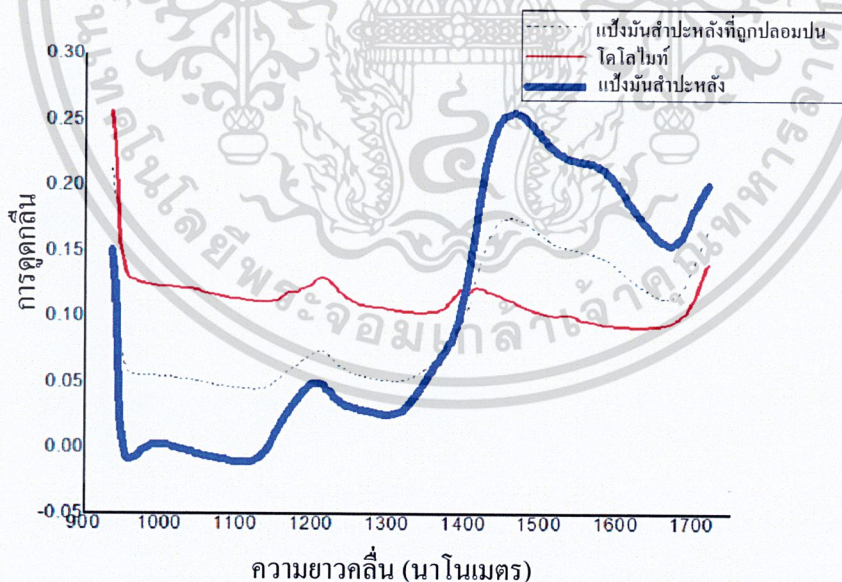
รูปที่ 4.4 ค่าการดูดกลืนแสงของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน

ทั้งหมด 400 ตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนมาเฉลี่ยให้เป็นเส้นเดียว รวมทั้งสเปกตรัมของตามรูปที่ 4.5 ซึ่งพบว่าสเปกตรัมทั้ง 3 มีพีคค่าการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นที่ 1,200 นาโนเมตร แต่ในช่วงความยาวคลื่น 1,400 ถึง 1,600 นาโนเมตรกลับพบเพียงพีคค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนกับพีคค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน ซึ่งไม่พบพีคค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของโคโลไมท์ที่ความยาวคลื่นนี้ โดยพีคค่าการดูดกลืนเฉลี่ยของโคโลไมท์พบที่ช่วงความยาวคลื่น 1,390 ถึง 1,450 นาโนเมตร พีคที่เกิดขึ้นเหล่านี้สะท้อนให้เห็นถึงองค์ประกอบทางเคมีภายในที่แตกต่างกันของแป้งมันสำปะหลังกับโคโลไมท์ โดยเฉพาะพีคการดูดกลืนแสงของน้ำกับพันธะ C-H ที่ความยาวคลื่น 1,200 นาโนเมตร (Zhao et al., 2018) ส่วนที่ความยาวคลื่น 1,400 นาโนเมตร คือค่าการดูดกลืนแสงของปริมาณแป้ง และที่ความยาวคลื่น 1,600 นาโนเมตร คือค่าการดูดกลืนแสงของพันธะ O-H ทำให้เข้าใจได้ว่าสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนจะสามารถแยกความแตกต่างได้ที่ความยาวคลื่นดังกล่าวจากปริมาณความชื้น, ปริมาณแป้งที่แตกต่างกัน ซึ่งพีคที่สูงกว่าของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนที่ความยาวคลื่น 1,400 นาโนเมตร และความยาวคลื่น 1,600 นาโนเมตร แสดงว่าแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนมีปริมาณของแป้งกับน้ำมากกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนและผงโคโลไมท์



รูปที่ 4.5 เส้นสเปกตรัมในการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลัง, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน และโคโลไมท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสร้างสมการทำนายการคัดแยกจากกลุ่ม calibration ที่ได้คัดเลือกให้มีข้อมูลของปริมาณสารปลอมปนน้อยสุดและมากสุดในกลุ่ม จากนั้นนำข้อมูลสเปกตรัมจากกลุ่ม calibration มาผ่านการปรับปรุงเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เพื่อให้ได้สเปกตรัมที่สามารถนำไปสร้างสมการทำนายแล้วได้ความแม่นยำสูงที่สุดในการคัดแยกแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนออกจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปน เช่น smoothing, 1st derivative, 2nd derivative, MSC, SNV ซึ่งเทคนิคเหล่านี้สามารถนำมาใช้ปรับปรุงรวมกันได้ โดยพิจารณาว่าสมการคัดแยกมีความถูกต้องในการทำนายที่ค่า cut off เท่ากับ 0.5 โดยค่า cut off เท่ากับ 0 คือ แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปน และ cut off เท่ากับ 1 คือ แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนโดโลไมท์ ซึ่งถ้าค่าที่ทำนายน้อยกว่าค่า cut off = 0.5 แสดงว่าเป็นแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปน แต่ถ้าค่าที่ทำนายไว้เท่ากับหรือสูงกว่าค่า cut off = 0.5 แสดงว่าเป็นแป้งมันสำปะหลังถูกปลอมปนโดโลไมท์

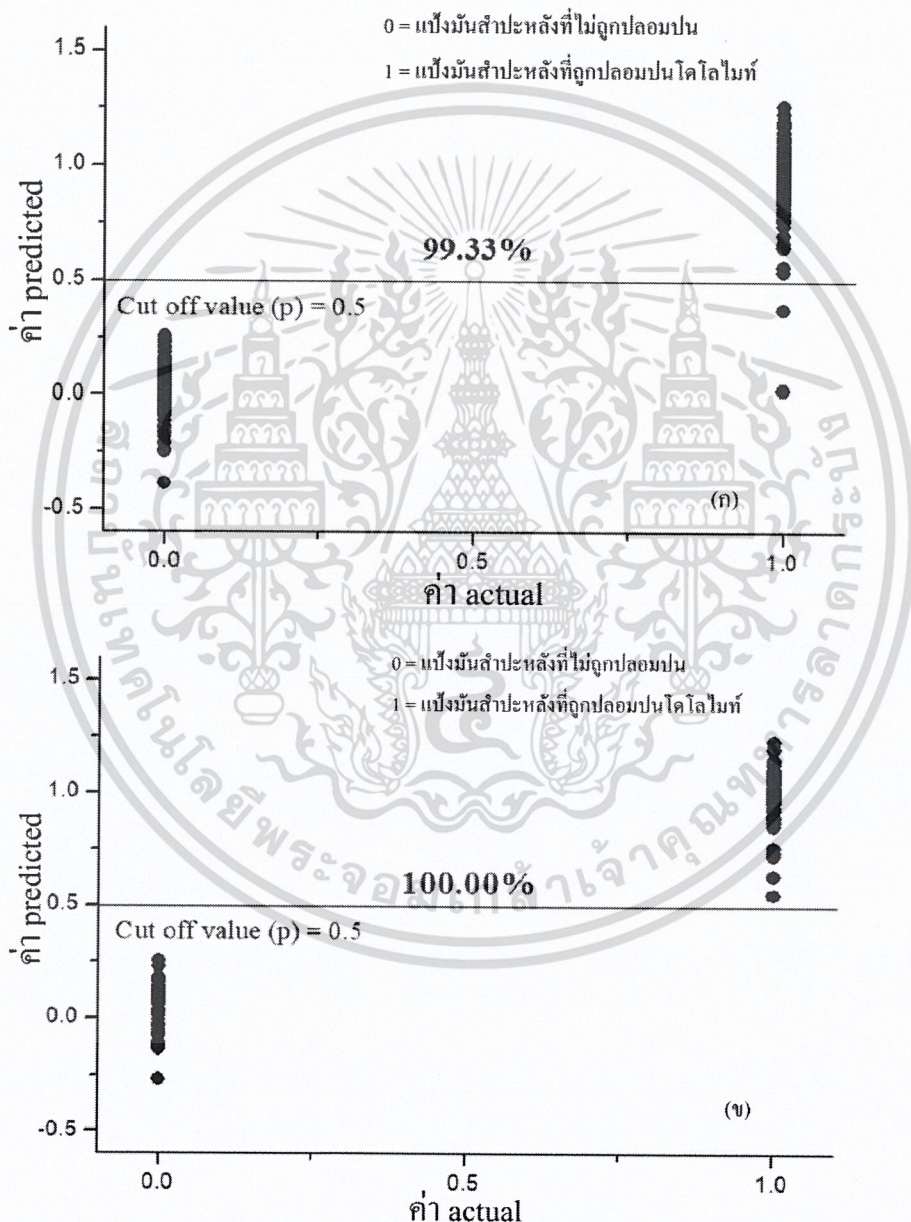
ผลของการทำนายหลังจากใช้สมการคัดแยกที่ผ่านการปรับปรุงและไม่ผ่านการปรับปรุงที่แสดงตามตารางที่ 4.1 พบว่า สมการคัดแยกทั้งหมดมีความแม่นยำในการคัดแยกสูงกว่า 96.00% โดยความแม่นยำน้อยที่สุด (96.33%) คือสมการที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเทคนิค MSC ส่วนความแม่นยำสูงที่สุด (99.33%) คือ การปรับปรุงด้วยเทคนิค 1st derivative ซึ่งสมการที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเทคนิค 1st derivative มีความแม่นยำสูงกว่าการทำนายของสมการคัดแยกที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (99.00%) จึงเลือกสมการคัดแยกที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเทคนิค 1st derivative เป็นสมการทำนาย

ตารางที่ 4.1 ผลความแม่นยำในการทำนายการปลอมปนในแป้งมันสำปะหลังของสมการคัดแยกของกลุ่ม calibration หลังจากผ่านการปรับปรุงสมการด้วยวิธี PLS-DA

การปรับปรุง	N	แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปน		แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน		% ความแม่นยำ
		ไม่ถูกปลอมปน		ถูกปลอมปน		
		ถูก	ผิด	ถูก	ผิด	
original	300	150	0	147	3	99.00
smoothing	300	150	0	147	3	99.00
1 st derivative	300	150	0	148	2	99.33
2 nd derivative	300	150	0	146	4	98.67
MSC	300	150	0	139	11	96.33
SNV	300	150	0	143	7	97.67
smoothing+1 st derivative	300	150	0	147	3	99.00
smoothing+2 nd derivative	300	150	0	146	4	98.67
1 st derivative+2 nd derivative	300	150	0	147	3	99.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสมการคัตแยกที่ให้ความแม่นยำสูงสุด คือสมการที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเทคนิค 1st derivative มาสร้างแบบจำลองการคัตแยกแบบแผนภาพการกระจายดังรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงค่า actual (แกน X) และค่า predicted (แกน Y) ของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปน (0) และแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมต์ (1) และใช้ค่า cut off เท่ากับ 0.5 เป็นค่าสำหรับบ่งชี้ว่าสมการคัตแยกทำนายค่าได้ถูกหรือผิด โดย (ก) เป็นแผนภาพการกระจายของกลุ่ม calibration และ (ข) เป็นแผนภาพการกระจายของกลุ่ม prediction



รูปที่ 4.6 แผนภาพการกระจายของสมการคัตแยกแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์: (ก) กลุ่ม calibration และ (ข) กลุ่ม prediction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการคัดแยกแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนออกจากแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์ของกลุ่ม calibration และกลุ่ม prediction ด้วยวิธี PLS-DA แสดงตามตารางที่ 4.2 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการทำนายสำหรับกลุ่ม prediction มีค่ามากกว่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการทำนายสำหรับกลุ่ม calibration โดยมีค่าเท่ากับ 100% และ 99.33% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ผลความแม่นยำในการทำนายการปลอมปนในแป้งมันสำปะหลังของสมการคัดแยกของกลุ่ม calibration และกลุ่ม prediction ด้วยวิธี PLS-DA

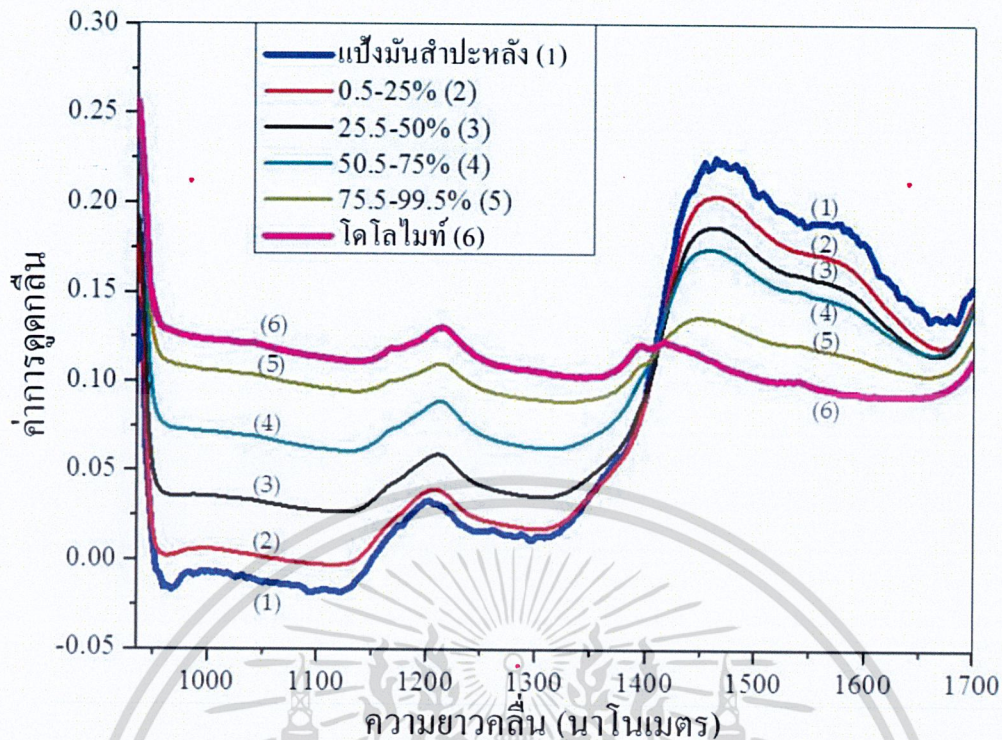
กลุ่มตัวอย่าง	N	แป้งมันสำปะหลังที่ไม่		แป้งมันสำปะหลังที่ถูก		% ความ แม่นยำ
		ถูกปลอมปน		ปลอมปน		
		ถูก	ผิด	ถูก	ผิด	
calibration	300	150	0	148	2	99.33
prediction	100	50	0	50	0	100.00

4.3 การสร้างสมการในการทำนายปริมาณของโคโลไมท์ที่ปลอมปนในแป้งมันสำปะหลัง

เมื่อนำเส้นสเปกตรัมที่แสดงการดูดกลืนแสงมาเฉลี่ยโดยแบ่งเป็น 6 เส้น จาก 6 กลุ่มตัวอย่าง คือ สเปกตรัมเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลัง, สเปกตรัมเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์ 0.5% - 25.0%, สเปกตรัมเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์ 25.5% - 50.0%, สเปกตรัมเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์ 50.5% - 75.0%, สเปกตรัมเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์ 75.5% - 99.5% และสเปกตรัมของผงโคโลไมท์ ได้เส้นดังรูปที่ 4.7

จากเส้นสเปกตรัมพบว่าในช่วงความยาวคลื่น 935 ถึง 1,410 นาโนเมตร เส้นสเปกตรัมของผงโคโลไมท์มีการดูดกลืนแสงมากที่สุด รองลงมา คือ แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์ 75.5% - 99.5%, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์ 50.5% - 75%, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์ 25.5% - 50.0%, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์ 0.5% - 25.0% และแป้งมันสำปะหลังตามลำดับ ในช่วงความยาวคลื่น 1,410 - 1,720 นาโนเมตร พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีการดูดกลืนแสงมากกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์ 0.5% - 25.0%, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์ 25.5% - 50.0%, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์ 50.5% - 75.0%, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโลไมท์ 75.5% - 99.5% และโคโลไมท์ตามลำดับ โดยตัวอย่างทั้ง 6 กลุ่มมีการตัดกันที่ความยาวคลื่น 1,410 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



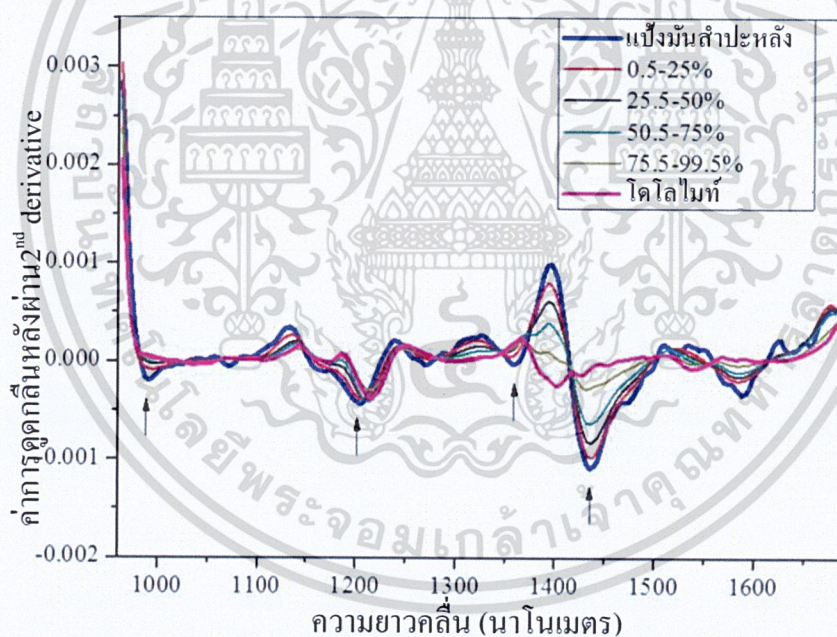
รูปที่ 4.7 เส้นสเปกตรัมในการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลัง (1), แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์ ((2), (3), (4), (5) คือ 0.5 – 25.0%, 25.5 – 50.0%, 50.5 – 75.0%, 75.5 – 99.5%) และผงโดโลไมท์ (6)

สเปกตรัมเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนปรากฏพีกที่มีการดูดกลืนแสงต่ำที่ความยาวคลื่น 1,200 นาโนเมตร และ 1,460 นาโนเมตร ตามรูปที่ 4.7 ซึ่งสัมพันธ์กับความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงจุดที่สองของพันธะ C-H และความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงจุดที่หนึ่งของพันธะ O-H ตามลำดับ (Zhao et al., 2018; Ozaki et al., 2007) แตกต่างกับสเปกตรัมของผงโดโลไมท์ที่ปรากฏพีกที่สูงกว่าที่ความยาวคลื่น 1,200 นาโนเมตร และช่วงความยาวคลื่น 1,410 ถึง 1,460 นาโนเมตร สอดคล้องกับความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงจุดที่สองของพันธะ O-H ที่ 1,200 นาโนเมตร และความยาวคลื่นแสงจุดที่หนึ่งของพันธะ O-H ที่ 1,410 นาโนเมตร (Workman & Weyer, 2012; Ozaki et al., 2007) จากกราฟแสดงว่าแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนมีองค์ประกอบของ O-H มากกว่าแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์ อีกทั้งยังมีปริมาณขององค์ประกอบ C-H น้อยกว่าอีกด้วย

อย่างไรก็ตามพีกที่ได้มาจากสเปกตรัมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงยังคงแสดงให้เห็นถึงพีกขององค์ประกอบภายในตัวอย่างที่อาจทับซ้อนกัน ดังนั้นเพื่อให้ได้พีกแต่ละองค์ประกอบที่ชัดเจนจึงดำเนินการนำสเปกตรัมการดูดกลืนเฉลี่ยไปปรับปรุงด้วย 2nd derivative ก่อน ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยให้สามารถแยกพีกที่ทับซ้อนกันให้ชัดเจนขึ้น (Ozaki et al., 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

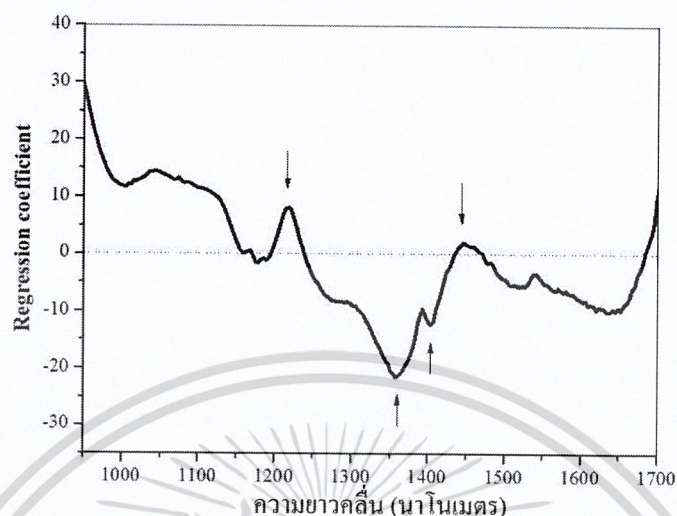
เมื่อนำสเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างไปปรับปรุงด้วยเทคนิค 2^{nd} derivative ตามรูปที่ 4.8 พบว่า แบริ่งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนปรากฏพีคที่ 980 นาโนเมตร, 1,202 นาโนเมตร, 1,360 นาโนเมตร และ 1,432 นาโนเมตรซึ่งสอดคล้องกับความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงของแป้ง (Ozaki et al., 2007) ส่วนผงโดโลไมท์เนื่องจากส่วนประกอบหลักคือ CaCO_3 จะมีความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสงที่ 13,700 นาโนเมตร (Gunasekaran et al., 2006) ซึ่งไม่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่เครื่องไฮเปอร์สเปกตรัมที่ใช้ในศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถวัดได้ แต่ผลของการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้พบว่าผงโดโลไมท์มีพีคปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 1,200 นาโนเมตร และ 1,410 นาโนเมตร ที่แสดงถึงปริมาณของน้ำที่มีบ้างเล็กน้อยในผงโดโลไมท์ ถึงแม้ว่าพีคของแป้งมันสำปะหลังที่มีการปลอมปนทั้ง 4 ช่วง จะมีความใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปน และผงโดโลไมท์ แต่สเปกตรัมเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนมีความแตกต่างอย่างชัดเจนกับสเปกตรัมของผงโดโลไมท์ เพราะสเปกตรัมของผงโดโลไมท์ไม่มีพีคที่ความยาวคลื่นของแป้งที่ 980 นาโนเมตร 1,360 นาโนเมตรและ 1,432 นาโนเมตร



รูปที่ 4.8 เส้นสเปกตรัมในการดูดกลืนแสงเฉลี่ยที่ผ่านการปรับปรุงด้วย 2^{nd} derivative ของแป้งมันสำปะหลัง (1), แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโดโลไมท์ ((2), (3), (4), (5) คือ 0.5 – 25.0%, 25.5 – 50.0%, 50.5 – 75.0%, 75.5 - 99.5%) และผงโดโลไมท์ (6)

รูปที่ 4.9 แสดงข้อมูลระหว่างค่า regression coefficient ต่อความยาวคลื่นเมื่อใช้สมการทำนายปริมาณการปลอมปนของโดโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังจากวิธี PLSR พบว่ามีพีคการดูดกลืนที่สำคัญที่

ความยาวคลื่น 1,200 นาโนเมตร, 1,360 นาโนเมตร, 1410 นาโนเมตร และ 1,432 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงของน้ำและแป้ง



รูปที่ 4.9 regression coefficients ของสมการทำนายปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังจากกลุ่ม calibration

ผลของการปรับปรุงและไม่ปรับปรุงสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่างๆเพียงเทคนิคเดียวหรือนำเทคนิคเหล่านี้มาใช้ปรับปรุงร่วมกันของกลุ่ม calibration แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี PLSR เพื่อทำนายปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังดังตารางที่ 4.4 พบว่าสมการที่ไม่ผ่านการปรับปรุงให้ค่า RMSECV ที่ต่ำที่สุด และค่า R ที่สูงที่สุด เท่ากับ 2.37% และ 0.997 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับปรุงด้วยเทคนิคอื่นๆ โดยมีค่า LV เท่ากับ 3 สมการทำนายปริมาณการปลอมปนที่ไม่ผ่านการปรับปรุงจึงถูกเลือกเป็นสมการในการทำนายปริมาณการปลอมปน

ตารางที่ 4.3 ผลของการปรับปรุงสเปกตรัมจากกลุ่ม calibration แล้ววิเคราะห์ด้วยวิธี PLSR

การปรับปรุง	N	LV	R	RMSECV (%)
original	140	3	0.997	2.37
smoothing	140	3	0.996	2.53
1 st derivative	140	2	0.991	3.88
2 nd derivative	140	2	0.983	5.41
MSC	140	2	0.434	27.10
SNV	140	4	0.975	6.54
smoothing+1 st derivative	140	2	0.992	3.79
smoothing+2 nd derivative	140	2	0.983	5.39
1 st derivative+2 nd derivative	140	2	0.985	4.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

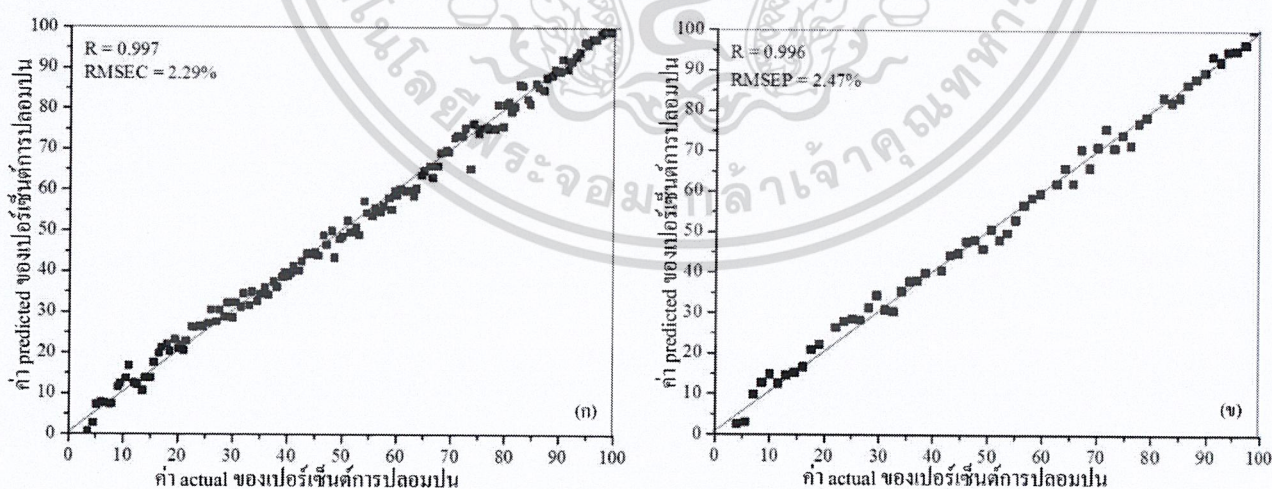
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลของการทำนายปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังด้วยกลุ่ม calibration และกลุ่ม prediction ด้วยสมการทำนาย

กลุ่มตัวอย่าง	การปรับปรุง	N	LV	R	RMSEC (%)	RMSEP (%)	RPD
calibration	original	140	3	0.997	2.29	-	-
prediction	original	61	3	0.996	-	2.47	11.76

เมื่อนำสมการทำนายปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังมาทดสอบด้วยกลุ่ม calibration และกลุ่ม prediction พบว่ากลุ่ม calibration ได้ค่า R เท่ากับ 0.997 และ RMSEC เท่ากับ 2.29% ส่วนกลุ่ม prediction ได้ค่า R เท่ากับ 0.996, RMSEP เท่ากับ 2.47% และ RPD (SD / SEP) เท่ากับ 11.76 ตามตารางที่ 4.5 ซึ่งค่า R ที่มากกว่า 0.99 และค่า RPD ที่มากกว่า 8.1 บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการทำนายของสมการ โดยจากค่าที่ได้นั้นแสดงว่าสมการที่ใช้ทำนายมีประสิทธิภาพสูง ทำให้สามารถนำสมการทำนายปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังนี้ไปใช้ในการทำงานจริงได้ (Ozaki et al., 2007; Williams, 2019)

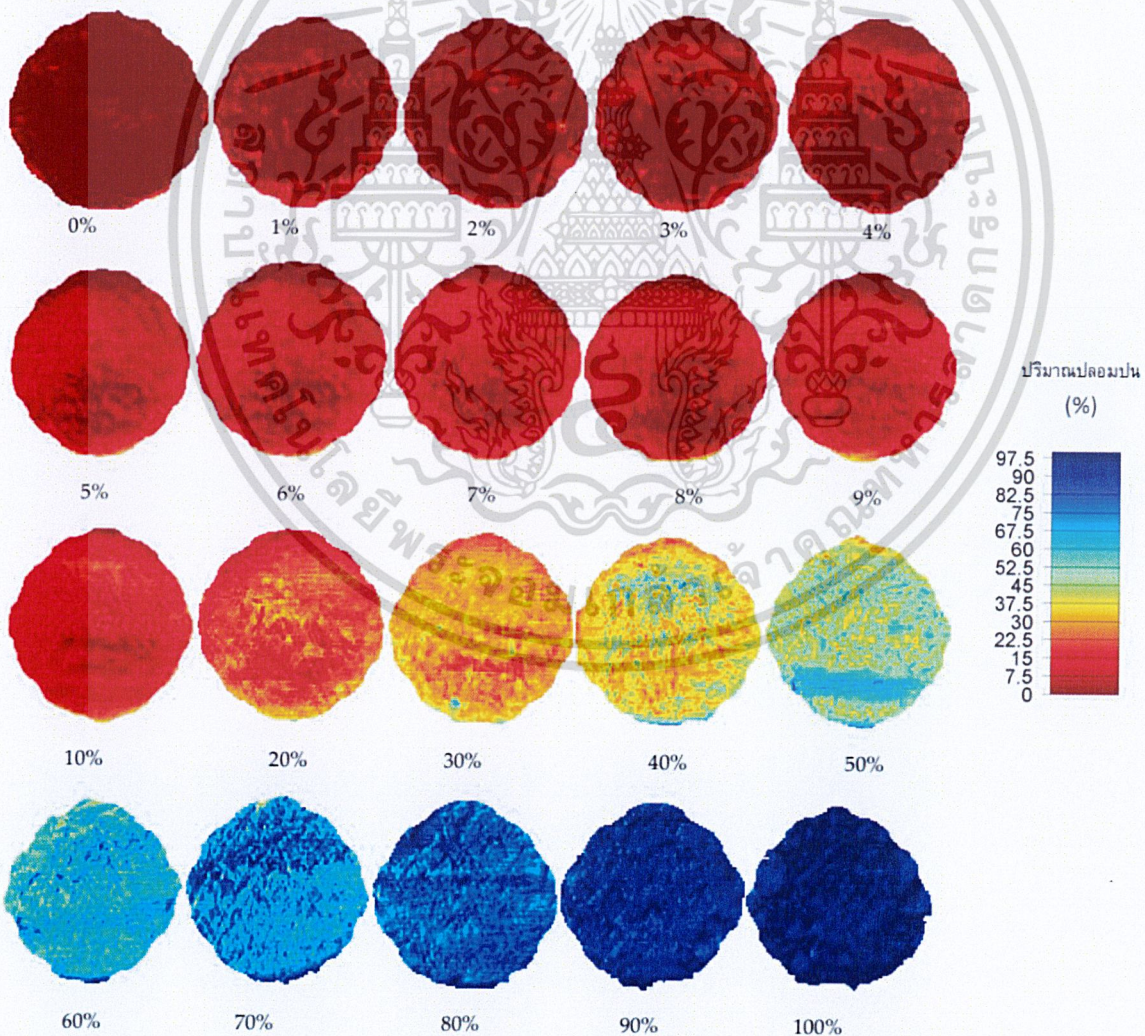
แผนภาพการกระจายที่แสดงระหว่างค่า actual ที่แกน X และค่า predicted ที่แกน Y ของปริมาณการปลอมปนดังรูปที่ 4.10 มีลักษณะของเส้นกราฟที่ใกล้มุม 45 องศา สำหรับทั้งกลุ่ม calibration และกลุ่ม prediction ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำนายที่สูงของสมการที่ได้



รูปที่ 4.10 แผนภาพการกระจายของสมการทำนายปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธี PLSR ใน (ก) กลุ่ม calibration และ (ข) กลุ่ม prediction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปภาพการทำนายปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังที่มาจากการใช้สมการในการทำนายที่ได้ตามรูปที่ 4.11 แสดงสีตั้งแต่สีน้ำตาลจนถึงสีน้ำเงินเข้มซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังตั้งแต่เล็กน้อยจนถึงมาก โดยสีน้ำตาลหมายถึงแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปน และสีน้ำเงินหมายถึงผงโคโลไมท์ ซึ่งรูปภาพการทำนายจากสมการทำนายแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนอย่างชัดเจน โดยรูปภาพของตัวอย่างที่เริ่มมีสีฟ้าเพิ่มขึ้นยิ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณการปลอมปนที่เพิ่มขึ้น และหากมีสีแดงที่เพิ่มขึ้นก็ยิ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณการปลอมปนที่น้อยลง วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายต่อการคัดแยกการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังที่สังเกตได้ง่ายที่สีของรูปภาพ (แดง, เหลือง, ฟ้า, น้ำเงิน) ดังนั้นรูปภาพที่ได้จากการทำนายด้วยการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดจึงสะดวก, ไม่ทำลายตัวอย่าง, ง่าย, รวดเร็ว และแม่นยำในการคัดแยกการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.11 ภาพการทำนายปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังในปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยนี้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพทางด้านปริมาณความชื้น, ปริมาณน้ำอิสระ, ความหนาแน่น, L^* , a^* , b^* ถูกนำมาพิจารณาในการทำนายการคัดแยกและทำนายปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้สมการที่มาจากทฤษฎีการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดพบว่าปริมาณความชื้น, ความหนาแน่น, L^* , a^* , b^* สามารถคัดแยกแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนออกจากแป้งมันสำปะหลังได้ ส่วนปริมาณน้ำอิสระไม่สามารถนำมาใช้ในการคัดแยกได้ ถึงแม้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพบางค่าสามารถคัดแยกแป้งมันสำปะหลังออกจากแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน แต่ไม่สามารถบ่งบอกปริมาณการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังได้

ในส่วนของข้อมูลสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด ช่วงความยาวคลื่น 935 ถึง 1,720 นาโนเมตร ที่ถูกนำไปปรับปรุงด้วยเทคนิค 1st derivative แล้วถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการคัดแยกการปลอมปนของโคโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังที่ด้วยวิธี PLS-DA เมื่อถูกนำมาใช้ในการคัดแยกข้อมูลในกลุ่ม calibration นั้นให้ความแม่นยำในการคัดแยกสูงกว่า 99% และให้ความแม่นยำสำหรับข้อมูลกลุ่ม 100% ซึ่งแสดงว่าสมการคัดแยกนี้สามารถนำไปใช้ในการแยกแป้งมันสำปะหลังที่มีการปลอมปนของโคโลไมท์ออกจากแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปนได้จริง

อีกทั้งสมการทำนายปริมาณของโคโลไมท์ที่ปลอมปนในแป้งมันสำปะหลังที่ข้อมูลของสเปกตรัมไม่ผ่านการนำไปปรับปรุงด้วยเทคนิคต่างๆ ก่อนนำมาใช้ในการสร้างสมการด้วยวิธี PLSR ได้ความถูกต้องในการทำนาย 99.6% นอกจากนั้นสามารถนำมาใช้ในการสร้างรูปภาพในการทำนายปริมาณการปลอมปนได้ โดยได้รูปภาพที่มีสีต่างๆ ที่สื่อความหมายถึงการปลอมปนและไม่ปลอมปน คือ สีน้ำตาลแสดงว่าแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ถูกปลอมปน และสีแดง, สีเหลือง, สีฟ้า และสีน้ำเงิน ที่แสดงถึงปริมาณการปลอมปนในแป้งมันสำปะหลังที่มากขึ้นเรื่อยๆ ไม่เพียงเท่านั้นการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดยังไม่ทำลายตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์, รวดเร็ว, แม่นยำ, เชื่อถือได้ และไม่ใช่สารเคมีในการวิเคราะห์ จึงทำให้การวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดยังดีกว่าวิธีการวิเคราะห์ตามปกติที่ใช้ในปัจจุบัน ดังนั้นการวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วง

ใกล้อินฟราเรดสามารถนำไปใช้ในคัดแยกการปลอมปนของแป้งมันสำปะหลังเป็นประจำก่อนการแปรรูปในอุตสาหกรรมได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์แป้งมันสำปะหลังที่มีการปลอมปนที่ความเข้มข้นในช่วงปริมาณ 0.5% ขึ้นไป หากการปลอมปนของโดโลไมท์ในแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณการปลอมปนที่น้อยกว่า 0.5% อาจจะต้องทำการวิเคราะห์ในความเข้มข้นที่น้อยกว่านั้นใหม่เพื่อสร้างสมการคัดแยกและทำนายปริมาณการปลอมปนดังกล่าว

การทดลองในงานวิจัยนี้ใช้โดโลไมท์ที่มีขนาด 500 mesh หากมีการปลอมปนที่มีขนาดของโดโลไมท์ที่เล็กกว่า 500 mesh อาจจะทำให้โดโลไมท์และแป้งมันสำปะหลังมีความกลมกลืนในการปลอมปนมากขึ้น จึงอาจต้องนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการคัดแยกและทำนายปริมาณการปลอมปนอีกครั้ง

เนื่องด้วยโดโลไมท์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะของสีที่ขาวแตกต่างจากแป้งมันสำปะหลังพอสมควร หากนำไปโดโลไมท์ที่ผ่านการฟอกสีมาใช้ในการทดลองเพื่อให้มีสีใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลัง อาจทำให้ยากแก่การคัดแยกมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- กรกช วรรณกุล. 2553. “การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำจิ้มไก่ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีย่านใกล้อินฟราเรด.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กระทรวงพาณิชย์. 2562. ประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่อง กำหนดให้แป้งมันสำปะหลังเป็นสินค้ามาตรฐาน และมาตรฐานสินค้าแป้งมันสำปะหลัง พ.ศ. 2562. [Online]. Available: http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2562/E/056/T_0002.PDF. 12 พฤศจิกายน 2562.
- กระทรวงสาธารณสุข. 2563. พระราชบัญญัติอาหารพ.ศ. 2522. [Online]. Available: <http://food.fda.moph.go.th/law/act.php>. 16 ตุลาคม 2563.
- ธงชัย สุวรรณสิขิน และปิติพร ฤทธิเรืองเดช. 2555. การวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ. ใน การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้ในการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ
- บริษัท นำสรรค จำกัด. 2563. ผลิตภัณฑ์ดูแลสตีวี่น้ำ. [Online]. Available: https://www.นำสรรค.com/?gclid=EAIaIQobChMI6O7NudzS7QIVkAkrCh3PdgEoEAAYASAAEgIT0_D_BwE. 16 ธันวาคม 2563.
- โพสต์ทูเดย์. 2553. ตลาดแป้งมันวิกฤต ‘หินฝุ่น’ โรงงานจีนโวย. [Online]. Available: <https://www.posttoday.com/social/general/50505>. 12 พฤศจิกายน 2562.
- ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์ โดยความร่วมมือจากกรมศุลกากร. 2563. สินค้าส่งออกสำคัญของไทยตามโครงสร้างสินค้าส่งออก. [Online]. Available: <http://tradereport.moc.go.th/Report/Default.aspx?Report=MenucomTopNRecode&Option=3&Lang=Th&ImExType=1&comcode=101040200>. 10 ธันวาคม 2563.
- สศคิ ผลมะขาม. 2558. “การตรวจสอบคุณภาพของมะขงชิดพันธุ์ทุลเกล้าด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทสโกปี.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2553. ระวังหลอกขายทราย-สารผสมแป้งมัน ย้ำห้ามใช้หวั่นกระทบการส่งออกทั้งระบบ. [Online]. Available: <https://warning.acfs.go.th/early-warning/view/?page=2595>. 12 พฤศจิกายน 2562.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2563. ตารางแสดงรายละเอียดมันสำปะหลัง. [Online]. Available: [อนุพันธ์ เทอดวงศักรกุล. 2545. การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์. หน้า 67-97. ใน การอบรมเชิงปฏิบัติการ การควบคุมสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ](http://www.oae.go.th/view/1/%E0%B8%95%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%AA%E0%B8%94%E0%B8%87%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%94%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B8%AA%E0%B8%B3%E0%B8%9B%E0%B8%B0%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%87/TH-TH. 10 ธันวาคม 2563.</p>
</div>
<div data-bbox=)

อนุพันธ์ เทอดวงศักรกุล. 2555. การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์. ใน การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้ในการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

Ahamed, M., Alhadlaq, H.A., Ahmad, J., Siddiqui, M.A., Khan, S.T., Musarrat, J. and Al-Khedhairi, A.A. 2015. Comparative cytotoxicity of dolomite nanoparticles in human larynx hep2 and liver hepg2 cells. Applied Toxicology. 35: 640 - 650.

Alcázar, A.S. C. and Meireles, M.A.A. 2015. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. Food Science and Technology. 35 (2): 215–236.

Al-Muhtaseb, A.H., McMinn, W.A.M. and Magee, T.R.A. 2002. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. Food and Bioproducts Processing. 80 (2): 118-128.

Aviles, R.T., Campos, M.S., Guerrero, L.C. and Ancona, D.B. 2016. Effects of pyroconversion and enzymatic hydrolysis on indigestible starch content and physicochemical properties of cassava (*Manihot Esculenta*) starch. Starch-Starke. 69: 5-6.

Barreto, A., Cruz-Tirado, J.P., Siche, R. and Quevedo, R. 2018. Determination of starch content in adulterated fresh cheese using hyperspectral imaging. Food Bioscience. 21: 14-19.

Caliskan G. and Dirim S.N. 2016. The effect of different drying processes and the amounts of maltodextrin addition on the powder properties of sumac extract powders. Powder Technology. 287: 308-314.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Codex. 2013. Codex standard for edible cassava flour Codex Stan 176-1989. [Online]. Available: http://www.fao.org/input/download/standards/59/CXS_176e.pdf. 2 January 2020.
- Dias, G.F., Alves, F.B.T., Andrade, A.V.C., Ferreira, A.M. and Santos, F.A. 2018. Toxicity assessment and chemical properties of dolomite for use in dentistry. *Revista de Dentologia da Universidade de são paulo*. 30 (1): 33-46.
- European commission. 2020a. Food Fraud. [Online]. Available: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/food-fraud-quality/topic/food-fraud_en Accessed. 14 December 2020.
- European commission. 2020b. Food fraud summary may 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/knowledge4policy/food-fraud-quality/food-fraud-summary-may-2020_en/ Accessed. 3 July 2020.
- Feng, X., Zhao, Y., Zhang, C., Cheng, P. and He, L. 2017. Discrimination of transgenic maize kernel using nir hyperspectral imaging and multivariate data analysis. *Sensors*. 17 (1894): 1-14.
- Fontana, Jr. A.J. 2007. "Measurement of water activity, moisture sorption isotherms, and moisture content of foods." 155-171. in *Water activity in foods*. Boston: Blackwell publishing.
- Forchetti, D.A.P. and Poppi, R.P. 2017. Use of NIR hyperspectral imaging and multivariate curve resolution (MCR) for detection and quantification of adulterants in milk powder. *LWT - Food Science and Technology*. 76: 337-343.
- Fu, X., Kim, M.S, Chao, K., Qin, J., Lim, J., Lee, H., Garrido-Varo, A., Pérez-Marín, D. and Ying, Y. 2014. Detection of melamine in milk powders based on NIR hyperspectral imaging and spectral similarity analyses. *Journal of Food Engineering*. 124: 97-104.
- Goñi, A. M. and Salvadori, V. O. 2016. Color measurement: comparison of colorimeter vs. computer vision system. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 11: 538-547.
- Gregg, J. M. , Bish, D. L., Kaczmark, S. E. and Machel, H. G. 2015. Mineralogy, nucleation and growth of domolite in the laboratory and sedimentary environment: a review. *Sedimentology*. 62 (6): 1749-1769.
- Gunasekaran, S., Anbalagan, G. and Pandi, S. 2006. Raman and infrared spectra of carbonates of calcite structure. *Raman Spectroscopy*. 37: 892-899.
- Harrington, R. 2010. Chinese flour adulterated with pulverised lime-reports. [Online]. Available: <https://www.foodnavigator-asia.com/Article/2010/04/09/Chinese-flour-adulterated-with-pulverised-lime-reports/> Accessed 3 July 2020.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Huang, Y.X., Liu, M.J., Chen, S., Jasmi, I.I., Tang, Y. and Lin, S. 2019. Enhanced adsorption and slow release of phosphate by dolomite–alginate composite beads as potential fertilizer. *Water Environment Research*. 91 (8): 797-804.
- Imen, Z., Hassani, A.H. and Borghae, S.M. 2019. Comparison of the effectiveness of natural dolomite and modified dolomite in the removal of heavy metals from aqueous solutions. *Advances in Environmental Health Research*. 7: 61-74.
- Jia, W.Y., Su, W.H. and Sun, D.W. 2018. Discrimination of organic wheat flour from other flour varieties by near-infrared (NIR) hyperspectral imaging. *Biosystems and Food Engineering*. 23: 76-79.
- Labuza, T.P. and Altunakar, B. 2007. "Water activity prediction and moisture sorption isotherms." 109-154. in *Water activity in foods*. Boston: Blackwell publishing.
- Lagarto, A., Bellma, A., Tillán, J., Gabilondo, T., Guerra, I., Ocanto, Z., Couret, M. and González, R. 2008. Effect of dolomite oral exposure in wistar rats during organogenesis period of pregnancy. *Experimental and Toxicologic Pathology*. 60: 499–504.
- Lohumi, S., Lee, H., Kim, M.S., Qin, J. and Cho, B.K. 2019. Raman hyperspectral imaging and spectral similarity analysis for quantitative detection of multiple adulterants in wheat flour. *Biosystems and Food Engineering*. 181: 103-113.
- Kamruzzaman, M., Makino, Y. and Oshita, S. 2016. Rapid and non-destructive detection of chicken adulteration in minced beef using visible near-infrared hyperspectral imaging and machine learning. *Journal of Food Engineering*. 170: 8-15.
- Labordel, A., Jaillais, B., Bouveresse, D.J.R., Boulanger, A. and Cordella, C.B.Y. 2019. Subpixel detection of peanut particles in wheat flour using near infrared hyperspectral imaging. *Optical Characterization of Materials: Conference Proceedings*. 2019: 79-86.
- Lichao, Z. and Joshua E.E. 2017. Relative protein quantification using tandem mass tag mass spectrometry. *Proteomics: Methods and Protocols*. 1550: 185-198.
- Martynenko, A. 2014. True, particle, and bulk density of shrinkable biomaterials: evaluation from drying experiments. *Journal Drying Technology*. 32: 1319-1325.
- Moyer, D., Devries, J. and Spink, J. 2017. The economics of a food fraud incident—case studies and examples including melamine in wheat gluten. *Food Control*. 71: 358–364.

- Neghab, M., Abedini, R., Soltanzadeh, A., Kashkooli, A.I. and Ghayoomi, S.M.A. 2012. Respiratory disorders associated with heavy inhalation exposure to dolomite dust. *Iranian Red Crescent Medical*. 14 (9): 549-557.
- Nicolaii, B.M., Lotzeb, E., Peirsa, A., Scheerlincka, N. and Theronb, K.I. 2006. Non-destructive measurement of bitter pit in apple fruit using NIR hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology*. 40: 1-6.
- Ozaki, Y., McClure, W.F. and Christy, A.A. 2007. *Near-infrared spectroscopy in food science and technology*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Ozdemir, E., Ayrimis, N. and Mengelolu, F. 2017. Effect of dolomite powder on combustion and technological properties of wpc and neat polypropylene. *The Chilean Chemical Society*. 62 (4): 3716-3720.
- Panichnumsin, P., Nopharatana, A., Ahring, B. and Chaiprasert, P. 2010. Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. *Biomass Bioenergy*. 34 (8): 1117-1124.
- Pathare, P.B., Opara, U.L. and Al-Said, F.A.J. 2012. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. *Food and Bioprocess Technology*. 6: 36-60.
- Qiu, J., Khalloufi, S., Martynenko, A., Dalen, G.V., Schutyser, M. and Almeida-rivera, C. 2015. Porosity, bulk density, and volume reduction during drying: review of measurement methods and coefficient determinations. *Journal Drying Technology*. 33: 1681-1699.
- Renée, J. 2014. Food fraud and “economically motivated adulteration” of food and food ingredients. *Congressional Research Service*. 1-40.
- Roberts, H.J. 1983. Potential toxicity due to dolomite and bonemeal. *Southern Medical Journal*, 76 (5): 556-559
- Sharma, A., Jana, A.H. and Chavan, R.S. 2012. Functionality of milk powders and milk-based powders for end use applications—A review. *Comprehensive reviews in Food Science and Food Safety*. 11: 518-528.
- Su, W. H. and Sun D.W. 2017. Evaluation of spectral imaging for inspection of adulterants in terms of common wheat flour, cassava flour and corn flour in organic avatar wheat (*Triticum* spp.) flour. *Food Engineering*. 200: 59-69.

- Su W.H. and Sun, D.W. 2018. Fourier transform infrared and Raman and hyperspectral imaging techniques for quality determinations of powdery foods: A review. *Comprehensive reviews in Food Science and Food Safety*. 17: 104-122.
- U.S. food and drug administration. 2020. FSMA final rule for mitigation strategies to protect food against intentional adulteration. [Online]. Available: <https://www.fda.gov/food/food-safety-modernization-act-fsma/fsma-final-rule-mitigation-strategies-protect-food-against-intentional-adulteration>. Accessed. 18 December 2020.
- Verdú, S., Vásquez, F., Graua, R., Ivorrab, E., Sánchez, A.J. and Barat, J.M. 2016. Detection of adulterations with different grains in wheat products based on the hyperspectral image technique: The specific cases of flour and bread. *Food Control*. 62: 373-380.
- Wang, W., Hostettler, C.E., Damberger, F.F., Kossmann, J., Lloydand, J.R. and Zeeman, S.C. 2018. Modification of cassava root starch phosphorylation enhances starch functional properties. *Frontiers in plant science*. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01562>. 30 November 2019.
- Warren, J.K. 2000. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science reviews*. 52: 1-81.
- Williams, P. 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.). New York: Taylor & Francis group, LLC.
- Wu, D., Shi, H., He, Y., Yu, X. and Bao, Y. 2013. Potential of hyperspectral imaging and multivariate analysis for rapid and non-invasive detection of gelatin adulteration in prawn. *Journal of Food Engineering*. 119 (3): 680-686.
- Xiao, Z., Storms, R. and Tsang, A. 2006. A quantitative starch-iodine method for measuring alpha-amylase and glucoamylase activities. *Analytical Biochemistry*. 351: 146-148.
- Zambrano, M.V., Dutta, B., Mercer, D.G., Maclean, H.L. and Touchie, M.F. 2019. Assessment of moisture content measurement methods of dried food products in small-scale operations in developing countries: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 88: 484-496.

Zhao, X., Wang, W., Ni, X., Chu, X., Li, Y.F. and Sun, C. 2018. Evaluation of near infrared hyperspectral imaging for detection of peanut and walnut powders in whole wheat flour. *Applied Science*. 8 (7): 1076.

Zhao, X., Wang, W., Ni, X., Chu, X., Li, Y.F. and Sun, C. 2019. Utilising near infrared hyperspectral imaging to detect low-level peanut powder contamination of whole wheat flour. *Biosystems and Food Engineering*. 184: 55-68.

Zhao, Z., Yu, H., Zhang, S., Du, Y., Sheng, Z., Chu, Y., Zhang, D., Guo, L. and Deng, L. 2020. Visualization accuracy improvement of spectral quantitative analysis for meat adulteration using Gaussian distribution of regression coefficients in hyperspectral imaging. *Optik*. 212: 164737.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ก.1 ขั้นตอนการวัดสเปกตรัมด้วยเครื่องไฮเปอร์สเปกตรัม Specim Fx17

ก.1.1 นำตัวอย่างมาปรับอุณหภูมิที่ห้องปรับอากาศที่รักษาอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ก.1.2 เทตัวอย่างลงบนภาชนะทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร และปริมาณ 9.5 ± 0.5 กรัม

ก.1.3 นำตัวอย่างที่ตรวจด้วยเครื่องไฮเปอร์สเปกตรัม โหมดสะท้อนกลับ ที่ช่วงความยาวคลื่น 935 ถึง 1,720 นาโนเมตร

ก.2 ขั้นตอนการวัดปริมาณความชื้นด้วยเครื่อง Mettler Toledo MJ33

ก.2.1 เสียบปลั๊กและเปิดเครื่อง

ก.2.2 วางจานบรรจุตัวอย่างลงไป แล้วกดปุ่ม set zero

ก.2.3 ใส่ตัวอย่างปริมาณ 5 กรัมลงในจานบรรจุตัวอย่าง โดยเกลี่ยให้ทั่วจาน

ก.2.4 กดปุ่ม start เริ่มการวัด รอจนได้ยินเสียงดังจบกระบวนการแล้วอ่านค่าที่ปรากฏ

ก.2.5 ทำการทดลองจากข้อ ก.2.1 ถึง ก.2.2 ซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

ก.3 ขั้นตอนการวัดปริมาณน้ำอิสระด้วยเครื่อง Water activity Aqua lab 4TE

ก.3.1 เสียบปลั๊กและเปิดเครื่อง

ก.3.2 นำถ้วยที่บรรจุสารคู่ความชื้นออก

ก.3.3 เติมตัวอย่างลงไปในถ้วย โดยให้ปิดบริเวณก้นถ้วยให้หมดและให้สูงถึงครึ่งถ้วย

ก.3.4 ใช้กระดาษชำระเช็ดทำความสะอาดบริเวณด้านข้างและขอบที่สูงกว่าครึ่งถ้วย

ก.3.5 เปิด chamber แล้วใส่ถ้วยบรรจุตัวอย่างลงไป

ก.3.6 ปิด chamber จากนั้นเลื่อนคันโยกไปที่ read รอจนได้ยินเสียงดังจบกระบวนการแล้วอ่านค่าที่ปรากฏ

ก.3.7 ทำการทดลองจากข้อ ก.3.1 ถึง ก.3.5 ซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

ก.4 ขั้นตอนการวัดค่าสี L^* , a^* , b^* ด้วยเครื่อง CR-400 Chroma Meter ระบบการวัด CIE $L^*a^*b^*$

ก.4.1 เสียบปลั๊กและเปิดเครื่องส่วนหัววัด

ก.4.2 กดปุ่ม calibration เพื่อทำการ calibration เครื่องกับ white calibration plate โดยการวัดค่า 1 ครั้ง

ก.4.3 นำไปวัดค่าสีของตัวอย่างที่บรรจุในถุงพลาสติกใส โดยหัววัดแนบสนิทกับตัวอย่างแล้วจึงกดวัดค่า ซึ่งวัด 3 ตำแหน่ง บริเวณตอนบน ตอนกลาง และตอนล่างของถุงตัวอย่างแล้วเฉลี่ยค่าที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.5 ขั้นตอนการวัดความหนาแน่น

ก.5.1 ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 50 กรัม

ก.5.2 เทใส่กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร

ก.5.3 อ่านค่าที่ได้

ก.5.4 ทำการทดลองจากข้อ ก.5.1 ถึง ก.5.3 ซ้ำ 3 ครั้ง

ก.5.5 นำมาคำนวณตามสูตร (ก.1)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)

m คือ น้ำหนัก (กรัม)

V คือ ปริมาณ (มิลลิลิตร)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

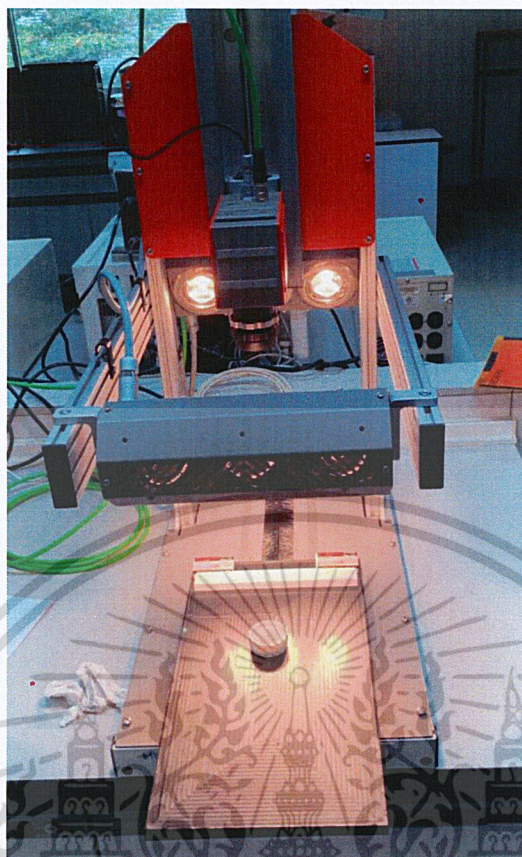


รูปที่ ข.1 การเตรียมตัวอย่างการปลอมปนของแป้งมันสำปะหลังและโดโลไมท์ในถุงพลาสติกใส



รูปที่ ข.2 ตัวอย่างแป้งมันสำปะหลัง, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน และผงโดโลไมท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

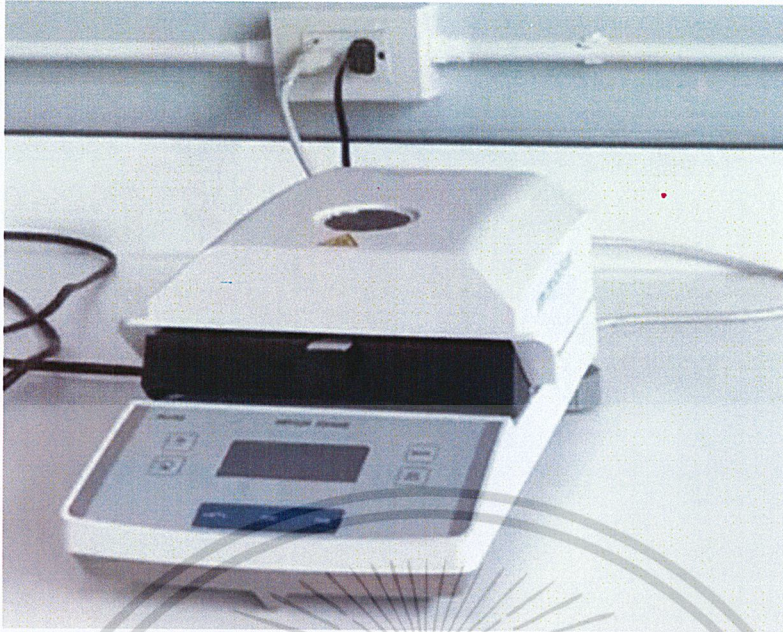


รูปที่ ข.3 การวิเคราะห์ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรดของแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยเครื่องไฮเปอร์สเปกตรัม (Specim Fx17)



รูปที่ ข.4 ตัวอย่างแป้งมันสำปะหลัง, แป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปน และผงโคโคโลไมท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 การหาปริมาณความชื้นด้วยเครื่อง Mettler Toledo MJ33

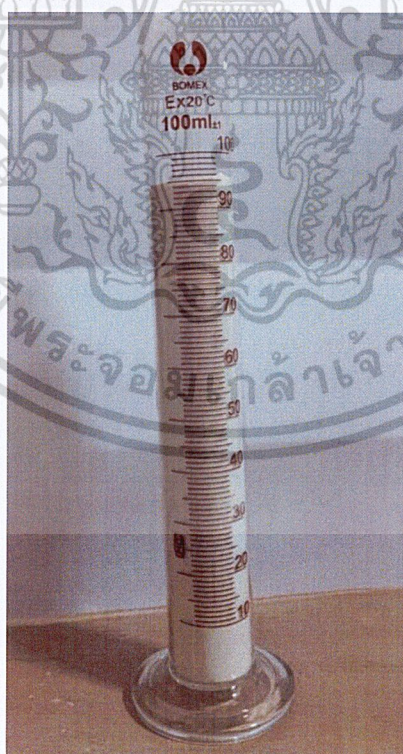


รูปที่ ข.6 การหาปริมาณน้ำอิสระด้วยเครื่อง Water activity Aqua lab 4TE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.7 การวัดค่าสีด้วยเครื่อง CR-400 Chroma Meter



รูปที่ ข.8 การวัดค่าความหนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

ตารางที่ ค.1 ปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและโคโคไมท์ในตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังที่ถูกปลอมปนด้วยโคโคไมท์

ปลอมปน (%)	ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง (กรัม)	ปริมาณโคโคไมท์ (กรัม)	ปลอมปน (%)	ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง (กรัม)	ปริมาณโคโคไมท์ (กรัม)
0.5	99.5	0.5	50.5	49.5	50.5
1	99	1	51	49	51
1.5	98.5	1.5	51.5	48.5	51.5
2	98	2	52	48	52
2.5	97.5	2.5	52.5	47.5	52.5
3	97	3	53	47	53
3.5	96.5	3.5	53.5	46.5	53.5
4	96	4	54	46	54
4.5	95.5	4.5	54.5	45.5	54.5
5	95	5	55	45	55
5.5	94.5	5.5	55.5	44.5	55.5
6	94	6	56	44	56
6.5	93.5	6.5	56.5	43.5	56.5
7	93	7	57	43	57
7.5	92.5	7.5	57.5	42.5	57.5
8	92	8	58	42	58
8.5	91.5	8.5	58.5	41.5	58.5
9	91	9	59	41	59
9.5	90.5	9.5	59.5	40.5	59.5
10	90	10	60	40	60
10.5	89.5	10.5	60.5	39.5	60.5
11	89	11	61	39	61
11.5	88.5	11.5	61.5	38.5	61.5
12	88	12	62	38	62
12.5	87.5	12.5	62.5	37.5	62.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลอมปน (%)	ปริมาณแป้งมัน สำปะหลัง (กรัม)	ปริมาณโคโค ไมท์ (กรัม)	ปลอมปน (%)	ปริมาณแป้งมัน สำปะหลัง (กรัม)	ปริมาณโคโค ไมท์ (กรัม)
13	87	13	63	37	63
13.5	86.5	13.5	63.5	36.5	63.5
14	86	14	64	36	64
14.5	85.5	14.5	64.5	35.5	64.5
15	85	15	65	35	65
15.5	84.5	15.5	65.5	34.5	65.5
16	84	16	66	34	66
16.5	83.5	16.5	66.5	33.5	66.5
17	83	17	67	33	67
17.5	82.5	17.5	67.5	32.5	67.5
18	82	18	68	32	68
18.5	81.5	18.5	68.5	31.5	68.5
19	81	19	69	31	69
19.5	80.5	19.5	69.5	30.5	69.5
20	80	20	70	30	70
20.5	79.5	20.5	70.5	29.5	70.5
21	79	21	71	29	71
21.5	78.5	21.5	71.5	28.5	71.5
22	78	22	72	28	72
22.5	77.5	22.5	72.5	27.5	72.5
23	77	23	73	27	73
23.5	76.5	23.5	73.5	26.5	73.5
24	76	24	74	26	74
24.5	75.5	24.5	74.5	25.5	74.5
25	75	25	75	25	75
25.5	74.5	25.5	75.5	24.5	75.5
26	74	26	76	24	76
26.5	73.5	26.5	76.5	23.5	76.5
27	73	27	77	23	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลอมนปน (%)	ปริมาณแป้งมัน ตำปะหลัง (กรัม)	ปริมาณโคโโล ไมท์ (กรัม)	ปลอมนปน (%)	ปริมาณแป้งมัน ตำปะหลัง (กรัม)	ปริมาณโคโโล ไมท์ (กรัม)
27.5	72.5	27.5	77.5	22.5	77.5
28	72	28	78	22	78
28.5	71.5	28.5	78.5	21.5	78.5
29	71	29	79	21	79
29.5	70.5	29.5	79.5	20.5	79.5
30	70	30	80	20	80
30.5	69.5	30.5	80.5	19.5	80.5
31	69	31	81	19	81
31.5	68.5	31.5	81.5	18.5	81.5
32	68	32	82	18	82
32.5	67.5	32.5	82.5	17.5	82.5
33	67	33	83	17	83
33.5	66.5	33.5	83.5	16.5	83.5
34	66	34	84	16	84
34.5	65.5	34.5	84.5	15.5	84.5
35	65	35	85	15	85
35.5	64.5	35.5	85.5	14.5	85.5
36	64	36	86	14	86
36.5	63.5	36.5	86.5	13.5	86.5
37	63	37	87	13	87
37.5	62.5	37.5	87.5	12.5	87.5
38	62	38	88	12	88
38.5	61.5	38.5	88.5	11.5	88.5
39	61	39	89	11	89
39.5	60.5	39.5	89.5	10.5	89.5
40	60	40	90	10	90
40.5	59.5	40.5	90.5	9.5	90.5
41	59	41	91	9	91
41.5	58.5	41.5	91.5	8.5	91.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลอมปน (%)	ปริมาณแป้งมัน สำปะหลัง (กรัม)	ปริมาณโคโค ไมท์ (กรัม)	ปลอมปน (%)	ปริมาณแป้งมัน สำปะหลัง (กรัม)	ปริมาณโคโค ไมท์ (กรัม)
42	58	42	92	8	92
42.5	57.5	42.5	92.5	7.5	92.5
43	57	43	93	7	93
43.5	56.5	43.5	93.5	6.5	93.5
44	56	44	94	6	94
44.5	55.5	44.5	94.5	5.5	94.5
45	55	45	95	5	95
45.5	54.5	45.5	95.5	4.5	95.5
46	54	46	96	4	96
46.5	53.5	46.5	96.5	3.5	96.5
47	53	47	97	3	97
47.5	52.5	47.5	97.5	2.5	97.5
48	52	48	98	2	98
48.5	51.5	48.5	98.5	1.5	98.5
49	51	49	99	1	99
49.5	50.5	49.5	99.5	0.5	99.5
50	50	50	100	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง, ผงโคโลไมท์ และแป้งมันสำปะหลังที่ถูก
ปลอมปนด้วยโคโลไมท์ (0.5% - 25%, 25.5% - 50%, 50.5% - 75% และ 75.5% - 99.5%)

ประเภท	ปริมาณ ความชื้น (%)	ปริมาณน้ำ อิสระ	ความ หนาแน่น			
			L*	a*	b*	(g/ml)
แป้งมันสำปะหลัง	11.50 ^a ± 0.37	0.499 ^{ab} ± 0.04	0.46 ^f ± 0.11	97.60 ^a ± 0.35	-0.08 ^d ± 0.02	0.42 ^d ± 0.02
0.5% - 25.0%	10.46 ^b ± 0.92	0.495 ^{ab} ± 0.01	0.53 ^c ± 0.03	93.70 ^b ± 1.47	0.39 ^c ± 0.22	4.06 ^c ± 0.78
25.5% - 50.0%	7.36 ^c ± 0.86	0.492 ^{ab} ± 0.07	0.62 ^d ± 0.02	90.15 ^c ± 0.64	0.76 ^b ± 0.13	5.67 ^b ± 0.30
50.5% - 75.0%	4.50 ^d ± 0.88	0.496 ^{ab} ± 0.01	0.72 ^c ± 0.04	88.62 ^d ± 0.42	0.98 ^a ± 0.05	6.23 ^a ± 0.09
75.5% - 99.5%	1.61 ^e ± 0.85	0.524 ^a ± 0.03	0.77 ^b ± 0.02	87.70 ^c ± 0.18	1.05 ^a ± 0.02	6.34 ^a ± 0.07
โคโลไมท์	0.16 ^f ± 0.01	0.476 ^b ± 0.00	0.76 ^a ± 0.01	87.62 ^c ± 0.09	1.06 ^a ± 0.01	6.33 ^a ± 0.02

ข้อมูล: ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a, b, c, d, e, f: ตัวอักษรกำกับต่างกันแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากการทดสอบด้วย Duncan's Multiple Range

ภาคผนวก ง.

Key Engineering Materials
ISSN: 1662-9795, Vol. 862, pp 46-50
© 2020 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland

Submitted: 2020-03-13
Revised: 2020-04-29
Accepted: 2020-05-08
Online: 2020-09-09

Detection of Adulteration of Tapioca Starch with Dolomite by near Infrared Hyperspectral Imaging

Duangkamolrat Khamsopha¹ and Sontisuk Teerachaichayut^{2,a*}

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

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

*sontisuk.te@kmitl.ac.th

Keywords: Nondestructive, Model, Prediction, Calibration, Classification

Abstract. Tapioca starch adulterated with dolomite is sold in markets, but this adulteration cannot be identified by normal visual inspection. Near infrared (NIR) hyperspectral imaging has been successfully used as a non-destructive method of identifying various characteristics of food, therefore it was tested to identify dolomite adulteration. Adulterated tapioca starch samples were prepared by adding dolomite in the range of 0.5-100% (wt/wt). Samples (N=400) of pure tapioca starch (0) and adulterated tapioca starch (1) were divided into calibration set (N=300) and a prediction set (N=100). All samples were scanned using NIR hyperspectral imaging (935-1720 nm) and spectra were pre-processed using Savitzky-Golay first derivative differentiation pretreatment in order to obtain the optimal conditions for establishing a classification model. Partial least squares-discriminant analysis was carried out to evaluate the accuracy of classification tapioca starch adulterated with dolomite. The results showed the total accuracy of prediction for classification was 100%. Therefore, NIR hyperspectral imaging was demonstrated to have a potential for use in detecting adulteration of tapioca starch with dolomite.

Introduction

Starch, extracted from the roots of the tapioca plant (*Manihot esculenta*), is used in the food industry as a texture improver, humectant, gelling agent, thickener and in the bakery industry as a supplement or replacement of wheat flour [1]. Adulteration of tapioca starch occurs [2], mostly by adding dolomite because dolomite is cheaper. Also, dolomite is similar to tapioca starch since tapioca starch is off white to light yellow in color and dolomite is creamy to gray-white in color [3 4]. Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) is a type of sedimentary rock that naturally occurs on earth, and is commonly used to reduce soil acidity and to remove heavy metals from aqueous solutions [5]. In the food and medicinal industries, dolomite is used as a source of calcium and magnesium supplement, especially in the cosmetic, skincare and dentistry industry and increasing bone mass [6].

Adulterated tapioca starch can't be identified by normal visual inspection. However, near infrared hyperspectral imaging has been successfully used for non-destructive qualitative and quantitative analysis of various food products [7]. For qualitative analysis, it has been used to determine contamination of peanut powder in wheat flour [7 8], walnut powder in wheat flour [7], contamination with borax in pork meatballs [9] and classify sweetness of longan fruit [10]. For quantitative analysis, it has successfully been used to determine the amount of peanut powder in wheat flour [11], level of acidity and total soluble solids in guava fruit [12], texture and total soluble solids in jelly [13], total soluble solids, titratable acidity and maturity index of limes [14] and levels of borax in pork meatballs [9].

There are no simple effective methods of testing tapioca flour for adulteration with dolomite therefore the aim of this work was to test whether using hyperspectral imaging could be used to detect dolomite contamination in tapioca flour.

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, (#542356880-22/08/20,03:49:46)

รูปที่ ง.1 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เรื่อง Detection of Adulteration of Tapioca Starch with Dolomite by near Infrared Hyperspectral Imaging หน้า 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Experimental

The procedures used in the experiment are illustrated in Figures 1.

Samples Preparation. Pure tapioca starch was purchased from a trusted reliable manufacturer in Bangkok, Thailand. This starch was divided into 400 x 100g samples. 200 were adulterated by adding dolomite every 0.5% (wt/wt) from 0.5 to 100%, while the other 200 samples were left as unadulterated tapioca starch samples and were used as control ($N_{\text{total}}=400$). All samples were weighed and packed in aluminum foil bags (PET12/ALU7/LLDPE80) in order to avoid effects on their moisture content. Samples were divided into 2 groups with equal numbers of pure tapioca starch and adulterated tapioca starch. The first group ($N=300$) was used for developing the classification model and the second group ($N=100$) was used for testing the model. The dolomite concentration of adulterated tapioca starch samples were selected for both groups in order to control for similar deviation.

Hyperspectral Imaging. All samples with similar weight were scanned by reflectance near infrared hyperspectral imaging (Specim Fx17, Spectral Imaging Ltd, Oulu, Finland) with a spectral wavelength of 935-1720 nm at a scanning speed of 22.97 mm/s and the scanning positioning speed was 20 mm/s. Samples were stored in an air conditioned room at 25°C for about 24 hours before measurement.

Data Analysis. Samples of pure tapioca starch were defined as 0 while samples of adulterated tapioca starch were defined as 1. PLS-DA was used in this study. Samples in the first group (calibration set) were used for developing the classification model and samples in the second group (prediction set) was used for testing the classification model. Spectral pretreatment methods, such as smoothing, 1st derivative, 2nd derivative, standard normal variate (SNV), multiplicative scatter correction (MSC) and combined methods, were investigated in the calibration set in order to obtain the best conditions for establishing the classification model by considering the best accuracy of cross validation. Results were analyzed statistically using the UmBio Evince hyperspectral image analysis software (Prediktera Evince, version 2.7.5, Sweden) and Unscramble program (CAMO, Oslo, Norway).

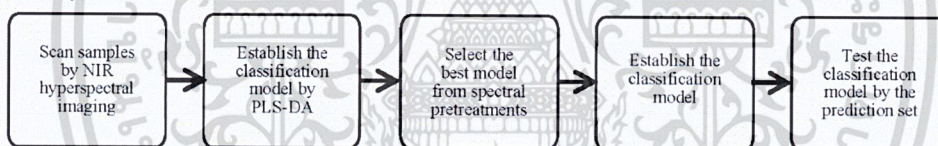


Fig. 1. Process flow chart used in the experiments

Result and Discussion

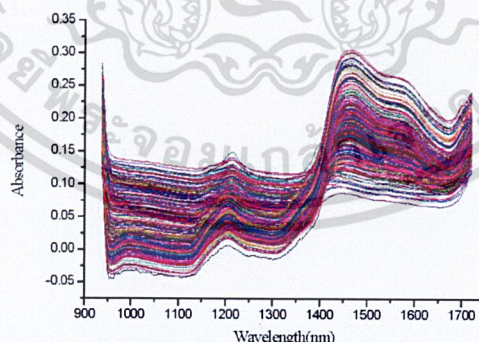


Fig. 2. The average absorbance spectra of all samples.

รูปที่ ๓.๒ งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เรื่อง Detection of Adulteration of Tapioca Starch with Dolomite by near Infrared Hyperspectral Imaging หน้าที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The spectra of the samples were selected and spectra of the background were removed before analysis using the spectra of the sample and background of each image (640 x 490 pixel). The average absorbance spectrum of each sample was used as a representative. All samples (N=400) were grouped for the calibration set (N=300) and the prediction set (N=100). The spectra of all samples are shown in Fig. 2. The range, mean and standard deviation of each dolomite concentration in the calibration set and prediction set are presented in Table 1, which shows that the standard deviation of each set were similar.

Table 1. Characteristics of dolomite concentration in the calibration set and the prediction set.

Items	Calibration set	Prediction set
Number of samples	300	100
Range	0-100%	0-99.5%
Mean	25.0%	25.5%
Standard deviation	32.3%	32.8%

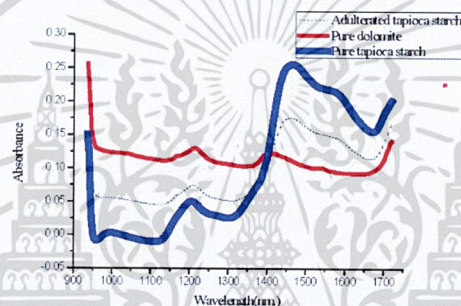


Fig. 3. The average absorbance spectra of adulterated tapioca starch with dolomite compared to pure tapioca starch and absorbance spectra of pure dolomite.

The average absorbance spectrum of pure tapioca starch, the average spectrum of adulterated tapioca starch with dolomite and the average spectrum of pure dolomite powder are shown in Fig. 3. There were peaks at 1,200 nm. The average absorbance spectrum of pure tapioca starch and the peak of the average spectra of adulterated tapioca starch with dolomite were 1,400-1,600 nm while the peak of the average spectrum of pure dolomite powder was 1390-1450 nm. These peaks correspond to the peaks of the first overtones of water [15] and the peak at 1,200 nm correspond to the second overtone of C-H bonding (methylene and methyl) [7]. The peaks at 1,400 nm to 1,600 nm are the first overtone of the starch content and O-H bonding (hydroxyl group) [16]. The different absorbance spectra for tapioca starch and dolomite clearly reflect their different chemical compositions.

Table 2. Results of various spectra pretreatments from the calibration set by Partial least squares - discriminant analysis.

Pretreatment	N	Pure tapioca starch		Adulterated tapioca starch		% Total accuracy
		Correct	Incorrect	Correct	Incorrect	
Original	300	150	0	147	3	99.00
Smoothing	300	150	0	147	3	99.00
1 st Derivative	300	150	0	148	2	99.33
2 nd Derivative	300	150	0	146	4	98.67
MSC	300	150	0	139	11	96.33
SNV	300	150	0	143	7	97.67
Smoothing+1 st Derivative	300	150	0	147	3	99.00

N = number of samples, 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.

รูปที่ 3.3 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เรื่อง Detection of Adulteration of Tapioca Starch with Dolomite by

near Infrared Hyperspectral Imaging หน้าที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Results of spectral pretreatments and the total accuracy of validation by the classification models are shown in Table 2. The cut off value of $p = 0.05$ was used for decision of correct or incorrect prediction. If the predicted value was less than $p = 0.05$, it indicated that was pure tapioca starch, while if the predicted value was equal or higher than $p = 0.05$, it indicated that was tapioca starch adulterated with dolomite. The result showed that the first derivative spectral pretreatment gave the highest total accuracy of validation (99.33%). Therefore the first derivative spectral pretreatment was used for establishing the classification model. In Fig. 4, the scatter plots are shown between actual value (X axis) and predicted value (Y axis) of the pure tapioca starch (0) and the tapioca starch adulterated with dolomite (1). The cut off value of $p = 0.05$ was shown for both the correct and incorrect classification.

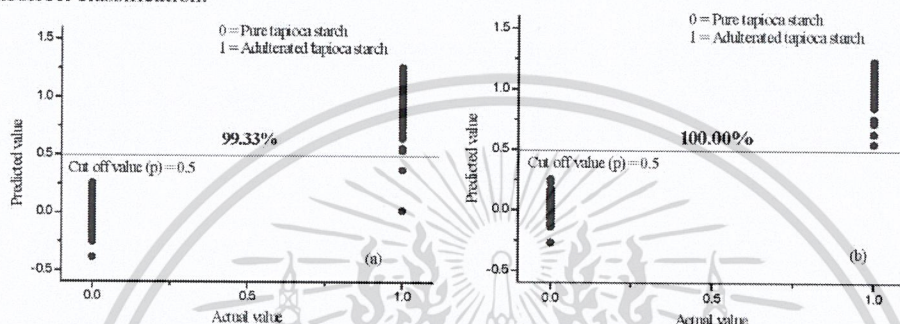


Fig. 4. Scatter plots of values from the classification model for pure tapioca starch and adulterated tapioca starch: (a) in the calibration set and (b) in the prediction set.

The results of PLS-DA by the classification model for the pure tapioca starch and the tapioca starch adulterated with dolomite in the calibration set and the prediction set are shown in Table 3. The calibration set's total accuracy is 99.33% and prediction set's total accuracy is 100%.

Table 3. Results of the classification accuracy by the classification model.

Sample set	N	Pure tapioca starch		Adulterated tapioca starch		% Total accuracy
		Correct	Incorrect	Correct	Incorrect	
calibration	300	150	0	148	2	99.33
Prediction	100	50	0	50	0	100.00

N = number of samples

Conclusions

The classification model in this study was established to detect adulteration of tapioca starch with dolomite using partial least squares - discriminant analysis. The Savitzky-Golay first derivative differentiation spectral pretreatment was used for developing the classification model. The results showed that the accuracy of calibration was over 99% and the accuracy of prediction was 100%. It can therefore be concluded that this technique can be successful used for detecting whether or not tapioca starch was adulterated with dolomite. This test is non-destructive, fast, accurate and reliable and uses no chemicals; all characteristic that makes it superior to the routine analytical method currently used. Additionally, near infrared hyperspectral imaging can be adapted and applied in on-line systems for routine inspection of adulteration of tapioca starch before processing.

Acknowledgments

The authors acknowledge for use the laboratory and equipment at the Faculty of Agro-Industry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. The authors are grateful to Prof. Panmanas Sirisomboon for technical help and Prof. A.K. Thompson for editing English language in this paper.

รูปที่ ๓.๔ งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เรื่อง Detection of Adulteration of Tapioca Starch with Dolomite by near Infrared Hyperspectral Imaging หน้าที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

References

- [1] S.C. Alcazar-Alay, M.A.A. Meireles, Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources, *J. Food Sci. Technol.* 35(2) (2015) 215-236.
- [2] Information on <https://warning.acfs.go.th/en/early-warning/view/?page=2595>
- [3] R.T. Aviles, M.S. Campos, L.C. Guerrero, D.B. Ancona, Effects of pyroconversion and enzymatic hydrolysis on indigestible starch content and physicochemical properties of cassava (*manihot esculenta*) starch, *J. Starch.* 69(5-6) (2017) 1600267.
- [4] Z. Imen, A.H. Hassani, S.M. Borghae, Comparison of the effectiveness of natural dolomite and modified dolomite in the removal of heavy metals from aqueous solutions, *J. Adv. Environ. Health Res.* 7(1) (2019) 61-74.
- [5] Y.X. Huang, M.J. Liu, S. Chen, I.I. Jasmi, Y. Tang, S. Lin, Enhanced adsorption and slow release of phosphate by dolomite-alginate composite beads as potential fertilizer, *J. Water Environ. Res.* 91(8) (2019) 797-804.
- [6] G.F. Dias, F.B.T. Alves, A.V.C. Andrade, A.M. Ferreira, F.A. Santos, Toxicity assessment and chemical properties of dolomite for use in dentistry, *Revista de Odontologia da Universidade de São Paulo*, 30(1) (2018) 33-46.
- [7] X. Zhao, W. Wang, X. Ni, X. Chu, Y.F. Li, C. Sun, Evaluation of near-Infrared hyperspectral imaging for detection of peanut and walnut powders in whole wheat flour, *J. Appl. Sci.* 8(7) (2018) 1076.
- [8] P. Mishra, C.B.Y. Cordella, D.N. Rutledge, P. Barreiro, J.M. Ro, B. Diezma, Application of independent components analysis with the jade algorithm and nir hyperspectral imaging for revealing food adulteration, *J. Food Eng.* 168 (2016) 7-15.
- [9] S. Sukthanaruk, S. Boonpiam, S. Teerachaichayut, Quantitative and qualitative assessment of pork meatball containing borax using near infrared spectroscopy, *AIP Conf. Proceedings.* 2030(1) (2018) 020210.
- [10] W. Sahachairungrueng, S. Teerachaichayut, Qualitative analysis for sweetness classification of longan by near infrared hyperspectral imaging, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 639 (2019) 012038.
- [11] X. Zhao, W. Wang, X. Ni, X. Chu, Y.F. Li, C. Sun, Utilising near-infrared hyperspectral imaging to detect low-level peanut powder contamination of whole wheat flour, *J. Biosyst. Eng.* 184 (2019) 55-68.
- [12] N. Klinbumrung, S. Teerachaichayut, Quantification of acidity and total soluble solids in guavas by near infrared hyperspectral imaging, *AIP Conf. Proceedings.* 2030(1) (2018) 020209.
- [13] P. Onnom, S. Teerachaichayut, Development of calibration models to predict texture and total soluble solids in jelly using hyperspectral imaging, *AIP Conf. Proceedings.* 2030(1) (2018) 020211.
- [14] S. Teerachaichayut, 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 Technol.* 133 (2017) 20-25.
- [15] F. Westad, A. Schmidt, M. Kermit, Incorporating chemical band-assignment in near infrared spectroscopy regression models, *J. Near Infrared Spectroscopy*, 16(3) (2008) 265-273.
- [16] S. Lohumi, S. Lee, W.H. Lee, M.S. Kim, C. Mo, H. Bae, B.K. Cho, Detection of starch adulteration in onion powder by Ft-Nir and Ft-IR spectroscopy, *J. Agric. food chem.* 62(38) (2014) 9246-9251.

รูปที่ ๓.๕ งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เรื่อง Detection of Adulteration of Tapioca Starch with Dolomite by near Infrared Hyperspectral Imaging หน้า ๕

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Outline

Highlights

Abstract

Keywords

1. Introduction

2. Materials and Methods

3. Results and Discussion

4. Conclusions

CRiDIT authorship contribution statement

Declaration of Competing Interest

Acknowledgments

References

Show full outline



Food Control

Available online 16 December 2020, 107781

In Press, Journal Pre-proof



Utilizing near infrared hyperspectral imaging for quantitatively predicting adulteration in tapioca starch

Duzngkamolner Khamsopha¹, Sontasuk Teerachichayut^{1,*, R. B.}

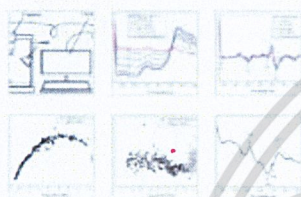
Show more

+ Add to Mendeley Share Cite

<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107781>

Get rights and content

Figures (8)



Show all figures

Tables (4)

Table 1

Highlights

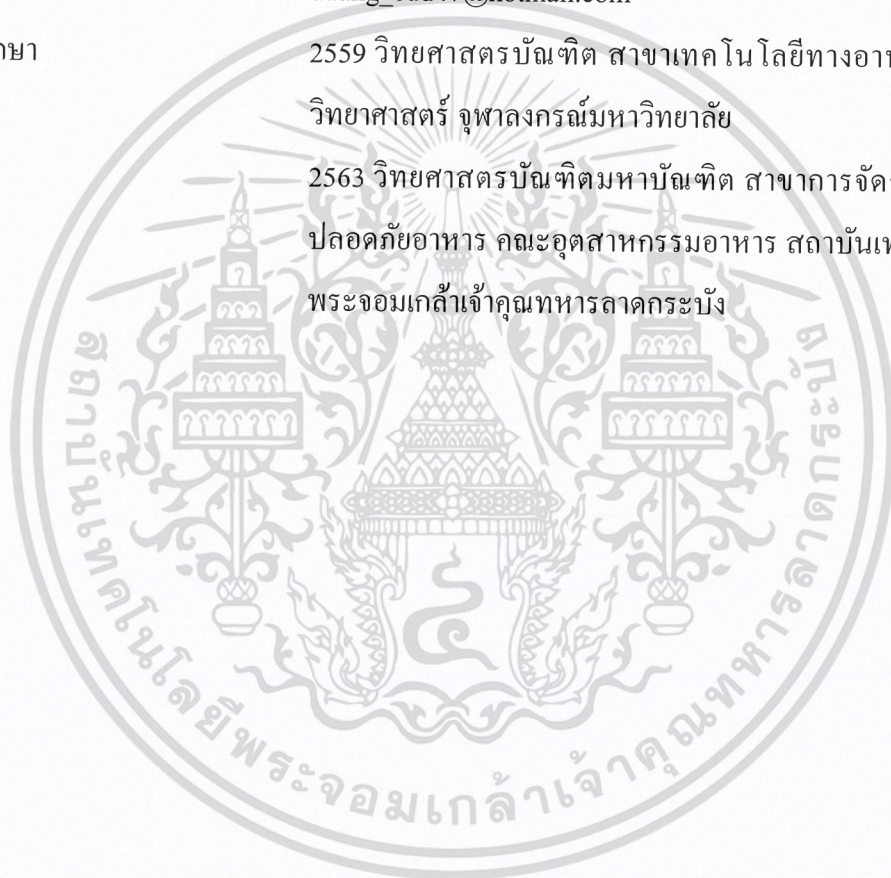
- NIR-HSI was applied for detecting the adulterant in tapioca starch.
- The calibration model for predicting the concentration of adulterant was established.
- The predictive images for detecting the adulterant in tapioca starch were created.
- The excellent results obtained with R of 0.996 and RMSEP of 2.47%.

รูปที่ ๓.6 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เรื่อง Utilizing near infrared hyperspectral imaging for quantitatively predicting adulteration in tapioca starch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวดวงกมลรัตน์ คำโสภ
First name – Last name	Miss Duangkamolrat Khamsopha
วัน เดือน ปีเกิด	14 พฤศจิกายน 2537
ที่อยู่	68/75 ซอยสายไหม45/1 แขวงสายไหม เขตสายไหม กรุงเทพฯ 10220
E-mail	duang_cud47@hotmail.com
ประวัติการศึกษา	2559 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2563 วิทยาศาสตรบัณฑิตมหาบัณฑิต สาขาการจัดการความ ปลอดภัยอาหาร คณะอุตสาหกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้