หัวข้อวิจัย การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องด้วยเทคนิค Fourier transform-near infrared reflectance spectroscopy

ผู้ดำเนินการวิจัย อารีรัตน์ อิ่มศิลป์
ปิยรัตน์ สิริธัญกิจ
หน่วยงาน สาขาเทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร โรงเรียนการเรือน และ
โครงการโรงสีข้าว สำนักกิจการพิเศษ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

ปีการศึกษา 2555

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้อง ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่าง และคุณสมบัติด้านความหนืด รวมถึงประยุกต์ใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้มาทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องขนาดเต็มเมล็ด จำนวน 60 ตัวอย่าง ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Square Regression; PLSR) และสร้างสมการสำหรับการทำนายการจำแนกกลุ่มข้าวหอมมะลิออกจากกลุ่มข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำ กลุ่มข้าวปริมาณแอมิโลสปานกลาง และกลุ่มข้าวปริมาณแอมิโลสสูงด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component analysis; PCA) และการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มด้วยการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด (Partial Least Square-Discriminant Analysis; PLS-DA) ช่วงจำนวนคลื่นที่ 10,000-4,000 cm^{-1} ผลการทดลองพบว่า ปริมาณโปรตีนของข้าวกล้องอยู่ในช่วง 5.27-9.06% ข้าวหอมมะลิมีปริมาณแอมิโลสและค่าความคงตัวของเจลไม่แตกต่างกับข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) ยกเว้นข้าวพันธุ์หอมคลองหลวง โดยข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำพันธุ์ปทุมธานี 1 มีค่าความคงตัวของเจลสูงที่สุด รองลงมาคือข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูง ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวหอมมะลิมีค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายด่างอยู่ในระดับ 7.00 ซึ่งไม่แตกต่างกับข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำ (p>0.05) ยกเว้นข้าวพันธุ์พิษณุโลก 1 ซึ่งมีค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายด่างอยู่ในระดับ 5.00 และไม่แตกต่างกับข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 2 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มข้าวปริมาณแอมิโลสปานกลาง ในขณะที่ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูงมีค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่างต่ำที่สุด สำหรับคุณสมบัติด้านความหนืด พบว่าข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำมีค่าความหนืดสูงสุดสูงที่สุด และมีค่าการแตกตัวของแป้งสุกไม่แตกต่างกับข้าวหอมมะลิ (p>0.05) ในขณะที่ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูงจะมีค่าความหนืดสุดท้าย ค่าความคงตัวของแป้งสุก และค่าความหนืดหลังการทำเย็นสูงที่สุด รองลงมาคือข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสปานกลาง ข้าวกลุ่ม

ปริมาณแอมิโลสต่ำ และข้าวหอมมะลิตามลำดับ (p<0.05) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความคงตัวของแป้งสุกและค่าความหนืดหลังการทำเย็นของข้าวหอมมะลิมีความแตกต่างกับข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

สมการที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายด่าง และคุณสมบัติด้านความหนืด ได้แก่ ค่าความหนืดสูงสุด ค่าการแตกตัวของแป้งสุก ค่าความความคงตัวของแป้งสุก ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าความหนืดหลังการทำเย็นมีค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายคุณภาพทางเคมีด้วยกลุ่มตัวอย่างดังกล่าว (Standard Error of Prediction: SEP) เท่ากับ 1.51%, 1.47%, 5.66 มิลลิเมตร, 0.67, 137 RVU, 71 RVU, 245 RVU, 141 RVU และ 0.86 RVU ตามลำดับ ค่า Bias เท่ากับ -0.07%, 0.23%, 0.26 มิลลิเมตร, -0.03, -11.90 RVU, -7.15 RVU, 33.47 RVU, 0.84 RVU และ -0.11 RVU ตามลำดับ

การสร้างสมการทำนายการจำแนกกลุ่มข้าวหอมมะลิออกจากข้าวกลุ่มอื่นตามคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องนั้น พบว่าวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักนั้นสามารถจำแนกข้าวออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มข้าวหอมมะลิ ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูง ซึ่งประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก (Principal components; PCs) องค์ประกอบ 1 (PC_1) และองค์ประกอบ 2 (PC_2) สามารถอธิบายค่าความแปรปรวนทั้ง 9 ตัวแปรได้ 67.46% และ 9.83% ตามลำดับ และอธิบายค่าความแปรปรวนรวมได้ 77.29% และยังพบว่าวิธีนี้สามารถจำแนกข้าวพันธุ์กข 15 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มข้าวหอมมะลิออกจากข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ได้ เมื่อพิจารณาการสร้างสมการการทำนายการจำแนกข้าวหอมมะลิออกจากข้าวกลุ่มอื่นด้วยวิธีการจำแนกกลุ่มด้วยการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด พบว่าสมการที่เหมาะสม คือ สมการที่สร้างขึ้นจากการปรับแต่งสเปคตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานช่วงจำนวนคลื่น 10,000-4,000 cm^{-1} โดยสมการที่สร้างขึ้นมีการจัดกลุ่มตัวแปรเดิมเป็นตัวแปรใหม่ได้ 5 แฟกเตอร์ โดยมีค่า R^2_{cal}, $RMSE_{cal}$, R^2_{val}, $RMSE_{val}$ และค่าความถูกต้องของการจำแนกกลุ่ม (Correctly classified) เท่ากับ 0.79, 0.17, 0.69, 0.21 และ 66.46% ตามลำดับ

Research Title	Determination of physicochemical properties of whole brown rice grain by fourier transform-near infrared reflectance spectroscopy
Researcher	Miss Areerat Imsilp Miss Piyarat Siritunyakit
Organization	Program of Food Processing Technology, School of Culinary Arts and Rice Mill Project, The Office of Business Affairs, Suan Dusit Rajabhat University
Academic Year	2012

The aim of this research were investigated the physicochemical of brown rice such as protein content, apparent amylose content, gel consistency, alkali spreading value, and pasting properties, including applied the near infrared reflectance spectroscopy in the wavenumber ranges of 10,000-4,000 cm^{-1} for prediction these properties of whole brown rice grain with sixty samples by partial least square regression (PLSR) and developed the model for classifying Hom Mali rice from low, intermediate and high amylose rice group by principal component analysis (PCA) and partial least square-discriminant analysis (PLS-DA). The results showed that, the protein content of brown rice sample were ranged in 5.27-9.06%. The apparent amylose content and gel consistency of Hom Mali rice were significant indifferent with low amylose rice group (p>0.05) except Hom Klong Luang variety. The gel consistency of Khao Dawk Mali 105 and Pathumthani 1 variety was the highest, followed by low, intermediate and high amylose rice group, respectively. Furthermore, the alkali spreading value of Hom Mali rice was 7.00 which indifferent with the low amylose rice group and Suphanburi 2 variety which identified as intermediate amylose rice group (p>0.05) except Pitsanulok 1 variety whereas the alkali spreading value of high amylose rice group was the lowest. For the pasting properties of rice, the results showed that peak viscosity of low amylose rice group was the highest and its breakdown viscosity was significant indifferent with Hom Mali rice (p>0.05). On the other hand, the high amylose rice group exhibited the greater of final viscosity, setback viscosity and trough viscosity than intermediate, low amylose

rice group and Hom Mali rice, respectively (p<0.05). Furthermore, the setback and trough viscosity of Hom Mali rice were significantly different with low amylose rice group (p<0.05).

The developed PLSR model for predicting the protein content, apparent amylose content, gel consistency, alkali spreading value, and pasting properties including peak viscosity, breakdown viscosity, setback viscosity, final viscosity and trough viscosity provided the correlation coefficient (R) that equaled to 0.98, 090, 0.82, 0.91, 0.78, 0.92, 0.91, 0.93, and 0.93, respectively. These models gave the standard error of predicting chemical values in validation set (SEP) equaled to 1.51%, 1.47%, 5.66 mm, 0.67 (observation of the alkali spreading value), 137, 71, 245, 141, and 0.86 RVU, respectively. Additionally, these models showed the bias were -0.07%, 0.23%, 0.26 mm, -0.03 (observation of the alkali spreading value, -11.90, -7.15, 33.47, 0.84, and -0.11 RVU, respectively.

Furthermore, this research also applied the principal component analysis (PCA) and partial least square-discriminant analysis (PLS-DA) to develop the models for classifying Hom Mali rice from the other groups based on their physicochemical properties (i.e., protein content, apparent amylose content, gel consistency, alkali spreading value, and pasting properties). The results showed that, PCA could be applied to classify brown rice samples into four groups- Hom Mali rice, low, intermediate and high amylose rice groups by two principal components (PCs). The PC_1 and PC_2 could explain the nine variables for 67.46 and 9.83%, respectively and two PCs (PC_1 + PC_2) could account for 77.29%. Additionally, this result also found that RD 15 variety which was grouped as Hom Mali rice could clearly classify from Pathumthani 1 variety which identified as low amylose rice group. The best performance of PLS-DA model for classifying Hom Mali rice from the other groups were the NIR spectra was pretreated by the standard normal variate (SNV) in the wavenumber ranges 10,000-4,000 cm^{-1}. This model exhibited the five factors which had the R^2_{cal}, $RMSE_{cal}$, R^2_{val}, $RMSE_{val}$, and correctly correctly classification of 0.79, 0.17, 0.69, 0.21, and 66.46%, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต ที่ให้การสนับสนุนด้านเงินทุนวิจัยให้สำเร็จลุล่วงอย่างดี ตลอดจนแก้ไขและตรวจสอบ จนงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จเป็นรูปเล่มอย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และพนักงานของบริษัท โรงสีข้าวสวนดุสิต จำกัด ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณศูนย์วิจัยข้าว สถานีทดลองข้าว และศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวต่าง ๆ สำหรับความอนุเคราะห์ตัวอย่างข้าวเปลือกแก่คณะวิจัยจนเสร็จสิ้นการวิจัย

คุณค่าแห่งงานวิจัยที่พึงมี คณะวิจัยขอมอบแด่บิดา มารดา รวมถึงครูอาจารย์ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะวิจัยขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย		(ค)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		(จ)
กิตติกรรมประกาศ		(ช)
สารบัญ		(ซ)
สารบัญตาราง		(ฎ)
สารบัญภาพ		(ฐ)
บทที่ 1	**บทนำ**	1
	ความเป็นมาและความสำคัญ	1
	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
	ขอบเขตการวิจัย	4
	นิยามศัพท์	4
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2	**แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	6
	คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว	6
	ความสำคัญของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพต่อคุณภาพข้าว	15
	วิธีการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว	20
	เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้	33
	การแบ่งกลุ่มข้าว	60
บทที่ 3	**วิธีดำเนินการวิจัย**	65
	วัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์	65
	วิธีดำเนินการวิจัย	67

หน้า

บทที่ 4	**ผลการวิจัย**	74
	การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้อง	74
	การวัดค่าการดูดกลืนแสงของข้าวกล้องขนาดเต็มเมล็ดด้วยเครื่องสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้	82
	การสร้างสมการที่เหมาะสมในการทำนายค่าคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องขนาดเต็มเมล็ด	88
	การสร้างสมการทำนายสำหรับแบ่งกลุ่มข้าวตามค่าคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องขนาดเต็มเมล็ด	102
บทที่ 5	**สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ**	114
	สรุปผลการวิจัย	114
	ข้อเสนอแนะ	117
รายการอ้างอิง		118
ภาคผนวก		135
	ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสด้วยวิธี AACC (1999)	136
	ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี AACC (2000a)	140
	ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ค่าความคงตัวของเจลตามวิธีของ Cagampang, Perez & Juliano (1973)	142
	ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ค่าการสลายเมล็ดข้าวในด่างตามวิธีของ Little, Hilder & Dawan (1958)	145
	ภาคผนวก จ การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็วด้วยวิธี AACC (2000b)	149
	ภาคผนวก ฉ การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นด้วยวิธี AACC (2000c)	152

หน้า

ภาคผนวก ช การสร้างสมการทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องที่จำนวนคลื่นและวิธีการปรับแต่งสเปคตรัมที่แตกต่างกัน 154

ประวัติผู้วิจัย 158

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติทางโครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลส	7
2.2	คุณสมบัติทางโครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกติน	8
2.3	การจำแนกข้าวตามปริมาณแอมิโลส	9
2.4	การแบ่งประเภทข้าวตามความคงตัวของเจล	10
2.5	การแบ่งประเภทข้าวตามลักษณะการสลายตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายด่าง	13
2.6	การจัดแบ่งข้าวพันธุ์ดีตามคุณภาพข้าวสุก	17
2.7	การแบ่งชนิดข้าวตามอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันและการประเมินด้วยค่าการสลายเมล็ดข้าวในด่างที่สัมพันธ์กับระยะเวลาหุงต้มข้าวสุก	19
2.8	ค่าแฟกเตอร์ในอาหารแต่ละผลิตภัณฑ์	24
2.9	เปรียบเทียบผลการหาค่าปริมาณโปรตีนในอาหารด้วยวิธีดูมาสและวิธีเจลดาห์ล	24
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างแถบในสเปคตรัมอินฟราเรดย่านใกล้กับหมู่ฟังก์ชัน	35
2.11	รายงานการวิจัยการใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการตรวจสอบคุณภาพข้าว	47
2.12	รายงานการวิจัยการใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการแบ่งกลุ่มข้าว	63
3.1	ตัวอย่างข้าวที่เก็บรวบรวมสำหรับใช้ในการทดลอง	65
3.2	การกำหนดตัวแปรหุ่นของข้าวกล้องหอมมะลิและข้าวกล้องกลุ่มอื่นที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิ	72
4.1	ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายเมล็ดข้าวในด่างของตัวอย่างข้าวกล้อง	77
4.2	คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวกล้อง	79
4.3	สรุปสมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องขนาดเต็มเมล็ดด้วยวิธี PLSR	91

ตารางที่ **หน้า**

4.4	สรุปสมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวกล้องขนาดเต็มเมล็ดด้วยวิธี PLSR	97
4.5	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการจำแนกองค์ประกอบหลัก	103
4.6	ค่าสถิติการจำแนกข้าวกล้องหอมมะลิออกจากข้าวกล้องกลุ่มอื่นด้วยวิธีการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มด้วยการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด	110

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลส	8
2.2	โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกติน	9
2.3	ลักษณะความคงตัวของเจลจากแป้งข้าว (ก) เจลแข็ง (ข) เจลนุ่มปานกลาง และ (ค) เจลแข็ง	11
2.4	การตรวจสอบข้าวชนิดอื่นปนโดยวิธีการสลายเมล็ดข้าวในด่าง	18
2.5	โครงสร้างของกรดอะมิโน	21
2.6	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบการวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธีดูมาส (Dumas combustion)	23
2.7	ลักษณะการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ไอโอดีน (ก) และการจับกับสารละลายไอโอดีนของโมเลกุลดี-กลูโคส (ข)	25
2.8	ลักษณะกราฟของความหนืดเมื่อวัดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์วิสโคแอมิโลกราฟ	31
2.9	ลักษณะกราฟของความหนืดเมื่อวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว	33
4.1	ลักษณะความหนืดของน้ำแป้งข้าวพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว	80
4.2	ลักษณะของสเปคตรัมเริ่มต้น (Original spectrum) ของข้าวกล้องขนาดเต็มเมล็ดกลุ่มข้าวหอมมะลิ ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสสูงที่ได้จากการวัดค่าด้วยเครื่องสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในช่วงจำนวนคลื่น 10,000-4,000 cm^{-1}	83
4.3	สเปคตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง	85
4.4	สเปคตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ	85
4.5	สเปคตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน	86
4.6	สเปคตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณร่วมกับวิธีแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง	86

ภาพที่ **หน้า**

4.7 สเปคตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับวิธีแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง 87

4.8 การเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ (Calibration set) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (Validation set) 89

4.9 การเปรียบเทียบปริมาณแอมิโลสระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ (Calibration set) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (Validation set) 92

4.10 การเปรียบเทียบค่าความคงตัวของเจลระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ (Calibration set) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (Validation set) 94

4.11 การเปรียบเทียบค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายด่างระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ (Calibration set) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (Validation set) 95

4.12 การเปรียบเทียบค่าความหนืดสูงสุดระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ (Calibration set) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (Validation set) 98

4.13 การเปรียบเทียบค่าการแตกตัวของแป้งสุกระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ (Calibration set) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (Validation set) 98

ภาพที่ **หน้า**

4.14 การเปรียบเทียบค่าความคงตัวของแป้งสุกระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ (Calibration set) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (Validation set) 99

4.15 การเปรียบเทียบค่าความหนืดสุดท้ายระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ (Calibration set) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (Validation set) 100

4.16 การเปรียบเทียบค่าความหนืดหลังการทำเย็นระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ (Calibration set) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (Validation set) 101

4.17 ค่าคะแนนปัจจัยองค์ประกอบ 1 (PC_1) และองค์ประกอบ 2 (PC_2) คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องขนาดเต็มเมล็ด 104

4.18 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปคตรัมข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการปรับแต่งสเปคตรัม 106

4.19 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปคตรัมข้าวกล้องที่ปรับแต่งสเปคตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ 106

4.20 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปคตรัมข้าวกล้องที่ปรับแต่งสเปคตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน 107

4.21 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปคตรัมข้าวกล้องที่ปรับแต่งสเปคตรัมด้วยวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง 107

4.22 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปคตรัมข้าวกล้องที่ปรับแต่งสเปคตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง 108

ภาพที่ **หน้า**

4.23 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปคตรัมข้าวกล้องที่ปรับแต่งสเปคตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีการอนุพันธ์อันดับที่สอง 108

4.24 การแบ่งกลุ่มข้าวกล้องหอมมะลิออกจากข้าวกล้องกลุ่มอื่นด้วยวิธี PLS-DA จากสเปคตรัมที่ไม่มีการปรับแต่งสเปคตรัม 111

4.25 การแบ่งกลุ่มข้าวกล้องหอมมะลิออกจากข้าวกล้องกลุ่มอื่นด้วยวิธี PLS-DA จากสเปคตรัมที่ปรับแต่งด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ 111

4.26 การแบ่งกลุ่มข้าวกล้องหอมมะลิออกจากข้าวกล้องกลุ่มอื่นด้วยวิธี PLS-DA จากสเปคตรัมที่ปรับแต่งด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน 112

4.27 การแบ่งกลุ่มข้าวกล้องหอมมะลิออกจากข้าวกล้องกลุ่มอื่นด้วยวิธี PLS-DA จากสเปคตรัมที่ปรับแต่งด้วยวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง 112

4.28 การแบ่งกลุ่มข้าวกล้องหอมมะลิออกจากข้าวกล้องกลุ่มอื่นด้วยวิธี PLS-DA จากสเปคตรัมที่ปรับแต่งด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง 113

4.29 การแบ่งกลุ่มข้าวกล้องหอมมะลิออกจากข้าวกล้องกลุ่มอื่นด้วยวิธี PLS-DA จากสเปคตรัมที่ปรับแต่งด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง 113