ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
191087

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารและการปลอมปน ข้าวหอมมะลิไทยโดยใช้เทคนิค FT-NIR สเปคโตรสโคปี

Determination of physicochemical properties of milled rice and adulteration of Thai Hom Mali rice by FT-NIR spectroscopy

นางสาววริพัสย์ อารีกุล
นางสาวอารีรัตน์ อิ่มศิลป์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2551
คณะอุตสาหกรรมเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
191087

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารและการปลอมปน ข้าวหอมมะลิไทยโดยใช้เทคนิค FT-NIR สเปคโตรสโคปี

Determination of physicochemical properties of milled rice and adulteration of Thai Hom Mali rice by FT-NIR spectroscopy

นางสาววริพัสย์ อารีกุล
นางสาวอารีรัตน์ อิ่มศิลป์

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2551
คณะอุตสาหกรรมเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ	(ภาษาไทย)	การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารและการปลอมปนข้าวหอมมะลิไทยโดยใช้เทคนิค FT-NIR สเปคโตรสโคปี
แหล่งเงิน		
ประจำปีงบประมาณ	2551	จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 408,900 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย	2	ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2553
หัวหน้าโครงการวิจัย		ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วริพัสย์ อารีกุล

สาขาวิชาเทคโนโลยีการหมัก คณะอุตสาหกรรมเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เขตลาดกระบัง กรุงเทพ ฯ 10520
โทรศัพท์ 0-2329-8526-7 ต่อ 7271 อีเมล์ : kavaripa@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

191087

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่าง และคุณสมบัติด้านความหนืด รวมถึงประยุกต์ใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้มาทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของตัวอย่างข้าวสารดังกล่าว ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial least square regression; PLSR) และสร้างสมการสำหรับการทำนายการปลอมปนข้าวหอมมะลิด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis; PCA) ช่วงจำนวนคลื่น 10,000-4,000 cm^{-1} ผลการทดลองพบว่าปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลาดย่างไม่สามารถนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ได้ แต่คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งโดยเฉพาะค่าความหนืดสูงสุดสามารถนำมาตรวจสอบได้เมื่อมีข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ผสม 80-90% และค่าการแตกตัวของแป้งสุก ค่าความคงตัวของแป้งสุก ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าความหนืดหลังการทำเย็นสามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวหอมมะลิได้เมื่อมีข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ผสมตั้งแต่ 55, 45, 20 และ 45% ตามลำดับ

สำหรับการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 นั้น พบว่าค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่างนั้นให้ผลการตรวจสอบที่แม่นยำมากที่สุด ในขณะที่ปริมาณแอมิโลส ค่าการแตกตัวของแป้งสุกสามารถนำมาใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้เช่นเดียวกัน โดยปริมาณแอมิโลส และค่าความคงตัวของเจลสามารถนำมาใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้เมื่อมีปริมาณข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมตั้งแต่ 15% ขึ้นไป

191087

และ 25% อย่างไรก็ตามผลการวิจัยครั้งนี้พบว่าปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวไม่สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 นอกจากนี้ยังพบว่าคุณสมบัติด้านความหนืดสามารถนำมาใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้เช่นเดียวกัน โดยค่าความหนืดสูงสุดสามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เมื่อมีข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมตั้งแต่ 15% ขึ้นไป ในขณะที่ค่าความคงตัวของแป้งสุก ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าความหนืดหลังการทำเย็น สามารถตรวจสอบการปลอมปนของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้ เมื่อมีข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมตั้งแต่ 10% ขึ้นไป อย่างไรก็ตามผลการวิจัยนี้พบว่าค่าการแตกตัวของแป้งสุกสามารถตรวจสอบการปลอมปนของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้เมื่อมีข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมเพียง 5% เท่านั้น

สมการที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของตัวอย่างข้าวด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายด่าง มีค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์ของกลุ่มทำนายความแม่นยำของสมการ (r^2_{val}) เท่ากับ 0.87, 0.88, 0.88 และ 0.86 ตามลำดับ และค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายคุณภาพทางด้านเคมีด้วยกลุ่มตัวอย่างดังกล่าว (Root mean square standard error of prediction; RMSEP) เท่ากับ 1.64, 1.14, 3.20 และ 0.52 ตามลำดับ สำหรับคุณสมบัติด้านความหนืด ได้แก่ ค่าความหนืดสูงสุด ค่าการแตกตัวของแป้งสุก ค่าความคงตัวของแป้งสุก ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าความหนืดหลังการทำเย็น สมการทำนายมีความแม่นยำต่ำ สำหรับการสร้างสมการทำนายการปลอมปนข้าวหอมมะลิ พบว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักสามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 และข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสเปคตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง และวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับวิธีวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สองมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105% จากข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ช่วงจำนวนคลื่น 10,000-4,000 cm^{-1} สำหรับการตรวจสอบการปลอมปนข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 นั้นจะพบว่าเทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้สามารถตรวจสอบได้อย่างแม่นยำเมื่อใช้ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

คำสำคัญ : คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ข้าวหอมมะลิ เทคนิคสเปคโตรสโคปี

Research Title: Determination of physicochemical properties of milled rice and adulteration of Thai Hom Mali rice by FT-NIR spectroscopy

Researcher: Ms.Varipat Areekul and Ms. Areerat Imsil

Faculty: Agro-Industry

Department: -

ABSTRACT

191087

The aims of this research were investigated the physicochemical properties of pure Kao Dawk Mali 105 (KDML105) 100%, pure Pathum Thani 1 (PTT1) 100%, pure Chai Nat 1 (CNT1) 100%, and KDML105 blended with PTT1 or CNT1 in different ratios of blending. Their physicochemical properties were protein content, apparent amylose content, gel consistency, alkali spreading value, and pasting properties. In addition, the near infrared reflectance spectroscopy (NIR) in the wavenumber ranged of 10,000-4,000 cm^{-1} was applied in order to predict these properties of rice samples by partial least square regression (PLSR). Later, the model for classifying the adulteration Hom Mali rice blended KDML105 with PTT1 or CNT1 in different ratios of blending were developed by using principal component analysis (PCA). The results showed that, the protein content, apparent amylose content, gel consistency, and alkali spreading value could not be used as the major parameters for indicating the adulteration of KDML105 and PTT1 or KDML105 and CNT1 varieties. However, the pasting properties especially, peak viscosity could be indicated the adulteration of KDML105 blended with PTT1 at 80-90%. Furthermore, breakdown viscosity, setback viscosity, final viscosity and trough viscosity also could be identified the adulteration of KDML105 blending with PTT1 at 55, 45, 20, and 45%, respectively.

For the adulteration of KDML105 blending with CNT1, the alkali spreading value showed the highest accuracy for differentiating this adulteration. The apparent amylose content and pasting properties could also identify the adulteration of KDML105. The apparent amylose content and gel consistency value could be used to differentiate the adulteration of KDML105 blending with from CNT1 higher than 15% and 25%, respectively. In contrast to the protein content, it was unable to differentiate this adulteration. Furthermore, the pasting properties could be used for adulterating KDML105. The blending of KDML105 with CNT1 were more than 15% could be

191087

adulterated from KDML105 on the basis of peak viscosity whereas the setback viscosity, final viscosity, and trough viscosity could be used for adulterating KDML105 from rice samples that CNT1 blended with KDML105 more than 10%. However, these results presented that the breakdown viscosity was able to adulterate KDML105 from CNT1 that blended with KDML105 of 5%.

The developed PLSR models for predicting the protein content, apparent amylose content, gel consistency, and gel consistency value provided the correlation coefficient of prediction group (r^2_{val}) of 0.87, 0.88, 0.88, and 0.86, respectively and the root mean square standard error of prediction (RMSEP) equaled to 1.64, 1.14, 3.20, and 0.52, respectively. The PLSR model of pasting properties, including peak viscosity, breakdown viscosity, setback viscosity, final viscosity and trough viscosity were not good for predicting these properties due to their low accuracy. Furthermore, this research also applied the principal component analysis (PCA) to develop the models for categorizing the adulteration of Hom Mali rice blending with PTT1 or CNT1 varieties. The results showed that, NIR spectroscopy accompanied with PCA could be applied to differentiate these adulteration. The NIR spectra, pretreated by the multiplicative scatter correction (MSC) + second derivative and the standard normal variate (SNV) + second derivative in the wavelength ranges of 10,000-4,000 cm^{-1} was the best performance of PCA model for predicting the adulteration of KDML105 blending with PTT1. Additionally, NIR spectroscopy incorporated with PCA technique could differentiate the adulteration of KDML105 blending with CNT1.

Keywords: Physicochemical properties, Hom Mali rice, Spectroscopy

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ 2551-2552 ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณศูนย์วิจัยข้าว และศูนย์เมล็ดข้าว สำหรับความอนุเคราะห์ตัวอย่างข้าวเปลือกแก่ผู้วิจัยจนเสร็จสิ้นการวิจัย

คุณค่าแห่งงานวิจัยที่พึงมี คณะวิจัยขอมอบแด่บิดา มารดา รวมถึงครูอาจารย์ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะวิจัยขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

วริพัสย์ อารีกุล
อารีรัตน์ อิ่มศิลป์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ III

กิตติกรรมประกาศ V

สารบัญ VI

สารบัญตาราง VIII

สารบัญภาพ X

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 2

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.6 นิยามคำศัพท์เฉพาะ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 คุณภาพข้าว 5

2.2 วิธีการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว 12

2.3 เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ 20

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 49

3.1 วัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์ 49

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย 50

บทที่ 4 ผลการวิจัย 55

4.1 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสาร 55

4.2 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 62

4.3 การวัดค่าการดูดกลืนแสงของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ 76

4.4 การสร้างสมการที่เหมาะสมในการทำนายค่าคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ด 78

4.5 การสร้างสมการทำนายสำหรับตรวจสอบการปลอมปนข้าวขาวดอกมะลิ 105จากข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก 90

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 97

5.1 สรุปผลการวิจัย 97

5.2 ข้อเสนอแนะ 98

บรรณานุกรม 99

ภาคผนวก 109

ภาคผนวก ก 110

ภาคผนวก ข 114

ภาคผนวก ค 116

ภาคผนวก ง 118

ภาคผนวก จ 122

ภาคผนวก ฉ 125

ภาคผนวก ช 127

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 องค์ประกอบของข้าวที่มีประสิทธิภาพการสีดี 7
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าว 7
2.3 การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณแอมิโลส 9
2.4 การแบ่งประเภทข้าวตามระดับอุณหภูมิแป้งสุก 9
2.5 การแบ่งประเภทข้าวตามความคงตัวของแป้งสุก 10
2.6 การแบ่งประเภทข้าวตามลักษณะการสลายตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายด่าง 11
2.7 ค่าแฟกเตอร์ในอาหารแต่ละผลิตภัณฑ์ 14
2.8 เปรียบเทียบค่าปริมาณโปรตีนในอาหารด้วยวิธีดูมาสและวิธีคเจลดาห์ล 15
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแถบในสเปคตรัมอินฟราเรดย่านใกล้กับหมู่ฟังก์ชัน 22
2.10 รายงานวิจัยการใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการตรวจสอบคุณภาพข้าว 32
2.11 รายงานการวิจัยการใช้เทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการแบ่งกลุ่มข้าว 47
3.1 ตัวอย่างข้าวที่เก็บรวบรวมสำหรับใช้ในการทดลอง 49
3.2 การแปรผันอัตราส่วนของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และพันธุ์ชัยนาท 1 ที่นำมาผสมข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 51
4.1 ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่างของตัวอย่างข้าวสาร 58
4.2 คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวสาร 60
4.3 ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่างของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน 63
4.4 คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน 67
4.5 ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่างของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน 70
4.6 คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน 75
4.7 สรุปสมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่างของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดด้วยวิธี PLSR 81
4.8 สรุปสมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดด้วยวิธี PLSR 86

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ผนวกที่ 1 อัตราส่วนความเข้มข้นของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน 112

ผนวกที่ 2 ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.7% 121

ผนวกที่ 3 สรุปการสร้างสมการทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารที่
จำนวนคลื่นและวิธีการปรับแต่งสเปคตรัมที่แตกต่างกัน 128

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

2.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบการวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธีดูมาส 14

2.2 ลักษณะการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ไอโอดีน (ก) และการจับกับสารละลายไอโอดีนของโมเลกุลดี-กลูโคส 16

2.3 ลักษณะกราฟของความหนืดเมื่อวัดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์วิสโคแอมิโลกราฟ 19

2.4 ลักษณะกราฟของความหนืดเมื่อวัดด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว 20

4.1 ลักษณะความหนืดของน้ำแป้งของข้าวพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว 61

4.2 ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่างของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) และข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 (ข) เมื่อแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.7% นาน 23 ชั่วโมง 65

4.3 ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่างของข้าวขาวดอกมะลิ 105 100% (ก) ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 95:5 (ข), 90:10 (ค), 85:15 (ง), 80:20 (จ), 75:25 (ฉ), 70:30 (ช), 65:35 (ซ). 60:40 (ฌ), 55:45 (ญ), 50:50 (ฎ), 45:55 (ฏ), 40:60 (ฐ), 35:65 (ฑ), 30:70 (ฒ), 25:75 (ณ), 20:80 (ด), 15:85 (ต), 10:90 (ถ), 5:95 (ท) และข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 100% (ธ) 72

4.4 ลักษณะของสเปคตรัมเริ่มต้น (Original spectrum) ของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดกลุ่มข้าวหอมมะลิ ข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำ ข้าวปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวปริมาณแอมิโลสสูง ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ช่วงความยาวคลื่น 10,000-4,000 cm^{-1} 76

4.5 สเปคตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง 77

4.6 การเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการ (สีน้ำเงิน) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (สีแดง) 79

4.7 การเปรียบเทียบปริมาณแอมิโลสระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการ (สีน้ำเงิน) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (สีแดง) 82

4.8 การเปรียบเทียบค่าความคงตัวของเจลระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการ (สีน้ำเงิน) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (สีแดง) 83

4.9 การกระจายค่าทางเคมีแบบไม่เป็นปกติของค่าความคงตัวของเจล 83

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.10 การเปรียบเทียบค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายด่างระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการ (สีน้ำเงิน) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (สีแดง) ... 84

4.11 การเปรียบเทียบค่าความหนืดนสูงสุดระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการ (สีน้ำเงิน) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (สีแดง) ... 85

4.12 การเปรียบเทียบค่าการแตกตัวของแป้งสุกระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการ (สีน้ำเงิน) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (สีแดง) ... 87

4.13 การเปรียบเทียบค่าความคงตัวของแป้งสุกระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการ (สีน้ำเงิน) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (สีแดง) ... 88

4.14 การเปรียบเทียบค่าความหนืดสุดท้ายระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการ (สีน้ำเงิน) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (สีแดง) ... 89

4.15 การเปรียบเทียบค่าความหนืดหลังการทำเย็นระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการ (สีน้ำเงิน) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (สีแดง) ... 89

4.16 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปคตรัมเริ่มต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ... 91

4.17 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปคตรัมเริ่มต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปคตรัมด้วยวิธีแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธุ์อันดับที่สอง ... 92

4.18 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปคตรัมเริ่มต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปคตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ ... 93

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.19 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปคตรัมเริ่มต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปคตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน 94

4.20 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปคตรัมเริ่มต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปคตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง 95

4.21 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปคตรัมเริ่มต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปคตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง 96

ผนวกที่ 1 กราฟความเข้มข้นของแอมิโลสมาตรฐาน 113

ผนวกที่ 2 ความคงตัวของเจลแป้งข้าว (ก) เจลแข็ง (ข) เจลนุ่มปานกลาง และ(ค) เจลนุ่ม 117

ผนวกที่ 3 กราฟ RVA ที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของน้ำแป้งของข้าวสาร 123