



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารและการปลอมปนข้าวหอม
มะลิไทยด้วยเทคนิค FT-NIR สเปกโตรสโกปี

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

นางสาววิพัทธ์ อารีกุล
นางสาวอารีรัตน์ อิมศิลป์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2551

คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารและการปลอมปนข้าวหอม
มะลิไทยด้วยเทคนิค FT-NIR สเปกโตรสโกปี

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

นางสาววิพัทธ์ อารีกุล
นางสาวอารีรัตน์ อิมศิลป์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2551

คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารและการปลอมปน
ข้าวหอมมะลิไทยด้วยเทคนิค FT-NIR สเปกโตรสโคปี

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2551 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 408,900 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 2 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2551 ถึง กันยายน 2553

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นางสาววิรัชย์ อารีกุล คณะอุตสาหกรรมเกษตร (หัวหน้าโครงการ)

นางสาวอารีรัตน์ อิมศิลป์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร (ผู้ร่วมโครงการวิจัย)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ (ข้าวขาวดอกมะลิ 105) 100% ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวปทุมธานี 1 และข้าวชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่ตรวจสอบ ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง และคุณสมบัติด้านความหนืด นอกจากนี้ยังนำเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ที่ความยาวคลื่นระหว่าง $10,000-4,000\text{ cm}^{-1}$ มาประยุกต์ใช้ในการทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของตัวอย่างข้าวสาร ด้วยวิธี Partial least square regression (PLSR) จากนั้นยังสร้างแบบจำลองในการทำนายการปลอมปนข้าวขาวดอกมะลิ 105 กับข้าวปทุมธานี 1 หรือ ข้าวชัยนาท 1 ด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis; PCA) ผลการทดลองพบว่าปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสาร ไม่สามารถนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์หลักในการบ่งชี้การปลอมปนข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 หรือ ข้าวชัยนาท 1 ได้ แต่คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งโดยเฉพาะค่าความหนืดสูงสุดสามารถใช้ตรวจสอบการปลอมปนของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับ 80-90% ข้าวปทุมธานี 1 นอกจากนี้ ค่าการแตกตัวของแป้งสุก ค่าความคงตัวของแป้งสุก ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าความหนืดหลังการทำให้เย็น สามารถใช้บ่งชี้การปลอมปนข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมข้าวปทุมธานี 1 ที่ระดับ 55, 45, 20 และ 45% ตามลำดับ

ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างเป็นวิธีที่มีความแม่นยำมากที่สุดสำหรับการตรวจสอบการปลอมปนข้าวขาวดอกมะลิ 105 กับข้าวชัยนาท 1 ในขณะที่ปริมาณแอมิโลส ค่าการแตกตัวของแป้งสุกสามารถใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวขาวดอกมะลิ 105 ได้เช่นเดียวกัน โดยปริมาณแอมิโลส และค่าความคงตัวของเจลสามารถใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมข้าวชัยนาท 1 สูงกว่า 25% ขึ้นไป ซึ่งมีค่า $<17.23 \pm 0.20$ และ $>72.56 \pm 2.30$ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวไม่สามารถใช้ตรวจสอบการปลอมปนนี้ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าคุณสมบัติด้านความหนืดบาง

ประการที่สามารถนำมาใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวขาวดอกมะลิ 105 ได้แก่ ค่าความหนืดสุดท้าย เพียงค่าเดียว ซึ่งสามารถตรวจสอบการปลอมปนของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ได้ เมื่อมีข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมตั้งแต่ 20% ขึ้นไป โดยมีค่ามากกว่า 1822 ± 11 อย่างไรก็ตามผลการวิจัยนี้พบว่า ค่าความหนืดสูงสุด ค่าการแตกตัวของแป้งสุก ค่าความคงตัวของแป้งสุก และค่าความหนืดหลังการทำเย็น ไม่สามารถตรวจสอบการปลอมปนของข้าวขาวดอกมะลิ 105 เมื่อมีข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ได้

แบบจำลองการ PLSR สำหรับทำนายปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มทำนายความแม่นยำของสมการ (r^2_{val}) เท่ากับ 0.87, 0.88, 0.88 และ 0.86 ตามลำดับ และมีค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (Root mean square standard error of prediction; RMSEP) เท่ากับ 1.64, 1.14, 3.20 และ 0.52 ตามลำดับ สำหรับแบบจำลองการ PLSR สำหรับคุณสมบัติด้านความหนืด ได้แก่ ค่าความหนืดสูงสุด ค่าการแตกตัวของแป้งสุก ค่าความคงตัวของแป้งสุก ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าความหนืดหลังการทำเย็น มีความแม่นยำต่ำจึงไม่เหมาะสมกับการทำนายการปลอมปนข้าวขาวดอกมะลิ 105 อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) สามารถจำแนกการปลอมปนข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 หรือ ชัยนาท 1 สเปกตรัม NIR ที่ผ่านการปรับแต่งด้วย multiple scatter correction (MSC) ร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง (second derivative) และวิธี standard normal variance (SNV) และอนุพันธ์อันดับที่สองในช่วงจำนวนคลื่น $10,000-4,000 \text{ cm}^{-1}$ มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับแบบจำลอง PCA ในการตรวจสอบการปลอมปนข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวปทุมธานี 1 นอกจากนี้ สเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ร่วมกับเทคนิค PCA สามารถใช้ในการตรวจสอบการปลอมปนข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวปทุมธานี 1

คำสำคัญ : คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เทคนิคสเปกโตรสโกปี

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

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

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 คณะวิจัยขอบแต่บิดา มารดา รวมถึงครูอาจารย์ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะวิจัยขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

วริพัทธ์ อารีกุล
อารีรัตน์ อิมศิลป์

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 เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้..... | 20 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 49 |
| 3.1 วัตถุประสงค์ สารเคมี และอุปกรณ์..... | 49 |
| 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 50 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัย..... | 55 |
| 4.1 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสาร..... | 55 |
| 4.2 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และข้าวพันธุ์ชัยนาท 1..... | 62 |
| 4.3 การวัดค่าการดูดกลืนแสงของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้..... | 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 การแบ่งประเภทข้าวตามลักษณะการสลายตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง..... | 11 |
| 2.7 ค่าแฟกเตอร์ในอาหารแต่ละผลิตภัณฑ์..... | 14 |
| 2.8 เปรียบเทียบค่าปริมาณโปรตีนในอาหารด้วยวิธีดูมาสและวิธีคเจลดาห์ล..... | 15 |
| 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแถบในสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้กับหมู่ฟังก์ชัน..... | 22 |
| 2.10 รายงานวิจัยการใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการตรวจสอบคุณภาพข้าว..... | 32 |
| 2.11 รายงานการวิจัยการใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการแบ่งกลุ่มข้าว..... | 47 |
| 3.1 ตัวอย่างข้าวที่เก็บรวบรวมสำหรับใช้ในการทดลอง..... | 49 |
| 3.2 การแปรผันอัตราส่วนของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และพันธุ์ชัยนาท 1 ที่นำมาผสมข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105..... | 51 |
| 4.1 ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของตัวอย่างข้าวสาร | 58 |
| 4.2 คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวสาร | 60 |
| 4.3 ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน..... | 63 |
| 4.4 คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน..... | 67 |
| 4.5 ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน..... | 70 |
| 4.6 คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน..... | 75 |
| 4.7 สรุปสมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดด้วยวิธี PLSR..... | 81 |
| 4.8 สรุปสมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดด้วยวิธี PLSR..... | 86 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| หมวดที่ 1 อัตราส่วนความเข้มข้นของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน..... | 112 |
| หมวดที่ 2 ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.7% | 121 |
| หมวดที่ 3 สรุปการสร้างสมการทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารที่ จำนวนคลื่นและวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมที่แตกต่างกัน..... | 128 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในระบบการวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธีดูมาส..... | 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 ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) และข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 (ข) เมื่อแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.7% นาน 23 ชั่วโมง..... | 65 |
| 4.3 ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวขาวดอกมะลิ 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 ลักษณะของสเปกตรัมเริ่มต้น (Original spectrum) ของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดกลุ่มข้าวหอมมะลิ ข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำ ข้าวปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวปริมาณแอมิโลสสูงที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ช่วงความยาวคลื่น 10,000-4,000 cm^{-1} | 76 |
| 4.5 สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง..... | 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 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.10 การเปรียบเทียบค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการ (สีน้ำเงิน) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (สีแดง)..... | 84 |
| 4.11 การเปรียบเทียบค่าความหนืดสูงสุดระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (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 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมเริ่มต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน | 91 |
| 4.17 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมเริ่มต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง | 92 |
| 4.18 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมเริ่มต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ | 93 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.19 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมเริ่มต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน | 94 |
| 4.20 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมเริ่มต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง | 95 |
| 4.21 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมเริ่มต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง | 96 |
| ผนวกที่ 1 กราฟความเข้มข้นของแอมิโลสมาตรฐาน | 113 |
| ผนวกที่ 2 ความคงตัวของเจลแป้งข้าว (ก) เจลแข็ง (ข) เจลนุ่มปานกลาง และ(ค) เจลนุ่ม | 117 |
| ผนวกที่ 3 กราฟ RVA ที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของน้ำแป้งของข้าวสาร | 123 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าว (*Oryza sativa*, L.) เป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญของประเทศไทย ปริมาณการส่งออกข้าวปี พ.ศ. 2553 เท่ากับ 8,328,468 ตันข้าวสาร คิดเป็นมูลค่า 168,193 ล้านบาท ประเทศไทยจึงเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกข้าวเป็นอันดับต้นของโลก โดยเฉพาะการเพิ่มขึ้นของปริมาณและมูลค่าของข้าวหอมมะลิ (Hom Mali rice) (กรมการค้าภายใน, 2553) ในการส่งออกข้าวของไทยมาตรฐานการส่งออกข้าวมักพิจารณาเกรดข้าวเป็นเกณฑ์ ซึ่งมีมาตรฐานกำหนดคุณภาพข้าวสารทางกายภาพของข้าวและจำนวนสิ่งเจือปนที่ติดมาเท่านั้น ได้แก่ รูปร่างของเมล็ดข้าว ความยาวของเมล็ดข้าว ความขาวของเมล็ดข้าว สัดส่วนปริมาณข้าวหัก ปริมาณสิ่งเจือปน ข้าวเหนียว ข้าวเมล็ดเหลือง เป็นต้น (กรมการค้าภายใน, 2543) ดังนั้น ข้าวสารที่บรรจุอยู่ในกระสอบเดียวกันจึงอาจประกอบด้วยข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ผสมกัน ถึงแม้ว่าข้าวนั้นจะมีลักษณะตรงกับมาตรฐานข้าวสารที่กำหนดไว้ แต่ข้าวที่มาจากพันธุ์ต่างกันจะมีคุณภาพแตกต่างกัน ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพข้าว ได้แก่ คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว (Physicochemical properties) เช่น ปริมาณแอมิโลส (Apparent amylose content) ปริมาณโปรตีน ค่าความคงตัวของเจล (Gel consistency) อุณหภูมิแป้งสุก (Gelatinization temperature) การสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง (Alkali spreading value) และคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าว (Pasting properties) เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีผลต่อคุณภาพการหุงต้มและรับประทาน (Cooking and eating quality) ลักษณะเนื้อสัมผัส (Cooked rice texture) การยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ รวมถึงการนำข้าวมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารอีกด้วย (งามชื่น คงเสรี, 2547, หน้า 27; Juliano, 1985, p. 443-524)

การตรวจสอบคุณภาพข้าวส่วนใหญ่จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ร่วมกับการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ซึ่งการศึกษาคุณสมบัติเคมีกายภาพของข้าวนั้นส่วนใหญ่จะใช้วิธีทางเคมี (Chemical method) เช่น การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสจะใช้หลักการการเกิดสีของสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-แอมิโลเพกทิน (Amylose-iodine complex) การหาปริมาณโปรตีน ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง และคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าว ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้ต้องใช้เวลาทดสอบนานกว่าจะทราบผลการทดลอง นอกจากนี้การใช้สารเคมีในการวิเคราะห์ ทำให้สิ้นเปลืองและทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงต้องอาศัยความเชี่ยวชาญของนักวิจัย ซึ่งอาจนำไปสู่ความผิดพลาดของการทดลองได้ (Bao, Cai & Corke, 2001, pp. 936-939)

การประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared spectroscopy; NIR spectroscopy) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีการสั่นแบบโอเวอร์โทน (Overtone vibration) และการสั่นแบบรวม (Combination vibration) ของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H) ออกซิเจน-ไฮโดรเจน (O-H) และไนโตรเจน-ไฮโดรเจน (N-H) ในโมเลกุลที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดขององค์ประกอบต่าง ๆ

ร่วมกับวิธีทางเคมีเมตริกซ์ (Chemometrics) เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมและยอมรับในการตรวจสอบคุณภาพข้าวทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพ เนื่องจากการวิเคราะห์ที่ไม่ทำลายตัวอย่าง รวดเร็ว และลดการใช้สารเคมี (Delwiche *et al.*, 1995. pp. 182-187 ; Shimizu *et al.*, 2001, pp. 104-109; Workmand & Weyer, 2008, p. 1-2; ธงชัย สุวรรณลิขันธ์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช. 2552, หน้า 6-2 ถึง 6-33) อาทิเช่น การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส ปริมาณโปรตีน (Delwiche *et al.*, 1995; pp. 182-187; Delwiche *et al.*, 1996, pp. 257-263) ไชมัน (Wang *et al.*, 2006, pp. 402-406) ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง และค่าความหนืดของข้าว ((Bao, Cai & Corke, 2001, pp. 936-939) ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก (Champagne *et al.*, 2001, pp. 1589-1594) นอกจากนี้ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างสมการทำนายการแบ่งกลุ่มข้าวได้อีกด้วย (Osborne *et al.*, 1993, pp. 77-83) ในการเตรียมตัวอย่างข้าวสำหรับการวิจัยในครั้งนี้จะเน้นตัวอย่างกลุ่มข้าวหอมมะลิที่เพาะปลูกในภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศไทยเป็นหลักเนื่องจากต้องการให้ตัวอย่างข้าวหอมมะลิที่มีความหลากหลายสำหรับการทดลองในส่วนของการศึกษาการปลอมปนข้าวหอมมะลิ ในขณะที่ตัวอย่างข้าวในกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำ ปานกลาง และสูงมีจำนวนน้อย เนื่องจากมีวัตถุประสงค์ในการขยายช่วง (Range) ของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวให้เพิ่มขึ้นสำหรับการทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารไทยแบบใช้ตัวอย่างข้าวเต็มเมล็ดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีย่านใกล้

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์การใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้มาใช้ในการสร้างสมการเพื่อทำนายค่าคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวและสร้างสมการเพื่อทำนายการแบ่งกลุ่มข้าว ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบคุณภาพข้าวเพื่อการซื้อขาย และการตรวจสอบการปลอมปนข้าวหอมมะลิไทยได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างสมการสำหรับทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารไทยแบบใช้ตัวอย่างข้าวเต็มเมล็ดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้

1.2.2 เพื่อสร้างสมการสำหรับการทำนายการปลอมปนข้าวหอมมะลิไทยด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัย มีรายละเอียด ดังนี้

1.3.1 สามารถตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสาร ได้แก่ ปริมาณแอมิโลส ปริมาณโปรตีน ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง และคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้

1.3.2 สามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวหอมมะลิไทยด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้

1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย

เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการดูดกลืนแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงจำนวนคลื่นที่ $10,000-4,000 \text{ cm}^{-1}$ โดยมีการสั่นแบบโอเวอร์ทอนและการสั่นแบบผลรวมรวมของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน ออกซิเจน-ไฮโดรเจน และไนโตรเจน-ไฮโดรเจนในสารประกอบต่าง ๆ เทคนิคนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยไม่ทำลายตัวอย่าง ลดการใช้สารเคมี มีความรวดเร็ว และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในไลน์การผลิตได้อีกด้วย จากการที่คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดแป้งที่มีอยู่ในข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ดังนั้น จึงตั้งสมมติฐานว่าการใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ซึ่งจะเกิดสเปกตรัมจากการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจนจะสะท้อนถึงปริมาณคุณสมบัติเหล่านั้น และการใช้ตัวอย่างข้าวแบบเต็มเมล็ดโดยไม่ต้องบดข้าวจะช่วยให้การนำไปใช้ในเชิงวิชาการและพาณิชย์เป็นไปได้อย่างสะดวกมากยิ่งขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารได้โดยไม่ต้องบดข้าว และใช้เครื่องมือและเทคนิคที่ทันสมัย ได้ข้อมูลรวดเร็ว ไม่ต้องใช้วิธีการทางเคมีซึ่งต้องใช้สารเคมี สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเวลา หน่วยงานที่สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ หน่วยงานภาครัฐที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการวิจัยพันธุ์ข้าว หน่วยงานเอกชน ได้แก่ โรงสีข้าว ผู้ค้าขายข้าว หรือหน่วยงานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.6.1 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว (Physicochemical properties) คือ คุณสมบัติที่มีความสำคัญต่อคุณภาพการหุงต้ม รับประทาน และการแปรรูปข้าว และการตรวจสอบคุณภาพข้าวสำหรับการซื้อขายข้าว ประกอบด้วยปริมาณแอมิโลส ปริมาณโปรตีน ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง อุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชัน และความหนืดของแป้ง เป็นต้น คุณสมบัตินี้ได้รับอิทธิพลมาจากพันธุ์ข้าว สภาวะแวดล้อมในการเพาะปลูก วิธีการเพาะปลูก พื้นที่เพาะปลูก ตลอดจนการขัดสีข้าว

1.6.2 เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ คือ การศึกษาอันตรกิริยาระหว่างรังสีอินฟราเรดย่านใกล้กับสสารที่โมเลกุลประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจน (X-H) อะตอม อะตอม X ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) ฯลฯ อันตรกิริยาดังกล่าว คือ การที่โมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้เข้าไป ซึ่งจะมีผลต่อการสั่นของพันธะต่าง ๆ ในโมเลกุล ระดับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของสสารที่ความยาวคลื่นของพันธะต่าง ๆ ในโมเลกุล ระดับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของสสารที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ จะปรากฏในลักษณะของสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ โดยจะวิเคราะห์ผลร่วมกับวิธีทางเคมีเมตริกซ์ก็จะทำให้สามารถวิเคราะห์ผลเชิงปริมาณและคุณภาพขององค์ประกอบที่ต้องการศึกษาได้

1.6.3 การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial least square regression; PLSR) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หลายตัวแปร (Multivariate analysis) ที่สามารถลดจำนวนตัวแปรได้ การสร้างสมการ PLSR นั้นจะทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) โดยในช่วงจัดกลุ่มลดจำนวนตัวแปรอิสระ (ตัวแปร Y) จะต้องมีการสร้างตัวแปรใหม่ที่เรียกว่า “ค่าคะแนนปัจจัย” (Factor loading) หรือ “แฟกเตอร์” โดยนำข้อมูลของตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) เข้ามาร่วมในการสร้างแฟกเตอร์ด้วย โดยค่าคะแนนปัจจัยหรือแฟกเตอร์ที่สร้างขึ้นมานี้จะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามเสมอ

1.6.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis; PCA) เป็นวิธีการหนึ่งทางสถิติในการวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัว โดยใช้เทคนิคการลดจำนวนตัวแปรอิสระด้วยการแบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่ ที่เรียกว่า “ปัจจัย หรือ องค์ประกอบ” (Factors or principal components; PCs) โดยที่จำนวนตัวแปรใหม่ที่เรียกว่าปัจจัยหรือองค์ประกอบหลักจะต้องมีจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับตัวแปรเดิม

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณภาพข้าว

คุณภาพข้าวมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบและโครงสร้างของเมล็ดข้าว ซึ่งถูกควบคุมโดยลักษณะทางพันธุกรรมและสภาพแวดล้อม แบ่งได้ 4 ประเภท คือ คุณภาพทางกายภาพ คุณภาพการสี (Milling quality) คุณภาพการหุงต้ม รับประทาน และการแปรรูป และคุณภาพทางด้านโภชนาการ (Nutritive quality) (ผดุงศักดิ์ วานิชชัง, 2535, หน้า 5-8; กัญญา เชื้อพันธ์, 2545, หน้า 10-21) มีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 คุณภาพข้าวทางกายภาพ

คุณภาพข้าวทางกายภาพ หมายถึง คุณสมบัติต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวที่สามารถมองเห็นหรือชั่ง ตวง วัดได้ เช่น น้ำหนักเมล็ด สีข้าวเปลือก สีข้าวกล้อง ขนาดและรูปร่างเมล็ด ลักษณะท้องไข ความใสขุ่นของข้าวสาร และความยาวของข้าวสาร เป็นต้น (กัญญา เชื้อพันธ์, 2545, หน้า 10-21)

2.1.1.1 น้ำหนักเมล็ด (Grain weight)

น้ำหนักเมล็ดเป็นลักษณะที่ถูกควบคุมโดยพันธุกรรม แปรปรวนไปตามขนาดรูปร่างของเมล็ด ความชื้น ชนิดของดิน การใส่ปุ๋ย และสภาพภูมิอากาศ จากการตรวจสอบน้ำหนักข้าวเปลือก 1,000 เมล็ดของข้าวที่ปลูกในประเทศไทย พบว่ามีน้ำหนักอยู่ระหว่าง 16.20-41.68 กรัม (ผดุงศักดิ์ วานิชชัง, 2535, หน้า 5-8)

2.1.1.2 น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight)

น้ำหนักจำเพาะเป็นน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อเฮกโตลิตร น้ำหนักจำเพาะขึ้นอยู่กับชนิดของเมล็ด พันธุ์ข้าว ความชื้นของเมล็ด สิ่งเจือปนและอัตราการอัดตัวของเมล็ด ดังนั้น การหาน้ำหนักจำเพาะของเมล็ด จึงจำเป็นต้องตั้งระยะความสูงในการเทเมล็ดลงเครื่องตวงและความชื้นเมล็ดไว้เป็นมาตรฐาน ข้าวกล้องจะมีน้ำหนักจำเพาะสูงกว่าข้าวเปลือกประมาณหนึ่งเท่าตัว

2.1.1.3 สีข้าวเปลือก (Hull color)

สีข้าวเปลือกเป็นลักษณะประจำพันธุ์ขึ้นอยู่กับลักษณะการแสดงออกของยีนสีข้าวเปลือกของข้าวไทยส่วนใหญ่มี 2 สี คือ สีฟาง และสีน้ำตาล

2.1.1.4 สีข้าวกล้อง (Pericarp color)

สีของเมล็ดข้าวกล้องจะแสดงออกที่เยื่อหุ้มผล (Pericarp) ซึ่งมีสีแตกต่างกันตั้งแต่ขาว แดง น้ำตาลเข้ม น้ำตาลเทา และม่วงถึงเกือบดำ สีข้าวกล้องถูกควบคุมโดยยีนหลายคู่ซึ่งแสดงออกในลักษณะต่าง ๆ สีข้าวกล้องมีความสำคัญทางเศรษฐกิจจึงจะเห็นได้จากข้าวมาตรฐานสูงที่มีราคาแพงจะไม่ยอมให้มีเมล็ดข้าวกล้องปนอยู่เลย

2.1.1.5 ขนาดรูปร่างเมล็ด (Grain dimension)

ขนาดรูปร่างเมล็ด ได้แก่ ความยาว (Length) ความกว้าง (Width) ความหนา (Thickness) และรูปร่าง (Shape) ขนาดรูปร่างเมล็ดของข้าวเป็นลักษณะประจำพันธุ์มีความแตกต่าง

กันขึ้นกับพันธุ์และสภาพพื้นที่ปลูก เช่น ข้าวอินดิกา (Indica) จะมีเมล็ดยาวรูปร่างเรียวยาว ข้าวจาปอนนิกา (Japonica) เมล็ดมีรูปร่างป้อม สั้น เป็นต้น

2.1.1.6 ลักษณะท้องไข (Chalkiness)

ลักษณะท้องไขในเมล็ดข้าวเกิดจากการจับตัวกันอย่างหลวม ๆ ของเม็ดแป้ง (Starch granule) กับโปรตีนรูปร่าง (Protein body) ในส่วนที่เป็นแป้งของเมล็ด ลักษณะนี้ถูกควบคุมโดยพันธุกรรมและสิ่งแวดล้อม ลักษณะท้องไขในเมล็ดข้าวแบ่งได้ 3 ชนิด คือ ท้องไขที่เกิดขึ้นตรงกลางของส่วนที่เป็นแป้งในเมล็ด (White center) ท้องไขที่เกิดด้านข้างหรือด้านท้องของเมล็ดด้านเดียวกับเยื่อเจริญ (White belly) และท้องไขที่เกิดขึ้นทางด้านหลังของเมล็ดด้านตรงข้ามกับเยื่อเจริญ (White belly) ลักษณะท้องไขเป็นดัชนีที่ใช้ประเมินราคาข้าวและเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการเนื่องจากทำให้คุณภาพการสีต่ำ มีข้าวหักมาก มาตรฐานข้าวไทยจะจำกัดปริมาณและชนิดของข้าวท้องไขที่ยอมให้มีเอาไว้ด้วย

2.1.1.7 ความขาวของข้าวสาร (Milled rice whiteness)

ข้าวที่ผ่านการขัดสีจนเป็นข้าวสารจะมีสีขาว ความขาวของข้าวสารจะแตกต่างกันขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระดับการสี องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าว ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวเปลือก เป็นต้น ความขาวของข้าวสารซึ่งจำแนกโดยระดับการสีจะเป็นตัวกำหนดชั้นของข้าว เช่น ข้าว 100% จะต้องมีระดับการสีเป็นสีตีพิเศษ ซึ่งหมายถึงการสีเอาสิ่งต่าง ๆ ออกหมด ไม่มีรำอยู่เลย จนข้าวมีลักษณะใส

2.1.1.8 ความใสของข้าวสาร (Grain transparency)

ความใสของข้าวสาร หมายถึง ความทึบแสงหรือความใสของเนื้อข้าวสารทั้งเมล็ด สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ในข้าวเจ้า ปัจจุบันยังไม่พบสาเหตุของความใสของข้าวสาร แต่คาดว่าน่าจะเกิดจากพันธุ์ข้าวและสภาพพื้นที่ปลูก

2.1.2 คุณภาพการสี

คุณภาพการสีข้าวประเมินได้จากปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าว (Head rice) ข้าวที่มีคุณภาพการสีดีต้องเป็นข้าวที่เมื่อผ่านกระบวนการขัดสีแล้วได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวสูง มีปริมาณข้าวหัก (Broken rice) น้อย ดังนั้น การประเมินคุณภาพการสีของข้าวจึงเกี่ยวข้องกับการสีข้าว ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพการสี ได้แก่ พันธุ์ข้าว การปฏิบัติก่อนการเก็บเกี่ยว ระยะเวลาและวิธีการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม การตากข้าว การนวดข้าว การเก็บรักษา และกระบวนการขัดสี (กัญญา เชื้อพันธ์, 2545, หน้า 10-21)

การขัดสีข้าว ขั้นตอนสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพการสี คือ การกะเทาะข้าวเปลือก (Husking) และการขัดขาว (Whitening) ถ้าได้ข้าวสารเต็มเมล็ดและต้นข้าวสูงแสดงว่าประสิทธิภาพการสีดี ผดุงศักดิ์ วานิชชัง (2552) พบว่าข้าวที่มีประสิทธิภาพการสีดีต้องมีองค์ประกอบต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 เมื่อสิ่งเจือปนในข้าวเปลือกก่อนทำความสะอาดเท่ากับ 5%

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของข้าวที่มีประสิทธิภาพการสีดี

| องค์ประกอบ | พื้นที่ (%) |
|------------|-------------|
| ข้าวกล้อง | 78 |
| แกลบ | 22 |
| รำ | 10 |
| ข้าวรวม | 68 |
| ต้นข้าว | 50 |
| ข้าวหัก | 18 |

ที่มา: ผดุงศักดิ์ วานิชชัง (2552)

นอกจากนี้ระดับการขัดสี (Degree of milling) ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสีข้าวและการจัดมาตรฐานข้าว กล่าวคือการสีข้าวในระดับสีดีพิเศษถึงแม้ว่าจะได้เมล็ดข้าวเรียวยาว สวยงาม แต่ก็จะทำให้ได้ปริมาณข้าวหักเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเมล็ดข้าวต้องผ่านการขัดสีที่มากกว่าข้าวสีดี หรือสีดีปานกลาง เป็นต้น ระดับการขัดสีแบ่งได้ 4 ระดับ คือ สีดีพิเศษ สีดี สีดีปานกลาง และสีธรรมดา (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547, หน้า 40)

2.1.3 คุณภาพทางด้านโภชนาการ

คุณภาพทางด้านโภชนาการของข้าวเป็นผลมาจากพันธุ์ สภาพการปลูก การเก็บเกี่ยว และกระบวนการแปรรูปจากข้าวเปลือกเป็นข้าวกล้องและข้าวสาร คุณภาพทางด้านโภชนาการของข้าวและการสูญเสียในระหว่างการขัดสี แสดงดังตารางที่ 2.2 (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547, หน้า 47; Juliano, 1985, p.15)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าว

| องค์ประกอบ | ข้าวกล้อง | ข้าวสาร | การสูญเสียระหว่างการขัดสี (%) ¹ |
|-------------------------------------|-----------|---------|--|
| พลังงาน (กิโลแคลอรี/100 กรัม) | 352.0 | 354.0 | 10 |
| โปรตีน (กรัม/100 กรัม) | 8.3 | 7.1 | 23 |
| ไขมัน (กรัม/100 กรัม) | 1.9 | 0.5 | 76 |
| คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (กรัม/100 กรัม) | 74.9 | 77.8 | 6 |
| เส้นใย (กรัม/100 กรัม) | 0.7 | 0.4 | 49 |
| เถ้า (กรัม/100 กรัม) | 1.1 | 0.6 | 51 |
| แคลเซียม (มิลลิกรัม/100 กรัม) | 9.0 | 8.0 | 20 |
| ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/100 กรัม) | 183.0 | 104.0 | 49 |
| ไรโบฟลาวิน (มิลลิกรัม/100 กรัม) | 0.07 | 0.05 | 36 |
| ไนอะซิน (มิลลิกรัม/100 กรัม) | 3.9 | 2.3 | 47 |

ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2547, หน้า 47) และ Juliano (1985, p. 15)

หมายเหตุ : ¹ คำนวณจากปริมาณรำที่ขัดสีออกจากข้าวกล้อง 10%

2.1.4 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว

คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว เป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญต่อคุณภาพการหุงต้ม รับประทาน และการแปรรูปข้าว และการตรวจสอบคุณภาพข้าวสำหรับการซื้อขายข้าว ซึ่งประกอบด้วยปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง อุณหภูมิการเกิดเจลลาคีโนเซชัน และคุณสมบัติด้านความเหนียวของแป้ง ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.1.4.1 โปรตีน

โปรตีนในข้าวเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่มากรองจากคาร์โบไฮเดรตและมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว แบ่งได้ 4 ชนิด คือ อัลบูมิน (Albumin) โกลบูลิน (Globulin) โพรลามิน (Prolamin) และกลูเตลิน (Glutelin) ซึ่งสามารถละลายได้ในน้ำ น้ำเกลือ แอลกอฮอล์ และต่าง ตามลำดับ (Juliano, 1985, 443-524) โปรตีนในข้าวจะพบมากในส่วนของเนื้อเยื่อแอลลูโรนและคัพพะ Wadsworth (1994) วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในข้าวกล้องและข้าวขัดขาว พบว่าข้าวกล้องจะมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 8.3 – 9.6% ในขณะที่ข้าวขัดขาวมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 7.3 – 8.3% เนื่องจากโปรตีนที่มีอยู่มากในเนื้อเยื่อแอลลูโรนและคัพพะจะถูกกำจัดออกในระหว่างกระบวนการขัดสีข้าว Juliano (1985) พบว่าโปรตีนที่อยู่ส่วนนอกของเมล็ดข้าวมีส่วนทำให้ระยะเวลาหุงต้มข้าวนานขึ้น เนื่องจากโปรตีนจะขัดขวางการดูดซึมน้ำเข้าไปภายในเมล็ดข้าว นอกจากนี้ข้าวที่มีโปรตีนสูงยังทำให้เมล็ดข้าวมีความแข็งแรงแรงขึ้น ทำให้ขัดสีออกได้ยากและทำให้ข้าวสุกมีความเหนียวน้อยลงและมีสีคล้ำ

โปรตีนที่กระจายอยู่ในเมล็ดข้าวนั้นจะเป็นแบบรูปร่างกลมขนาดเล็ก ส่วนโปรตีนรูปร่างกลมขนาดใหญ่มีปริมาณน้อยกว่าและพบมากบริเวณใจกลางเมล็ดข้าวเท่านั้น โดยในองค์ประกอบของโปรตีนจะเป็นโพรลามินร่วมกับกลูเตลิน สำหรับโปรตีนร่างแห (Protein matrix) จะพบน้อยมากหรือไม่พบเลยในเนื้อของเมล็ดข้าวซึ่งแตกต่างจากธัญพืชอื่น ถ้าพบก็จะมีลักษณะเชื่อมโยงเป็นเส้นใยโปรตีน (Protein fibrils) แทรกอยู่ระหว่างโปรตีนรูปร่าง (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547, หน้า 165)

2.1.4.2 ปริมาณแอมิโลส (Apparent amylose content)

แอมิโลสเป็นของกลูโคสจัดเรียงตัวเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (Linear chain) พบมากในสตาร์ช (Starch) ของเมล็ดข้าวมีเฉพาะในเอนโดสเปิร์ม (Endosperm) เท่านั้น ในข้าวขัดขาว (Non-waxy milled rice) พบปริมาณแอมิโลส 8 – 37% ของปริมาณสตาร์ชทั้งหมด ซึ่งปริมาณแอมิโลสจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเมล็ดข้าว (Juliano *et al.*, 1964a, pp. 234-241; Juliano *et al.*, 1964b, pp. 275-286) โมเลกุลของแอมิโลสประกอบด้วยกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา 1,4-กลูโคซิดิก (α -1,4-glucosidic linkage) และมีโซ่กิ่ง (Branched chain) เชื่อมต่อกับพันธะแอลฟา 1,6-กลูโคซิดิก (α -1,6-glucosidic linkage) ประมาณ 3 – 4 กิ่ง โดยมีระดับชั้นของพอลิเมอร์เชิงเส้นเฉลี่ย 1,000 – 1,100 ความยาวของสายเฉลี่ย 250 – 320 จำนวนสายเฉลี่ย 3.4 – 4.0 และมีโมเลกุลที่เป็นกิ่งก้าน 31 – 49% (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547, หน้า 158)

นอกจากนี้ยังมี คิงเสรี (2545) ยังพบว่าอัตราส่วนปริมาณแอมิโลสต่อแอมิโลเพกติน (Amylopectin) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวสุกมีคุณภาพแตกต่างกัน กล่าวคือปริมาณแอมิโลเพกตินทำให้ข้าวสุกเหนียว ในขณะที่แอมิโลสทำให้ความเหนียวของข้าวสุกลดลง ส่วนข้าวเจ้า

ที่มีปริมาณแอมิโลสสูงมักร่วนและแข็งกว่าข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลางและต่ำ ตามลำดับ การจัดแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณแอมิโลส แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณแอมิโลส

| ประเภทข้าว | ปริมาณแอมิโลส (%) | ลักษณะข้าวสุก |
|--------------------|-------------------|---------------------|
| ข้าวเหนียว | 0 – 2 | เหนียวมาก |
| ข้าวแอมิโลสต่ำ | 10 – 19 | เหนียวและนุ่ม |
| ข้าวแอมิโลสปานกลาง | 20 – 25 | ค่อนข้างร่วนไม่แข็ง |
| ข้าวแอมิโลสสูง | 25 – 34 | ร่วนค่อนข้างแข็ง |

ที่มา: งามชื่น คงเสรี (2545, หน้า 32)

2.1.4.3 อุณหภูมิแป้งสุก (Gelatinization temperature)

อุณหภูมิแป้งสุกเป็นอุณหภูมิที่ทำให้แป้งกลายเป็นเจลและเปลี่ยนจากทึบแสงเป็นใส คุณสมบัตินี้มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการหุงต้ม ข้าวที่มีอุณหภูมิแป้งสุกสูงจะใช้เวลาในการหุงต้มข้าวมากกว่าข้าวที่มีอุณหภูมิแป้งสุกต่ำ การแบ่งประเภทข้าวตามระดับอุณหภูมิแป้งสุกสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม แสดงดังตารางที่ 2.4 (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547, หน้า 181)

ตารางที่ 2.4 การแบ่งประเภทข้าวตามระดับอุณหภูมิแป้งสุก

| อุณหภูมิแป้งสุก (°C) | ประเภทอุณหภูมิแป้งสุก | ระยะเวลาในการหุงต้ม (นาที) |
|----------------------|-----------------------|----------------------------|
| ต่ำกว่า 69 | ต่ำ | 12 – 16 |
| 70 – 74 | ปานกลาง | 16 – 24 |
| สูงกว่า 74 | สูง | มากกว่า 24 |

ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2547, หน้า 181)

2.1.4.4 ระยะเวลาในการหุงต้ม

ระยะเวลาในการหุงต้มข้าวอาจใช้เวลา 14-24 นาที หรือมากกว่านั้นขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาในการหุงต้ม คือ เมล็ดข้าวต้องไม่มีลักษณะของแป้งดิบภายในเมล็ด ระยะเวลาที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแป้งสุก แม้ว่าระยะเวลาหุงต้มจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแป้งสุก แต่ความหนาของเมล็ดข้าวทำให้ต้องเพิ่มระยะเวลาการหุงต้มข้าว เช่น ข้าวที่มีอุณหภูมิแป้งสุกเท่ากันแต่ข้าวที่มีเมล็ดหนาจะต้องใช้เวลาในการหุงต้มมากกว่าข้าวเมล็ดบาง ในทำนองเดียวกันปริมาณโปรตีนซึ่งมีมากตามบริเวณผิวนอกของเมล็ดอาจเป็นอุปสรรคในการซึมผ่านของน้ำ และทำให้เวลาในการหุงต้มข้าวเพิ่มสูงขึ้น (งามชื่น คงเสรี, 2545, หน้า 21)

2.1.4.5 ความคงตัวของแป้งสุก (Gel consistency)

ความคงตัวของแป้งสุกเป็นคุณสมบัติทางเคมีกายภาพสำคัญในการประเมินคุณภาพการหุงต้ม รับประทาน และการแปรรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก เนื่องจากผู้ทดสอบชิมไม่สามารถจำแนกความแตกต่างทางลักษณะเนื้อสัมผัสข้าวสุกของข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสสูงใกล้เคียงกันได้ แต่ค่าความคงตัวของเจลสามารถจำแนกความแตกต่างลักษณะเนื้อ

สัมผัสของข้าวสุกที่มีปริมาณแอมิโลสใกล้เคียงกันได้ เนื่องจากเจลแป้ง (Gelatinized starch) ของข้าวแต่ละพันธุ์มีอัตราการคืนตัวไม่เท่ากัน ส่งผลให้เจลแป้งมีความแข็งและอ่อนแตกต่างกัน (Blakeney, 1979, pp. 343-353)

การหาค่าความคงตัวของแป้งสุก สามารถหาได้โดยอาศัยหลักการทำให้แป้งใสโดยการต้มในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แล้วทำให้เย็นและวัดระยะทางที่แป้งไหลไปเมื่อวางในแนวราบ (Capampang *et al.*, 1973, pp. 1589-1594) ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสเท่ากัน อาจมีความแข็งข้าวสุกแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของแป้งสุกที่มีอัตราการคืนตัวไม่เท่ากัน ทำให้แป้งสุกมีความแข็งและอ่อนแตกต่างกัน Buttery *et al.* (1983) ทดสอบความคงตัวของแป้งสุกโดยอ่านจากระยะทางที่แป้งไหล หากข้าว 2 พันธุ์มีปริมาณแอมิโลสใกล้เคียงกันข้าวที่มีความคงตัวของแป้งสุกอ่อน เมื่อหุงเป็นข้าวสวยจะได้ข้าวที่มีความนุ่มเหนียวมากกว่าข้าวที่มีความคงตัวของแป้งสุกแข็ง การแบ่งประเภทข้าวตามค่าความคงตัวของแป้งสุก แบ่งได้ 3 ประเภท แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การแบ่งประเภทตามความคงตัวของแป้งสุก

| ประเภทแป้งสุก | ระยะทางที่แป้งไหล (มม.) |
|----------------|-------------------------|
| แป้งสุกแข็ง | 26 – 40 |
| แป้งสุกปานกลาง | 41 – 60 |
| แป้งสุกอ่อน | 61 - 100 |

ที่มา: Cagampang, Perez & Juliano (1973, pp. 1589-1594)

2.1.4.6 ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง

ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างมีความสำคัญต่อคุณภาพด้านกรหุงต้มและแปรรูปข้าว เนื่องจากสามารถใช้ประเมินอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ชข้าวทางอ้อม (Delwiche *et al.*, 1996, pp. 257-263) Little *et al.* (1958) พัฒนารีวิวการตรวจสอบอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันโดยการทดสอบการแตกตัวของเมล็ดข้าว จำนวน 6 เมล็ด ที่แช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.7% นาน 23 ชั่วโมง และประเมินค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่างโดยคนที่ผ่านการฝึกฝน (Trained inspector) เป็นระดับคะแนน 1 ถึง 7 ระดับคะแนน 1 หมายถึง ลักษณะของเมล็ดข้าวไม่เปลี่ยนแปลง 2 หมายถึง เมล็ดข้าวพองตัว 3 หมายถึง เมล็ดข้าวพองตัวมีแป้งกระจาย จนกระทั่งถึงระดับคะแนน 7 หมายถึง เมล็ดข้าวสลายตัวทั้งเมล็ดและมีลักษณะเป็นเมือกใส

Juliano *et al.* (1964c) พบว่าค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวอย่างมีนัยสำคัญ ข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันต่ำเมล็ดข้าวจะสลายตัวทั้งเมล็ด ในขณะที่ข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชันสูงเมล็ดข้าวจะไม่เปลี่ยนแปลงหรือพองตัวเป็นบางส่วน โดยแบ่งข้าวตามระดับการสลายของเมล็ดข้าวในต่างได้ 3 ประเภท แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การแบ่งประเภทข้าวตามลักษณะการสลายตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง

| ลักษณะการสลายตัวของเมล็ดข้าว ในสารละลายต่าง | อุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชัน (°C) | ประเภทข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิด เจลลิตินในเซชัน |
|--|--|---|
| 6 - 7 | ต่ำกว่า 65 | ต่ำ |
| 4 - 5 | 70 - 74 | ปานกลาง |
| 1 - 3 | 75 - 79 | สูง |

ที่มา: Little, Hilder & Dawson (1958, pp. 111-126)

Nishi *et al.* (2001) พบว่าระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างเป็นผลมาจากโครงสร้างของแอมิโลเพกทิน (Fine structure amylopectin) โดย Umemoto *et al.* (2002) พบว่าความยาวของสายแอมิโลเพกทินมีผลต่อการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง สตาร์ชข้าวที่มีองค์ประกอบของแอมิโลเพกทินสายสั้นสูง (ระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน 7 – 10) จะแตกตัวได้ง่ายกว่าสตาร์ชข้าวที่มีแอมิโลเพกทินสายยาวอยู่ในปริมาณที่สูง (ระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน 12 – 21) นอกจากนี้ Prathepha *et al.* (2005) ยังพบว่า การสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวเหนียว (Glutinous rice) จะแตกต่างจากข้าวเจ้า (Non-glutinous rice) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยข้าวเหนียวทั้ง 50 ตัวอย่างจะสลายตัวในสารละลายต่างทั้งเมล็ดและมีลักษณะเป็นเมือกใส ในขณะที่ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลางและสูงจะมีระดับการสลายของเมล็ดข้าวในต่างต่ำ งามซัน คองเสรี (2545) รายงานว่าข้าวเหนียวจะมีค่าระดับการสลายเมล็ดข้าวในต่างเฉลี่ย 6 – 7 ในขณะที่ระดับการสลายเมล็ดข้าวในต่างของข้าวเจ้าจะอยู่ในช่วง 1 – 3

Nakamura *et al.* (2002) พบว่าปริมาณแอมิโลสไม่มีความสัมพันธ์กับค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง ซึ่งสอดคล้องกับ Harushima *et al.* (1998) พบว่าในสตาร์ชข้าวจะมี Amylopectin – synthesizing enzyme ที่ทำหน้าที่สังเคราะห์ขึ้นแตกต่างกัน ส่งผลให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชตลอดจนโครงสร้างของแอมิโลเพกทินในเมล็ดข้าวแตกต่างกันอีกด้วย ซึ่งความยาวของสายแอมิโลเพกทินนั้นมีผลต่อการแตกตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างอย่างมีนัยสำคัญ

2.1.4.7 คุณสมบัติด้านความหนืด (Pasting properties of rice)

อุณหภูมิในการเกิดเจลและความหนืดของแป้งสามารถวัดได้ด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำแป้งเมื่อได้รับความร้อน เมื่อให้ความร้อนเม็ดแป้งจะเกิดการพองตัว ความหนืดเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ความหนืดจะสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุด เรียกความหนืดที่จุดสูงสุดนี้ว่า “ความหนืดสูงสุด” (Peak viscosity) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการรวมตัวของน้ำแป้ง หลังจากเกิดความหนืดสูงสุดแล้วความหนืดจะลดลงเนื่องจากการแตกตัวของเม็ดแป้ง แอมิโลสจะถูกปล่อยออกมากับสารละลายและอาจมีบางส่วนที่เป็นแอมิโลเพกทินด้วย ความหนืดมีการเปลี่ยนแปลงไปสู่ขั้นสลายตัวหรือเรียกว่า “ค่าการแตกตัวของแป้งสูง” (Breakdown) เมื่อเข้าสู่ระยะการทำให้แป้งเย็นตัว ความหนืดจะเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดจากโครงสร้างของแป้งที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ (Retrogradation) ช่วงอุณหภูมิที่แป้งคืนตัวเรียกว่า “ค่าความคงตัวของแป้งสูง” (Setback) ค่านี้สามารถใช้ประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกได้ (Leach, Mc Cowen & Schoch, 1959)

2.1.5 อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก (Elongation ration of cooked rice)

อัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความยาวของเมล็ดข้าวสุกต่อความยาวของเมล็ดข้าวสาร โดยแบ่งอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ยึดปกติมีอัตราส่วนน้อยกว่า 1.9 และกลุ่มที่ 2 ยึดปกติมีอัตราส่วนมากกว่า 1.9 ในระหว่างการหุงต้มเมล็ดข้าวจะขยายตัวโดยรอบโดยเฉพาะด้านยาว (งามชื่น คงเสรี, 2547, หน้า 35)

2.1.6 กลิ่นหอม (Aroma)

กลิ่นหอมเป็นลักษณะพิเศษและลักษณะประจำพันธุ์ของข้าว ข้าวสุกที่มีกลิ่นหอมจะมีสาร 2-Acetyl-1-pyrroline มากกว่าข้าวทั่วไป ข้าวหอมที่อยู่ในรูปข้าวกล้องจะมีสารนี้ประมาณ 0.1-0.2 ไมโครกรัม (น้ำหนักแห้ง) ในขณะที่ข้าวสารมีสารนี้เพียง 0.04-0.09 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) กลิ่นหอมของข้าวจะลดลงเมื่อเป็นข้าวเก่า เนื่องจากสารให้ความหอมจะสูญเสียไปปัจจัยที่ทำให้กลิ่นหอมลดลง คือ ความร้อน ความชื้น และสภาวะในการเก็บรักษาข้าว (Buttery *et al.*, 1983)

2.2 วิธีการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าว

การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวส่วนใหญ่ตรวจสอบด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญ ดังนี้

2.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนจะทำการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่าง เช่น วิธีคเจลดาล์ (Kjeldahl method) และวิธีดูมาส (Dumas combustion method) โดยทั้งสองวิธีนี้ได้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด เนื่องจากสามารถใช้ได้กับอาหารหลายชนิด ซึ่งมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังนี้

2.2.1.1 วิธีคเจลดาล์

วิธีคเจลดาล์เป็นการวิเคราะห์โปรตีนในอาหารโดยการวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในตัวอย่างด้วยการย่อยสลายโปรตีน ซึ่งประกอบด้วยกรดอะมิโน (Amino acid) ที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบในกลุ่มอะมิโน (Amino group) การย่อยสลายโปรตีนจะปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาและถูกเปลี่ยนให้เป็นแอมโมเนีย (การวิเคราะห์โปรตีน, 2008, หน้า 42-45) การวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธีคเจลดาล์ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก คือ

ขั้นตอนที่ 1 ย่อยตัวอย่าง (Digestion) ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น ไนโตรเจนในตัวอย่างจะเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียมซัลเฟต $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงโดยมีสารเร่งปฏิกิริยา เช่น คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ซีลีเนียม (Se) เมอคิวรีซัลเฟต (HgSO_4) เมอคิวรีออกไซด์ (HgO) หรือเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4)

ขั้นตอนที่ 2 การกลั่นแอมโมเนีย (Distillation) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มาทำปฏิกิริยากับเกลือแอมโมเนียมซัลเฟตที่ได้จากการย่อยตัวอย่างแล้ว จะได้ก๊าซแอมโมเนีย ซึ่งจับก๊าซนี้ได้ด้วยสารละลายบอริก

ขั้นตอนที่ 3 การไตเตรตเพื่อหาปริมาณไนโตรเจน (Titration) เป็นการนำสารละลายกรดบอริกซึ่งจับก๊าซแอมโมเนียไว้มาไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก

ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณ นำปริมาณสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกที่ใช้ในการไตเตรตไปคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนแล้วคูณกับค계ลดतालแพคเตอร์ (Kjeldahl factor) ซึ่งค่าเฉลี่ยของไนโตรเจนในโปรตีนอยู่ที่ 16% ได้เป็นค่าโปรตีนหยาบ

สำหรับปริมาณโปรตีนในข้าวที่คำนวณมาจากปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดจะคูณด้วยจลดतालแพคเตอร์ 5.95 เนื่องจากในองค์ประกอบของกลูเตลินในข้าวมีไนโตรเจนอยู่ถึง 16.8% (Juliano, 1985, p. 443-524)

$$\text{ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (\%)} = \frac{(A - B) \times C \times 0.014 \times 100}{D}$$

$$\text{โปรตีน (\%)} = N (\%) \times 6.25$$

เมื่อ A คือ มิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.1 นอร์มอล ที่ใช้ไตเตรตกับตัวอย่าง

B คือ มิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.1 นอร์มอล ที่ใช้ไตเตรตกับแบลงค์

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก

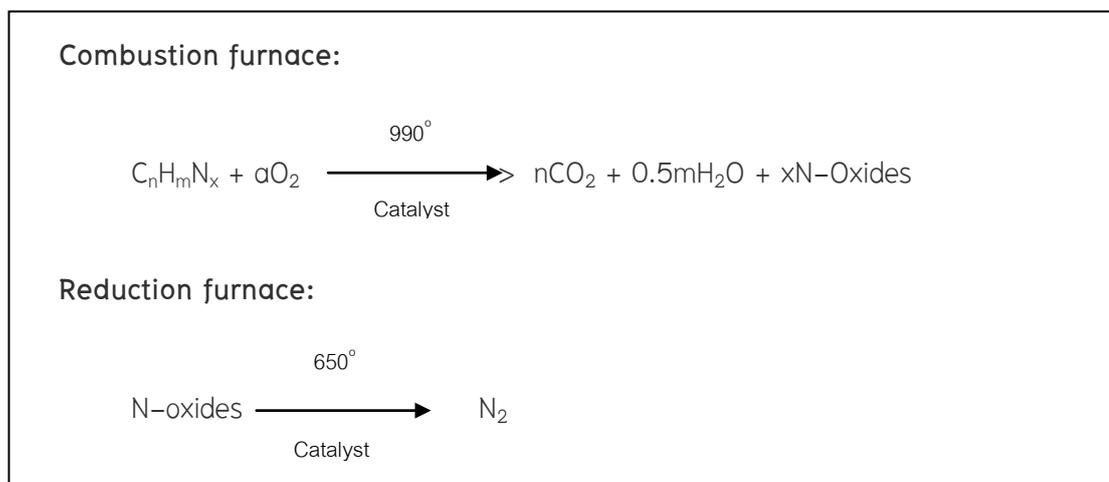
D คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าวิธีค계ลดतालแพคเตอร์จะเป็นวิธีที่ให้ค่าการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและแม่นยำ แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ ระยะเวลาในการทดสอบค่อนข้างนานตามชนิดและองค์ประกอบของตัวอย่าง ผู้วิเคราะห์ต้องมีทักษะและความชำนาญค่อนข้างสูง ต้องใช้สารเคมีที่เป็นกรดและด่างเข้มข้นหลายชนิด รวมถึงมีการใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ทองแดง โปรท ทำให้เกิดปัญหาด้านการจัดการของเสียจากห้องปฏิบัติการและปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม (มโนวิช เรืองดิษฐ์ และยุทธภูมิ สัมพันธ์รักษ์, 2553, หน้า 13-16)

2.1.1.2 วิธีดูมาส

การหาปริมาณโปรตีนโดยวิธีดูมาสเป็นวิธีวิเคราะห์โปรตีนที่ได้รับความนิยมเนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและยังให้ค่าผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับวิธีค계ลดतालแพคเตอร์ นอกจากนี้ยังมีข้อดีอีกหลายประการ เช่น ใช้ระยะเวลาและสารเคมีในการวิเคราะห์น้อยกว่า หลักการทำงานของเทคนิคนี้จะอาศัยหลักการนำสารตัวอย่างปริมาณน้อยมาเผาหรือสันดาปในระบบปิดที่อุณหภูมิไม่น้อยกว่า 850°C ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.99% โดยใช้โลหะ เช่น ทองแดง หรือ แพลตตินัม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไอสารที่ได้จากการเผาไหม้ (Combustion gases) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลของไนโตรเจน ไนโตรเจนออกไซด์ น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และสารรบกวนอื่น เช่น สารประกอบซัลเฟอร์ ฮาโลเจน จะถูกนำเข้าไปในระบบโดยแก๊สตัวพา (Carrier gas) เช่น แก๊สฮีเลียม แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น แก๊สตัวพาต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีหรือมีผลต่อสารวิเคราะห์ เมื่อไนโตรเจนออกไซด์ผ่านเข้าไปใน Reduction tube จะถูกรีดิวซ์ให้เป็นก๊าซไนโตรเจนโดยโลหะทองแดง หรือ ทังสแตน ส่วนสารอื่น ๆ ก็จะถูกกำจัดด้วยตัวดูดซับที่มีความจำเพาะแตกต่างกันไปตามชนิดของสาร น้ำที่เกิดขึ้นจะถูกกำจัดด้วยสารดูดซับความชื้น (Drying agent) เช่น ไดฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (Diphosphorus pentoxide) และแมกนีเซียมเปอร์คลอเรต (Magnesium perchlorate) คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกกำจัดโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนสารประกอบซัลเฟอร์และ

ธาตุฮาโลเจนจะถูกกำจัดโดยตัวดูดซับ เช่น เลดโครเมต (Lead chromate) หรือซิลเวอร์วูล (Silver wool) (มโนวิช เรื่องดิษฐ์ และยุทธภูมิ สัมพันธ์รักษ์, 2553, หน้า 13-16) ตัวอย่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบการวิเคราะห์โปรตีนด้วยวิธีดูมาส (Dumas combustion)

ที่มา: มโนวิช เรื่องดิษฐ์ และยุทธภูมิ สัมพันธ์รักษ์ (2553, หน้า 13-16)

เมื่อก๊าซไนโตรเจนผ่านกระบวนการกำจัดสารรบกวนแล้ว จะถูกพาเข้าไปที่เครื่องตรวจวัด Thermal Conductivity Detector (TCD) เพื่อแยกสารที่ต้องการตรวจวิเคราะห์ สัญญาณที่ตรวจวัดได้ก็จะถูกประมวลผลผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงผลเป็นค่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ซึ่งค่าไนโตรเจนทั้งหมดสามารถนำมาคำนวณหาค่าปริมาณโปรตีน โดยการนำมาคูณกับแฟกเตอร์ที่เหมาะสมเช่นเดียวกับวิธีคเจลดาห์ล ซึ่งค่าแฟกเตอร์ที่จะนำมาใช้นั้นมีค่าที่แตกต่างกันจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนที่แตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ (มโนวิช เรื่องดิษฐ์ และยุทธภูมิ สัมพันธ์รักษ์, 2553, หน้า 13-16) ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าแฟกเตอร์ในอาหารแต่ละผลิตภัณฑ์

| ชนิดของอาหาร | ค่าแฟกเตอร์ |
|--------------------------------|-------------|
| ข้าวสาลี | 5.83 |
| แป้ง | 5.70 |
| พาสต้า | 5.70 |
| ข้าว | 5.95 |
| ข้าวไรย์/ข้าวบาร์เลย์/ข้าวโอ๊ต | 5.83 |
| ถั่วเหลือง | 5.71 |
| นม | 6.38 |

ที่มา: มโนวิช เรื่องดิษฐ์ และยุทธภูมิ สัมพันธ์รักษ์ (2553, หน้า 13-16)

Williams, Sobering & Antoniszyn (1998) เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองระหว่างวิธีดูมาสและวิธีคเจลดาห์ล พบว่าวิธีดูมาสให้ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสูงกว่าวิธีคเจลดาห์ลถึง 1.5 – 2.0% เนื่องจากวิธีดูมาสจะให้สารประกอบที่ได้จากการเผาไหม้โปรตีน เปปไทด์ และกรดอะมิโนให้อยู่ในรูปของไนโตรเจน ในขณะที่วิธีคเจลดาห์ลจะให้สารประกอบไนโตรเจนซึ่งอยู่

ในสารแอมโมเนียก่อน หลังจากนั้นจึงนำไปไตเตรตเพื่อให้ได้ไนโตรเจนซึ่งอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดได้ การเปรียบเทียบค่าปริมาณโปรตีนเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีดูมาสและวิธีคเจลดาห์ล แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบค่าปริมาณโปรตีนในอาหารด้วยวิธีดูมาสและวิธีคเจลดาห์ล

| ประเภท | ผลิตภัณฑ์ | ปริมาณโปรตีน (%) | |
|---------------|----------------------|------------------|-----------|
| | | วิธีคเจลดาห์ล | วิธีดูมาส |
| Dairy product | Drymilk | 5.54 | 5.58 |
| | Chocolate milk shake | 0.56 | 0.56 |
| Cereal | Corn | 1.41 | 1.43 |
| | Wheat | 2.36 | 2.37 |
| Animal feeds | Soya bean meal | 7.98 | 8.00 |
| | Hog feed | 3.38 | 3.39 |

ที่มา: Williams, Sobering & Antoniszyn (1998, pp. 1-14)

อย่างไรก็ตามทั้ง 2 วิธีนี้ยังไม่ถูกต้องมากนักสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน เนื่องจากต้องอาศัยสมมติฐานที่ว่า “แหล่งของไนโตรเจนทั้งหมดทั้งที่อยู่ในอาหารมาจากกรดอะมิโน ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของโปรตีน” และ “องค์ประกอบหลักของอาหารประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต และไขมัน ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ” แต่เนื่องด้วยวิธีนี้เป็นการคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ทั้งที่มาจากโปรตีนและไม่ใช่โปรตีน ดังนั้นสมมติฐานนี้จะจริงก็ต่อเมื่ออาหารที่นำมาวิเคราะห์นั้นไม่มีสารประกอบอื่นที่ไม่ใช่โปรตีนเจือปน (การวิเคราะห์โปรตีน, 2008, หน้า 42-45)

2.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส

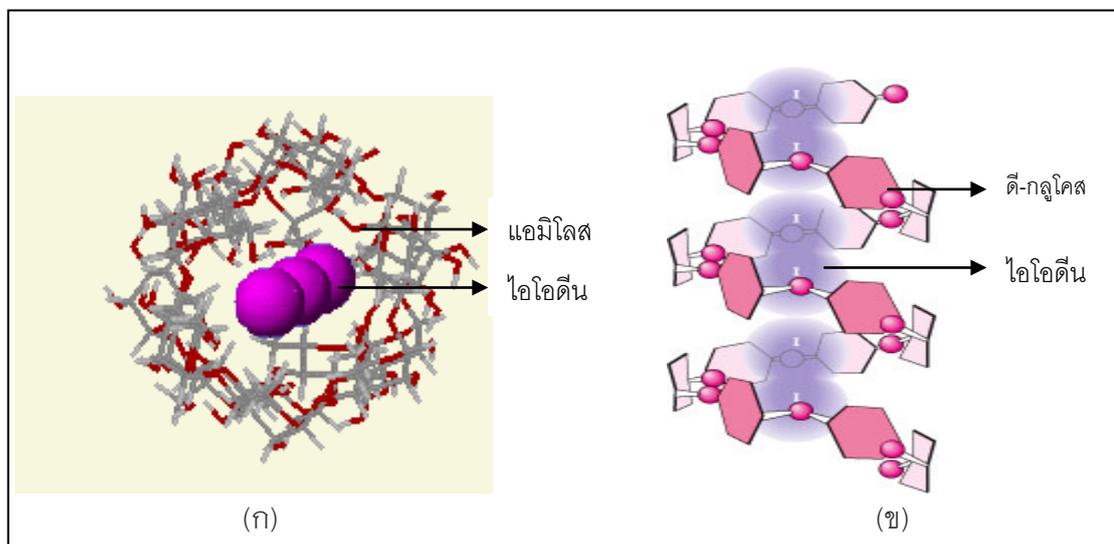
สตาร์ชข้าวประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคสที่สำคัญ 2 ชนิด คือ แอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ซึ่งปริมาณของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด จะแตกต่างกันตามชนิดของแป้ง วิธีการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสที่สำคัญ ได้แก่

2.2.2.1 การทำให้เกิดสี (Colorimetric method)

วิธีนี้อาศัยหลักการการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลส-ไอโอดีนทำให้ได้สารประกอบสีน้ำเงิน จากนั้นวัดค่าสีน้ำเงินด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร สารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ไอโอดีนเกิดจากโครงสร้างเส้นตรงของแอมิโลส ซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นเส้นที่ขดเป็นเกลียวจับกับสารละลายไอโอดีนเกิดเป็นโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนและไม่เป็นของแข็งในสารละลาย (Juliano, 1971, pp. 334-340, 360; Keush, 2011, online; Virginia university, 2011, online) แสดงดังภาพที่ 2.2

การเรียงตัวของแอมิโลสในลักษณะที่เป็นเส้นขดเกลียวทำให้เกิดขั้วคู่ (Dipole) ไปตามแกนของขดเกลียวส่งผลให้เกิดขั้วคู่ของโมเลกุลดี-กลูโคส (D-glucose) แต่ละโมเลกุลในสายโซ่ ดังนั้น เมื่อโมเลกุลของสารละลายไอโอดีนเข้าไปในขดเกลียวจึงถูกเหนี่ยวนำทำให้เกิดสภาพมีขั้วด้วยคู่ที่แข็งแรงของโมเลกุลแอมิโลส ทั้งขั้วคู่ของแอมิโลสและสารละลายไอโอดีนจะทำปฏิกิริยากันภายใต้แรงของสภาพขั้วคู่ ขนาดของการเหนี่ยวนำขั้วคู่จะเพิ่มตามจำนวนโมเลกุลของสารละลาย

ไอโอดีนและการจัดเรียงในแนวขนาน รวมทั้งความเข้มข้นของไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) ของโมเลกุลแอมิโลสซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามความยาวโมเลกุล นอกจากนี้ยังพบว่าอะตอมของไอโอดีนจะถูกกำจัดอยู่ในส่วนกลางของขดเกลียวโดยตี-กลูโคส 6 โมเลกุล จับไอโอดีนไว้ได้ 1 โมเลกุล (Keush, 2011, online; Virginia university, 2011, online)



ภาพที่ 2.2 ลักษณะการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ไอโอดีน (ก) และการจับกับสารละลาย ไอโอดีนของโมเลกุลตี-กลูโคส

ที่มา: Keush (2011); Virginia university (2011)

การวิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลสวิธีนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน มีความยุ่งยากในการสร้างกราฟมาตรฐานก่อนการวิเคราะห์ และอาจเกิดการรบกวนจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโมเลกุลแอมิโลสจากโมเลกุลแอมิโลเพกทินในส่วนที่จับกันด้วยพันธะแอลฟา 1,4-กลูโคซิดิก ซึ่งสามารถรวมตัวกับสารละลายไอโอดีนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนแอมิโลส-ไอโอดีนได้เช่นเดียวกัน ทำให้ปริมาณแอมิโลสที่วิเคราะห์ได้จากวิธีนี้สูงกว่าปกติ (Gibson, Solah & McCleary, 1997, pp. 111-119)

2.2.2.2 การใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC)

การหาปริมาณแอมิโลสวิธีนี้จะคำนวณค่าปริมาณแอมิโลสจากพลังงานที่ใช้ในการละลายสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและไขมันซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำแบ่งถูกให้ความร้อนในสภาพที่มีไขมันมากเกินไปเพื่อให้แอมิโลสในแป้งทั้งหมดจับกับไขมัน พลังงานที่ใช้ในการละลายจะได้จากพื้นที่ใต้กราฟของพีคที่เกิดขึ้น วิธีนี้สะดวกและรวดเร็ว ให้ผลการทดลองที่ถูกต้องสำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550, หน้า 256)

2.2.2.3 การใช้ High Performance Size Chromatography (HPSEC)

วิธีนี้สามารถหาปริมาณแอมิโลสได้โดยอาศัยความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) ของตัวอย่าง โดยโมเลกุลที่มีขนาดแตกต่างกันเมื่อเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุด้วยวัสดุที่รูพรุน (Packing material) จะมีความสามารถในการแพร่ผ่านแตกต่าง

กัน โมเลกุลที่มีขนาดเล็กสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนและถูกกักไว้ทำให้ถูกชะออกมาได้ช้าที่สุด ส่วนโมเลกุลที่มีขนาดกึ่งกลางไม่ใหญ่มากนักจะแพร่ผ่านได้เฉพาะบางส่วนของรูพรุนและจะถูกกักจากรูที่เล็กมาก ๆ ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่มากจะไม่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้ จึงถูกชะออกมาจากคอลัมน์เป็นอันดับแรก (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550, หน้า 256)

2.2.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสด้วยวิธี Concanavalin-A (Con A)

การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสด้วยวิธี Concanavalin-A จะอาศัยหลักการตกตะกอนของแอมิโลเพกทินด้วยสาร Concanavalin-A ตามวิธีของ Gibson, Solah & McCleary (1997) ซึ่งสาร Concanavalin นี้เป็นสารโพลีแซคคาร์ไรด์ที่ประกอบด้วยสายโซ่กิ่งของ α -D-glucopyranosyl หรือ D-mannopyranosyl เป็นจำนวนมาก และที่ปลายสายประกอบด้วยน้ำตาลอนรีดิวซ์ (Non-reducing sugar) ซึ่งมีความจำเพาะต่อโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน และทำให้โมเลกุลของแอมิโลเพกทินตกตะกอน จากนั้นจึงนำสารละลายใสมาหาความเข้มข้นของปริมาณแอมิโลสในอัตราส่วนของ GOPOD ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 510 นาโนเมตร

การวิเคราะห์ทำได้โดยนำแป้งข้าวมาเติมสาร Dimethyl sulphoxide (DMSO) และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C นาน 15 นาที เติมเอทานอลความเข้มข้น 95% เพื่อกำจัดไขมันในแป้งข้าว จากนั้นเติมสาร Concanavalin-A และนำมาทำการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 2000g นาน 5 นาที เพื่อให้โมเลกุลของแอมิโลเพกทินตกตะกอน นำส่วนสารละลายใสใส่หลอดทดลองและเติม Sodium acetate buffer จำนวน 3 มิลลิลิตร ปิดฝา วางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) นาน 5 นาที เมื่อครบ 5 นาที นำสารละลายดังกล่าวในหลอดทดลองมาวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 40°C นาน 5 นาที จากนั้นเติมสารผสมระหว่าง Amyloglucosidase + α -amylase enzyme จำนวน 0.1 มิลลิลิตรและบ่มที่ 40°C นาน 30 นาที ทำการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 2000g นาน 5 นาที นำส่วนที่ได้ 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองเติม GOPOD reagent จำนวน 4 มิลลิลิตร และบ่มที่ 40°C นาน 20 นาที หลังจากนั้นจึงนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 510 นาโนเมตร การคำนวณหาปริมาณแอมิโลสคำนวณได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณแอมิโลส (\%)} &= \frac{\text{Absorbance Con A Supernatant} \times 6.15 \times 100}{\text{Absorbance Total starch aliquot} \times 9.2} \\ &= \frac{\text{Absorbance Con A Supernatant}}{\text{Absorbance Total starch aliquot}} \times 66.8 \end{aligned}$$

2.2.3 การวิเคราะห์ค่าความคงตัวของเจล

การวิเคราะห์ค่าความคงตัวของเจลจะอาศัยคุณสมบัติของแป้งสุกที่มีอัตราการคืนตัวหรือการเกิดรีโทรกราเดชันไม่เท่ากัน ทำให้เจลของแป้งสุกมีความแข็งและอ่อนแตกต่างกัน วิธีวิเคราะห์ทำได้โดยนำแป้งใส่ในหลอดทดลองที่มีเอทานอล ความเข้มข้น 95% เพื่อป้องกันแป้งจับตัวเป็นก้อนในขั้นตอนการเกิดเจลตาโนเซชัน เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.2 นอร์มัล และสารละลายไทมอลบลู (Thymol blue) เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตและวัดระยะเวลาการไหลของเจลแป้ง จากนั้นนำเจลแป้งสุกไปทำให้เย็นในน้ำแข็ง นาน 20 นาที เพื่อให้เจลแป้งสุกเกิดการคืนตัวและวัดระยะทางที่เจลแป้งสุกไหลหน่วยเป็นมิลลิเมตร (Cagampang, Perez & Juliano, 1973)

2.2.4 การวิเคราะห์หาค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง

การวิเคราะห์ทำได้โดยอาศัยความแตกต่างของการสลายเมล็ดข้าวที่มีเอนโดสเปิร์มแตกต่างกันระหว่างข้าวเหนียว (Glutinous rice) และข้าวเจ้า (Non-glutinous) ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1.7% นาน 23 ชั่วโมง (Prathepha *et al.*, 2005) หลังจากนั้นประเมินระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างด้วยสายตาของผู้ที่ผ่านการฝึกฝน (Visual observation) เปรียบเทียบกับลักษณะการสลายตัวของตัวอย่างเป็นช่วงคะแนนตั้งแต่ 1 – 7 (ระดับ 1 หมายถึง ลักษณะของเมล็ดข้าวไม่เปลี่ยนแปลงเลย และ 7 หมายถึง เมล็ดข้าวสลายตัวตลอดทั้งเมล็ดและมีลักษณะเป็นเมือกใส) (Little, Hilder & Dawson, 1958, pp. 111-126; งามชื่น คงเสรี, 2545, หน้า 106)

2.2.5 การวัดความหนืดของแป้ง

การตรวจวัดคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งทำได้หลายวิธีและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีหลักการทำงานและการอ่านค่าความหนืดแตกต่างกัน ดังนี้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550, หน้า 256)

2.2.5.1 การใช้เครื่องวัดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer)

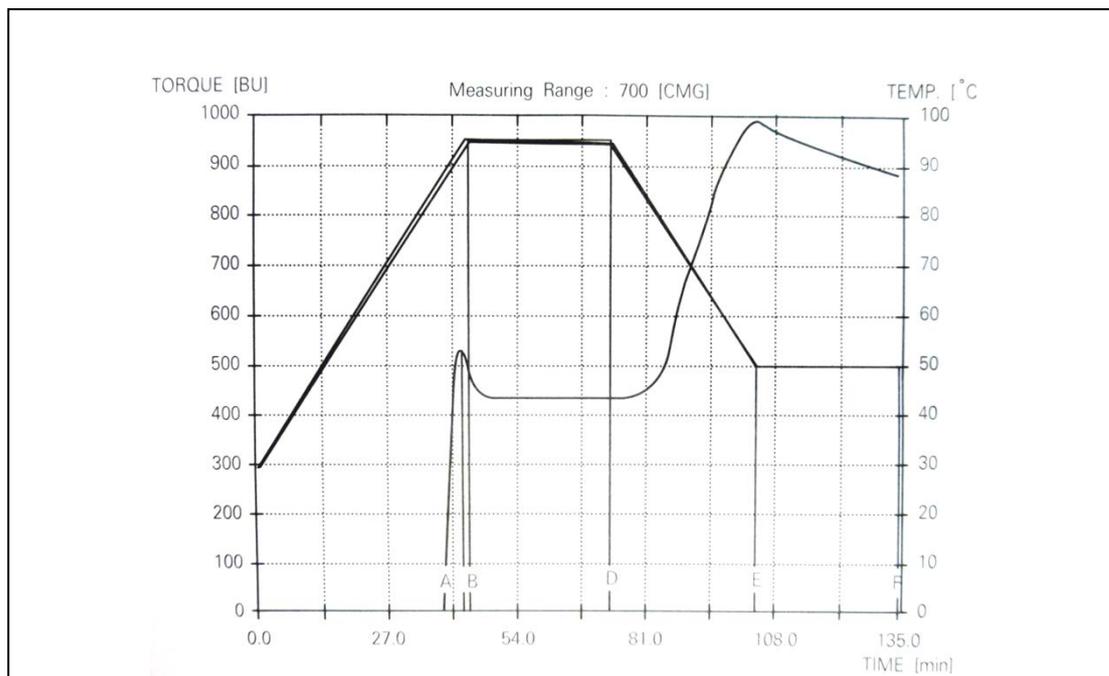
สามารถวัดความหนืดได้ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ การทำงานของเครื่องเกิดจากการหมุนของวัตถุทรงกระบอกหรือแผ่นจานในของเหลวด้วยอัตราเร็วคงที่ ค่าความหนืดของของเหลววัดได้จากค่าความต้านทานการหมุนของของเหลวที่อัตราเร็วคงที่ แรงต้านจะทำให้สปริงเกิดการยืดตัว โดยแสดงด้วยเข็มสีแดงบนหน้าปัดเครื่อง ค่านี้จะคูณด้วยค่าคงที่ตามความเร็ว ขนาดและชนิดของเครื่อง ค่าที่วัดได้จากเครื่องนี้จะมีหน่วยความหนืดของของเหลวเป็นเซนติพอยส์ (Centipoise)

2.2.5.2 การใช้เครื่องบราเบนเดอร์แอมิโกลกราฟ

เครื่องบราเบนเดอร์แอมิโกลกราฟเป็นวิธีที่นิยมแพร่หลาย หลักการทำงานคือการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งในระหว่างการทำให้ร้อนจนถึงขั้นการทำให้เย็น ติดตามผล และแสดงผลในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง มีหน่วยเป็น Brabender unit (BU) สามารถเปลี่ยนเป็นเซนติพอยส์ได้โดยเทียบความหนืดของสารละลายแป้งสุก 5% ความหนืด 500 BU เท่ากับ 2,700 เซนติพอยส์ ความหนืดค่าต่าง ๆ จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะที่สำคัญของแป้งแต่ละชนิด แสดงดังภาพที่ 2.3 โดยที่จุด A แสดงความหนืดเริ่มเกิดเจลาตินไนซ์ จุด B แสดงความหนืดสูงสุด ซึ่งเป็นความหนืดสูงสุดในช่วงการให้ความร้อนเป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ จุด C แสดงความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 95°C ซึ่งให้เห็นถึงความยากง่ายในการหุงต้ม จุด D แสดงความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 95°C ซึ่งให้เห็นถึงความคงตัวของเม็ดแป้ง จุด E แสดงความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 50°C ซึ่งให้เห็นถึงการเกิดรีโทรกราเดชันเนื่องจากการทำให้เย็น และจุด F แสดงความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 50°C ซึ่งให้เห็นถึงความคงตัวของน้ำแป้งสุกที่ผ่านการหุงต้ม และทิ้งไว้ให้เย็นแล้ว

เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนจะดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบเม็ดแป้งเหลือน้อยลงทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากเกิดความหนืดขึ้น อุณหภูมิที่กราฟเริ่มเกิดความหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (Pasting temperature) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุด เป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไปอีก รวมทั้งมีการกวนอย่างต่อเนื่องจะทำให้โครงสร้างภายในแตกออกความหนืดลดลง ต่อมาเมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้เกิดรีโทรกราเดชันส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มความหนืดที่เกิด

จากการเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลแอมิโลสที่หลุดออกจากเม็ดแป้ง กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550, หน้า 256)



ภาพที่ 2.3 ลักษณะกราฟของความหนืดเมื่อวัดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์วิสโคแอมิโลกราฟ
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2550, หน้า 256)

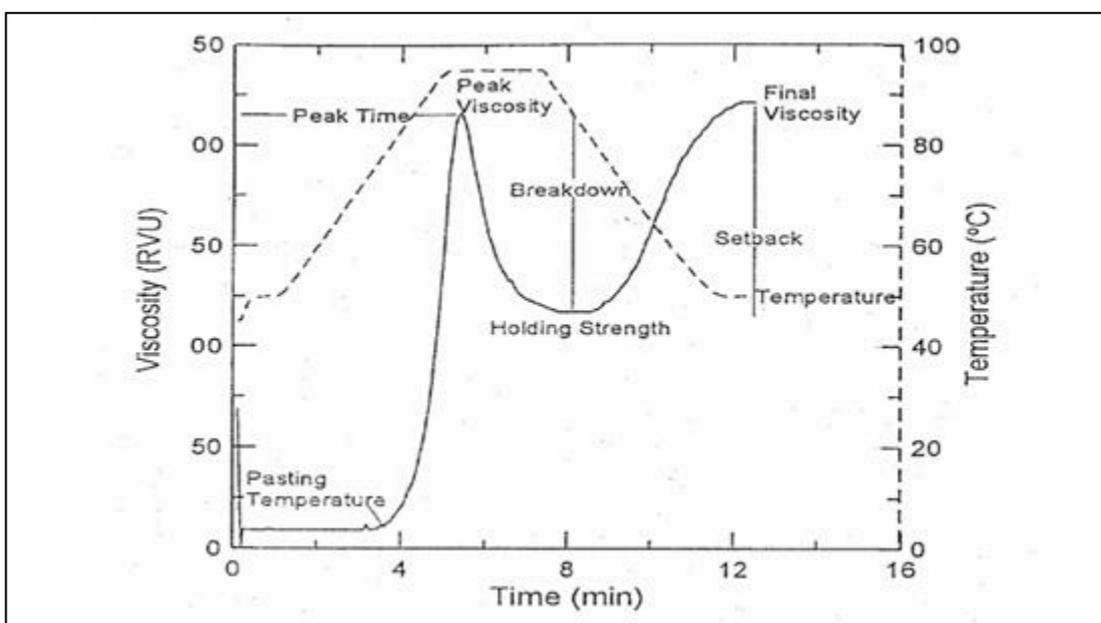
2.2.5.3 การใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ความหนืดของตัวอย่างที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีหลักการวัดค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเครื่องทำให้ส่วนผสมของตัวอย่างกับน้ำได้รับความร้อนจนเกิดความหนืดในขณะที่ย้อนขึ้นด้วยอัตราระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจนถึงอุณหภูมิสูงสุด (ประมาณ 95 °C) หลังจากนั้นก็จะคงอุณหภูมิที่สูงสุดนี้ไว้ระยะเวลาหนึ่งเพื่อวัดความคงทนของความหนืดต่อแรงเฉือนของเครื่อง จากนั้นจึงตรวจสอบค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเครื่องทำให้ส่วนผสมเย็นลงในอัตราระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่ลดลง ความเปลี่ยนแปลงของความหนืดทั้ง 3 ระยะ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2544, หน้า 2) ลักษณะกราฟของความหนืดเมื่อวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว แสดงดังภาพที่ 2.4

จากเส้นโค้งของความหนืด (Pasting curve) สามารถอธิบายค่าต่าง ๆ ที่อ่านได้จากเส้นโค้งของความหนืด เมื่อนำเม็ดสตาร์ชที่ผสมในน้ำมาให้ความร้อนจะเกิดกระบวนการเจลาติไนเซชัน ในขณะที่เม็ดสตาร์ชของตัวจะมีความหนืดเกิดขึ้นและความหนืดเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนของสตาร์ช เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและมีการกวนโดยพายตลอดเวลา ทำให้เม็ดสตาร์ชถูกทำลายและเกิดการกระจายตัวของแอมิโลส ทำให้เกิดผลรวมของกระบวนการเปลี่ยนแปลงต่อจากการเกิดเจลาติไนเซชัน เรียกว่า ความหนืด (Pasting) อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (Pasting temperature) วัดเมื่อความหนืดเริ่มที่ 2 RVU ความหนืดสูงสุด คือ จุดสมดุลระหว่างการพองตัวที่ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นกับการทำลายเม็ดสตาร์ชของเครื่องกวนที่ทำให้ความหนืดลดลง วัดค่าเป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความหนืด

สูงสุด (Peak temperature) และเวลาที่ความหนืดสูงสุด (Peak time) ที่เกิดขึ้นในขณะที่มีความหนืดสูงสุด (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2544, หน้า 2)

เมื่อคงอุณหภูมิไว้ระยะเวลาหนึ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวของแป้งสุก (Breakdown viscosity) โดยทั่วไปจะทำให้ความหนืดลดลงเนื่องจากอุณหภูมิ อัตราการกวน แรงที่ใช้ในการกวน และคุณสมบัติของเม็ดสตาร์ช เรียกว่า ความคงทนต่อการกวน (Shear-thinning, Holding strength, Hot paste viscosity, Trough) เมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสตาร์ชอีกครั้ง ขึ้นอยู่กับลักษณะของส่วนผสมว่าข้นมากหรือน้อย ถ้าข้นมากจะเกิดการรวมตัวเป็นเจลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเป็นความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้อธิบายลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ความหนืดเกิดขึ้นหลังการหุงต้มและทำให้เย็น ค่าความคงตัวของแป้งสุกหรือเซตแบค (Setback viscosity) เป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่คงทนต่อการกวน ค่าความคงตัวของแป้งสุกมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดรีโทรกราเดชัน จึงส่งผลโดยตรงต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2544, หน้า 2)



ภาพที่ 2.4 ลักษณะกราฟของความหนืดเมื่อวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว
ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2550, หน้า 250)

2.3 เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้

สเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้เป็นการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR radiation) ช่วงความยาวคลื่น 800 – 2,500 นาโนเมตร หรือ $12,500 - 4,000 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความถี่ซึ่งมีค่าเฉพาะ (Quantized frequency) กับพันธะเคมี (Chemical bond) ของโมเลกุลที่ประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจน (X-H) อะตอม X ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) เป็นต้น อันตรกิริยาดังกล่าวคือการที่โมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่มีความถี่ตรงกับความถี่ค่าเฉพาะจนทำให้เกิดการสั่นของพันธะเคมีในระดับโอเวอร์โทน (Overtone vibration) และคอมบิเนชัน (Combination vibration) ระดับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้

ของโมเลกุลที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ จะปรากฏในสเปกตรัม NIR เพื่อนำไปประมวลผลในการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพต่อไป (ศุมาพร เกษมสำราญ, 2552, หน้า 2-5)

การสั่นแบบโอเวอร์โทนเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้เข้าไปทำให้เกิดการแทนที่ชั้นเปลี่ยนระดับพลังงานการสั่นจากระดับพื้น (Ground state) ($v = 0$) ไปยังระดับกระตุ้นที่ (Excited state) 2, 3 ขึ้นไป จะได้พีค (Peak) ที่เรียกว่าแถบโอเวอร์โทนมีลักษณะความเข้มต่ำฐานกว้าง สำหรับการสั่นแบบคอมบิเนชันหรือแบบรวมเกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลหนึ่ง ๆ มีการสั่นได้หลายชนิดและเกิดขึ้นในเวลาพร้อมกัน บางครั้งการสั่นที่ต่างชนิดกันเกิดการรวมกันได้ดี จึงเกิดเป็นแถบคอมบิเนชันขึ้น โดยทั่วไปแถบโอเวอร์โทนจะมีความเข้มหรือการดูดกลืนต่ำ เมื่อเทียบกับพีคที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานพื้นฐาน ($v = 0 \rightarrow v = 1$) ถึง 10 และ 100 เท่าตัว โดยแถบโอเวอร์โทนอันดับหนึ่งมีความเข้มสูงสุด รองลงมาคือโอเวอร์โทนอันดับสอง และสาม ตามลำดับ ดังนั้นจะไม่สามารถสังเกตเห็นแถบโอเวอร์โทนอันดับที่สามขึ้นไป เนื่องจากมีความเข้มต่ำมาก (ศุมาพร เกษมสำราญ, 2552, หน้า 2-5) ความสัมพันธ์ระหว่างแถบในสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้กับหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) แสดงดังตารางที่ 2.9

2.3.1 การเกิดอันตรกิริยาของรังสีอินฟราเรดย่านใกล้กับสสาร

ศุมาพร เกษมสำราญ (2552) อธิบายการเกิดอันตรกิริยาของรังสีอินฟราเรดย่านใกล้กับสสารว่าเมื่อรังสีอินฟราเรดเดินทางผ่านเข้าไปยังสสาร รังสีบางส่วนจะถูกดูดกลืน (Absorption) เอาไว้ บางส่วนจะผ่านออกมา (Transmission) และบางส่วนเกิดการสะท้อน (Reflection) ปรากฏการณ์เหล่านี้จะเกิดเพียงอันใดอันหนึ่งหรือเกิดพร้อมกัน แสดงดังสมการที่ 1

$$I_0 = I_a + I_t + I_r \quad \text{สมการที่ 1}$$

ตารางที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแถบในสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้กับหมู่ฟังก์ชัน

| ความยาวคลื่น (นาโนเมตร) | จำนวนคลื่น (cm^{-1}) | หมู่ฟังก์ชัน | ย่านอันตรกิริยา | โมเลกุล |
|----------------------------|------------------------------------|--|--|--------------------------------|
| 1440 | 6944 | C-H methylene (CH_2) | C-H combination, C-H_2 | Hydrocarbon, aliphatic |
| 1441 | 6940 | O-H from sugar as crystalline sucrose | O-H (2ν) carbohydrates (C4 hydroxyl within a crystalline matrix) | Crystalline sucrose |
| 1450 | 6897 | O-H polymeric (O-H) | O-H (2ν), O-H | Starch/Polymeric alcohol/water |
| 1471 | 6798 | N-H amide with N-R group | N-H (2ν), CONHR | Amide/protein |
| 1490 | 6711 | N-H amide with N-R group | N-H (2ν), CONHR | Amide/protein |
| 1492 | 6702 | N-H amide NH or NH_2 | N-H (2ν), ArNH_2 | Amide/protein |
| 1510 | 6623 | N-H amide NH or NH_2 | N-H (2ν), CONH_2 | Amide/protein |
| 1520 | 6579 | N-H amide NH or NH_2 | N-H (2ν), CONH_2 | Amide/protein |
| 1550 | 6450-6250 | N-H from secondary amide in proteins | N-H (2ν) stretching from secondary amide In proteins | N-H from protein |
| 1790 | 5587 | O-H from water | O-H combination | Water |
| 1820 | 5495 | O-H/C-H combination | O-H stretching and C-O stretching ($3\nu_s$) combination | Cellulose |

ที่มา: Workmand & Weyer (2008, p. 239-262)

ตารางที่ 2.9 (ต่อ)

| ความยาวคลื่น (นาโนเมตร) | จำนวนคลื่น (cm^{-1}) | หมู่ฟังก์ชัน | ย่านอันตรกิริยา | โมเลกุล |
|----------------------------|------------------------------------|--|---|----------------------|
| 1940 | 5155 | O-H (H-O-H) water | O-H stretching and HOH bending combination | Water |
| 1960 | 5102 | O-H Polymeric (.O-H) | O-H stretching and HOH bending combination | Polysaccharides |
| 1980 | 5051 | N-H amide II (.CONH ₂) | N-H stretching and N-H in-plane bending combination | Amides/proteins |
| 2050 | 4878 | N-H/C-N/N-H amide II and amide III combination (.CONH) and (.CONH ₂) | N-H in-plane bend and C-N stretching and N-H in-plane bend combination | Amides/proteins |
| 2055 | 4866 | N-H/C=O amide as (.CoNH) and (.CONH ₂) | N-H stretching and C=O stretching (amide I) combination | Amides/proteins |
| 2060 | 4850 | N-H combination band from secondary amides in proteins | N-H [ν N-H and amide II deformation (N-H in-plane bending) combination] for secondary amides in proteins | N-H from protein |
| 2100 | 4761 | O-H/C-O polymeric (.O-H and .C-O) | O-H bending and C-O stretching combination | Polysaccharides |
| 2140 | 4673 | C-H/C=O lipid associated (.RC=CH and RC=O) | C-H stretching and C=O stretching combination and C-H deformation combination | Lipids |
| 2180 | 4587 | N-H proteins: N-H ($3\nu_B$) | N-H (3δ) | Proteins/amino acids |

ที่มา: Workmand & Weyer (2008, p. 239-262)

ตารางที่ 2.9 (ต่อ)

| ความยาวคลื่น (นาโนเมตร) | จำนวนคลื่น (cm^{-1}) | หมู่ฟังก์ชัน | ย่านอันตรกิริยา | โมเลกุล |
|----------------------------|------------------------------------|--|--|-----------------|
| 2180 | 4590 | N-H/C-N/C=O combination band from secondary amides in proteins | N-H/C-N/C=O[2 x amide I (2 ν C=O stretching) and amide III deformation (C-N stretching/N-H in-plane bending) combination] for secondary amides in proteins | Proteins |
| 2200 | 4545 | CHO carbohydrate (.CHO) | C-H stretching and C=O combination | Carbohydrates |
| 2270 | 4405 | O-H/C-H cellulose (.OH and .C-O) | O-H stretching and C-O stretching combination | Cellulose |
| 2273 | 4400 | O-H/C-O from glucose | O-H/C-O glucose absorption from O-H Stretching and C-O stretching combination | Glucose |
| 2280 | 4386 | C-H starch (.C-H and CH_2) | C-H stretching and CH_2 deformation | Polysaccharides |
| 2310 | 4239 | C-H (.C-H bending) | C-H (3 δ) | Lipids |
| 2322 | 4307 | C-H (.C-H and CH_2) | C-H stretching and CH_2 deformation combination | Polysaccharides |
| 2330 | 4292 | C-H (.C-H and CH_2) | C-H stretching and CH_2 deformation combination | Polysaccharides |
| 2335 | 4283 | C-H (.C-H and CH_2) | C-H stretching and CH_2 deformation combination | Polysaccharides |

ที่มา: Workmand & Weyer (2008, p. 239-262)

ตารางที่ 2.9 (ต่อ)

| ความยาวคลื่น (นาโนเมตร) | จำนวนคลื่น (cm^{-1}) | หมู่ฟังก์ชัน | ย่านอันตรกิริยา | โมเลกุล |
|----------------------------|------------------------------------|--|---|-----------------------------|
| 2380 | 4202 | C-H/C-C (.C-H and .C-C) | C-H stretching and C-C stretching combination | Lipids |
| 2470 | 4049 | C-H (.CH ₂) | C-H combination | Lipids, aliphatic compounds |
| 2470 | 4049 | C-N-C amide: (.C-N-C) | C-N-C (2V) | Proteins |
| 2500 | 4000 | C-H/C-C/C-O-C (.C-H and .C-C and .C-O-C) | C-H stretching and C-C and C-O-C Stretching combination | Polysaccharides |

ที่มา: Workmand & Weyer (2008, p. 239-262)

เมื่อสสารเกิดอันตรกิริยากับรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ ความเข้มของแถบการดูดกลืนใน NIR สเปกตรัมจะนิยมแสดงในรูปค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) แคนตั้ง และความยาวคลื่น (Wavelength) (แคนนอน) ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสาร ดังนี้

$$\text{กรณีวัดแสงส่องผ่าน} \quad A = \epsilon bc = \log (1/T) = \log (I_0/I_t) \quad \text{สมการที่ 2}$$

$$\text{กรณีวัดแสงสะท้อน} \quad A = \epsilon bc = \log (1/R) = \log (I_0/I_r) \quad \text{สมการที่ 3}$$

| | | | |
|-------|------------|-----|--|
| เมื่อ | A | คือ | ค่าการดูดกลืนแสง |
| | ϵ | คือ | สภาพดูดกลืนโมลาร์ (Molar absorptivity) เป็นค่าคงที่ของแต่ละสาร |
| | b | คือ | ความหนาของตัวอย่าง |
| | c | คือ | ความเข้มข้นของสารที่ดูดกลืนแสง |
| | T | คือ | แสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่าง |
| | R | คือ | แสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่าง |
| | I_0 | คือ | ความเข้มแสงที่ตกกระทบตัวอย่าง |
| | I_t | คือ | ความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่าง |
| | I_r | คือ | ความเข้มแสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่าง |

โดยทั่วไปการใช้ประโยชน์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ คือ การวิเคราะห์ในเชิงปริมาณเพื่อหาความเข้มข้นของตัวอย่างหรือสารที่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ได้ สมการที่ 2 และ 3 จึงสามารถจัดเรียงใหม่ได้เป็น

$$c = A/\epsilon b = \log (1/T)\epsilon b = \log (1/R) / \epsilon b \quad \text{สมการที่ 4}$$

ค่า ϵ และ b เป็นค่าคงที่ในกรณีวัดสารละลาย หากวัดของแข็งที่มีขนาดอนุภาค ค่า b จะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคเฉลี่ย เนื่องจากแสงเดินทางผ่านเข้าไปในตัวอย่างไม่ด้วยระยะทางไม่คงที่ ดังนั้น ตัวอย่างลักษณะนี้จึงไม่เป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต การควบคุม b ให้คงที่ คือ การบดตัวอย่างหรือคัดขนาดตัวอย่างให้มีขนาดเท่ากันเพื่อลดอิทธิพลที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์หาปริมาณสารมักทำให้อยู่ในรูปสมการของผลการวิเคราะห์จากตัวอย่างมาตรฐานหรือตัวอย่างชุดสร้างสมการ (Calibration sample) จำนวนหลายตัว และเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$C = B_0 + B_i A_i = B_0 + B_i \log (1/T_i) = B_0 + B_i \log (1/R_i) \quad \text{สมการที่ 5}$$

| | | | |
|-------|-------|-----|--|
| เมื่อ | B_0 | คือ | ค่าตัดจุดแกน y (intercept) ของสมการ |
| | B_i | คือ | สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ที่ตำแหน่ง i |

2.3.2 การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์

รังสีอินฟราเรดย่านใกล้สามารถส่องผ่านตัวอย่างแบบสะท้อนกลับ (Reflectance) แบบส่องผ่าน (Transmittance) หรือแบบการสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse transmittance) ส่งผลให้ข้อมูลสเปกตรัมของ NIR มีความซับซ้อนและแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง ความยาวคลื่น ความชื้นในตัวอย่าง อุณหภูมิของตัวอย่าง และขนาดอนุภาคของตัวอย่าง (Particle size) เป็นต้น ปัจจัยดังกล่าวมีผลทำให้สเปกตรัมซ้อนทับกัน (Overlapping) หรือทำให้สเปกตรัมเปลี่ยนแปลงเลื่อนขึ้นลง (Baseline shift) และส่งผลโดยตรงต่อการทำสมการแคลิเบรชัน (Calibration equation) (Nicolai *et al.*, 2007, pp. 99-108; Workmand & Weyer, 2008, p. 10) ดังนั้น การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการทำสมการแคลิเบรชันจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความแม่นยำของสมการแคลิเบรชัน การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์มีหลายวิธี อาทิเช่น การแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์ (Derivative transformation) การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (Multiplicative scatter correction; MSC) วิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard normal variate; SNV) (Rinnan *et al.*, 2009, p. 29-48)

2.3.2.1 การแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์

การหาค่าอนุพันธ์ของสเปกตรัมเป็นวิธีที่ใช้ประโยชน์ในการแก้ปัญหาการซ้อนทับกันของจุดยอดในสเปกตรัมและการเลื่อนขึ้นของสเปกตรัมทั้งแบบเบสไลน์ออฟเซต (Baseline offset) และเบสไลน์ชิฟต์เชิงเส้น (Linear baseline shift) การคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสอง (Second derivative) ของสเปกตรัม จะทำให้เกิดการแยกของจุดยอดที่เหลื่อมซ้อนกันออกมา การแปลงค่าเป็นอนุพันธ์อันดับสองจะช่วยลดผลกระทบจากการกระเจิงแสงทั้งที่เป็นผลเชิงบวก (Additive effect) ที่ทำให้ขนาดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่นในลักษณะที่เป็นการบวกเพิ่มด้วยค่าบนเส้นตรงที่เป็นมุมเอียง ซึ่งค่าบวกจะเพิ่มน้อยกว่าที่ความยาวคลื่นสั้นและค่าบวกเพิ่มจะสูงที่ความยาวคลื่นสูง และผลเชิงคูณ (Multiplicative effect) ที่ทำให้ขนาดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นในลักษณะที่มีค่าคงที่มากคุณค่าการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่นโดยจะลดผลกระทบหลักจากผลเชิงบวก การคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสองสามารถคำนวณได้จากสมการ (อนุพันธ์ เทอตวงศ์วรกุล, 2552, หน้า 5-1 ถึง 5-23, 2552 ; Rinnan *et al.*, 2009, p. 29-48)

$$\left[\frac{d^2 \log\left(\frac{1}{R}\right)}{d^2 \lambda} \right]_{\lambda-\lambda_i} = c [\log(1/R_{\lambda_i-j}) - 2\log(1/R_{\lambda_i}) + \log(1/R_{\lambda_i+j})]$$

2.3.2.2 การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ

เป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อลดผลที่เกิดจากการกระเจิงแสง (Scattering light) ต่อสเปกตรัมที่ได้จากการวัดแบบการสะท้อนการแพร่ (Diffuse reflectance) และแบบส่องผ่าน โดยทั่วไปการกระเจิงแสงจะทำให้ความชันโดยรวมของสเปกตรัมเปลี่ยนไป ซึ่งเปรียบเสมือนว่าสเปกตรัมถูกทำให้หมนรอบจุดที่ความยาวคลื่นต่ำที่สุดของสเปกตรัม (Multiplicative effect) การปรับแก้ด้วยวิธีการกระเจิงแบบผลคูณมีขั้นตอนที่สำคัญ คือ ขั้นตอนแรกต้องนำสเปกตรัมของตัวอย่างทั้งหมดมาเฉลี่ยเพื่อให้ได้สเปกตรัมเฉลี่ยก่อน จากนั้นนำค่า $\log(1/R)$ หรือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่แต่ละความยาวคลื่นของแต่ละตัวอย่างมาพลอตกับค่า \log

(1/R) ของสเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างทั้งหมดทุกความยาวคลื่นซึ่งจะได้เส้นตรงที่มีความชันไม่เท่ากับหนึ่ง ขั้นตอนที่สอง คือ หมุนสเปกตรัมของแต่ละตัวอย่างมาให้ตรงกับสเปกตรัมเฉลี่ย ขั้นตอนการหมุนดังกล่าวทำได้โดยการหาค่าคงที่ค่าหนึ่งมาลบออกจากสเปกตรัมเพื่อลดผลจากการเลื่อนตัวของสเปกตรัม และต้องหาค่าคงที่อีกค่าหนึ่งมาหารค่าการดูดกลืนแสงของทุก ๆ จุด (ความยาวคลื่น) ของตัวอย่างเพื่อปรับความชันของสเปกตรัมที่เปลี่ยนไป (อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, 2552, หน้า 5-1 ถึง 5-23)

2.3.2.3 วิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

ตัวอย่างที่ถูกวัดด้วยวิธีการสะท้อนแบบแพร่โดยทั่วไปจะทำให้เกิดสเปกตรัมที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของอนุภาคในตัวอย่าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกระเจิงแสงที่สูงและเป็นสาเหตุให้เกิดความแปรปรวนส่วนใหญ่ในข้อมูลที่วัดได้ กระบวนการปรับแก้แบบปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานจะแตกต่างจากวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ โดยไม่จำเป็นต้องใช้สเปกตรัมอ้างอิงเหมือนในวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณที่ต้องใช้สเปกตรัมเฉลี่ยเป็นค่าอ้างอิง ในวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานสเปกตรัมแต่ละเส้นจะถูกปรับแก้โดยปรับค่าการดูดกลืนให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน (Normalization) คล้ายกับการคำนวณค่ามาตรฐานหรือค่า Z ในทางสถิติ โดยปรับแก้ให้ค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมมีค่าเป็นศูนย์ด้วยการนำค่าเฉลี่ยของสเปกตรัม (ค่าการดูดกลืนแสง) ของตัวอย่างนั้น มาลบออกจากค่าสเปกตรัมที่แต่ละความยาวคลื่นตลอดช่วง และปรับแก้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานให้เท่ากับหนึ่ง โดยนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณจากค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมตลอดช่วงมาหารค่าสเปกตรัมหรือค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความยาวคลื่น (อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, 2552, หน้า 5-1 ถึง 5-23)

2.3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีของอินฟราเรดย่านใกล้

ข้อมูลที่ได้จากเครื่องสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ จะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการดูดกลืนแสง หรือที่เรียกว่า “สเปกตรัม” ซึ่งข้อมูลดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ต้องการทราบได้ทันที ในการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัมที่ได้ รวมทั้งหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปกตรัมที่ได้กับค่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ในการวิเคราะห์ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ 2 ขั้นตอน คือ การสร้างสมการที่ใช้ทำนายค่าคุณภาพองค์ประกอบที่ต้องการทราบ (Calibration) และการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้น (Validation) (ธงชัย สุวรรณสิขณน์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช, 2552, หน้า 6-1 ถึง 6-33) วิธีการทางคณิตศาสตร์สำคัญที่ใช้ในการสร้างสมการแคลิเบรชันได้แก่ การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple linear regression; MLR) การถดถอยโดยใช้องค์ประกอบหลัก (Principal components regression; PCR) การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial least square regression; PLSR) การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis; PCA) และการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มด้วยการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial least square-discriminant analysis; PLS-DA) เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึง

เฉพาะวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก และการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มด้วยการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งใช้ในการวิจัยครั้งนี้เท่านั้น

2.3.3.1 การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน

การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนในที่นี้จะเรียกว่า “PLSR” เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หลายตัวแปร (Multivariate analysis) ที่สามารถลดจำนวนตัวแปรได้ นิยมใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ สมการของ PLSR ประกอบด้วยตัวแปรอิสระ (Independent variables) หรือตัวแปร X (X variables) เป็นค่าที่อ่านได้จากสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ (ค่า $\log 1/R$, ค่า ΔOD) และตัวแปรตาม (Dependent variables) หรือ ตัวแปร Y (Y variables) หมายถึง ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (ปริมาณความชื้น ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน ปริมาณแอมิโลส เป็นต้น) (Williams, 2007) การสร้างสมการ PLSR นั้น จะทำการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) โดยในช่วงจัดกลุ่มการลดจำนวนตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) จะต้องมีการสร้างตัวแปรใหม่ ที่เรียกว่า “ค่าคะแนนปัจจัย” (Factor loading) หรือ “แพกเตอร์” โดยนำข้อมูลของตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) เข้ามารวมในการสร้างแพกเตอร์ด้วย โดยค่าคะแนนปัจจัยหรือแพกเตอร์ที่สร้างขึ้นมานี้จะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามเสมอ สมการของ PLSR สามารถเขียนได้ดังนี้ (Liu & He, 2008, pp. 562-567; ธงชัย สุวรรณสิขณน์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช, 2552, หน้า 6-1 ถึง 6-33)

$$Y = k_0 + k_1F_1 + k_2F_2$$

การพิจารณาความเหมาะสมของสมการจะพิจารณาจากค่าทางสถิติที่สำคัญ อาทิเช่น ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient; R) คือ ค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) และตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ค่า Standard Error of Calibration (SEC) คือ ค่าที่บอกถึงความสามารถของสมการที่สร้างขึ้นว่ามีความเหมาะสมในการนำไปใช้ทำนายค่าทางเคมีหรือไม่ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย สำหรับการตรวจสอบว่าสมการที่สร้างขึ้นมานั้นสามารถนำมาทำนายข้อมูลชุดอื่นที่เป็นประชากรกลุ่มเดียวกันได้หรือไม่ จะพิจารณาจากค่า Standard Error of Prediction (SEP) คือ ค่าที่บอกถึงการนำเอาสมการที่สร้างขึ้นมาทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากเครื่องสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ว่ามีความแม่นยำสูงหรือต่ำ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย และค่า Bias เป็นค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ทำนายได้จากสมการที่สร้างขึ้นกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริง ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย เช่นเดียวกัน (Romía & Bernárdez, 2009, pp. 51-79; ธงชัย สุวรรณสิขณน์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช, 2552, หน้า 6-1 ถึง 6-33)

2.3.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

ธงชัย สุวรรณสิขณน์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช (2552) อธิบายถึงการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก หรือ PCA ว่าเป็นวิธีการหนึ่งทางสถิติในการวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัว โดยใช้เทคนิคการลดจำนวนตัวแปรอิสระด้วยการแบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่ที่เรียกว่า “ปัจจัย หรือ องค์ประกอบ” (Factors or Principal Components; PCs: สมมติว่ามีตัวแปรใหม่ทั้งสิ้น k ตัว ได้แก่ F_1, F_2, \dots, F_k) ซึ่งเป็นผลรวมเชิงเส้น (Linear combination)

ของผลคูณค่าตัวแปรอิสระเดิมที่ได้มาจากข้อมูลสเปกตรัมทั้งหมด (Original measurements: สมมติว่ามีตัวแปรเดิมทั้งสิ้น p ตัว หรือ p ความยาวคลื่น ได้แก่ X_1, X_2, \dots, X_p) กับสัมประสิทธิ์ในการถ่วงน้ำหนักตัวแปร (Factor loadings ที่ให้กับตัวแปรเดิมเพื่อนำมาสร้างตัวแปรใหม่ ได้แก่ $w_{11}, w_{12}, \dots, w_{kp}$) ดังแสดงในสมการ โดยที่จำนวนตัวแปรใหม่ที่เรียกว่าปัจจัยหรือองค์ประกอบหลักจะต้องมีจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับตัวแปรเดิม

$$F_1 = w_{11} * X_1 + w_{12} * X_2 + w_{13} * X_3 + \dots + w_{1p} * X_p$$

$$F_2 = w_{21} * X_1 + w_{22} * X_2 + w_{23} * X_3 + \dots + w_{2p} * X_p$$

.....

.....

$$F_k = w_{k1} * X_1 + w_{k2} * X_2 + w_{k3} * X_3 + \dots + w_{kp} * X_p$$

การอธิบายผลที่ได้จากการสร้างสมการนั้น สามารถอธิบายจากค่าน้ำหนักปัจจัย (PCA loading) และค่าคะแนนปัจจัย (PCA score) โดยที่ค่าน้ำหนักปัจจัยใช้ในการอธิบายโครงสร้างของข้อมูลในรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปร (Variable correlation) โดยแต่ละตัวแปรเดิมจะมีค่าน้ำหนัก (Loading) ในแต่ละ PC ซึ่งค่าน้ำหนัก คือ ค่าโคไซน์ (Cosine) ของมุมระหว่างตัวแปรกับ PC นั้น ๆ (มุมที่แคบจะมีค่าน้ำหนักสูง) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง +1 ถ้าตัวแปร 2 ตัวแปรมีค่าน้ำหนักสูงอยู่บนแกน PC เดียวกัน นั่นแสดงว่าทั้งสองตัวแปรนั้นมีความสัมพันธ์กันสูง โดยทิศทางของความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของค่าน้ำหนัก โดยถ้ามีเครื่องหมายบวกแสดงว่ามีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน และถ้ามีเครื่องหมายลบแสดงว่ามีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกัน

ในขณะที่ค่าคะแนนปัจจัย จะใช้ในการอธิบายโครงสร้างของข้อมูลในรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวอย่าง (Sample pattern) ซึ่งจะแสดงถึงความคล้ายหรือความแตกต่างของตัวอย่าง โดยแต่ละตัวอย่างจะมีค่าคะแนน (Score) ในแต่ละ PC ซึ่งค่าเหล่านี้จะแสดงให้เห็นตำแหน่งของตัวอย่างตามแกน PC โดยตัวอย่างที่มีค่าคะแนนใกล้เคียงกันในแกน PC เดียวกัน จะมีความคล้ายกัน นั่นแสดงว่าตัวอย่างที่คล้ายกันเหล่านี้จะมีค่าของตัวแปรเดิมบางตัวที่ใกล้เคียงกันด้วย ในทางกลับกันตัวอย่างที่มีค่าคะแนนแตกต่างกันมากจะมีค่าของตัวแปรเดิมนั้นแตกต่างกันด้วย จาก การอธิบายผลด้วยค่าคะแนนปัจจัยทำให้การสร้างสมการด้วยวิธี PCA สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์จำแนกกลุ่มได้

2.3.4 การประยุกต์ใช้สเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการตรวจสอบคุณภาพข้าวและผลิตภัณฑ์

ปัจจุบันนี้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบและประเมินคุณภาพข้าวแทนการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีอย่างแพร่หลาย รายงานวิจัยที่ใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการตรวจสอบคุณภาพข้าว แสดงดังตารางที่ 2.10 พบว่าเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบคุณภาพข้าว ดังจะเห็นได้จาก Delwiche *et al.* (1995) ศึกษาหาปริมาณแอมิโลสในแป้งข้าวด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบสะท้อนกลับ วิเคราะห์ผลด้วยวิธีทางสถิติ PLSR ที่ความยาวคลื่น 1,100-2,498 นาโนเมตร ผลการศึกษาพบว่าสมการที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ทำนายแอมิโลสมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.95 และ

มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.0 ต่อมาในปี 1996 Delwiche, McKenzie & Webb ศึกษาคุณภาพข้าวขาวขนาดเต็มเมล็ดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบสะท้อนกลับที่ความยาวคลื่น 400-2,498 นาโนเมตร วิเคราะห์ผลด้วยวิธีทางสถิติ PLSR ที่ความยาวคลื่น 1,100-1,800 นาโนเมตร พบว่าสมการที่สร้างขึ้นสำหรับใช้ทำนายปริมาณแอมิโลสมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.887 และค่าความคลาดเคลื่อนจากการตรวจสอบสมการที่สร้างขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.33% จากตัวอย่างทั้งหมด 95 ตัวอย่าง

Shimizu *et al.* (1998) วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสในข้าวขาวขนาดเต็มเมล็ดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีย่านใกล้อินฟราเรด และวิเคราะห์ผลด้วย PLSR ผลการทดลองพบว่าสมการสามารถนำมาใช้ตรวจสอบปริมาณแอมิโลส ปริมาณโปรตีน และความชื้นได้อย่างแม่นยำ แต่ไม่สามารถตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวได้ Wu & Shi (2004) ทำนายน้ำหนักเมล็ดข้าว น้ำหนักเมล็ดข้าวกล้อง และปริมาณแอมิโลสในข้าวแบบวัดที่ละเมล็ด ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบสะท้อนกลับ ผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการทำนายน้ำหนักเมล็ดข้าว น้ำหนักเมล็ดข้าวกล้อง และปริมาณแอมิโลสมีค่าเท่ากับ 0.85 0.71 และ 0.67 ตามลำดับ นอกจากนี้ Wu & Shi (2006) ประเมินคุณลักษณะการหุงต้มของข้าวสุกด้วยเทคนิคนี้พบว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมในการนำไปทำนายค่าปริมาณแอมิโลส ความคงตัวของเจล และค่าการสลายเมล็ดในต่าง

นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังสามารถนำมาใช้ตรวจสอบคุณภาพการหุงต้ม รับประทาน และการแปรรูปข้าวได้อีกด้วย โดยเฉพาะลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก Windham *et al.* (1997) นำเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้มาทำนายลักษณะของข้าวสุกที่ระดับการขัดสีต่างกัน ผลการทดลองพบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคนี้มาตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัส แต่บางคุณลักษณะของเนื้อสัมผัสข้าวสุกมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำ Champagne *et al.* (2001) ทำนายลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ โดยให้ค่าคะแนนการทดสอบชิมของผู้ทดสอบชิมเนื้อสัมผัสของข้าวสุกด้วยวิธี Descriptive analysis เป็นตัวแปรอิสระ และข้อมูลการดูกลิ่นแสงเป็นตัวแปรตาม เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ด้วยวิธีทางสถิติ PLSR พบว่าสมการที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ทำนายค่าความแข็ง ความเหนียว และการยึดเกาะกันของข้าวสุกมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง 0.71-0.96

ตารางที่ 2.10 รายงานวิจัยการใช้เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการตรวจสอบคุณภาพข้าว

| คุณภาพข้าว | ลักษณะตัวอย่าง | วิธีการมาตรฐาน (Referene method) | ผลการวิจัย | รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.) | รายการอ้างอิง |
|-----------------|---|--|---|--|--------------------------------|
| คุณภาพการสี | | | | | |
| - ระดับการขัดสี | ข้าวสาร | ไขมันที่ผิว, ไขมันทั้งหมด ปริมาณรำที่ถูกกำจัด | <u>MLR</u> : SEE = 0.112, $r^2 = 0.98$ | NIR: 800 – 1,800 | Stermer <i>et al.</i> (1977) |
| - ระดับการขัดสี | ข้าวกล้อง, ข้าวสาร | ปริมาณรำที่ถูกกำจัด | <u>MLR</u> : SEE = 0.569, $r^2 = 0.988$ SEP = 0.744, $r^2 = 0.985$ <u>PLS</u> : SEE = 0.511, $r^2 = 0.992$ SEP = 1.07, $r^2 = 0.965$ | NIR: 1100 – 2500 | Wadsworth <i>et al.</i> (1994) |
| - ระดับการขัดสี | ข้าวสารเมล็ดสั้น, กลาง, และยาว (n=196) | Milling meter | <u>PLS</u> : SEP = 2.7, $r^2 = 0.969$ | NIR: 450 – 1,048 | Delwiche <i>et al.</i> (1996) |
| - ค่าความขาว | ข้าวสารเมล็ดสั้น, กลาง, และยาว (n=196) | Milling meter | <u>PLS</u> : SEP = 0.60, $r^2 = 0.966$ | NIR: 450 – 1,048 | Delwiche <i>et al.</i> (1996) |
| - ค่าความมัน | ข้าวสารเมล็ดสั้น, กลาง, และยาว (n=196) | Milling meter | <u>PLS</u> : SEP = 0.15, $r^2 = 0.927$ | NIR: 450 – 1,048 | Delwiche <i>et al.</i> (1996) |
| - ระดับการขัดสี | ข้าวสารและแป้งข้าว (n=120) | Milling meter | <u>PLS</u> : Milled rice: SECV = 4.2-6.3 Rice flour : SECV = 8.2 Milled rice : SECV = 4.29-9.90 | NIR: 750 – 1,050 NIR: 750 – 1,050 NIT: 750 – 1,050 | Barton <i>et al.</i> (1998) |
| - ค่าความขาว | ข้าวสารและแป้งข้าว (n=120) | Milling meter | <u>PLS</u> : Milled rice: SECV = 0.98-1.28 Rice flour : SECV = 1.90 Milled rice: SECV = 1.01-4.43 | NIR: 750 – 1,050 NIR: 750 – 1,050 NIT: 750 – 1,050 | Barton <i>et al.</i> (1998) |

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

| คุณภาพข้าว | ลักษณะตัวอย่าง | วิธีการมาตรฐาน (Reference method) | ผลการวิจัย | รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.) | รายงานการวิจัย |
|-----------------|--|--------------------------------------|--|--|--------------------------------|
| - ค่าความมัน | ข้าวสารและแป้งข้าว (n=120) | Milling meter | PLS: Milled rice: SECV = 0.14-0.19 Rice flour : SECV = 0.2 Milled rice: SECV = 0.19-0.21 | NIR: 750 – 1,050 NIR: 750 – 1,050 NIT: 750 – 1,050 | Barton <i>et al.</i> (1998) |
| - ระดับการขัดสี | ข้าวสารและแป้งข้าว (n=96) | Milling meter | PLS: Milled rice: SECV = 3.13 Rice flour : SECV = 7.69 Milled rice: SECV = 6.01 | NIR: 400 – 2,498 NIR: 400 – 2,498 NIT: 850 – 1,050 | Barton <i>et al.</i> (2000) |
| - ค่าความขาว | ข้าวสารและแป้งข้าว (n=96) | Milling meter | PLS: Milled rice: SECV = 0.71 Rice flour : SECV = 1.76 Milled rice: SECV = 1.54 | NIR: 400 – 2,498 NIR: 400 – 2,498 NIT: 850 – 1,050 | Barton <i>et al.</i> (2000) |
| - ค่าความมัน | ข้าวสารและแป้งข้าว (n=96) | Milling meter | PLS: Milled rice: SECV = 0.20 Rice flour : SECV = 0.22 Milled rice: SECV = 0.24 | NIR: 400 – 2,498 NIR: 400 – 2,498 NIT: 850 – 1,050 | Barton <i>et al.</i> (2000) |
| - ค่าความขาว | ข้าวกล้องเมล็ดสั้น, ข้าวสาร (n=61) | Milling meter | PLS: Brown rice: SECV = 0.52, r = 0.78 Brown rice: SECV = 0.62, r = 0.66 Milled rice: SECV = 0.71, r = 0.87 Milled rice : SECV = 0.88, r = 0.79 | NIR: 800 – 1,098 NIR: 1,100 – 2,498 NIR: 800 – 1,098 NIR: 1,100 – 2,498 | Natsuga and Kawamura (2006) |
| - ค่าความมัน | ข้าวกล้องเมล็ดสั้น, ข้าวสาร (n=61) | Milling meter | PLS: Brown rice: SECV = 6.02, r = 0.82 Brown rice: SECV = 6.63, r = 0.78 Milled rice: SECV = 4.10, r = 0.89 Milled rice : SECV = 6.08, r = 0.75 | NIR: 800 – 1,098 NIR: 1,100 – 2,498 NIR: 800 – 1,098 NIR: 1,100 – 2,498 | Natsuga and Kawamura (2006) |

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

| คุณภาพข้าว | ลักษณะตัวอย่าง | วิธีการมาตรฐาน (Reference method) | ผลการวิจัย | รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.) | รายการอ้างอิง |
|--------------------|---|--------------------------------------|---|--|--------------------------------|
| ปริมาณความชื้น (%) | ข้าวกล้อง, ข้าวสาร (n=125) | ตู้อบลมร้อนที่ 135°C นาน 3 ชม. | <u>PLS</u> : Brown rice: SEP = 0.12, r = 0.990 Milled rice: SEP = 0.17, r = 0.978 | NIT: 825 – 1,075 | Shimizu <i>et al.</i> (1998) |
| | ข้าวเปลือก (n=150) | AOAC (ตู้อบลมร้อน) | <u>PLS</u> : Rough rice: SEP = 0.70, r ² = 0.96 | NIT: 400 – 2,498 | Kawamura <i>et al.</i> (1997) |
| | ข้าวเปลือก, ข้าวกล้อง | AOAC (ตู้อบลมร้อน) | <u>PLS</u> : Rough rice: SEP = 0.70, r ² = 0.96 Brown rice: SEP = 0.50, r ² = 0.97 | NIR: 400 – 2,498 | Kawamura <i>et al.</i> (2003) |
| | ข้าวกล้องที่ละเมียด (n=100) | ตู้อบลมร้อนที่ 135°C นาน 15 ชม. | <u>PLS</u> : SEP = 0.29, r = 0.99 SEP = 0.24, r = 0.99 | NIT: 800 – 1,000 NIT: 1,300 – 1,500 | Rittiron <i>et al.</i> (2004) |
| | ข้าวกล้องเมล็ดสั้น, ข้าวสาร (n=61) | ตู้อบลมร้อนที่ 135°C นาน 24 ชม. | <u>PLS</u> : Brown rice: SECV = 0.15, r = 0.98 Brown rice: SECV = 0.19, r = 0.97 Milled rice: SECV = 0.16, r = 0.96 Milled rice: SECV = 0.19, r = 0.99 | NIR: 800 – 1,098 NIR: 1,100 – 2,498 NIR: 800 – 1,098 NIR: 1,100 – 2,498 | Natsuga and Kawamura (2006) |
| ปริมาณโปรตีน (%) | ข้าวสาร (n=130) | ตู้อบลมร้อนที่ 105°C นาน 72 ชม. | <u>MLR</u> : SEC = 0.329, r ² = 0.975, RPD=5.5 <u>PLS</u> : SEP = 0.245, r ² = 0.987, RPD = 8.2 | NIR: 960, 930, 980 NIR: 930 – 1,014 | Lin <i>et al.</i> (2006) |
| | แป้งข้าว, ข้าวเมล็ดยาว, ข้าวเมล็ดสั้น (n=97) | Combustion method (N x 5.95) | <u>PLS</u> : SEP = 0.107, r ² = 0.989 | NIR: 1,100 – 2,498 | Delwiche <i>et al.</i> (1995) |
| | ข้าวสารเมล็ดยาว, ปานกลางและสั้น (n=95) | Combustion method (N x 5.95) | <u>PLS</u> : SEP = 0.13, r ² = 0.966 | NIR: 1,180 – 1,800 | Delwiche <i>et al.</i> (1996) |

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

| คุณภาพข้าว | ลักษณะตัวอย่าง | วิธีการมาตรฐาน (Reference method) | ผลการวิจัย | รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.) | รายการอ้างอิง |
|------------|--|--------------------------------------|--|--|----------------------------------|
| โปรตีน (%) | ข้าวสาร, แป้งข้าว (n=120) | Kjeldahl method (N x 5.95) | <u>PLS</u> : Milled rice: SECV = 0.22-1.12 Rice flour: SECV = 0.15 Milled rice: SECV = 0.18-0.21 | NIR: 1,100 – 2,500 NIR: 1,100 – 2,500 NIT: 1,100 – 2,500 | Barton <i>et al.</i> (1998) |
| | ข้าวกล้อง, ข้าวสาร (n=125) | Kjeldahl method (N x 5.95) | <u>PLS</u> : Brown rice: SEP = 0.19, r = 0.943 Milled rice: SEP = 0.16, r = 0.961 | NIT: 825 – 1,075 NIT: 825 – 1,075 | Shimizu <i>et al.</i> (1998) |
| | ข้าวเปลือก (n=150) | Kjeldahl method (N x 5.95) | <u>PLS</u> : Brown rice: SEP = 0.24, r ² = 0.70 Milled rice: SEP = 0.22, r ² = 0.76 | NIT: 400 – 2,498 NIT: 400 – 2,498 | Kawamura <i>et al.</i> (1997) |
| | ข้าวสาร, แป้งข้าว (n=96) | Combustion method (N x 5.95) | <u>PLS</u> : Milled rice: SECV = 0.22 Rice flour : SECV = 0.14 Milled rice: SECV = 0.20 | NIR: 400 – 2,498 NIR: 400 – 2,498 NIT: 850 – 1,050 | Barton <i>et al.</i> (2000) |
| | ข้าวสารเมล็ดยาว,ปานกลาง และข้าวสารเมล็ดสั้น (n=90) | Combustion method (N x 5.95) | <u>PLS</u> : SEP = 0.138, r ² = 0.992 | NIR: 200-1795, 2,050 – 3,570 ^{cm-1} | Himmelsbach <i>et al.</i> (2001) |
| | ข้าวสารเมล็ดยาว,ปานกลาง และข้าวสารเมล็ดสั้น (n=76) | Combustion method (N x 5.95) | <u>PLS</u> : RMSEP = 0.38, r ² = 0.85 | NIR: 400 – 2,500 | Champagne <i>et al.</i> (2001) |
| | ข้าวเปลือก, ข้าวกล้อง | Combustion method (N x 5.95) | <u>PLS</u> : Rough rice: SEP = 0.24, r ² = 0.70 Brown rice: SEP = 0.23, r ² = 0.68 | NIR: 400 – 2,498 | Kawamura <i>et al.</i> (2003) |

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

| คุณภาพข้าว | ลักษณะตัวอย่าง | วิธีการมาตรฐาน (Reference method) | ผลการวิจัย | รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.) | รายการอ้างอิง |
|-------------------|--|--|---|--|--------------------------------|
| ปริมาณโปรตีน (%) | แป้งข้าว, ข้าวเมล็ดยาว, ปานกลาง และสั้น (n=128) แป้งข้าว (n=214) | Combustion method (N x 5.95) | PLS: SECV = 0.23, $r^2 = 0.982$ | NIR: 400 – 2,498 | Sohn <i>et al.</i> (2004a) |
| | | Combustion method (N x 5.95) | PLS: SECV = 0.22, $r^2 = 0.983$ | NIR: 1,100 – 2,498 | Sohn <i>et al.</i> (2004b) |
| | ข้าวกล้องที่ละเม็ด (n=100) | Combustion method (N x 5.95) | PLS: SEP = 0.38, $r = 0.96$ SEP = 0.31, $r = 0.97$ | NIT: 800 – 1,000 NIT: 1,300 – 1,500 | Rittiron <i>et al.</i> (2004) |
| | ข้าวกล้องเมล็ดสั้น, ข้าวสาร (n=61) | Kjeldahl method (N x 5.95) | PLS: Brown rice: SECV = 0.16, $r = 0.96$ Brown rice: SECV = 0.24, $r = 0.92$ Milled rice: SECV = 0.18, $r = 0.95$ Milled rice: SECV = 0.19, $r = 0.94$ | NIR: 800 – 1,098 NIR: 1,100 – 2,498 NIR: 800 – 1,098 NIR: 1,100 – 2,498 | Natsuga and Kawamura (2006) |
| ปริมาณแอมิโลส (%) | ข้าวกล้อง (n=153), ข้าวสาร (n=123) | Iodine colorimetry using a potato (superlose)- waxy (IR29) | PLS: Brown rice: SEP = 2.27, $r^2 = 0.757$ Milled rice: SEP = 0.79, $r^2 = 0.960$ | NIT: 800 – 1,050 | Villareal <i>et al.</i> (1994) |
| | แป้งข้าว, ข้าวเมล็ดยาว, ปานกลาง และสั้น (n=247) | Colorimetric assay for milled rice, and was performed on autoanaly- zer (Juliano, 1971) | PLS: SEP = 1.04, $r^2 = 0.956$ | NIR: 1,100 – 2,498 | Delwiche <i>et al.</i> (1995) |
| | ข้าวสาร, ข้าวเมล็ดยาว, ปานกลาง, สั้น (n=196) | Colorimetric assay for milled rice , and was performed autoanalyser (Juliano, 1971) | PLS: SEP = 1.33, $r^2 = 0.887$ | NIR: 400 – 2,498 | Delwiche <i>et al.</i> (1996) |

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

| คุณภาพข้าว | ลักษณะตัวอย่าง | วิธีการมาตรฐาน (Reference method) | ผลการวิจัย | รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.) | รายการอ้างอิง |
|-------------------|---|---|---|--|----------------------------------|
| ปริมาณแอมิโลส (%) | ข้าวสาร, แป้งข้าว (n=120) | Iodine-blue colorimetric method | PLS: Milled rice: SECV = 0.37-0.43 Rice flour: SECV = 0.53 Milled rice: SECV = 0.53-0.55 | NIR: 1,100 – 2,500 NIR: 1,100 – 2,500 NIT: 1,100 – 2,500 | Barton <i>et al.</i> (1998) |
| | ข้าวกล้อง, ข้าวสาร (n=125) | Iodine-blue colorimetric method (Juliano, 1971) | PLS: Brown rice: SEP = 0.17, r = 0.818 Milled rice: SEP = 0.78, r = 0.921 | NIT: 825 – 1,075 NIT: 825 – 1,075 | Shimizu <i>et al.</i> (1998) |
| | ข้าวเปลือก (n=150) | Iodine-blue colorimetric method (Juliano, 1971) | PLS: Milled rice: SEP = 0.27, r ² = 0.00 | NIT: 400 – 2,498 | Kawamura <i>et al.</i> (1997) |
| | ข้าวสาร, แป้งข้าว (n=96) | Iodine-blue colorimetric method (Juliano, 1971) | PLS: Milled rice: SECV = 1.17 Rice flour : SECV = 0.53 Milled rice: SECV = 1.83 | NIR: 400 – 2,498 NIR: 400 – 2,498 NIT: 850 – 1,050 | Barton <i>et al.</i> (2000) |
| | ข้าวสารเมล็ดยาว, ปานกลาง และสั้น (n=90) | Colorimetric assays Using an autoanalyzer (Webb, 1972) | PLS: SEP = 1.05, r ² = 0.985 | NIR: 200-1795, 2,050 – 3,570 ^{cm-1} | Himmelsbach <i>et al.</i> (2001) |
| | ข้าวสารเมล็ดยาว, ปานกลาง และสั้น (n=76) | Iodine-blue colorimetric method (Juliano, 1971) | PLS: RMSEP = 1.91, r ² = 0.81 | NIR: 400 – 2,500 | Champagne <i>et al.</i> (2001) |
| | แป้งข้าว (n=162) | Colorimetric assay for milled rice, and was performed on autoanalyzer (Juliano, 1971) | PLS: SEC = 0.89, r ² = 0.96 SECV = 1.43, r ² = 0.89 SEP = 1.39, r ² = 0.91 | NIR: 400 – 2,500 | Bao <i>et al.</i> (2001) |

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

| คุณภาพข้าว | ลักษณะตัวอย่าง | วิธีการมาตรฐาน (Reference method) | ผลการวิจัย | รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (nm.) | รายการอ้างอิง |
|-------------------|--|---|---|--|------------------------------|
| ปริมาณแอมิโลส (%) | ข้าวเจ้าจาปอนิกามีเมล็ดสั้น (n=125) | Iodine-blue colorimetric method (Juliano, 1971) | PLS: SECV = 0.96, $r^2 = 0.63$ SECV = 0.56, $r^2 = 0.85$ | NIR: 850 – 1,050 | Shimizu <i>et al.</i> (2003) |
| | แป้งข้าว, ข้าวเมล็ดยาว, ปานกลาง, สั้น (n=128) | Iodine-blue colorimetric method (AACC, 2000d) | PLS: SECV = 1.0, $r^2 = 0.979$ | NIR: 850 – 1,050 NIR: 400 – 2,498 | Sohn <i>et al.</i> (2004a) |
| | แป้งข้าว (n=214) | Iodine-blue colorimetric method (AACC, 2000d) | PLS: SECV = 0.57, $r^2 = 0.994$ | NIR: 1,100 – 2,498 | Sohn <i>et al.</i> (2004b) |
| | ข้าวกล้องที่ละเมล็ด (n=474) | Iodine-blue colorimetric method and expressed as brown rice weight (%) | PLS: SEP = 2.82, $r^2 = 0.85$ | NIR: 1,100- 2,500 | Wu and Shi (2004) |
| | ข้าวกล้องเมล็ดสั้น, ข้าวสาร (n=61) | Iodine-blue colorimetric method (Juliano, 1971) | PLS: Milled rice: SECV = 1.42, $r = 0.52$ Milled rice : SECV = 1.13, $r = 0.75$ | NIR: 800 – 1,098 NIR: 1,100 – 2,498 | Natsuga and Kawamura (2006) |
| | ข้าวเปลือก, ข้าวกล้อง, ข้าวสาร, แป้งข้าว (n=586) | Colorimetric assay for milled rice, and was performed on autoanalyzer (Juliano, 1971) | MPLS: Milled rice: SECV = 2.13, $r^2 = 0.92$ | NIR: 1,100 – 2,498 | Wu and Shi (2007) |
| | ข้าวสาร (n=230) | Iodine-blue colorimetric method (Juliano, 1971) | PLS: Milled rice: SEC = 1.723, $r^2 = 0.902$ Milled rice: SEP = 2.158, $r^2 = 0.843$ Rice flour: SEC = 0.969, $r^2 = 0.934$ Rice flour: SEP = 1.224, $r^2 = 0.945$ | NIR: 1,160 – 1,950 NIR: 1,160 – 1,950 NIR: 1,400 – 2,492 NIR: 1,400 – 2,492 | Srisawas (2009) |

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

| คุณภาพข้าว | ลักษณะตัวอย่าง | วิธีการมาตรฐาน (Reference method) | ผลการวิจัย | รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (นม.) | รายการวิจัย |
|-------------------------------|---|--|---|--|-------------------------------|
| ค่าการสลายเมล็ดข้าว ในต่าง | ข้าวสารเมล็ดยาว, ปาน กลาง และสั้น (n=196) | Six grains were immersed in 1.7% KOH (Little <i>et al.</i> , 1958) | PLS: SEP = 0.43, $r^2 = 0.966$ | NIR: 400 – 2,498 | Delwiche <i>et al.</i> (1996) |
| | ข้าวสาร, แป้งข้าว (n=96) | Six grains were immersed in 1.7% KOH (Little <i>et al.</i> , 1958) | PLS: SECV = 0.64 | NIR: 400 – 2,498 | Barton <i>et al.</i> (2000) |
| | แป้งข้าว (n=162) | Six grains were immersed in 1.7% KOH (Little <i>et al.</i> , 1958) | PLS: SEP = 0.88, $r^2 = 0.70$ | NIR: 400 – 2,500 | Bao <i>et al.</i> (2001) |
| | ข้าวเปลือก, ข้าวกล้อง, ข้าวสาร, แป้งข้าว (n=586) | Six grains were immersed in 1.7% KOH (Little <i>et al.</i> , 1958) | MPLS: Milled rice: SECV = 0.33, $r^2 = 0.84$ | NIR: 1,100 – 2,498 | Wu and Shi (2007) |
| | ข้าวสาร (n=230) | Six grains were immersed in 1.7% KOH (Little <i>et al.</i> , 1958) | PLS: Milled rice: SEC = 0.524, $r^2 = 0.831$ Milled rice: SEP = 0.545, $r^2 = 0.806$ Rice flour: SEC = 0.568, $r^2 = 0.809$ Rice flour: SEP = 1.224, $r^2 = 0.945$ | NIR: 1,116 - 1,936 NIR: 1,116 - 1,936 NIR: 1,116 – 2,484 NIR: 1,116 – 2,484 | Srisawas (2009) |
| ค่าความคงตัวของเจล (นม.) | แป้งข้าว (n=162) | Gel length of rice paste (Cagampang <i>et al.</i> , 1973) | PLS: SEP = 7.12, $r^2 = 0.81$ | NIR: 400 – 2,500 | Bao <i>et al.</i> (2001) |
| | ข้าวเปลือก, ข้าวกล้อง, ข้าวสาร, แป้งข้าว (n=586) | Gel length of rice paste (Cagampang <i>et al.</i> , 1973) | MPLS: Milled rice: SECV = 11.73, $r^2 = 0.76$ | NIR: 1,100 – 2,498 | Wu and Shi (2007) |

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

| คุณภาพข้าว | ลักษณะตัวอย่าง | วิธีการมาตรฐาน (Reference method) | ผลการวิจัย | รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (nm.) | รายการอ้างอิง | |
|--|-------------------------------------|--|---|--|--------------------------------|---------------------------|
| ค่าความคงตัวของเจล (nm.) | ข้าวสาร (n=230) | Gel length of rice paste (Cagampang <i>et al.</i> , 1973) | PLS: Milled rice: SEC = 15.06, $r^2 = 0.611$ | NIR: 1,108 – 1,940 | Srisawas (2009) | |
| | | | Milled rice: SEP = 16.44, $r^2 = 0.533$ | NIR: 1,108 – 1,940 | | |
| | ปริมาณไขมัน (%) | ข้าวเมล็ดยาว | Soxtec system | Rice flour: SEC = 14.31, $r^2 = 0.670$ | NIR: 1,116 – 1,776 | Chen <i>et al.</i> (1997) |
| | | | | Rice flour: SEP = 14.52, $r^2 = 0.654$ | NIR: 1,116 – 1,776 | |
| ข้าวสารเมล็ดยาว,ปานกลาง, เมล็ดสั้น (n=76) | Soxtec system | PLS: SEC = 0.04, $r^2 = 0.97$ | NIR: 400 - 700 | NIR: 1,500 – 2,500 | | |
| | | SEC = 0.03, $r^2 = 0.99$ | NIR: 400 – 700, 1,500 – 2,500 | | | |
| ข้าวจาปอนิกา, อินдика, ข้าวเหนียว (n=248) | Soxtec system | SEC = 0.024, $r^2 = 0.99$ | NIR: 400 – 2,500 | NIR: 400 – 2,500 | Champagne <i>et al.</i> (2001) | |
| | | SEC = 0.03, $r^2 = 0.99$ | NIR: 400 – 2,500 | | | |
| ข้าวสาร, แป้งข้าว (n=140) | Fat acidity (mg of KOH/100 g dm) | Soxtec system | PLS: RMSEP = 0.04, $r^2 = 0.90$ | NIR: 400 – 2,500 | Wang <i>et al.</i> (2006) | |
| | | | PLS: Brown rice grain: RMSECV = 0.17, $r^2 = 0.73$ | NIR: 1,100 – 2,498 | | |
| | | | Brown rice flour: RMSECV = 0.15, $r^2 = 0.81$ | | | |
| | | | Milled rice grain: RMSEC = 0.12, $r^2 = 0.81$ | | | |
| | | | Milled rice flour: RMSECV = 0.09, $r^2 = 0.89$ | | | |
| | | | PLS: Milled rice: SEP = 0.83, $r^2 = 0.87$ | | | NIR: 1,100 – 2,498 |
| | | | Rice flour: SEP = 0.73, $r^2 = 0.94$ | | | |

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

| คุณภาพข้าว | ลักษณะตัวอย่าง | วิธีการมาตรฐาน (Reference method) | ผลการวิจัย | รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (nm.) | รายการอ้างอิง |
|--------------------------|---|--------------------------------------|---|--|--------------------------------|
| ปริมาณไขมัน (%) | ข้าวกล้องเมล็ดสั้น,ข้าวสาร (n=61) | Free fatty acid (mg) | PLS: Milled rice: SECV = 3.39, r = 0.42 Milled rice : SECV = 3.07, r = 0.56 Brown rice : SECV = 11.56, r = 0.30 Brown rice : SECV = 9.02, r = 0.67 | NIR: 800 – 1,098 NIR: 1,100 – 2,498 NIR: 800 – 1,098 NIR: 1,100 – 2,498 | Natsuga and Kawamura (2006) |
| ความหนืดของข้าว (RVU) | ข้าวสารเมล็ดยาว,ปานกลาง, เมล็ดสั้น (n=196) | RVA analyzer | PLS: Peak viscosity SEP = 23.7, r ² = 0.639 Final viscosity SEP = 20.6, r ² = 0.424 Breakdown viscosity SEP = 14.3, r ² = 0.719 Consistency SEP = 10.6, r ² = 0.735 Setback viscosity SEP = 20.2, r ² = 0.737 | NIR: 1,120 – 1,800 NIR: 1,120 – 1,800 NIR: 1,140 – 1,800 NIR: 1,120 – 1,800 NIR: 1,110 – 1,800 | Delwiche <i>et al.</i> (1996) |
| | แป้งข้าว (n=162) | RVA analyzer | PLS: Peak viscosity SEP = 17.15, r ² = 0.32 Hot paste viscosity SEP = 16.7, r ² = 0.55 Cold paste viscosity SEP = 20.8, r ² = 0.76 Consistency; SEP = 12.4, r ² = 0.78 Setback viscosity; SEP = 13.6, r ² = 0.792 | NIR: 400 – 2,500 | Bao <i>et al.</i> (2001) |

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

| Parameter | Sample | Reference method | Results | Mode: Wavelength (nm) | Author (Year) |
|---|---|-------------------------|--|--|---------------------------------|
| ความหนืดของข้าว (RVU) | ข้าวเจ้าจากปอนิกามาเมล็ดสั้น (n=341) แบ่งข้าว (n=86) ข้าวสาร (n=230) | RVA analyzer | Breakdown viscosity; SEP = 10.2, $r^2 = 0.88$ <u>PLS</u> : Maximum viscosity SEP = 17.7, $r^2 = 0.75$, RPD = 1.9 | NIR: 850 – 1,048 | Shimizu <i>et al.</i> (2001) |
| | | RVA analyzer | <u>PLS</u> : viscosity at 212 second ($r^2 = 0.961$) and 228 second ($r^2 = 0.903$) were correlated with NIR spectroscopy | NIR: 1,100 – 2,500 | Meadows and Barton II (2002) |
| | | RVA analyzer | <u>PLS</u> : Peak viscosity SEP = 26.83, $r^2 = 0.678$ Breakdown viscosity SEP = 14.89, $r^2 = 0.735$ Setback viscosity SEP = 33.50, $r^2 = 0.602$ Consistency SEP = 27.83, $r^2 = 0.522$ | NIR: 1,130 – 2,470 NIR: 1,120 – 2,480 NIR: 1,108 – 2,492 NIR: 1,148 – 2,452 | Srisawas (2009) |
| ระดับการเกิดรีโทรกรา เดชั่น (%) | ข้าวสุก (n=43) | Enzymatic digestibility | <u>MLR</u> : Eq.1: SEP = 3.22, $r^2 = 0.968$ Eq.2: SEP = 4.66, $r^2 = 0.979$ Eq.3: SeP = 3.91, $r^2 = 0.975$ | NIR: 400 – 2,498 | Cho <i>et al.</i> (1998) |
| คุณลักษณะทางประสาท สัมผัส (0-15 scale) | Milled rice (n=60) | Sensory evaluation | <u>PLSR</u> : Manual adhesiveness, visual Adhesiveness, stickiness to lip, RAP = 0.54- 0.56 | NIR | Windham <i>et al.</i> (1997) |

ตารางที่ 2.10 (ต่อ)

| คุณภาพข้าว | ลักษณะตัวอย่าง | วิธีการอ้างอิง (Reference method) | ผลการวิจัย | รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (nm.) | รายการอ้างอิง |
|---------------------------------------|---|--|--|-------------------------------|--------------------------------|
| คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส (0-15 scale) | ข้าวสารเมล็ดยาว,ปานกลาง และเมล็ดสั้น (n=76) | Sensory texture attribute (0-15 scale) | PLS: RMSEP = 1.91, $r^2 = 0.81$ PLS: Initial starchy coating RMSEP = 0.20, $r^2 = 0.76$ Stickiness RMSEP = 0.38, $r^2 = 0.53$ Hardness RMSEP = 0.32, $r^2 = 0.67$ Cohesiveness of mass RMSEP = 0.22, $r^2 = 0.83$ | NIR: 400 – 2,500 | Champagne <i>et al.</i> (2001) |
| เนื้อสัมผัสของเจลข้าว (g) | แป้งข้าว (n=162) | Texture analyzer | PLS: Hardness: SEP = 2.4, $r^2 = 0.86$ Adhesiveness: SEP=3.6, $r^2 = 0.67$ Springiness: SEP = 0.06, $r^2 = 0.01$ Cohesiveness: SEP=0.03, $r^2 = 0.58$ Gumminess: SEP = 1.24, $r^2 = 0.77$ Chewiness: SEP = 1.00, $r^2 = 0.86$ | NIR: 400 – 2,500 | Bao <i>et al.</i> (2001) |
| คุณสมบัติด้านความร้อน | แป้งข้าว (n=162) | DSC (°C) | PLS: To: SEP = 1.79, $r^2 = 0.86$ Tp: SEP = 1.33, $r^2 = 0.89$ Tc: SEP = 2.23, $r^2 = 0.64$ ΔH_g (J/g): SEP=0.03, $r^2 = 0.58$ | NIR: 400 – 2,500 | Bao <i>et al.</i> (2001) |

2.3.4 การแบ่งกลุ่มข้าว (Classification of rice)

ประเทศไทยมีความหลากหลายในพันธุ์ข้าวปลูก สถาบันวิจัยข้าวได้รวบรวมพันธุ์ข้าวและพบว่ามียี่ห้อยทั้งหมดประมาณ 5,500 ตัวอย่าง จากความหลากหลายของพันธุ์ข้าวดังกล่าว การแบ่งกลุ่มข้าวจึงอาจพิจารณาจากสภาพทางภูมิศาสตร์ในการเพาะปลูก สภาพพื้นที่ปลูก (ข้าวไร่ ข้าวนาสวน ข้าวทนน้ำลึก และข้าวนาเมือง) สายพันธุ์ข้าว (ข้าวอินดิกา ข้าวจาปอนิกา และข้าวจาวานิกา) วิธีการเพาะปลูก (การทำนาดำ และการทำนาหว่าน) สภาพแสงแดดในขณะที่ข้าวเจริญเติบโต (ข้าวไวแสง และข้าวไม่ไวแสง) และสภาพการเก็บเกี่ยว (ข้าวเบา ข้าวกลาง และข้าวหนัก) เป็นต้น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547, หน้า 53-75) หรืออาจแบ่งชนิดข้าวตามลักษณะรูปร่างของเมล็ดข้าวได้เช่นเดียวกัน อาทิเช่น ความยาวของเมล็ด (ข้าวเมล็ดสั้น ข้าวเมล็ดยาวปานกลาง ข้าวเมล็ดยาว และข้าวเมล็ดยาวมาก) และรูปร่างของเมล็ด (ข้าวเมล็ดเรียวยาว ข้าวเมล็ดค่อนข้างป้อม และข้าวเมล็ดป้อม) (Aphithanaphong, 2004, pp. 36-50)

การแบ่งกลุ่มข้าวยังสามารถแบ่งได้ตามระดับการขัดสี (Degree of milling) ได้แก่ สีสดีพิเศษ (8% ของน้ำหนักที่หายไปหรือมากกว่า) สีสดี (7-7.9% ของน้ำหนักที่หายไป) สีสดีปานกลาง (6-6.9% ของน้ำหนักที่หายไป) และสีธรรมดา (5-5.9% ของน้ำหนักที่หายไป) (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547, หน้า 154) เมื่อพิจารณาคูณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวนั้นพบว่าข้าวสามารถแบ่งกลุ่มตามคุณสมบัติดังกล่าวได้เช่นเดียวกัน Juliano (1985) แบ่งกลุ่มตามปริมาณแอมิโลสได้ 5 กลุ่ม คือ ข้าวเหนียว (0-5%) ข้าวเจ้าแอมิโลสต่ำมาก (5.1-12.0%) ข้าวเจ้าแอมิโลสต่ำ (12.1-20.0%) ข้าวเจ้าแอมิโลสปานกลาง (20.1-25.0%) และข้าวเจ้าแอมิโลสสูง (>25%) และเมื่อพิจารณาตามปริมาณสตาร์ชในเมล็ดข้าว สามารถแบ่งข้าวได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ข้าวเหนียว (Waxy or glutinous rice) และข้าวเจ้า (Non-waxy or non-glutinous rice) นอกจากนี้การแบ่งกลุ่มข้าวยังสามารถแบ่งได้อ่อนความคงตัวของเจลแบ่งได้อีกด้วย คือ เจลนุ่ม (61-100 มิลลิเมตร) เจลนุ่มปานกลาง (41-60 มิลลิเมตร) และเจลแข็ง (26-40 มิลลิเมตร) (Cagampang, Perez & Juliano, 1973, pp. 1589-1594)

การแบ่งกลุ่มข้าวตามอุณหภูมิการเกิดเจลตาในเซชัน แบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ ข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลตาในเซชันต่ำ (55-69°C) ข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลตาในเซชันปานกลาง (70-74°C) และข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลตาในเซชันสูง (75-79°C) (Kongseree, 2002, p. 25) เมื่อพิจารณาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก สามารถแบ่งข้าวได้ 4 กลุ่ม คือ ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกนุ่มมาก ลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่ม ลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งร่วนปานกลาง และลักษณะเนื้อสัมผัสแข็งร่วนมาก (Champagne *et al.*, 2001, pp. 358-362) ในขณะที่กรมการค้าต่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ (1997) แบ่งข้าวออกเป็น 2 ประเภท คือ ข้าวที่มีกลิ่นหอม (Aromatic rice) และข้าวที่ไม่มีกลิ่นหอม (Non-aromatic rice) ข้าวที่อยู่ในกลุ่มข้าวหอมที่สำคัญ ได้แก่ ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวพันธุ์กข 15 ซึ่งจัดเป็นข้าวหอมมะลิไทยที่มีความต้องการจากผู้บริโภคและมูลค่าสูงกว่าข้าวประเภทอื่น ๆ ข้าวหอมมะลิจึงมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยเป็นอย่างสูง

จากการที่ประเทศไทยมีความหลากหลายทางสายพันธุ์ข้าว ประกอบกับข้าวหอมมะลิของไทยมีมูลค่าสูงแต่มีผลผลิตต่ำ จึงเป็นเหตุจูงใจให้ผู้ประกอบการนำข้าวพันธุ์อื่นที่มีลักษณะทาง

กายภาพหรือคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่คล้ายกับข้าวหอมมะลิมาผสมกับข้าวหอมมะลิ ทำให้คุณภาพการหุงต้ม รับประทาน และแปรรูปของข้าวหอมมะลิมีคุณภาพลดลง ส่งผลให้เกิดการร้องเรียนจากลูกค้า (กรมการค้าต่างประเทศ, 2554, ออนไลน์) ในปัจจุบันผู้ประกอบการค้าข้าวจึงนิยมใช้วิธีการตรวจดีเอ็นเอ (DNA analysis) แบ่งกลุ่มข้าวหอมมะลิตอกจากข้าวประเภทอื่น ๆ ซึ่งการตรวจดีเอ็นเอนั้นเป็นวิธีการที่ให้ผลแม่นยำ แต่ใช้เวลานาน และมีค่าใช้จ่ายสูง (Kim *et al.*, 2003, pp. 346-349)

ดังนั้น ในปัจจุบันนี้จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้คิดค้นวิธีการแบ่งกลุ่มข้าวออกเป็นประเภทต่าง ๆ โดยใช้วิธีการตรวจสอบที่ให้ผลแม่นยำ รวดเร็ว และเป็นที่ยอมรับในระดับสากล เช่น การประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ร่วมกับวิธีการทางเคมีเมทริกซ์แบ่งกลุ่มข้าวออกเป็นประเภทต่าง ๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.11 โดยพบว่าการวิเคราะห์หลายตัวแปรก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแบ่งกลุ่มข้าวด้วยเช่นกัน Bett-Garber *et al.* (2001) แบ่งข้าวออกเป็น 7 กลุ่ม โดยพิจารณาจากปริมาณแอมิโลส ปริมาณโปรตีน กลิ่นรส และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก ด้วยวิธี Ward's cluster analysis ในขณะที่ Patindol *et al.* (2006) แบ่งข้าวออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ พันธุ์ Wells และ Bengal ด้วยวิธี Hierarchical cluster analysis ในปีต่อมา Suwannaporn, Pitiphunpong & Champangen (2007) แบ่งข้าวออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ด้วยวิธีการวิเคราะห์จำแนกกลุ่ม โดยอาศัยคุณสมบัติทางด้านความหนืดของข้าวและปริมาณแอมิโลส พบว่าสามารถจำแนกกลุ่มข้าวได้อย่างชัดเจน

สำหรับการแบ่งกลุ่มข้าวโดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ร่วมกับวิธีการทางเคมีเมทริกซ์นั้น Osborne *et al.* (1993) ศึกษาความเป็นไปได้ในการจำแนกความแตกต่างของข้าวพันธุ์บาสมาติออกจากข้าวพันธุ์เมล็ดยาวด้วยเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้โดยใช้ข้าวพันธุ์บาสมาติ จำนวน 16 ตัวอย่าง และข้าวพันธุ์เมล็ดยาวจำนวน 100 ตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่าสามารถจำแนกข้าวพันธุ์บาสมาติออกกลุ่มข้าวพันธุ์เมล็ดยาวได้ Ootake & Kokot (1998) ศึกษาจำแนกกระหว่างข้าวเหนียวและข้าวเจ้าด้วยเทคนิค FT-NIR ส่วน Kwon & Cho (1998) วิเคราะห์ความแตกต่างของข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ที่จำหน่ายภายในประเทศ โดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีแบบการถ่ายภาพ (Image processing technique a CCD camera) ผลการศึกษาพบว่าเทคนิคนี้สามารถจำแนกข้าวที่มีรูปร่างแตกต่างกันได้แม่นยำถึง 90%

Rittiron, Saranwong & Kawano (2005) วิเคราะห์การปลอมปนข้าวญี่ปุ่นโดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบส่องผ่าน (Transmittance) โดยใช้วิธีการวัดแบบมีละเมล็ด (Single grain) ผลการศึกษาพบว่าสามารถแยกข้าวผสมออกจากข้าวบริสุทธิ์ โดยใช้ปริมาณโปรตีนเป็นตัวชี้บ่งในการแยกการปลอมปนดังกล่าว Theanjumol *et al.* (2005) จำแนกกลุ่มข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ข้าวชาวดอกมะลิ 105 และข้าวพันธุ์อื่น ๆ ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ และแบ่งกลุ่มข้าวด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก หรือ PCA ผลการวิจัยพบว่าข้าวพันธุ์กข 15 ปทุมธานี 1 และชาวดอกมะลิ 105 จะมีคุณภาพที่คล้ายกันและแตกต่างจากข้าวกลุ่มอื่นอย่างชัดเจน และจากการแบ่งกลุ่มด้วย PCA พบว่าไม่สามารถแยกความแตกต่างในด้านคุณภาพของข้าวพันธุ์กข 15 และชาวดอกมะลิ 105 ออกจากข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ได้

ตารางที่ 2.11 รายงานวิจัยการใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการแบ่งกลุ่มข้าว

| วิธีการ | ลักษณะตัวอย่าง | วิธีการวิเคราะห์หลายตัวแปร/ เคโมเมตริกซ์ | ผลการวิจัย | รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (nm.) | รายการอ้างอิง |
|-------------------------------------|---|---|--|---|-------------------------------------|
| การวิเคราะห์หลายตัวแปร | ข้าวสาร ($n=91$) | Ward's cluster analysis | Categorizing rice cultivars into seven groups based on grain dimension, apparent amylose content, and alkali spreading value | - | Bett-Garber <i>et al.</i> (2001) |
| | ข้าวเมล็ดแดง ($n=16$) | Hierarchical cluster analysis | Classifying red rice samples into two groups based on kernel properties | - | Patindol <i>et al.</i> (2006) |
| | ข้าวสาร ($n=9$) | Discriminant analysis | Classifying rice amylose content varieties using only pasting properties | - | Suwannaporn <i>et al.</i> (2007) |
| | สตาร์ชจากข้าวพันธุ์เมล็ดยาว ($n=20$) | Ward's cluster analysis | Classifying long grain rice according to their swelling, pasting, and gelatinization properties | - | Patindol <i>et al.</i> (2009) |
| | ข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 | PCA | Classifying KDML105 based on its Cultivated location into five regions | - | Pitiphunpong and Suwannaporn (2009) |
| เทคนิคสเปกโตรสโคปีย่านใกล้อินฟราเรด | ข้าวพันธุ์บัวสมมติ ($n=16$) และข้าวพันธุ์อื่น ๆ ($n=100$) | Fisher linear discriminant | Classifying Basmati rice from other rice varieties | NIT: 850 – 1,050 | Osborne <i>et al.</i> (1993b) |
| | ข้าวสาร ($n=19$) | Soft Independent Modelling of Class Analogy (SIMCA) | FT-NIR DRIFT reasonably classified glutinous rice from non-glutinous rice | FT-NIR DRIFT: 400 – 11,000 ^{cm-1} | Ootake & Kokot (1998a) |

ตารางที่ 2.11 (ต่อ)

| วิธีการ | ลักษณะตัวอย่าง | วิธีการวิเคราะห์หลายตัวแปร/ เคโมเมทริกซ์ | ผลการวิจัย | รูปแบบ/ ความยาวคลื่น (nm.) | รายการอ้างอิง |
|--|--|---|--|---|-----------------------------------|
| เทคนิคสเปกโตรสโคปี ย่านใกล้อินฟราเรด | ข้าวสาร (n=19) | Soft Independent Modelling of Class Analogy (SIMCA) | Second derivative: Glutinous classify correctly 63.9 Non-glutinous classify correctly 66.7 MSC: Glutinous classify correctly 58.3 Non-glutinous classify correctly 50.0 | FT-NIR DRIFT: 400 – 11,000 ^{cm-1} | Ootake and Kokot (1998b) |
| | พันธุ์ข้าว | | Rice highly identified up to 90% based on their shape | NIR spectroscopy With CCD camera NIR: 400 – 2,500 | Kwon and Cho (1998) |
| | ข้าวพันธุ์เมล็ดยาว,ปานกลาง และเมล็ดสั้น (n=280) | Modified PLS (MPLS) | 1 st calibration: SECV = 0.165, r2 = 0.91 2 nd calibration: SECV = 0.165, r= 0.93 Korean domestic rice correctly identified of 80% samples | | Kim <i>et al.</i> (2003) |
| | ข้าวที่มีกลิ่นหอมของ ประเทศไทย | PCA | PCA was not sufficient to classify Thai rice variety by NIR spectroscopy without chemical properties | NIR: 1,100 – 2,500 | Theanjumpool <i>et al.</i> (2005) |
| | ข้าวสารญี่ปุ่น | PLS | Detection blended the Koshihiakari with >5% of Akitakomachi varieties by single kernel NIT spectroscopy | NIT: 1,100 – 2,500 | Rittiron <i>et al.</i> (2005) |
| ข้าวเปลือกจากการเพาะปลูก 4 ฤดูกาล (n=1,408) | Discriminant analysis (DA) | Eight models were used to classify paddy rice | NIR: 1,100 – 2,500 | Liu <i>et al.</i> (2006) | |

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุประสงค์ สารเคมี และอุปกรณ์

3.1.1 วัตถุประสงค์

ตัวอย่างข้าวเปลือก จำนวน 60 ตัวอย่าง ประกอบด้วยข้าวเปลือกหอมมะลิ จำนวน 50 ตัวอย่าง ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำ 3 ตัวอย่าง ได้แก่ ข้าวพันธุ์หอมคลองหลวง ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และข้าวพันธุ์พิษณุโลก 1 ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสปานกลาง จำนวน 2 ตัวอย่าง ได้แก่ ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 2 และสุพรรณบุรี 60 และข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูง จำนวน 5 ตัวอย่าง ประกอบด้วยข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 พันธุ์ชัยนาท 2 พันธุ์เหลืองประทิว 123 พันธุ์พิษณุโลก 2 และพันธุ์ปทุมธานี 60 โดยตัวอย่างข้าวทั้งหมดเพาะปลูกในปี พ.ศ. 2552 จากศูนย์วิจัยข้าว และศูนย์เมล็ดข้าวต่าง ๆ ในประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างข้าวที่เก็บรวบรวมสำหรับใช้ในการทดลอง

| กลุ่มข้าว | พันธุ์ข้าว | อักษรย่อ | แหล่งเพาะปลูก | จำนวนตัวอย่าง |
|-----------------------------|--|---|--|-----------------------|
| ข้าวหอมมะลิ | 1. ข้าวดอกมะลิ 105 2. กข15 | 1. KDML105 2. RD15 | ศูนย์วิจัยข้าว และศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าว | 50 |
| ปริมาณแอมิโลสต่ำ | 1. หอมคลองหลวง 2. ปทุมธานี 1 3. พิษณุโลก 1 | 1. HKLG 2. PTN1 3. PL1 | | |
| ปริมาณแอมิโลสปานกลาง | 1. สุพรรณบุรี 2 2. สุพรรณบุรี 60 | 1. SPR2 2. SPR60 | 1. ศูนย์วิจัยข้าวสุพรรณบุรี 2. ศูนย์วิจัยข้าวสุพรรณบุรี | 1 1 |
| ปริมาณแอมิโลสสูง | 1. ชัยนาท 1 2. ชัยนาท 2 3. เหลืองประทิว 123 4. พิษณุโลก 2 5. ปทุมธานี 60 | 1. CNT1 2. CNT2 3. LPT123 4. PL2 5. PTN60 | 1. ศูนย์วิจัยข้าวชัยนาท 2. ศูนย์วิจัยข้าวชัยนาท 3. ศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก 4. ศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก 5. ศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวนครสวรรค์ | 1 1 1 1 1 |
| จำนวนตัวอย่างทั้งหมด | | | | 60 |

3.1.2 สารเคมี

- 3.1.2.1 เอทานอล 95%
- 3.1.2.2 กรดอะซิติก
- 3.1.2.3 กรดไฮโดรคลอริก
- 3.1.2.4 ไอโอดีน
- 3.1.2.5 โพแทสเซียมไอโอไดด์
- 3.1.2.6 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
- 3.1.2.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์
- 3.1.2.8 บรอมไทมอลบลู 0.025%
- 3.1.2.9 โพแทสเซียมไอโอดีนมาตรฐาน

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

| | | |
|---|--------------------|----------------|
| 3.1.3.1 เครื่องกะเทาะเปลือก | Satake, Model SB | ญี่ปุ่น |
| 3.1.3.2 เครื่องขัดสี | Satake, Model SKB | ญี่ปุ่น |
| 3.1.3.3 เครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว | Satake, TRG05A | ญี่ปุ่น |
| 3.1.3.4 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง | Shimadzu, UV-1601 | ญี่ปุ่น |
| 3.1.3.5 เครื่องสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ (FT-NIR spectroscopy) | Buchi NIRLab N-200 | สวิตเซอร์แลนด์ |
| 3.1.3.6 เครื่องวิเคราะห์ไนโตรเจนแบบดูมาส (Nitrogen combustion analyzer) | Leco model FP-2000 | อเมริกา |
| 3.1.3.7 เครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid visco analyzer; RVA) | Model 3-D | ออสเตรเลีย |
| 3.1.3.8 ชุดสกัดไขมัน | Foss, model 1043 | สวีเดน |
| 3.1.3.9 เครื่องชั่งชนิดละเอียด | Mettler, AE 50 | ญี่ปุ่น |
| 3.1.3.10 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) | Memmert | เยอรมัน |
| 3.1.3.11 เครื่องบด (Udy Miller) | Udy, Cyclotec | อเมริกา |
| 3.1.3.12 โถดูดความชื้น (Air-tight desicator) | Memmert | เยอรมันนี |
| 3.1.3.13 เครื่องแก้ว | | |

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.2.1 การรวบรวมตัวอย่างข้าว

ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลองรวบรวมจากศูนย์วิจัยข้าวและศูนย์เมล็ดข้าวต่าง ๆ ในประเทศไทย ปีการเพาะปลูกพ.ศ. 2552 ประกอบด้วยข้าวหอมมะลิ ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำ ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูง ข้าวเปลือกแต่ละตัวอย่างจะถูกนำมาทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาด (Rice pre-cleaner equipment) เพื่อกำจัดข้าวเมล็ดลีบ เศษฟาง เศษหญ้า และสิ่งเจือปนต่าง ๆ จากนั้นนำตัวอย่างข้าวเปลือกมาบรรจุในถุงพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ความหนา 70 ไมโครเมตร ฤๅละ 5 กิโลกรัม ปิดปากถุงให้สนิทด้วยเครื่องปิดผนึกพลาสติก นำถุงพลาสติกบรรจุข้าวเปลือกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิประมาณ 10°C จนกว่าจะนำมาทดลอง

3.2.2 การเตรียมวัตถุดิบข้าวสารขนาดเต็มเมล็ด

นำตัวอย่างข้าวเปลือกแต่ละตัวอย่างมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 24 ชั่วโมง เพื่อปรับความชื้นของตัวอย่างข้าวเปลือกให้สมดุล จากนั้นนำข้าวเปลือก จำนวน 100 กรัม มากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือก (Satake, Model SB, ญี่ปุ่น) จำนวน 1 ครั้ง จะได้ข้าวกล้อง จากนั้นนำตัวอย่างข้าวกล้องแต่ละตัวอย่างไปขัดขาวด้วยเครื่องขัดขาวแบบลูกหิน (Satake, Model SKB) นาน 2 นาที นำข้าวสารมาคัดแยกข้าวหักและปลายข้าวออกด้วยเครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าวแบบตะแกรงกลม (Satake, TRG 05A) ใช้ตะแกรงกลมเบอร์ 5.2 ปรับมุมวางรองรับข้าวหักประมาณ 30° นาน 1 นาที จนได้เฉพาะข้าวสารขนาดเต็มเมล็ด จากนั้นนำข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดที่เตรียมได้แต่ละตัวอย่างมาบรรจุแบบสุญญากาศในซองลามิเนตไสชนิด NY/LLDPE และนำมาเก็บที่อุณหภูมิห้อง จนกว่าจะนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้

3.2.3 การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้

นำตัวอย่างข้าวสารเต็มเมล็ดทั้ง 60 ตัวอย่าง ที่เตรียมไว้ในข้อ 2.2 มาชั่งน้ำหนักในจานเพาะเชื้อ (Petri dish) ประมาณ 80 กรัม และวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ (FT-NIR spectroscopy, Buchi NIRLab N-200) ช่วงความยาวคลื่น 1,100-2,500 นาโนเมตร ทำการวัดด้วยหลักการสะท้อนแสง (Reflectance) ที่อุณหภูมิ 25°C โดยเริ่มที่ความยาวคลื่นต่ำที่สุดและเพิ่มขึ้นช่วงละ 2 นาโนเมตร ของแต่ละหน่วยตัวอย่าง ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้จำนวน 701 ค่า จะถูกเก็บข้อมูลไว้ในรูปของลอการิทึม ($\log 1/\text{reflectance}$) และบันทึกด้วยโปรแกรม NIRCal รุ่น 5.21 โดยทำการทดลองตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

เมื่อทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงตัวอย่างข้าวสารเต็มเมล็ดพันธุ์บริสุทธิ์ (Pure rice variety) ทั้ง 60 ตัวอย่าง เสร็จเรียบร้อยแล้ว จะทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของพันธุ์ข้าวที่นิยมนำมาผสมกับข้าวหอมมะลิ ได้แก่ ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 (ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำ) และข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 (ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูง) โดยแปรผันอัตราส่วนที่นำมาผสมกับข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (ข้าวหอมมะลิ) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การแปรผันอัตราส่วนข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ที่นำมาผสมข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

| ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับ ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 | | ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับ ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 | |
|--|----------------|--|--------------|
| ข้าวดอกมะลิ 105 (%) | ปทุมธานี 1 (%) | ข้าวดอกมะลิ 105 (%) | ชัยนาท 1 (%) |
| 100 | 0 | 100 | 0 |
| 95 | 5 | 95 | 5 |
| 90 | 10 | 90 | 10 |
| 85 | 15 | 85 | 15 |
| 80 | 20 | 80 | 20 |
| 75 | 25 | 75 | 25 |
| 70 | 30 | 70 | 30 |
| 65 | 35 | 65 | 35 |
| 60 | 40 | 60 | 40 |
| 55 | 45 | 55 | 45 |
| 50 | 50 | 50 | 50 |
| 45 | 55 | 45 | 55 |
| 40 | 60 | 40 | 60 |
| 35 | 65 | 35 | 65 |
| 30 | 70 | 30 | 70 |
| 25 | 75 | 25 | 75 |
| 20 | 80 | 20 | 80 |
| 15 | 85 | 15 | 85 |
| 10 | 90 | 10 | 90 |
| 5 | 95 | 5 | 100 |
| 0 | 100 | 0 | |

3.2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ด

นำตัวอย่างข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดแต่ละตัวอย่างที่ผ่านการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้มาบดด้วยเครื่องบด ขนาด 100 เมช (Mesh) ร่อนผ่านตะแกรง และนำมาบรรจุในถุงออลูมิเนียมฟอยด์ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้อง ซึ่งจะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่สำคัญ ได้แก่

3.2.4.1 ปริมาณแอมิโลส ด้วยวิธี AACC (1999) แสดงดังภาคผนวก ก

3.2.4.2 ปริมาณโปรตีนด้วยวิธีดูมาส (Nitrogen combustion method) ด้วยวิธี AACC (2000a) แสดงดังภาคผนวก ข

3.2.4.3 ค่าความคงตัวของแป้งสุก ตามวิธีของ Cagampang, Perez & Juliano (1973) แสดงดังภาคผนวก ค

3.2.4.4 ค่าการสลายเมล็ดข้าวในต่าง ตามวิธีของ Little, Hilder & Dawan (1958) แสดงดังภาคผนวก ง

3.2.4.5 คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว ด้วยวิธี AACC (2000b) แสดงดังภาคผนวก จ

3.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างสมการที่เหมาะสมในการทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ด

3.2.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลทางด้านคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดแต่ละพารามิเตอร์ จะนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) และนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3.2.5.2 การสร้างสมการที่เหมาะสมในการทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ด

1) การตรวจสอบข้อมูลผิดปกติ (Outlier)

ข้อมูลค่าทางเคมีของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องจะถูกนำมาตรวจสอบหาข้อมูลที่ผิดปกติ ซึ่งอาจตัวอย่างที่มีค่าทางเคมีสูงหรือต่ำจากการกระจายค่าทางเคมีเป็นแบบปกติ (Normal distribution) โดยจะใช้ค่าทางสถิติคะแนน t (t -score) โดยแปลงค่าทางเคมีเป็นค่าทางสถิติ t ตามวิธีของ Sirisomboon (2007) และ ฤทธิธรณ (2552a) ดังสมการ

$$t_i = \frac{x_i - \bar{x}}{SD}$$

| | | | |
|-------|-----------|-----|----------------------------------|
| เมื่อ | t_i | คือ | ค่าทางสถิติ t ของตัวอย่าง i |
| | x_i | คือ | ค่าทางเคมีของตัวอย่าง i |
| | \bar{x} | คือ | ค่าเฉลี่ยทางเคมี |
| | SD | คือ | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าทางเคมี |

หากค่าสัมบูรณ์ของค่าทางสถิติคะแนน t ของตัวอย่างใดมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 3 จะหมายถึงตัวอย่างนั้นอยู่นอกกลุ่มประชากรตัวอย่างที่สนใจ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ให้พิจารณาตัดตัวอย่างนั้นทิ้ง

2) การปรับแต่งสเปกตรัม

นำข้อมูลสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR spectrum) ที่บันทึกไว้ด้วยโปรแกรม NIRCal ไปวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Unscrambler รุ่น X 10.1 (CAMO software, ASA, Norway) ด้วยไฟล์ข้อมูลในรูปแบบ JCAMP-DX ทำการเฉลี่ยสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้จากนั้นนำสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ที่หาค่าเฉลี่ยแล้วมาปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์ด้วยวิธีการแปลงค่าอนุพันธ์เป็นอันดับสองโดยใช้วิธีการปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ทุกช่วงความยาวคลื่น 10 นาโนเมตร (Savitzky-Golay algorithm : left and right side in 10 nm gap size of the second derivative) วิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (MSC) และวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (SNV) นอกจากนี้ยังปรับแต่งสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณร่วมกับวิธีการแปลงค่าอนุพันธ์เป็นอันดับสองโดยใช้วิธีการปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ทุกช่วงความยาวคลื่น 10 นาโนเมตร (MSC + Savitzky-Golay second derivative : 10 nm averaging for left and right side) และวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับวิธีการแปลงค่าอนุพันธ์เป็นอันดับสองโดยใช้วิธีการปรับเรียบแบบซาวิตซ์กีโกเลย์ทุกช่วงความยาวคลื่น 10 นาโนเมตร (SNV + Savitzky-Golay second derivative : 10 nm averaging for left and right side) อีกด้วย

3) การสร้างสมการเพื่อทำนายที่เหมาะสมในการทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน หรือ PLSR

การสร้างสมการ PLSR เพื่อทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ด ได้แก่ ปริมาณแอมิโลส ปริมาณโปรตีน ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง และคุณสมบัติด้านความเหนียว จำนวน 102 ตัวอย่าง ซึ่งรวมทั้งจำนวนตัวอย่างข้าวพันธุ์บริสุทธิ์ และตัวอย่างที่ได้จากการผสมข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 กับข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิพันธุ์นั้น ได้กำหนดให้ค่าเคมีของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องเป็นตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) และสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้เป็นตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) จากนั้นให้เรียงลำดับค่าทางเคมีหรือตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) จากค่าน้อยไปมาก และแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มสร้างสมการ (Calibration) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) ด้วยอัตราส่วนตัวอย่างข้าวสารกลุ่มสร้างสมการต่อตัวอย่างข้าวสารกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องเท่ากับ 2:1 หลังจากนั้นทำการตรวจสอบสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ที่ผิดปกติ (Outlier) ด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก หรือ PCA หากตัวอย่างอยู่นอกกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ให้พิจารณาตัดสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ทิ้ง

เมื่อตรวจสอบข้อมูลที่ผิดปกติทั้งจากค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานและสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้แล้ว นำข้อมูลกลุ่มตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) และตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) มาหาความสัมพันธ์ด้วยการสร้างสมการโดยใช้วิธี PLSR ที่ช่วงความยาวคลื่น 1,100-2,500 นาโนเมตร และทดสอบสมการด้วยวิธีการทดสอบความแม่นยำภายในกลุ่มทั้งหมดหรือฟูลครอสแวลิดชัน (Full cross validation) โดยใช้ตัวอย่างทั้งหมด เพื่อตรวจสอบการปรับแต่งสเปกตรัม และช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการสร้างสมการแคลิเบรชัน ทำการพิจารณาความ

เหมาะสมของสมการ PLSR ที่สร้างขึ้นจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) และค่าความคลาดเคลื่อนของสมการ PLSR (SEC) โดยสมการที่ดีต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงและค่าความคลาดเคลื่อนของสมการ PLSR ต่ำ (Williams & Norris, 2001)

การตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้น ทำได้โดยนำค่าที่วิเคราะห์ได้จริงทางเคมีของตัวอย่างกลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) มาทำการเปรียบเทียบค่าทางเคมีที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ PLSR ที่สร้างขึ้นจากสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ (Predicted value) กับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริง (Actual value) การตรวจสอบความถูกต้องของสมการจะพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายด้วยตัวอย่างกลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง (Standard Error of Prediction; SEP) ค่าความแตกต่าง (Bias) ระหว่างค่าที่ทำนายได้จากสมการกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริงของแต่ละสมการ และค่า RPD (Ratio of standard error of Performance to standard Deviation) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าทางเคมีและค่า SEP ของตัวอย่างในกลุ่มที่ใช้ในการทดสอบความแม่นยำของสมการแคลิเบรชันและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ สมการที่สร้างขึ้นที่มีความแม่นยำควรมีค่า SEP และ Bias ต่ำ แต่ควรมีค่า RPD สูง (William & Norris, 2001; รณฤทธิ์ ฤทธิธิน, 2552a, หน้า 7-1 ถึง 7-16)

3.2.5.3 การสร้างสมการและการตรวจสอบความแม่นยำของสมการทำนายสำหรับแบ่งกลุ่มข้าวสารหอมมะลิจากข้าวสารกลุ่มอื่นที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิด้วยวิธี PCA

การสร้างสมการและการตรวจสอบความแม่นยำของสมการทำนายสำหรับแบ่งกลุ่มข้าวสารหอมมะลิจากข้าวสารกลุ่มอื่นที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิตามคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ จะนำข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากการวัดค่าด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้หรือสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ จำนวน 102 ตัวอย่าง มาเป็นตัวแปรจำแนกกลุ่ม เพื่อสร้างสมการทำนายสำหรับแบ่งกลุ่มข้าวสารหอมมะลิออกจากข้าวสารกลุ่มอื่นที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิโดยใช้เทคนิคทางสถิติวิธี PCA ทำได้โดยนำสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้ที่ผ่านการหาค่าเฉลี่ย การปรับแต่งสเปกตรัม และการตรวจสเปกตรัมที่ผิดปกติแล้ว มาสร้างสมการทำนายสำหรับแบ่งกลุ่มข้าวสารหอมมะลิออกจากข้าวสารกลุ่มอื่นที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิด้วยเทคนิคทางสถิติวิธี PCA จากนั้นพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักปัจจัย (PCA loading) และคะแนนปัจจัย (PCA score) บนแกนองค์ประกอบหลัก (Principal component; PC) โดยค่าน้ำหนักปัจจัยจะใช้ในการอธิบายโครงสร้างของข้อมูลในรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปร และค่าคะแนนปัจจัยจะอธิบายโครงสร้างของข้อมูลในรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวอย่าง ซึ่งจะแสดงถึงความคล้ายหรือความแตกต่างของตัวอย่าง โดยแต่ละตัวอย่างจะมีค่าคะแนน (Score) ในแต่ละ PC ซึ่งค่าเหล่านี้จะแสดงให้เห็นตำแหน่งของตัวอย่างตามแกน PC โดยตัวอย่างที่มีค่าคะแนนใกล้เคียงกันในแกน PC เดียวกัน จะมีความคล้ายกัน ในทางตรงกันข้ามตัวอย่างที่มีค่าคะแนนแตกต่างกันมากจะมีค่าคะแนนของตัวแปรเดิมนั้นแตกต่างกันด้วย (ธงชัย สุวรรณสิขณน์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช, 2552, หน้า 6-1 ถึง 6-33)

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสาร

ข้าวสารขนาดเต็มเมล็ด จำนวน 60 ตัวอย่าง ที่นำมาทดลองเป็นข้าวพันธุ์ที่มีขนาดเมล็ดยาวประกอบด้วยข้าวหอมมะลิ ข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำ ข้าวปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวปริมาณแอมิโลสสูง โดยศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณแอมิโลส ปริมาณโปรตีน ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง และคุณสมบัติด้านความหนืด ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่สามารถนำมาใช้ในการสร้างสมการทำนายค่าคุณภาพทางด้านเคมีกายภาพ และเป็นข้อมูลสำคัญในการศึกษาการปลอมปนข้าวพันธุ์อื่นที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิอีกด้วย

4.1.1 ปริมาณโปรตีน

ปริมาณโปรตีนในข้าวแต่ละพันธุ์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม วิธีการเพาะปลูก พันธุ์ข้าว และฤดูกาลเพาะปลูก เป็นต้น (Patrick & Hoskins, 1974, pp. 84-95) จากตารางที่ 4.1 พบว่าข้าวตัวอย่างมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 5.27 ± 0.02 ถึง $9.06 \pm 0.08\%$ โดยข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 60 และข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด และข้าวพันธุ์ชัยนาท 2 มีปริมาณโปรตีนน้อยที่สุด ซึ่งปริมาณโปรตีนในข้าวสารตัวอย่างที่แตกต่างกันมีสาเหตุมาจากปัจจัยดังกล่าวข้างต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีการเพาะปลูก Bahamaniar & Ranjbar (2007) พบว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนทำในช่วงที่ข้าวออกดอกจะมีผลทำให้ปริมาณโปรตีนในข้าวเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ Gomez & Veskosit (1973) พบว่าตัวอย่างข้าวพันธุ์เดียวกันเมื่อนำมาปลูกที่ประเทศไทยและฟิลิปปินส์จะมีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใย และคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกันสูงมาก อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ Marshall & Wadsworth (1994) ที่รายงานว่าข้าวจะมีปริมาณโปรตีนประมาณ 7.3-8.3% ของน้ำหนักตัวอย่าง โปรตีนจะทำหน้าที่ขัดขวางการซึมผ่านของน้ำเข้าไปในเมล็ดข้าว อีกทั้งข้าวที่มีปริมาณโปรตีนสูงจะมีผลทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกและอุณหภูมิการเกิดเจลลาตินเซชันเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย

4.1.2 ปริมาณแอมิโลส

ข้าวในกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูง ได้แก่ ข้าวพันธุ์ชัยนาท 2 พันธุ์ปทุมธานี 60 พันธุ์เหลืองประทิว 123 พันธุ์พิษณุโลก 2 และพันธุ์ชัยนาท 1 มีปริมาณแอมิโลสสูงที่สุด รองลงมาคือข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสปานกลาง ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำ และกลุ่มข้าวหอมมะลิ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) ความแตกต่างของปริมาณแอมิโลสในข้าวแต่ละพันธุ์ขึ้นอยู่กับปริมาณสตาร์ช (Starch content) Navaserarttavisootr (2004) พบว่าปริมาณสตาร์ชของกลุ่มพันธุ์ข้าวหอม (Aromatic rices) จะมีปริมาณต่ำกว่าข้าวกลุ่มที่ไม่ใช่ข้าวหอม (Non-aromatic rices) และยังพบว่าข้าวหอมมะลิมีปริมาณแอมิโลสไม่แตกต่างกับข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ยกเว้นข้าวพันธุ์หอมคลองหลวง เนื่องจากข้าวทั้ง 2 กลุ่ม จัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำนั่นเอง (งามชื่น คงเสรี, 2539, หน้า 34) Hu-lin *et al.* (2007) ยังพบว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนจะทำให้

ปริมาณแอมิโลสในเมล็ดข้าวลดลง แต่จะส่งผลให้ค่าความคงตัวของเจลเพิ่มขึ้นอีกด้วย ปริมาณแอมิโลสของข้าวแต่ละพันธุ์ที่วิเคราะห์ได้สอดคล้องกับ Juliano (1993) และงามชื่น คงเสรี (2539) ที่แบ่งกลุ่มตามปริมาณแอมิโลสเป็น 5 กลุ่ม คือ ข้าวเหนียว ข้าวเจ้าแอมิโลสต่ำมาก ข้าวเจ้าแอมิโลสต่ำ ข้าวเจ้าแอมิโลสปานกลาง และข้าวเจ้าแอมิโลสสูง (แสดงดังตารางที่ 2.3)

นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบการแบ่งกลุ่มข้าวตามรายงานของ Juliano (1993) และงามชื่น คงเสรี (2539) กับผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.1 พบว่าข้าวสารทั้ง 60 ตัวอย่าง สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำ ประกอบด้วยข้าวหอมมะลิ (ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์กข 15) พันธุ์หอมคลองหลวง พันธุ์ปทุมธานี 1 พันธุ์พิษณุโลก 1 ข้าวกลุ่มแอมิโลสปานกลาง ประกอบด้วยข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 2 พันธุ์สุพรรณบุรี 60 ในขณะที่ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูง ประกอบด้วยข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 พันธุ์ชัยนาท 2 พันธุ์เหลืองประทิว 123 พันธุ์พิษณุโลก 2 และพันธุ์ปทุมธานี 60 ตามลำดับ

4.1.3 ค่าความคงตัวของเจล

ค่าความคงตัวของเจลเป็นคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่สำคัญ สามารถนำมาใช้จำแนกความแตกต่างลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่มีปริมาณแอมิโลสใกล้เคียงกันได้ เนื่องจากค่าความคงตัวของเจลแบ่งข้าวแต่ละพันธุ์มีอัตราการคืนตัวไม่เท่ากัน ส่งผลให้เจลแบ่งมีความแข็งและอ่อนแตกต่างกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าเจลแบ่งที่แข็งจะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกแข็ง ร่วน ในขณะที่เจลแบ่งอ่อนจะทำให้ข้าวสุกมีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่ม เหนียว (Blakeney, 1979, pp. 343-353) เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.1 พบว่าข้าวหอมมะลิ (ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105) และข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำ (ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1) มีค่าความคงตัวของเจลสูงที่สุด รองลงมาคือข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสสูงตามลำดับ อย่างไรก็ตามข้าวหอมมะลิมีค่าความคงตัวของเจลไม่แตกต่างกับข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เนื่องจากจัดอยู่ในกลุ่มข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำ

นอกจากนี้จากตารางที่ 4.1 ยังพบว่าข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งเป็นข้าวที่จัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง แต่มีค่าความคงตัวของเจลไม่แตกต่างกับข้าวหอมมะลิและข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ งามชื่น คงเสรี (2539) และ Cheaupun, Wongpiyachon & Kongseree (2005) อธิบายว่าการที่ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 มีค่าความคงตัวของเจลสูงอาจมีสาเหตุมาจากลักษณะเฉพาะของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่มีอายุการเก็บรักษาไม่เกิน 4 เดือน จะมีลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกนุ่ม เนื่องจากค่าความคงตัวของเจลมีลักษณะเจลนุ่มปานกลาง ดังนั้น จึงส่งผลให้การไหลของเจลแบ่งหรือค่าความคงตัวของเจลไม่แตกต่างกับข้าวหอมมะลิและข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.1 พบว่าสามารถแบ่งกลุ่มข้าวตามค่าความคงตัวของเจลตามวิธีของ Cagampang, Perez & Juliano (1973) ได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มข้าวเจลนุ่ม (ระยะทางที่แบ่งสุกไหล 61-100 มิลลิเมตร) ได้แก่ ข้าวหอมมะลิและข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำ กลุ่มข้าวเจลนุ่มปานกลาง (ระยะทางที่แบ่งสุกไหล 41-60 มิลลิเมตร) ได้แก่ ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 2 และสุพรรณบุรี 60 และกลุ่มข้าวเจลแข็ง (ระยะทางที่แบ่งสุกไหล 26-40 มิลลิเมตร) ได้แก่ ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูง ซึ่งประกอบด้วยข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ข้าวพันธุ์ชัยนาท 2 ข้าวพันธุ์เหลืองประทิว 123 ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 60 และข้าวพันธุ์พิษณุโลก

4.1.4 ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง

ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง มีความสำคัญต่อคุณภาพด้านการหุงต้ม และแปรรูปข้าว เนื่องจากสามารถใช้ประเมินอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชข้าวทางอ้อม (Delwiche *et al.*, 1996, pp. 257-263) ค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าข้าวหอมมะลิมีค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่างอยู่ระดับ 7.00 หมายถึงเมล็ดข้าวสลายตัวทั้งเมล็ดและมีลักษณะเป็นเมือกใส ซึ่งไม่แตกต่างกับข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำ ($p>0.05$) ยกเว้นข้าวพันธุ์พิษณุโลก 1 ซึ่งมีค่าการสลายเมล็ดข้าวในต่างอยู่ในระดับ 5.00 และไม่แตกต่างกับข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 2 ($p>0.05$) ที่จัดอยู่ในกลุ่มข้าวปริมาณแอมิโลสปานกลาง ในขณะที่ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูงจะมีค่าการสลายเมล็ดข้าวในต่างสารละลายต่ำที่สุด โดยอยู่ในระดับ 1.00-2.00 ซึ่งหมายถึงเมล็ดข้าวไม่เปลี่ยนแปลงถึงพองตัวเล็กน้อย ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับ Little *et al.* (1958) ซึ่งแบ่งข้าวได้ 3 กลุ่ม คือ ข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันต่ำ (ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง 6-7) ข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันปานกลาง (ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง 4-5) และข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันสูง (ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง 1-3) แสดงดังตารางที่ 2.5

Nishi *et al.* (2001) รายงานว่าระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างแต่ ละพันธุ์ที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากโครงสร้างของแอมิโลเพกทิน โดย Umemoto *et al.* (2002) พบว่าสตาร์ชข้าวที่มีองค์ประกอบของแอมิโลเพกทินสายสั้นสูงจะแตกตัวได้ง่ายกว่าสตาร์ชข้าวที่มีแอมิโลเพกทินสายยาวในปริมาณที่สูง นอกจากนี้ Nakamura *et al.* (2002) พบว่าปริมาณแอมิโลสไม่มีความสัมพันธ์กับค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง ซึ่งสอดคล้องกับ Harushima *et al.* (1998) พบว่าในสตาร์ชข้าวจะมี Amylopectin-synthesizing enzyme ทำหน้าที่สังเคราะห์ยีนที่มีคุณลักษณะแตกต่างกัน ส่งผลให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชตลอดจนโครงสร้างของแอมิโลเพกทินในเมล็ดข้าวแตกต่างกันอีกด้วย ซึ่งความยาวของสายแอมิโลเพกทินนั้นมีผลต่อการแตกตัวของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4.1 ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของตัวอย่างข้าวสาร

| กลุ่ม/พันธุ์ข้าว | ปริมาณโปรตีน (%) | ปริมาณแอมิโลส (%) | ค่าความคงตัวของเจล (มม.) | ค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง |
|--|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| ข้าวหอมมะลิ (n = 50) | | | | |
| 1. ข้าวดอกมะลิ 105 (n = 31) | 7.01 ± 0.71 ^{bc} | 16.09 ± 1.12 ^{ef} | 79.06 ± 4.16 ^a | 7.00 ± 0.00 ^a |
| 2. กข 15 (n = 19) | 6.97 ± 0.83 ^{bc} | 16.03 ± 1.46 ^{ef} | 73.63 ± 5.76 ^{ab} | 7.00 ± 0.00 ^a |
| ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำ (n = 3) | | | | |
| 1. หอมคลองหลวง (n = 1) | 6.49 ± 0.01 ^c | 18.25 ± 0.22 ^{cd} | 71.50 ± 0.72 ^{ab} | 7.00 ± 0.00 ^a |
| 2. ปทุมธานี 1 (n = 1) | 8.13 ± 0.03 ^{ab} | 16.60 ± 1.11 ^{de} | 77.50 ± 0.17 ^a | 7.00 ± 0.00 ^a |
| 3. พิษณุโลก 1 (n = 1) | 6.92 ± 0.01 ^{bc} | 14.35 ± 0.07 ^f | 71.00 ± 1.04 ^{ab} | 5.00 ± 0.00 ^b |
| ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสปานกลาง (n = 2) | | | | |
| 1. สุพรรณบุรี 2 (n = 1) | 7.57 ± 0.02 ^{bc} | 19.65 ± 0.50 ^c | 59.50 ± 0.73 ^{cd} | 5.00 ± 0.00 ^b |
| 2. สุพรรณบุรี 60 (n = 1) | 9.06 ± 0.08 ^a | 22.45 ± 0.34 ^b | 55.00 ± 1.45 ^d | 4.00 ± 0.00 ^c |
| ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูง (n = 5) | | | | |
| 1. ชัยนาท 1 (n = 1) | 7.52 ± 0.16 ^{bc} | 26.60 ± 0.29 ^a | 65.50 ± 0.58 ^{bc} | 2.00 ± 0.00 ^d |
| 2. ชัยนาท 2 (n = 1) | 5.27 ± 0.02 ^d | 28.65 ± 0.23 ^a | 39.00 ± 1.14 ^e | 1.00 ± 0.00 ^e |
| 3. เหลืองประทิว 123 (n = 1) | 6.85 ± 0.04 ^{bc} | 27.25 ± 0.13 ^a | 41.00 ± 1.24 ^e | 1.00 ± 0.00 ^e |
| 4. พิษณุโลก 2 (n = 1) | 7.02 ± 0.13 ^{bc} | 26.65 ± 0.26 ^a | 41.25 ± 0.96 ^e | 1.00 ± 0.00 ^e |
| 5. ปทุมธานี 60 (n = 1) | 6.94 ± 0.01 ^{bc} | 28.55 ± 0.13 ^a | 41.50 ± 1.00 ^e | 1.00 ± 0.00 ^e |

^{a,b,c} ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.1.5 คุณสมบัติด้านความหนืด

ความหนืดของแป้งเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญต่อการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสและการแปรรูปอาหารที่มีข้าวเป็นองค์ประกอบ (Meadows & Barton II, 2002, pp. 563-566) คุณสมบัติด้านความหนืดแสดงดังตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.1

4.1.5.1 ความหนืดสูงสุด

ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ ได้แก่ ข้าวพันธุ์หอมคลองหลวง พันธุ์ปทุมธานี 1 และพันธุ์พิษณุโลก 1 มีค่าความหนืดสูงสุด รองลงมาคือ ข้าวหอมมะลิ ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสสูง ตามลำดับ Meadows & Barton-II (2002) และ Patindol *et al.* (2009) พบว่าปริมาณแอมิโลสมีผลต่อค่าความหนืดสูงสุดของแป้ง เนื่องจากโมเลกุลของแอมิโลสจะไปยับยั้งการพองตัวของเม็ดแป้งในระหว่างการให้ความร้อนแก่น้ำแป้งที่อุณหภูมิ 95°C จึงส่งผลให้ค่าความหนืดสูงสุดของข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำสูงกว่าข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูง ตามลำดับ

4.1.5.2 การแตกตัวของแป้งสุก

การแตกตัวของแป้งสุกเป็นผลต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดกับค่าความหนืดที่คงที่ต่อการกวน ถ้าค่าการแตกตัวของแป้งสุกต่ำจะแสดงถึงจำนวนการแตกตัวของเม็ดแป้งต่ำด้วย (Park, Kim & Kim, 2001, pp. 151-156) ข้าวหอมมะลิมีค่าการแตกตัวของแป้งสุกไม่แตกต่างกับข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำ ($p > 0.05$) แต่มีแนวโน้มสูงกว่าข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวกลุ่มแอมิโลสสูง ตามลำดับ ($p < 0.05$) โดย Meadows & Barton-II (2002) และ Patindol *et al.* (2009) พบว่าค่าการแตกตัวของแป้งสุกมีความสัมพันธ์ในทางบวกกับสายโซ่ในโครงสร้างของแอมิโลเพกทินและมีความสัมพันธ์ในทางบวกกับสายโซ่ในโครงสร้างของแอมิโลเพกทินและมีความสัมพันธ์ในทางลบกับปริมาณแอมิโลส จึงมีผลทำให้ข้าวหอมมะลิและข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำซึ่งในเม็ดแป้งประกอบด้วยแอมิโลสเพกทินสูงและปริมาณแอมิโลสต่ำจึงมีค่าการแตกตัวของแป้งสุกสูงกว่าข้าวในกลุ่มอื่น ๆ ดังผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.2

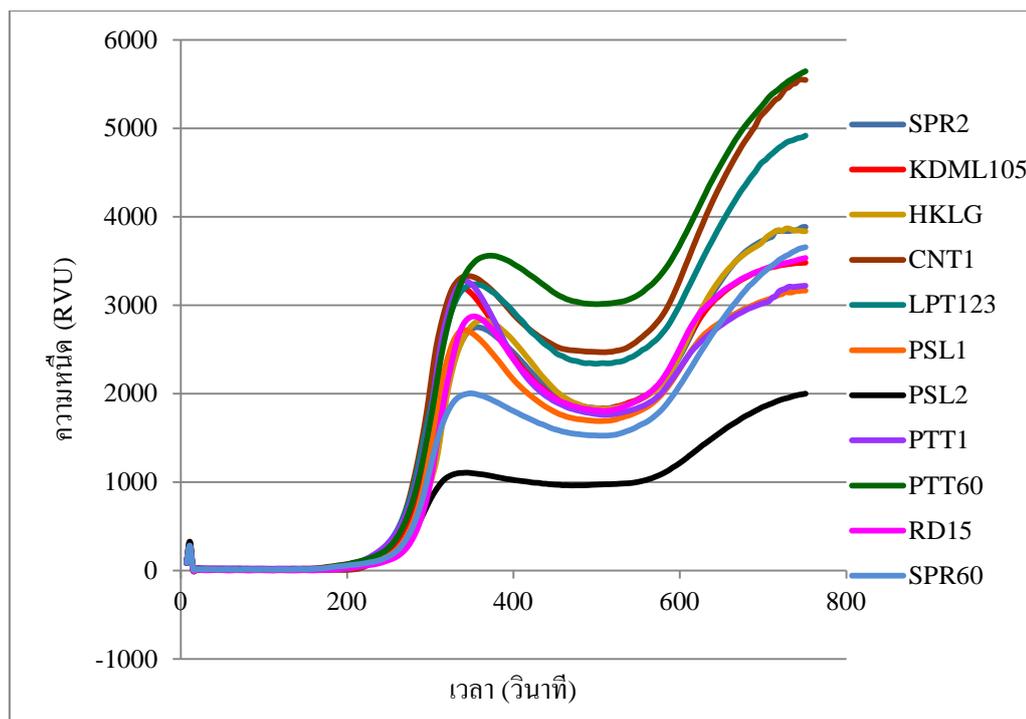
4.1.5.3 ค่าความคงตัวของแป้งสุก

ค่าความคงตัวของแป้งสุกเป็นค่าผลต่างระหว่างค่าความหนืดสุดท้ายกับค่าความหนืดสูงสุด ค่าความคงตัวของแป้งสุกจะแสดงถึงการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชข้าว ซึ่งสามารถจำแนกความแตกต่างของข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกันได้ (Gravois & Webb, 1997, pp. 25-29) จากตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.1 พบว่าข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวพันธุ์เหลืองประทิว 123 จะมีค่าความคงตัวของแป้งสุกสูงที่สุด รองลงมาคือ ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ และข้าวหอมมะลิ ตามลำดับ นอกจากนี้จากตารางที่ 4.2 ยังพบว่าข้าวหอมมะลิมีค่าความคงตัวของแป้งสุกต่ำกว่าข้าวกลุ่มที่มีปริมาณต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ในการแบ่งกลุ่มข้าวหอมมะลิออกจากข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำโดยพิจารณาจากค่าความคงตัวของแป้งสุก

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวสาร

| กลุ่ม/พันธุ์ข้าว | ความหนืดสูงสุด (RVU) | การแตกตัวของแป้งสุก (RVU) | ความคงตัวของแป้งสุก (RVU) | ความหนืดสุดท้าย (RVU) | อุณหภูมิแป้งสุก (°C) | ความหนืดหลังการทำเย็น (RVU) |
|--|-------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| ข้าวหอมมะลิ (n = 50) | | | | | | |
| 1. ข้าวดอกมะลิ 105 (n = 31) | 1,842 ± 11 ^b | 1,103 ± 7 ^a | -763 ± 17 ^e | 3,045 ± 14 ^e | 84.46 ± 0.90 ^{de} | 1,660 ± 9 ^e |
| 2. กข 15 (n = 19) | 1,753 ± 12 ^b | 1,062 ± 6 ^{ab} | -595 ± 11 ^e | 3,000 ± 28 ^e | 84.84 ± 0.55 ^{cd} | 1,612 ± 8 ^e |
| ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำ (n = 3) | | | | | | |
| 1. หอมคลองหลวง (n = 1) | 2,180 ± 2 ^a | 1,060 ± 1 ^{ab} | 128 ± 3 ^d | 3,165 ± 3 ^{de} | 84.45 ± 0.50 ^{cd} | 1,949 ± 2 ^d |
| 2. ปทุมธานี 1 (n = 1) | 2,073 ± 1 ^a | 1,025 ± 2 ^{ab} | 221 ± 1 ^d | 3,436 ± 2 ^{bcd} | 85.55 ± 0.19 ^{cd} | 1,953 ± 2 ^d |
| 3. พิษณุโลก 1 (n = 1) | 2,036 ± 3 ^a | 1,083 ± 4 ^{ab} | 161 ± 2 ^d | 3,236 ± 2 ^{cde} | 88.50 ± 0.20 ^{ab} | 1,869 ± 2 ^d |
| ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสปานกลาง (n = 2) | | | | | | |
| 1. สุพรรณบุรี 2 (n = 1) | 1,247 ± 1 ^d | 976 ± 4 ^b | 932 ± 1 ^c | 3,561 ± 1 ^{abc} | 86.25 ± 0.23 ^c | 2,145 ± 1 ^c |
| 2. สุพรรณบุรี 60 (n = 1) | 1,545 ± 3 ^c | 967 ± 2 ^b | 997 ± 2 ^c | 3,546 ± 5 ^{abc} | 88.30 ± 0.96 ^{ab} | 2,146 ± 4 ^c |
| ข้าวกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูง (n = 5) | | | | | | |
| 1. ชัยนาท 1 (n = 1) | 1,038 ± 7 ^e | 484 ± 3 ^c | 1,036 ± 4 ^b | 3,679 ± 4 ^{ab} | 83.25 ± 0.17 ^e | 2,465 ± 7 ^a |
| 2. ชัยนาท 2 (n = 1) | 934 ± 3 ^e | 464 ± 5 ^c | 1,464 ± 2 ^b | 3,742 ± 1 ^{ab} | 89.50 ± 0.57 ^a | 2,313 ± 2 ^b |
| 3. เหลืองประทิว 123 (n = 1) | 958 ± 2 ^e | 512 ± 2 ^c | 1,887 ± 2 ^a | 3,755 ± 2 ^{ab} | 83.30 ± 0.11 ^e | 2,444 ± 1 ^a |
| 4. พิษณุโลก 2 (n = 1) | 983 ± 4 ^e | 417 ± 4 ^{cd} | 1,401 ± 4 ^b | 3,629 ± 17 ^{ab} | 87.82 ± 1.65 ^b | 2,311 ± 6 ^b |
| 5. ปทุมธานี 60 (n = 1) | 1,062 ± 2 ^e | 334 ± 5 ^d | 1,559 ± 2 ^b | 3,856 ± 6 ^a | 86.30 ± 0.29 ^c | 2,442 ± 2 ^a |

a,b,c ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 4.1 ลักษณะความหนืดของน้ำแป้งของข้าวพันธุ์ต่าง ๆ เมื่อวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว

4.1.5.4 ค่าความหนืดสุดท้าย

ค่าความหนืดสุดท้าย เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของความหนืดของแป้งนิยมใช้ในการอธิบายลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ความหนืดจะเกิดขึ้นหลังการหุงต้มและทำให้เย็น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2544, หน้า 3-4) จากตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.1 จะพบว่าค่าความหนืดสุดท้ายจะมีลักษณะคล้ายกับค่าความคงตัวของแป้งสุก กล่าวคือค่าความหนืดสุดท้ายมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณแอมิโลสในข้าวเพิ่มสูงขึ้นและส่งผลให้ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสสูงมีค่าความหนืดสุดท้ายสูงกว่าข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ และข้าวหอมมะลิ ตามลำดับ ($p < 0.05$) แต่ค่าความหนืดสุดท้ายของข้าวหอมมะลิไม่แตกต่างกับข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ ($p > 0.05$)

4.1.5.5 อุณหภูมิแป้งสุก

อุณหภูมิแป้งสุก เป็นอุณหภูมิที่แสดงถึงเม็ดสตาร์ชเริ่มพองตัวและเกิดกระบวนการเจลาติไนเซชัน ทำให้ความหนืดของน้ำแป้งเพิ่มสูงขึ้น (Perdon *et al.*, 2001, pp. 205-209) อุณหภูมิแป้งสุกของตัวอย่างข้าวอยู่ในช่วง 89.50 ± 0.57 ถึง $83.25 \pm 0.17^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิแป้งสุกของข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสสูงมีแนวโน้มสูงกว่าตัวอย่างข้าวกลุ่มอื่น ๆ ยกเว้นข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และข้าวพันธุ์เหลืองประทิว 123

4.1.5.6 ความหนืดหลังการทำเย็น

ค่าความหนืดหลังการทำเย็นของข้าวพันธุ์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.1 โดยพบว่าข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสสูงมีค่าความหนืดหลังการทำเย็นสูงที่สุด รองลงมาคือ ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ และข้าวหอมมะลิ ตามลำดับ ($p < 0.05$) และยังพบว่าข้าวหอมมะลิมีค่าความหนืดหลังการทำเย็นแตกต่างกับข้าวกลุ่มที่มี

ปริมาณแอมิโลสต่ำ ($p < 0.05$) ดังนั้น ค่าความหนืดหลังการทำเย็นจึงเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจำแนกข้าวหอมมะลิออกจากข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำได้

จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของตัวอย่างข้าวสารทั้ง 60 ตัวอย่าง จะพบว่าปริมาณโปรตีนไม่สามารถนำมาใช้จำแนกข้าวหอมมะลิออกจากข้าวกลุ่มอื่น ได้ แต่ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง และคุณสมบัติทางด้านความหนืดสามารถนำมาใช้ในการจำแนกข้าวหอมมะลิออกจากข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสสูงได้ แต่ไม่สามารถนำมาจำแนกข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำได้ อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองที่วิเคราะห์ได้จะพบว่าคุณสมบัติด้านความหนืด โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความคงตัวของแป้งสูงสามารถนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการจำแนกข้าวหอมมะลิออกจากข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำได้

4.2 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวหอมมะลิผสมกับข้าวปทุมธานี 1 และข้าวพันธุ์ชัยนาท 1

ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 เป็นข้าวที่อยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำและกลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง ตามลำดับ ข้าวทั้งสองพันธุ์นี้นิยมนำมาผสมกับข้าวหอมมะลิเนื่องจากมีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับข้าวหอมมะลิมากที่สุด อีกทั้งข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ยังจัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำเช่นเดียวกับข้าวหอมมะลิ นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 อายุการเก็บรักษาไม่เกิน 4 เดือน จะมีค่าความคงตัวของเจลใกล้เคียงกับข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำอีกด้วย จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นผู้ประกอบการค้าข้าวส่วนใหญ่จึงนิยมนำข้าวทั้งสองพันธุ์มาผสมรวมกับข้าวหอมมะลิ และส่งผลให้ข้าวหอมมะลิมีคุณภาพด้านการหุงต้ม รับประทาน และการแปรรูปลดลง ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค (งามชื่น คงเสรี, 2539, หน้า 42) ดังนั้น การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวหอมมะลิผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และสร้างสมการสำหรับทำนายการปลอมปนข้าวหอมมะลิเป็นสำคัญ

4.2.1 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าปริมาณโปรตีนของตัวอย่างข้าวดังกล่าวอยู่ในช่วง 6.46 ± 0.25 ถึง $7.39 \pm 0.47\%$ โดยข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% จะมีปริมาณโปรตีนน้อยที่สุด และข้าวสารพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 25 : 75 จะมีปริมาณโปรตีนมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวสารพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% และตัวอย่างข้าวชาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันนั้นจะมีปริมาณโปรตีนไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าถึงแม้ปริมาณโปรตีนในข้าวแต่ละพันธุ์จะแตกต่างกันโดยมีสาเหตุจากปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม วิธีการเพาะปลูก และพันธุ์ข้าวตามรายงานการวิจัยของ Patrick & Hoskinw (1974) แต่เมื่อนำข้าวมาผสมกันในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจะมีทำให้ปริมาณโปรตีนในข้าวแต่ละตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าว ในสารละลายต่างของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

| อัตราส่วนผสม (%) | | ปริมาณโปรตีน (%) | ปริมาณแอมิโลส (%) | ค่าความคงตัวของเจล (มม.) | ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง |
|------------------|------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| ขาวดอกมะลิ 105 | ปทุมธานี 1 | | | | |
| 100 | 0 | 7.33 ± 0.37 ^{abc} | 15.90 ± 0.70 ^{abc} | 85.33 ± 1.52 ^{ab} | 6.96 ± 0.58 ^{ab} |
| 95 | 5 | 7.43 ± 0.25 ^{abc} | 16.16 ± 0.57 ^{abc} | 83.00 ± 1.73 ^{abc} | 6.83 ± 0.58 ^{abcd} |
| 90 | 10 | 7.30 ± 0.20 ^{abc} | 15.13 ± 0.80 ^{cde} | 81.66 ± 2.88 ^{abcd} | 6.83 ± 0.12 ^{abcd} |
| 85 | 15 | 6.86 ± 0.40 ^{bc} | 15.46 ± 0.41 ^{abcde} | 80.66 ± 1.15 ^{bcd} | 6.86 ± 0.06 ^{abcd} |
| 80 | 20 | 7.46 ± 0.40 ^{abc} | 15.46 ± 1.01 ^{abcde} | 81.33 ± 3.05 ^{abcd} | 6.76 ± 0.57 ^{bc} |
| 75 | 25 | 7.20 ± 0.40 ^{abc} | 15.56 ± 0.96 ^{abcd} | 80.66 ± 1.15 ^{bcd} | 6.70 ± 0.00 ^d |
| 70 | 30 | 7.06 ± 0.76 ^{abc} | 16.00 ± 0.46 ^{abc} | 82.00 ± 2.00 ^{abcd} | 6.83 ± 0.15 ^{abcd} |
| 65 | 35 | 7.36 ± 0.64 ^{abc} | 15.16 ± 1.05 ^{cde} | 79.33 ± 5.13 ^{bc} | 6.93 ± 0.05 ^{abc} |
| 60 | 40 | 6.76 ± 0.46 ^{bc} | 16.53 ± 0.70 ^{bc} | 82.00 ± 2.00 ^{abcd} | 6.80 ± 0.10 ^{bcd} |
| 55 | 45 | 7.26 ± 0.55 ^{abc} | 16.80 ± 0.45 ^a | 83.33 ± 1.15 ^{abc} | 6.86 ± 0.15 ^{abcd} |
| 50 | 50 | 6.83 ± 0.51 ^{bc} | 15.73 ± 0.40 ^{abcd} | 82.66 ± 4.04 ^{abc} | 6.80 ± 0.10 ^{bcd} |
| 45 | 55 | 6.70 ± 0.17 ^{bc} | 14.90 ± 0.52 ^{cde} | 76.66 ± 5.03 ^d | 6.80 ± 0.00 ^{bcd} |
| 40 | 60 | 6.73 ± 0.60 ^{bc} | 14.13 ± 0.06 ^e | 83.66 ± 4.72 ^{abc} | 6.83 ± 0.15 ^{abcd} |
| 35 | 65 | 7.30 ± 0.61 ^{abc} | 14.50 ± 0.53 ^{de} | 83.33 ± 1.16 ^{abc} | 6.86 ± 0.15 ^{abcd} |
| 30 | 70 | 6.53 ± 0.35 ^c | 14.90 ± 0.50 ^{cde} | 84.33 ± 0.54 ^{abc} | 6.90 ± 0.10 ^{abc} |
| 25 | 75 | 7.93 ± 0.47 ^a | 15.33 ± 0.40 ^{bcde} | 83.66 ± 1.52 ^{abc} | 6.86 ± 0.06 ^{abcd} |
| 20 | 80 | 7.03 ± 0.49 ^{abc} | 15.46 ± 1.01 ^{abcde} | 82.66 ± 3.05 ^{abc} | 6.80 ± 0.10 ^{bcd} |
| 15 | 85 | 7.56 ± 0.32 ^{ab} | 15.36 ± 0.40 ^{bcde} | 85.33 ± 0.57 ^{ab} | 6.90 ± 0.00 ^{abc} |
| 10 | 90 | 7.26 ± 0.92 ^{abc} | 15.46 ± 0.63 ^{abcde} | 83.67 ± 4.93 ^{abc} | 6.97 ± 0.57 ^{ab} |
| 5 | 95 | 7.10 ± 0.70 ^{abc} | 16.03 ± 0.66 ^{abc} | 86.00 ± 2.00 ^{ab} | 7.00 ± 0.00 ^a |
| 0 | 100 | 6.46 ± 0.25 ^c | 15.26 ± 1.00 ^{bcde} | 87.00 ± 1.73 ^a | 7.00 ± 0.00 ^a |

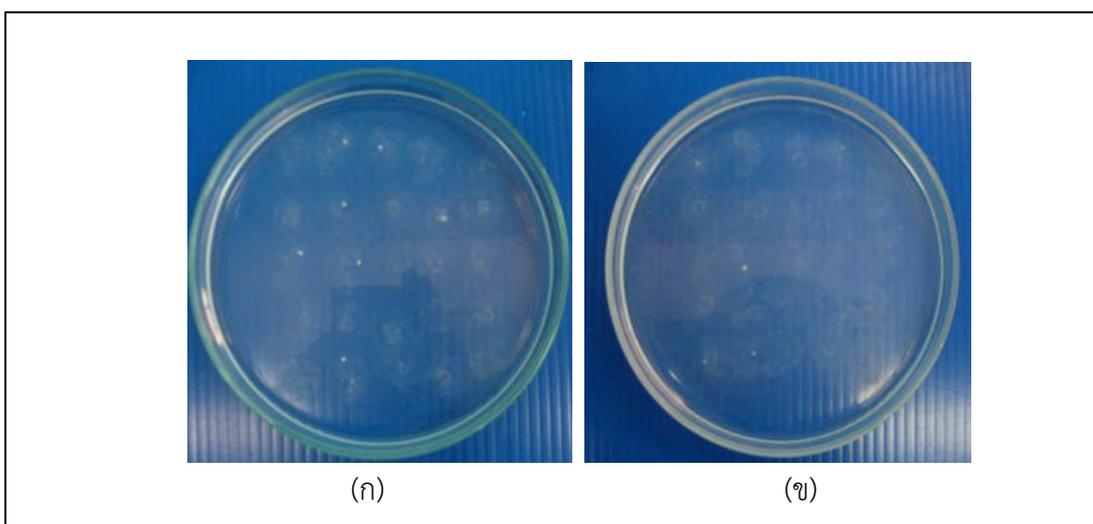
a,b,c ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์ปทุมธานี 1 เป็นข้าวที่จัดอยู่ในกลุ่มข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำและกลุ่มข้าวหอมเหมือนกัน แต่ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จัดอยู่ในกลุ่มข้าวหอมมะลิไทย ในขณะที่ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ไม่ได้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มข้าวหอมมะลิไทยแต่อยู่ในกลุ่มข้าวหอมเท่านั้น (งามชื่น คงเสรี, 2539, หน้า 14) จากการที่ข้าวทั้ง 2 พันธุ์นี้จัดอยู่ในกลุ่มข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำเหมือนกัน จึงส่งผลให้ปริมาณแอมิโลสของตัวอย่างข้าวทั้ง 2 พันธุ์ และตัวอย่างข้าวที่ผสมกันในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจึงมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 4.3) อย่างไรก็ตามจากตารางที่ 4.3 จะพบว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนเท่ากับ 55 : 45 จะมีปริมาณแอมิโลสสูงที่สุด ($16.80 \pm 0.45\%$) และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนเท่ากับ 40 : 60 จะมีปริมาณแอมิโลสต่ำที่สุด ($14.13 \pm 0.06\%$)

จากการที่ปริมาณแอมิโลสมีความสัมพันธ์ทางลบ (Negative correlation) กับค่าความคงตัวของเจลและค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง กล่าวคือข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะมีระยะเวลาไหลของเจลแบ่งต่ำหรือค่าความคงตัวของเจลต่ำ และมีค่าการสลายของเมล็ดข้าวใน

สารละลายต่างเท่ากับ 1 (เมล็ดข้าวไม่มีการสลายตัว) ในขณะที่ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำจะมีค่าความคงตัวของเจลสูง และมีค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างเท่ากับ 6-7 (เมล็ดข้าวสลายตัวเป็นวุ้นใส) (Juliano, 1993, pp. 112; Little, Hilder & Dawson, 1958, pp. 111-126; Cagampang, Perez & Juliano, 1973, pp. 1589-1594) ซึ่งงานวิจัยครั้งนี้จะพบว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 เป็นข้าวที่อยู่ในกลุ่มปริมาณแอมิโลสต่ำและมีปริมาณแอมิโลสไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4.3) จึงส่งผลให้ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ และตัวอย่างข้าวที่ผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วย ($p>0.05$) จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าความคงตัวของเจลแบ่งอยู่ในช่วง 77.66 ± 5.03 ถึง 87.00 ± 1.73 มิลลิเมตร โดยข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนเท่ากับ 45 : 55 จะมีค่าความคงตัวของเจลแบ่งต่ำที่สุด ในขณะที่ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% จะมีค่าความคงตัวของเจลแบ่งสูงที่สุด

นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% และตัวอย่างข้าวที่ผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันมีค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างอยู่ในช่วง 6-7 (การตรวจสอบด้วยสายตา) แสดงว่าเมล็ดข้าวมีการสลายตัวตลอดทั้งเมล็ดและมีลักษณะเป็นเมือกใส (ภาพที่ 4.2) จากผลการทดลองดังกล่าวจึงทำให้สรุปได้ว่าข้าวพันธุ์ดอกมะลิ 105 ไม่สามารถจำแนกออกจากข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ได้ด้วยวิธีการตรวจสอบการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง หรือกล่าวได้ว่าวิธีการตรวจสอบการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างไม่สามารถนำมาตรวจสอบการปลอมปนข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1ปลอมปนได้



ภาพที่ 4.2 ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ก) และข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 (ข) เมื่อแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.7% นาน 23 ชั่วโมง

คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 และข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าค่าความหนืดสูงสุดของข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% จะมีค่าความหนืดสูงที่สุด ($1,869 \pm 6$ RVU) และข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1

ที่อัตราส่วน 80 : 20 ($1,819 \pm 8$ RVU) และ 55 : 45 ($1,823 \pm 9$ RVU) จะมีค่าความหนืดสูงสุดต่ำที่สุดและไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จากตารางที่ 4.3 ยังพบว่าข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วน 85 : 15 ($1,829 \pm 2$ RVU), 80 : 20 ($1,819 \pm 8$ RVU), 75 : 25 ($1,824 \pm 7$ RVU), 70 : 30 ($1,828 \pm 15$ RVU), 60 : 40 ($1,839 \pm 4$ RVU), 55 : 45 ($1,823 \pm 9$ RVU), 50 : 50 ($1,837 \pm 6$ RVU), 45 : 55 ($1,830 \pm 14$ RVU), 35 : 65 ($1,837 \pm 6$ RVU) และ 15 : 85 ($1,836 \pm 6$ RVU) มีค่าความหนืดสูงสุดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่มีความแตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% ($1,843 \pm 4$ RVU) และข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วน 95 : 5 ($1,844 \pm 9$ RVU), 90 : 10 ($1,842 \pm 2$ RVU), 65 : 35 ($1,851 \pm 10$ RVU), 30 : 70 ($1,854 \pm 3$ RVU), 25 : 75 ($1,855 \pm 6$ RVU), 20 : 80 ($1,861 \pm 4$ RVU), 10 : 90 ($1,865 \pm 5$ RVU) และ 5 : 95 ($1,843 \pm 3$ RVU) ($p < 0.05$)

ปริมาณแอมิโลสในเมล็ดข้าวจะไปยับยั้งการพองตัวของเม็ดแป้งในระหว่างการให้ความร้อนส่งผลให้ค่าความหนืดสูงสุดของข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่าข้าวกลุ่มปริมาณปานกลาง และสูง (Meadows & Barton-II, 2002, pp. 563-566; Patindol, Gu & Wang, 2009, pp. 3-11) จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสสูงกว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ตารางที่ 4.3) จึงมีค่าความหนืดสูงสุดสูงกว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 อย่างไรก็ตามเมื่อนำข้าวทั้ง 2 พันธุ์มาผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ จะพบว่าค่าความหนืดสูงสุดส่วนใหญ่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) นอกจากนี้ผลการทดลองดังกล่าวยังพบว่าข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วน 20 : 80 ($1,861 \pm 4$ RVU) และ 10 : 90 ($1,865 \pm 5$ RVU) จะมีค่าความหนืดสูงสุดแตกต่างจากข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วนอื่น ๆ และข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% แสดงว่าค่าความหนืดสูงสุดสามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ผสม ที่ 80-90% ได้

ค่าการแตกตัวของแป้งสุกของตัวอย่างข้าวสารต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% มีค่าการแตกตัวของแป้งสุกต่ำที่สุด ($1,023 \pm 9$ RVU) และแตกต่างกับค่าการแตกตัวของแป้งสุกของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% และข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.4 จะพบว่าค่าการแตกตัวของแป้งสุกของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% ไม่มีความแตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วน 95 : 5 ($1,105 \pm 5$ RVU), 90 : 10 ($1,109 \pm 56$ RVU), 85 : 15 ($1,116 \pm 55$ RVU), 75 : 25 ($1,106 \pm 3$ RVU), 70 : 30 ($1,085 \pm 6$ RVU), 65 : 35 ($1,088 \pm 2$ RVU) และ 60 : 40 ($1,087 \pm 7$ RVU) ($p > 0.05$) ตามลำดับ ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าถ้ามีข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 อยู่ในช่วง 5-40% จะไม่สามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้ค่าการแตกตัวของแป้งสุกได้ แต่ถ้ามีการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่ 55% ขึ้นไป มีแนวโน้มที่จะตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้โดยใช้ค่าการแตกตัวของแป้งสุก (ตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

| อัตราส่วนผสม (%) | | คุณสมบัติด้านความหนืด (RVU) | | | | |
|------------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| ข้าวดอกมะลิ 105 | ปทุมธานี 1 | ความหนืดสูงสุด | การแตกตัวของแป้งสุก | ค่าความคงตัวของแป้งสุก | ความหนืดสุดท้าย | ความหนืดหลังการทำเย็น |
| 100 | 0 | 1,843 ± 4 ^{defg} | 1,110 ± 8 ^a | -763 ± 6 ^{jk} | 3,035 ± 12 ^j | 1,649 ± 10 ^{hi} |
| 95 | 5 | 1,844 ± 9 ^{defg} | 1,105 ± 5 ^a | -775 ± 5 ^k | 3,041 ± 5 ^j | 1,649 ± 7 ^{hi} |
| 90 | 10 | 1,842 ± 2 ^{efghi} | 1,109 ± 56 ^a | -765 ± 5 ^{jk} | 3,046 ± 6 ^j | 1,648 ± 2 ^{hi} |
| 85 | 15 | 1,829 ± 2 ^{ijkl} | 1,116 ± 55 ^a | -770 ± 6 ^k | 3,047 ± 6 ^j | 1,632 ± 5 ^{jk} |
| 80 | 20 | 1,819 ± 8 ^l | 1,065 ± 12 ^{bcde} | -761 ± 2 ^{jk} | 3,107 ± 5 ⁱ | 1,623 ± 4 ^k |
| 75 | 25 | 1,824 ± 7 ^{kl} | 1,106 ± 3 ^a | -746 ± 6 ^{hijk} | 3,144 ± 17 ^h | 1,648 ± 4 ^{hi} |
| 70 | 30 | 1,828 ± 15 ^{jkl} | 1,085 ± 6 ^{abcd} | -764 ± 10 ^{jk} | 3,205 ± 6 ^{fg} | 1,659 ± 6 ^{gh} |
| 65 | 35 | 1,851 ± 10 ^{cdef} | 1,088 ± 2 ^{ab} | -735 ± 11 ^{ghi} | 3,222 ± 5 ^f | 1,669 ± 4 ^{fg} |
| 60 | 40 | 1,839 ± 4 ^{fghij} | 1,087 ± 7 ^{abc} | -755 ± 6 ^{ijk} | 3,202 ± 4 ^{fg} | 1,653 ± 9 ^h |
| 55 | 45 | 1,823 ± 9 ^l | 1,067 ± 4 ^{bcde} | -742 ± 3 ^{ghij} | 3,186 ± 4 ^g | 1,637 ± 11 ^{jk} |
| 50 | 50 | 1,837 ± 6 ^{fghijk} | 1,071 ± 6 ^{bcde} | -726 ± 13 ^{fg} | 3,253 ± 67 ^e | 1,678 ± 4 ^{ef} |
| 45 | 55 | 1,830 ± 14 ^{hijkl} | 1,047 ± 6 ^{ef} | -728 ± 9 ^{fg} | 3,260 ± 10 ^e | 1,668 ± 18 ^{fg} |
| 40 | 60 | 1,843 ± 4 ^{defg} | 1,063 ± 4 ^{bcde} | -713 ± 12 ^{ef} | 3,438 ± 9 ^d | 1,688 ± 4 ^{de} |
| 35 | 65 | 1,837 ± 4 ^{ghijk} | 1,056 ± 4 ^{bcdef} | -712 ± 15 ^{ef} | 3,475 ± 6 ^c | 1,677 ± 6 ^{ef} |
| 30 | 70 | 1,854 ± 3 ^{bcde} | 1,066 ± 5 ^{bcde} | -700 ± 20 ^{de} | 3,557 ± 12 ^b | 1,689 ± 2 ^{de} |
| 25 | 75 | 1,855 ± 6 ^{bcd} | 1,046 ± 8 ^{ef} | -687 ± 19 ^d | 3,555 ± 12 ^b | 1,693 ± 4 ^d |
| 20 | 80 | 1,861 ± 4 ^{abc} | 1,052 ± 5.5 ^{cdef} | -666 ± 13 ^c | 3,561 ± 11 ^b | 1,694 ± 5 ^d |
| 15 | 85 | 1,836 ± 6 ^{ghijk} | 1,051 ± 10 ^{def} | -644 ± 19 ^b | 3,578 ± 6 ^b | 1,723 ± 7 ^c |
| 10 | 90 | 1,865 ± 5 ^{ab} | 1,036 ± 7 ^{ef} | -643 ± 4 ^b | 3,621 ± 4 ^a | 1,729 ± 11 ^{bc} |
| 5 | 95 | 1,843 ± 3 ^{defg} | 1,044 ± 7 ^{ef} | -616 ± 14 ^a | 3,631 ± 5 ^a | 1,741 ± 13 ^{ab} |
| 0 | 100 | 1,869 ± 6 ^a | 1,023 ± 9 ^f | -612 ± 10 ^a | 3,647 ± 6 ^a | 1,750 ± 9 ^a |

^{a,b,c} ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ค่าความคงตัวของแป้งสุกของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วน 5 : 95 มีค่าสูงสุด (-616 ± 14 RVU) และไม่แตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% (-612 ± 10 RVU) ($p > 0.05$) แต่มีความแตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% และข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน ($p < 0.05$) (ตารางที่ 4.4) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความคงตัวของแป้งสุกของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% (-763 ± 6 RVU) ไม่แตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วน 95 : 5 (-775 ± 5 RVU), 90 : 10 (-765 ± 5 RVU), 85 : 15 (-770 ± 6 RVU), 80 : 20 (-761 ± 2 RVU), 75 : 25 (-746 ± 6 RVU), 70 : 30 (-764 ± 10 RVU), 65 : 35 (-735 ± 11 RVU) และ 60 : 40 (-755 ± 6 RVU) ($p > 0.05$) แต่แตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วนตั้งแต่ 55 : 45 เป็นต้นไป

ผลการทดลองดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ตั้งแต่ 45% ขึ้นไป จะสามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าว

ดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ได้โดยใช้คุณสมบัติความหนืดของแป้งด้านค่าความคงตัวของแป้งสูงในการตรวจสอบการปลอมปนดังกล่าว

ค่าความหนืดสุดท้ายของตัวอย่างข้าวสารต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 โดยพบว่าข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% มีค่าความหนืดสุดท้ายสูงที่สุด ($3,647 \pm 6$ RVU) และไม่แตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วน 10 : 90 ($3,621 \pm 4$ RVU) และ 5 : 95 ($3,621 \pm 5$ RVU) ($p > 0.05$) แต่แตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% และข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน ($p < 0.05$) จากตารางที่ 4.4 ยังพบว่าข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% มีค่าความหนืดสุดท้ายไม่แตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วน 95 : 5 ($3,041 \pm 5$ RVU), 90 : 10 ($3,046 \pm 6$ RVU) และ 85 : 15 ($3,047 \pm 6$ RVU) ($p > 0.05$) จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงว่าตัวอย่างที่มีข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ผสมข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ในช่วง 5-15% นั้น จะไม่สามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 โดยใช้ค่าความหนืดสุดท้ายได้ นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วน 70 : 30 ($3,205 \pm 6$ RVU), 65 : 35 ($3,222 \pm 5$ RVU), 60 : 40 ($3,202 \pm 4$ RVU) และ 55 : 45 ($3,186 \pm 4$ RVU) มีค่าความหนืดสุดท้ายไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) เช่นเดียวกับข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วน 50 : 50 ($3,253 \pm 67$ RVU) และ 45 : 55 ($3,260 \pm 10$ RVU) จะมีค่าความหนืดสุดท้ายไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) และข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วน 30 : 70 ($3,557 \pm 12$ RVU), 25 : 75 ($3,555 \pm 12$ RVU), 20 : 80 ($3,561 \pm 11$ RVU) และ 15 : 85 ($3,578 \pm 6$ RVU) ก็มีค่าความหนืดสุดท้ายไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) เช่นเดียวกัน

สำหรับค่าความหนืดหลังการทำให้เย็นซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ใช้ในการอธิบายลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังการหุงต้มและทำให้เย็น (อรอนงค์, 2544) แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% ($1,649 \pm 10$ RVU) มีค่าความหนืดหลังการทำให้เย็นไม่แตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วน 95 : 5 ($1,649 \pm 7$ RVU), 90 : 10 ($1,648 \pm 2$ RVU), 75 : 25 ($1,648 \pm 4$ RVU) และ 60 : 40 ($1,653 \pm 9$ RVU) ($p > 0.05$) ซึ่งแสดงว่าค่าความหนืดหลังการทำให้เย็นไม่สามารถใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่อัตราส่วนดังกล่าวได้ อย่างไรก็ตามตัวอย่างข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่มีข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ผสมตั้งแต่ 45% ขึ้นไปมีแนวโน้มที่จะตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ได้ โดยอาศัยคุณสมบัติด้านความหนืดหลังการทำให้เย็น นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% ($1,750 \pm 13$ RVU) จะมีค่าความหนืดหลังการทำให้เย็นสูงสุดแต่ไม่แตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วน 5 : 95 ($1,741 \pm 13$ RVU) ($p > 0.05$)

จากผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่าปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างไม่สามารถนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ในการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ได้ แต่คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ

105 ได้ โดยค่าความหนืดสูงสุดสามารถตรวจสอบการปลอมปนได้เมื่อข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ผสม 80-90% และค่าการแตกตัวของแป้งสุก ค่าความคงตัวของแป้งสุก ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าความหนืดหลังการทำให้เย็นสามารถตรวจสอบตัวอย่างข้าวที่มีข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ผสมตั้งแต่ 55, 45, 20 และ 45% ขึ้นไป ตามลำดับ

4.2.2 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.5 โดยพบว่าปริมาณโปรตีนของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันอยู่ในช่วง 6.03 ± 0.15 ถึง $7.30 \pm 0.26\%$ โดยข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 10 : 90 ($7.30 \pm 0.26\%$) จะมีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดและไม่แตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 35 : 65 ($7.24 \pm 0.15\%$), 60 : 40 ($7.20 \pm 0.20\%$), 15 : 85 ($7.16 \pm 0.20\%$) และ 10 : 90 ($7.30 \pm 0.26\%$) ($p > 0.05$) (ตารางที่ 4.5)

จากตารางที่ 4.5 ยังพบว่าข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% ($6.20 \pm 0.17\%$) มีปริมาณโปรตีนไม่แตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% ($6.43 \pm 0.23\%$) ($p > 0.05$) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวแตกต่างจากงานวิจัยของงามชื่น คงเสรี (2545) ที่พบว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่เพาะปลูกที่ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี จังหวัดปทุมธานีจะมีปริมาณโปรตีนที่แตกต่างกัน โดยข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 (8.92%) จะมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (7.70%) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Patrick & Hoskins (1974) ที่พบว่าปริมาณโปรตีนในข้าวแต่ละพันธุ์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม วิธีการเพาะปลูก พันธุ์ข้าว และฤดูกาลเพาะปลูก นอกจากนี้จากตารางที่ 4.5 ยังพบว่าข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% จะมีปริมาณโปรตีนไม่แตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน ($p > 0.05$) ยกเว้นข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 35 : 65 ($7.24 \pm 0.15\%$), 60 : 40 ($7.20 \pm 0.20\%$), 15 : 85 ($7.16 \pm 0.20\%$) และ 10 : 90 ($7.30 \pm 0.26\%$) ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวจึงสรุปได้ปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวไม่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากข้าวพันธุ์ชัยนาท 1

ตารางที่ 4.5 ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าว
ในสารละลายต่างของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ใน
อัตราส่วนที่แตกต่างกัน

| อัตราส่วนผสม (%) | | ปริมาณโปรตีน (%) | ปริมาณแอมิโลส (%) | ค่าความคงตัวของเจล (มม.) |
|------------------|----------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| ขาวดอกมะลิ 105 | ชัยนาท 1 | | | |
| 100 | 0 | 6.20 ± 0.17 ^{def} | 15.68 ± 0.51 ^l | 82.66 ± 2.08 ^{ab} |
| 95 | 5 | 6.33 ± 0.23 ^{cdef} | 16.13 ± 0.15 ^{kl} | 82.33 ± 1.52 ^{ab} |
| 90 | 10 | 6.20 ± 0.20 ^{def} | 16.10 ± 0.60 ^{kl} | 78.24 ± 2.51 ^b |
| 85 | 15 | 6.80 ± 0.10 ^{bc} | 16.56 ± 0.32 ^k | 83.67 ± 2.08 ^a |
| 80 | 20 | 6.20 ± 0.26 ^{def} | 16.43 ± 0.40 ^k | 79.00 ± 2.00 ^b |
| 75 | 25 | 6.66 ± 0.40 ^{cd} | 17.23 ± 0.20 ^j | 72.56 ± 2.30 ^c |
| 70 | 30 | 6.03 ± 0.15 ^f | 17.44 ± 0.15 ⁱ | 71.35 ± 2.51 ^{cd} |
| 65 | 35 | 6.23 ± 0.20 ^{def} | 18.15 ± 0.25 ⁱ | 68.00 ± 2.01 ^{de} |
| 60 | 40 | 7.20 ± 0.20 ^{ab} | 18.38 ± 0.31 ⁱ | 66.87 ± 1.53 ^{ef} |
| 55 | 45 | 6.43 ± 0.35 ^{cdef} | 18.46 ± 0.20 ⁱ | 64.00 ± 2.05 ^{ef} |
| 50 | 50 | 6.63 ± 0.37 ^{cde} | 18.70 ± 0.26 ^{hi} | 63.00 ± 1.00 ^{fg} |
| 45 | 55 | 6.50 ± 0.52 ^{cdef} | 18.45 ± 0.32 ⁱ | 64.45 ± 3.51 ^{ef} |
| 40 | 60 | 6.23 ± 0.22 ^{def} | 19.16 ± 0.19 ^h | 63.00 ± 2.64 ^{fg} |
| 35 | 65 | 7.24 ± 0.15 ^{ab} | 19.73 ± 0.18 ^g | 59.00 ± 1.00 ^{gh} |
| 30 | 70 | 6.22 ± 0.18 ^{def} | 21.42 ± 0.42 ^f | 57.00 ± 2.65 ^h |
| 25 | 75 | 6.13 ± 0.06 ^{ef} | 21.40 ± 0.36 ^f | 55.01 ± 2.00 ^h |
| 20 | 80 | 6.30 ± 0.30 ^{cdef} | 22.50 ± 0.17 ^e | 47.68 ± 5.68 ^{ij} |
| 15 | 85 | 7.16 ± 0.20 ^{ab} | 23.46 ± 0.41 ^d | 50.35 ± 3.05 ⁱ |
| 10 | 90 | 7.30 ± 0.26 ^a | 24.70 ± 0.20 ^c | 43.67 ± 2.08 ^{jk} |
| 5 | 95 | 6.40 ± 0.26 ^{cdef} | 25.70 ± 0.17 ^b | 43.36 ± 2.09 ^k |
| 0 | 100 | 6.43 ± 0.23 ^{cdef} | 26.40 ± 0.26 ^a | 41.69 ± 2.07 ^k |

a,b,c ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ปริมาณแอมิโลสของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% ($15.68 \pm 0.51\%$) มีปริมาณต่ำที่สุดและไม่แตกต่างกับกับข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 95 : 5 ($16.13 \pm 0.15\%$) และ 90 : 10 ($16.10 \pm 0.60\%$) ($p > 0.05$) แต่แตกต่างกับกับข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่อัตราส่วนผสมอื่น ๆ และข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% ($p < 0.05$) ซึ่งมีสาเหตุมาจากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ ในขณะที่ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 จัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง (งามชื่น คงเสรี, 2545, หน้า 42) จึงส่งผลให้ปริมาณแอมิโลสในตัวอย่างข้าวมีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่าปริมาณแอมิโลสสามารถนำมาใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้ ถ้าในตัวอย่างข้าวสารนั้นมีปริมาณข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ตั้งแต่ 15% เป็นต้นไป

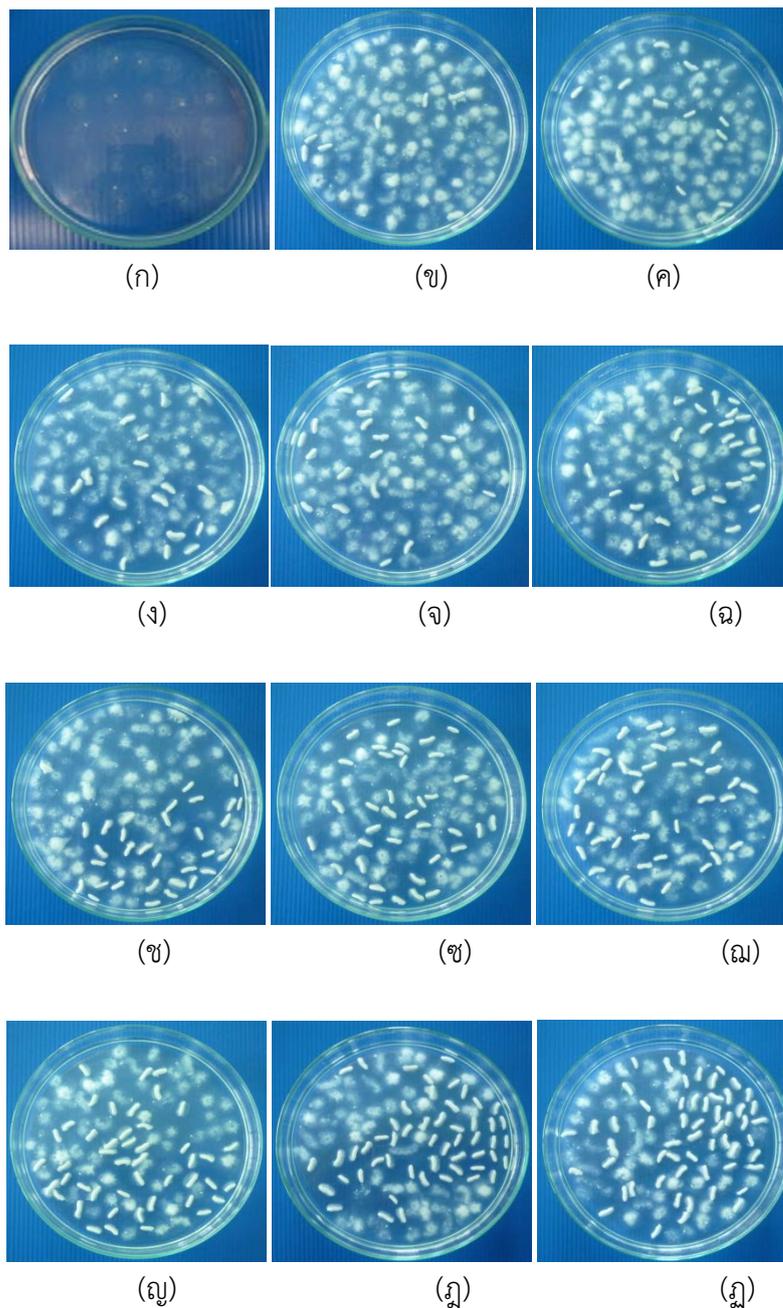
ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีค่าความคงตัวของเจลสูง กล่าวคือ แป้งสุกจะมีลักษณะอ่อน ระยะทางที่เจลแบ่งไหลอยู่ในช่วง 61-100 มิลลิเมตร ในขณะที่ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 เป็นข้าวที่มีค่าความคงตัวของเจลต่ำ แป้งสุกมีลักษณะแข็ง ระยะทางที่เจลแบ่งไหลอยู่

ในช่วง 26-40 มิลลิเมตร (งามชื่น คงเสรี, 2545, หน้า 44) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้ค่าความคงตัวมาใช้ในการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

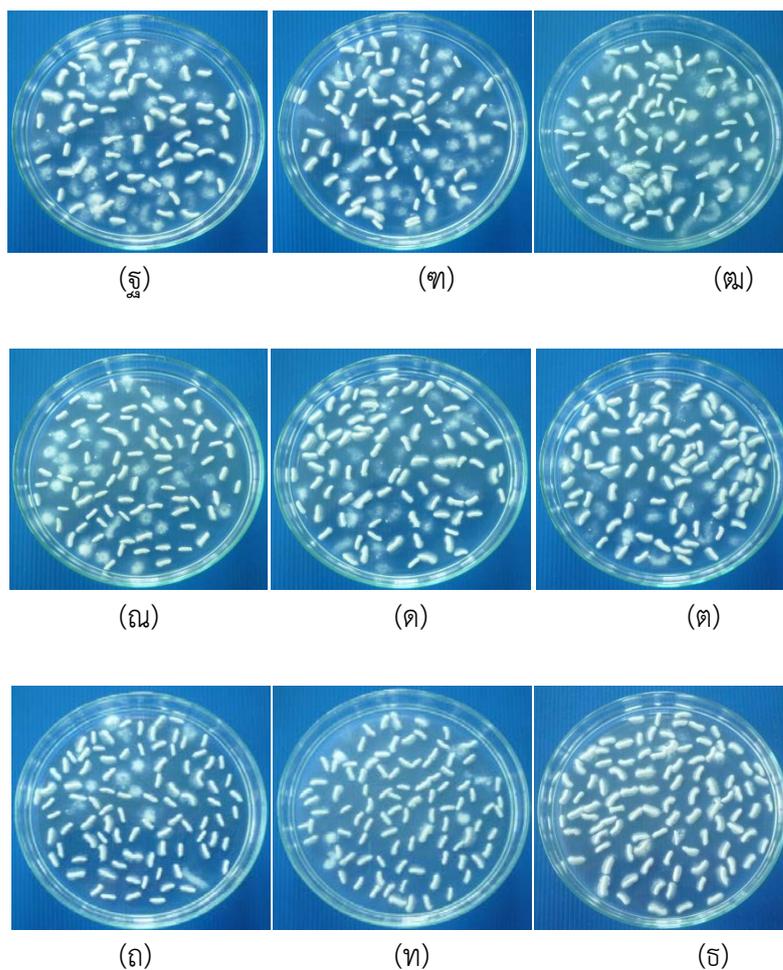
จากตารางที่ 4.5 ยังพบว่าข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% (82.66 ± 2.08 มิลลิเมตร) มีค่าความคงตัวของเจลสูงที่สุดและไม่แตกต่างกับกับข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัณนาท 1 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 95 : 5 (82.33 ± 1.52 มิลลิเมตร), 90 : 10 (78.24 ± 2.51 มิลลิเมตร), 85 : 15 (83.67 ± 2.08 มิลลิเมตร) และ 80 : 20 (79.00 ± 2.00 มิลลิเมตร) ($p > 0.05$) แต่แตกต่างกับตัวอย่างข้าวที่มีปริมาณข้าวสารพันธุ์ชัณนาท 1 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ตั้งแต่ 25% ขึ้นไป และข้าวสารพันธุ์ชัณนาท 1 แท้ 100% ($p < 0.05$) ดังนั้นค่าความคงตัวของเจลแบ่งจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่มีข้าวสารพันธุ์ชัณนาท 1 ผสมตั้งแต่ 25% ขึ้นไป

สำหรับค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง แสดงดังภาพที่ 4.3 โดยพบว่าข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างจะอยู่ในช่วง 6-7 คือ เมล็ดข้าวสลายตัวตลอดทั้งเมล็ดและมีลักษณะเป็นเมือกใส (ภาพที่ 4.3ก) ซึ่งตรงข้ามกับข้าวสารพันธุ์ชัณนาท 1 100% ที่มีระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างอยู่ในช่วง 1-2 กล่าวคือเมล็ดข้าวไม่มีการเปลี่ยนแปลงถึงเมล็ดข้าวมีการพองตัวเล็กน้อย (ภาพที่ 4.3ข) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Prathepha *et al.* (2005) และงามชื่น คงเสรี (2545) ที่พบว่าค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวเหนียวซึ่งอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำมากจะแตกต่างกับข้าวเจ้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยข้าวเหนียวจะมีค่าระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างเฉลี่ย 6-7 ในขณะที่ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวเจ้าจะอยู่ในช่วง 1-3 ซึ่งสาเหตุดังกล่าวเกิดจากความยาวของสายแอมิโลเพกทิน Umemoto *et al.* (2002) รายงานว่าสตาร์ชข้าวที่มีองค์ประกอบของแอมิโลเพกทินสายสั้นสูงจะแตกตัวได้ง่ายกว่าสตาร์ชข้าวที่มีแอมิโลเพกทินสายยาวในปริมาณที่สูง

อย่างไรก็ตาม Nakamura *et al.* (2002) พบว่าปริมาณแอมิโลสไม่มีความสัมพันธ์กับค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่มีข้าวสารพันธุ์ชัณนาท 1 ผสมตั้งแต่ 5% ขึ้นไปจะมีระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างแตกต่างกันอย่างชัดเจน (ภาพที่ 4.3ข-ค) ดังนั้น ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ชัณนาท 1 ได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 4.3 ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 100% (ก) ข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่อัตราส่วน เท่ากับ 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)



ภาพที่ 4.3 ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 40 : 60 (จ), 35 : 65 (ข), 30 : 70 (ค), 25 : 75 (ง), 20 : 80 (ด), 15 : 85 (ต), 10 : 90 (ถ), 5 : 95 (ท) และข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 100% (ธ) (ต่อ)

คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.6 ค่าความหนืดสูงสุดของตัวอย่างข้าวสารอยู่ในช่วง $1,223 \pm 4$ RVU ถึง $1,849 \pm 11$ RVU โดยข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 มีค่าความหนืดสูงสุดต่ำที่สุด และข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนเท่ากับ 90 : 10 ($1,849 \pm 11$ RVU) มีค่าความหนืดสูงสุดและไม่แตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนเท่ากับ 95 : 5 ($1,836 \pm 6$ RVU) และข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 100% ($1,843 \pm 4$ RVU) ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตามจากตารางที่ 4.6 พบว่าค่าความหนืดสูงสุดของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% มีความแตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่มีข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมตั้งแต่ 15% ขึ้นไป และข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% ($p < 0.05$) โดยค่าความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ในข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องจากโมเลกุลของแอมิโลสจะไปยับยั้งการพองตัวของเม็ดแป้งในระหว่างการให้ความร้อนแก่น้ำแบ่งที่อุณหภูมิ 95°C จึงส่งผลให้ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1

ซึ่งเป็นข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงมีค่าความหนืดสูงสุดต่ำกว่าข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำ (Patindol *et al.*, 2009 ; งามชื่น, 2545) ดังนั้น จากผลการทดลองดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าค่าความหนืดสูงสุดสามารถนำมาใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมตั้งแต่ 15% เป็นต้นไป

ค่าการแตกตัวของแป้งสุกมีแนวโน้มลดลงเมื่อข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ผสมในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณเพิ่มขึ้น ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6 โดยข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% ($1,110 \pm 8$ RVU) มีค่าการแตกตัวของแป้งสุกสูงที่สุด รองลงมาคือข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ผสมกับข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 55, 60, 65, 70, 80, 75, 85, 90 และ 95% ตามลำดับ และข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% มีค่าการแตกตัวของแป้งสุกต่ำที่สุด (776 ± 4 RVU) ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องจากค่าการแตกตัวของแป้งสุกมีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับปริมาณแอมิโลส (Patindol, Gu & Wang, 2009, pp. 3-11) ดังนั้นเมื่อตัวอย่างข้าวสารมีปริมาณข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าปริมาณแอมิโลสเพิ่มขึ้นด้วย (ตารางที่ 4.5) และส่งผลให้ค่าการแตกตัวของแป้งสุกลดลง นอกจากนี้จากตารางที่ 4.6 ยังพบว่าข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% มีค่าการแตกตัวของแป้งสุกแตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันและข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% ($p < 0.05$) ดังนั้น การตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 สามารถใช้คุณสมบัติความหนืดของแป้งด้านค่าการแตกตัวของแป้งสุกมาตรวจสอบได้

ค่าความคงตัวของแป้งสุก ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าความหนืดหลังการทำให้เย็นมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับปริมาณแอมิโลส กล่าวคือเมื่อปริมาณแอมิโลสเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าความคงตัวของแป้งสุก ความหนืดสุดท้าย และความหนืดหลังการทำให้เย็นเพิ่มขึ้นด้วย (Meadows & Barton-II, 2002, pp. 563-566; Patindol, Gu & Wang, 2009, pp. 3-11) จากตารางที่ 4.6 จึงพบว่าข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% มีค่าความคงตัวของแป้งสุก ความหนืดสุดท้าย และความหนืดหลังการทำให้เย็นสูงที่สุด และมีความแตกต่างทางสถิติกับข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองจะพบว่าข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% มีค่าความคงตัวของแป้งสุก ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าความหนืดหลังการทำให้เย็นไม่แตกต่างกับข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่เท่ากับ 95 : 5 ($p > 0.05$) ดังนั้น การตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้ค่าความคงตัวของแป้งสุก ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าความหนืดหลังการทำให้เย็นจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้เมื่อตัวอย่างข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมหรือปลอมปนตั้งแต่ 10% เป็นต้นไป

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

| อัตราส่วนผสม (%) | | คุณสมบัติด้านความหนืด (RVU) | | | | |
|------------------|----------|-----------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| ข้าวดอกมะลิ 105 | ชัยนาท 1 | ความหนืดสูงสุด | การแตกตัวของแป้ง | ค่าความคงตัวของแป้งสุก | ความหนืดสุดท้าย | ความหนืดหลังการทำเย็น |
| 100 | 0 | 1,843 ± 4 ^a | 1,110 ± 8 ^a | -763 ± 6 ^p | 3,035 ± 12 ^o | 1,649 ± 10 ^o |
| 95 | 5 | 1,836 ± 6 ^a | 1,069 ± 12 ^b | -739 ± 4 ^p | 3,059 ± 12 ^{no} | 1,675 ± 5 ^{no} |
| 90 | 10 | 1,849 ± 11 ^a | 1,049 ± 7 ^c | -664 ± 16 ^o | 3,084 ± 9 ⁿ | 1,691 ± 9 ^{mn} |
| 85 | 15 | 1,754 ± 6 ^b | 1,038 ± 7 ^c | -610 ± 3 ⁿ | 3,120 ± 9 ^m | 1,715 ± 12 ^m |
| 80 | 20 | 1,687 ± 4 ^c | 1,003 ± 4 ^{de} | -578 ± 5 ⁿ | 3,184 ± 4 ^l | 1,719 ± 64 ^m |
| 75 | 25 | 1,675 ± 7 ^c | 1,012 ± 3 ^d | -521 ± 11 ^m | 3,190 ± 58 ^l | 1,822 ± 11 ^l |
| 70 | 30 | 1,648 ± 4 ^{cd} | 994 ± 4 ^e | -465 ± 14 ^l | 3,260 ± 3 ^k | 1,853 ± 9 ^k |
| 65 | 35 | 1,621 ± 5 ^d | 962 ± 10 ^f | -424 ± 5 ^{kl} | 3,287 ± 5 ^{jk} | 1,931 ± 10 ^j |
| 60 | 40 | 1,571 ± 10 ^e | 961 ± 7 ^f | -384 ± 8 ^{jk} | 3,290 ± 4 ^j | 2,015 ± 9 ⁱ |
| 55 | 45 | 1,471 ± 3 ^f | 940 ± 10 ^g | -359 ± 6 ^j | 3,308 ± 16 ^{ij} | 2,125 ± 6 ^h |
| 50 | 50 | 1,452 ± 11 ^{fg} | 911 ± 11 ⁱ | -295 ± 7 ⁱ | 3,327 ± 15 ^{hi} | 2,335 ± 11 ^g |
| 45 | 55 | 1,450 ± 3 ^{fg} | 925 ± 4 ^h | -280 ± 15 ⁱ | 3,343 ± 17 ^{gh} | 2,356 ± 10 ^g |
| 40 | 60 | 1,440 ± 8 ^{fg} | 886 ± 13 ^j | -220 ± 6 ^h | 3,364 ± 13 ^{fg} | 2,472 ± 10 ^f |
| 35 | 65 | 1,423 ± 14 ^g | 890 ± 6 ^j | -174 ± 7 ^{gh} | 3,372 ± 10 ^f | 2,473 ± 9 ^e |
| 30 | 70 | 1,370 ± 5 ^h | 877 ± 7 ^j | -153 ± 13 ^g | 3,390 ± 6 ^f | 2,512 ± 15 ^d |
| 25 | 75 | 1,370 ± 10 ^h | 851 ± 9 ^k | -125 ± 14 ^f | 3,391 ± 4 ^f | 2,527 ± 14 ^d |
| 20 | 80 | 1,345 ± 6 ^h | 853 ± 7 ^k | 354 ± 9 ^e | 3,422 ± 10 ^e | 2,639 ± 13 ^c |
| 15 | 85 | 1,323 ± 10 ⁱ | 841 ± 3 ^k | 461 ± 10 ^d | 3,450 ± 6 ^d | 2,872 ± 4 ^b |
| 10 | 90 | 1,280 ± 5 ^j | 820 ± 8 ^l | 617 ± 6 ^c | 3,573 ± 12 ^c | 2,927 ± 11 ^a |
| 5 | 95 | 1,242 ± 2 ^{jk} | 810 ± 9 ^l | 730 ± 2 ^b | 3,675 ± 8 ^b | 2,951 ± 9 ^a |
| 0 | 100 | 1,223 ± 4 ^k | 776 ± 4 ^m | 887 ± 4 ^a | 3,885 ± 6 ^a | 2,972 ± 8 ^a |

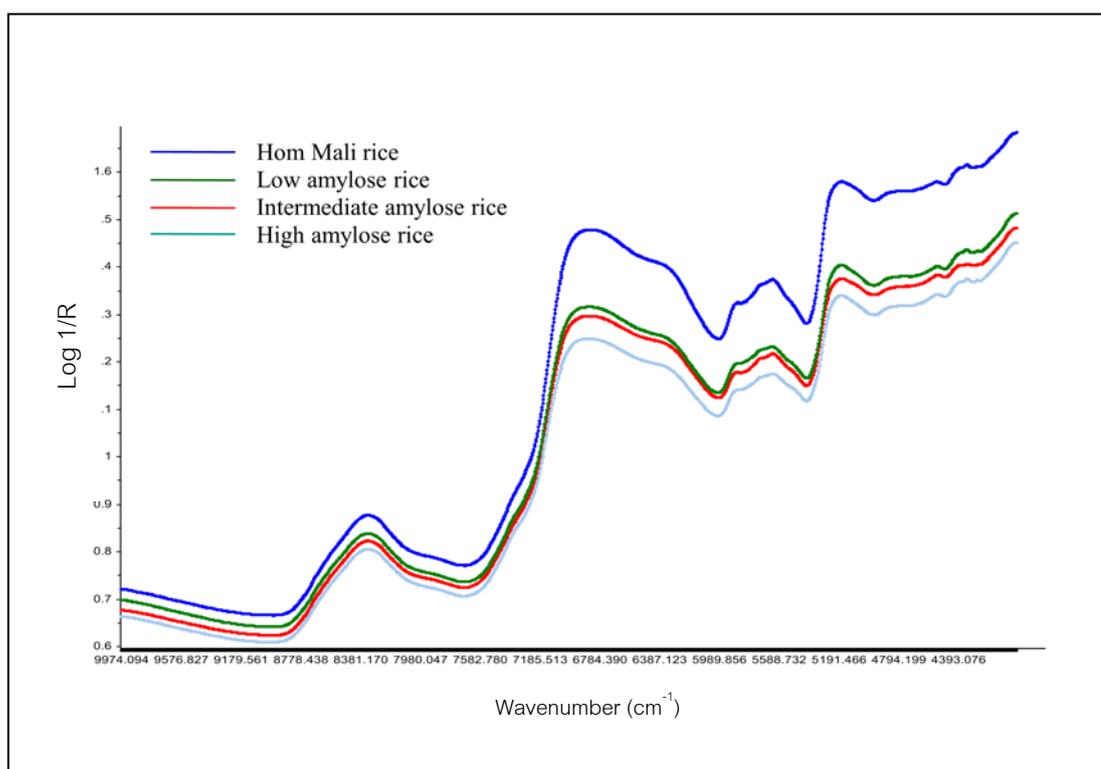
a,b,c ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากผลการทดลองดังกล่าว จึงสรุปได้ว่าการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 นั้น การตรวจสอบระดับค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างนั้นให้ผลการตรวจสอบที่แม่นยำมากที่สุด ในขณะที่ปริมาณแอมิโลส ค่าการแตกตัวของแป้งสุกสามารถนำมาใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ได้เช่นเดียวกัน โดยปริมาณแอมิโลสสามารถนำมาใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ได้เมื่อมีปริมาณข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมตั้งแต่ 15% ขึ้นไป และ 25% ขึ้นไปเมื่อตรวจสอบโดยใช้ค่าความคงตัวของเจล อย่างไรก็ตามผลการวิจัยครั้งนี้พบว่าปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวไม่สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 นอกจากนี้ยังพบว่าคุณสมบัติด้านความหนืดสามารถนำมาใช้ตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ได้เช่นเดียวกัน โดยค่าความหนืดสูงสุดสามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เมื่อมีข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมตั้งแต่ 15% ขึ้นไป ในขณะที่ค่าความคงตัวของแป้งสุก ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าความหนืดหลังการทำเย็น สามารถตรวจสอบการปลอมปนของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ได้ เมื่อมีข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมตั้งแต่ 10% ขึ้นไป อย่างไรก็ตามผลการวิจัยนี้พบว่าค่าการแตกตัวของ

แป้งสุกสามารถตรวจสอบการปลอมปนของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้เมื่อมีข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมเพียง 5% เท่านั้น

4.3 การวัดค่าการดูดกลืนแสงของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้

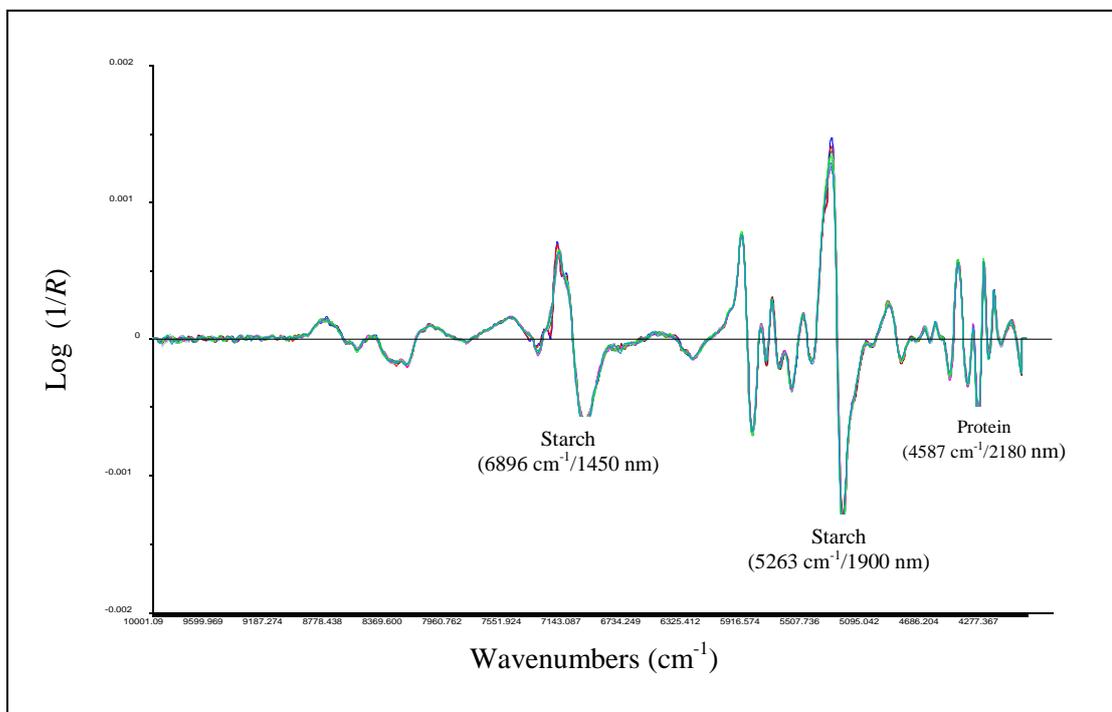
การวัดค่าการดูดกลืนแสงของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ ในช่วงจำนวนคลื่น $10,000-4,000\text{ cm}^{-1}$ (1,100-2,500 นาโนเมตร) ลักษณะของสเปกตรัมเริ่มต้น (Original spectrum) ของข้าวหอมมะลิ ข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำ ข้าวปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวปริมาณแอมิโลสสูง แสดงดังภาพที่ 4.4 พบว่าลักษณะรูปแบบของสเปกตรัมข้าวสารหอมมะลิที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้มีค่าการดูดกลืนแสงหรือค่า $\log 1/R$ สูงกว่าข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ กลุ่มข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวกลุ่มที่มีแอมิโลสสูง ตามลำดับ ซึ่ง Osborne *et al.* (1993) รายงานว่าค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมที่แตกต่างกันอาจเนื่องจากองค์ประกอบภายในของข้าวแต่ละกลุ่มที่แตกต่างกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณแอมิโลสในเมล็ดข้าว



ภาพที่ 4.4 ลักษณะของสเปกตรัมเริ่มต้น (Original spectrum) ของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดกลุ่มข้าวหอมมะลิ ข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำ ข้าวปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวปริมาณแอมิโลสสูงที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในช่วงจำนวนคลื่น $10,000-4,000\text{ cm}^{-1}$

จากภาพที่ 4.4 จะพบว่าลักษณะสเปกตรัมมีการซ้อนทับกันของพีคและพีคแยกออกจากกันไม่ชัดเจน อาจเป็นผลจากการเกิดการกระเจิงแสงเมื่อตกกระทบกับตัวอย่างเนื่องจากตัวอย่างข้าวสารเต็มเมล็ดมีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งมีผลต่อการสร้างสมการทำนายวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

กายภาพของข้าว การวิจัยครั้งนี้จึงได้มีการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ วิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณรวมกับการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง และวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานรวมกับการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง ซึ่งผลจากการปรับแต่งสเปกตรัมพบว่าการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สองจะทำให้ได้สเปกตรัมที่มีฐานแคบและจุดยอดแยกกันอย่างชัดเจนแต่มีลักษณะกลับหัวลงมาด้านล่าง แสดงดังภาพที่ 4.5 โดยพบว่าแต่ละความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กับพันธะเคมีที่แตกต่างกัน คือ จำนวนคลื่นที่ $6,900\text{ cm}^{-1}$ มีความสัมพันธ์กับพันธะ O-H ในโมเลกุลน้ำในข้าวซึ่งมีปริมาณความชื้นประมาณ 13-14% และจำนวนคลื่นที่ $6,896$ และ $5,263\text{ cm}^{-1}$ มีความสัมพันธ์กับพันธะ O-H, C-O และ C-H ในสตาร์ช ขึ้นอยู่กับการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretching) การสั่นแบบงอของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H bending) และการสั่นผลรวมแบบยืดของหมู่คาร์บอน-ออกซิเจน (C-O stretching combination) (Osborne *et al.*, 1993, pp. 77-83; Workmand & Weyer, 2008, p. 239-262)



ภาพที่ 4.5 สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง

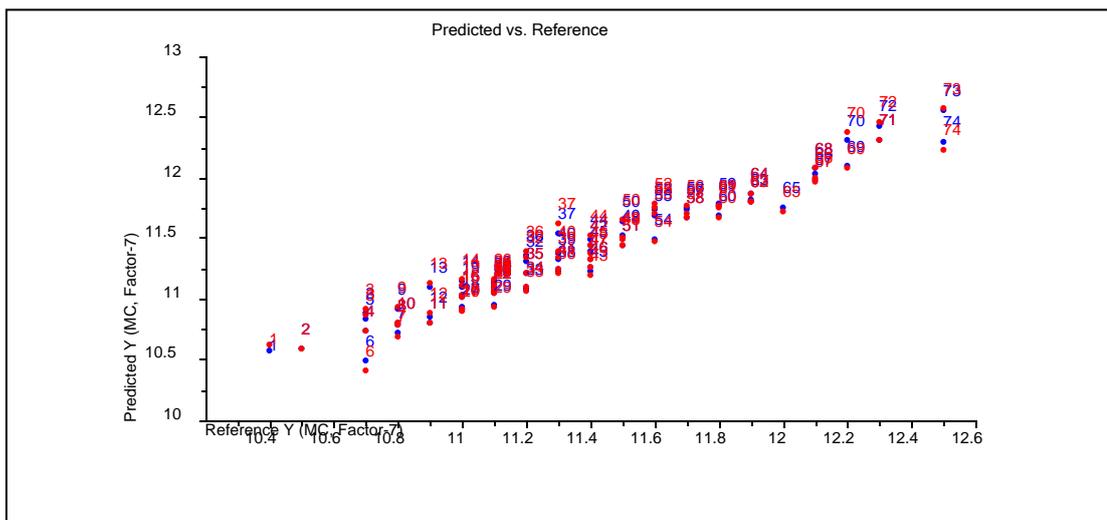
นอกจากนี้ Parker (1983) พบว่าพีคของโมเลกุลเอมิโลสจะมีการสั่นแบบยืดของหมู่ CH_2 ที่จำนวนคลื่น $5,128\text{ cm}^{-1}$ (1,950 นาโนเมตร) $4,063\text{ cm}^{-1}$ (2,461 นาโนเมตร) และ $4,019\text{ cm}^{-1}$ (2,488 นาโนเมตร) และจากภาพที่ 4.5 ยังพบของโปรตีนที่วัดค่าการดูดกลืนแสงในรูปของกลุ่มเอไมด์ และหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H functional groups) ที่พบช่วงจำนวนคลื่น $4,587\text{ cm}^{-1}$ (2,180 นาโนเมตร) (Workmand & Weyer, 2008, p. 239-262)

4.4 การสร้างสมการที่เหมาะสมในการทำนายค่าคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ด

การสร้างสมการที่เหมาะสมในการทำนายค่าคุณภาพที่ทำการศึกษา ทำได้โดยนำข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดทั้ง 60 ตัวอย่าง แบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม คือ ข้าวหอมมะลิ ข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำ ข้าวปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวปริมาณแอมิโลสสูง ตามลำดับ กำหนดให้เป็นตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X) และกำหนดให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวขนาดเต็มเมล็ด ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง และคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าว เป็นตัวแปรตาม (ตัวแปร Y) นำข้อมูลตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมาหาความสัมพันธ์ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน หรือ PLSR เพื่อสร้างสมการทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดดังกล่าว สมการที่เหมาะสมควรมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการสูง (r^2_{val}) และค่าความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ PLSR (RMSEP) ต่ำ การสร้างสมการสำหรับทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ด มีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 การสร้างสมการทำนายค่าปริมาณโปรตีน

เมื่อนำสมการที่ผ่านการปรับแต่งสเปคตรัม (ตัวแปร X) มาหาความสัมพันธ์กับปริมาณโปรตีนที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี (ตัวแปร Y) ด้วยวิธีทางสถิติ PLSR พบว่าสมการที่เหมาะสม คือ สมการที่ผ่านการปรับแต่งสเปคตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ มีการจัดกลุ่มตัวแปรเดิมเป็นตัวแปรใหม่ได้ 7 แพกเตอร์ และสมการที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง (r^2_{val}) ค่าความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ PLSR (RMSEP) และค่า RDP เท่ากับ 0.87, 1.64% และ 2.58 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 Parker (1983) พบว่าโปรตีนในข้าวสามารถตรวจพบได้จากแถบเอไมด์ 1 (Amide I band) จำนวนคลื่นที่ $1,660\text{ cm}^{-1}$ และวงแหวนกรดอะมิโน (Aromatic amino acids) จำนวนคลื่นที่ $1,613\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Himmelsbach *et al.* (2001) พบว่าสมการทำนายค่าโปรตีนที่เหมาะสมควรจะอยู่ในช่วงจำนวนคลื่นที่ $200\text{-}1,795\text{ cm}^{-1}$ และ $2,050\text{-}3,570\text{ cm}^{-1}$ เมื่อวัดด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบฟูเรียร์/รามาน (NIR-FT/Raman spectroscopy)



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

นอกจากนี้ Navasearttavisoot (2004) ยังพบว่าจำนวนคลื่นที่ $5,882$ และ $5,050$ cm^{-1} มีความสัมพันธ์กับปริมาณโปรตีนมาก โดยแต่ละตำแหน่งจะมีความเกี่ยวข้องกับพันธะเคมีที่แตกต่างกัน คือ จำนวนคลื่นที่ $5,882$ cm^{-1} มีความสัมพันธ์กับพันธะ C-H และจำนวนคลื่นที่ $5,050$ cm^{-1} มีความสัมพันธ์กับโมเลกุลของโปรตีน ดังนั้น สมการที่สร้างขึ้นด้วยวิธี PLSR จำนวนคลื่นช่วง $10,000-400$ cm^{-1} จะครอบคลุมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปริมาณโปรตีน อย่างไรก็ตามผลการวิจัยครั้งนี้พบว่าสมการที่เหมาะสมในการทำนายปริมาณโปรตีนมีค่าค่าความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการสูงกว่าผลการวิจัยของ Barton *et al.* (1998) ได้ทำการตรวจสอบปริมาณโปรตีนของข้าวขาวขนาดเต็มเมล็ดและแบ่งข้าวที่ปลูกในสหรัฐอเมริกาด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ในช่วงจำนวนคลื่น $10,000-400$ cm^{-1} พบว่าสมการทำนายค่าปริมาณโปรตีนของข้าวขาวขนาดเต็มเมล็ดและแบ่งข้าวจะมีค่า RMSEP เท่ากับ 0.25 และ 0.18% ตามลำดับ นอกจากนี้จากผลการวิจัยของ Choi & Kim (2000) ยังพบว่าตรวจสอบปริมาณโปรตีนในข้าวกล้องพันธุ์ Dongjin, Jlpum และ Chucheong ด้วยการทดสอบแบบทีละเมล็ด (Single grain kernel) ที่จำนวนคลื่นช่วง $10,000-400$ cm^{-1} พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการน้อยกว่า 0.479%

4.4.2 การสร้างสมการทำนายค่าปริมาณแอมิโลส

ปริมาณแอมิโลสในข้าวสามารถพบได้จากแถบการสั่นแบบยืดของหมู่ฟังก์ชัน CH_2 ที่จำนวนคลื่นที่ $2,905$ และ $2,490$ cm^{-1} (Himmelsbach *et al.*, 2001) นอกจากนี้ Parker (1983) ยังพบว่าปริมาณแอมิโลสสามารถพบได้ที่แถบการสั่นแบบยืดของหมู่ฟังก์ชัน CH_2 ช่วงจำนวนคลื่นที่ $5,128$, $4,063$ และ $4,019$ cm^{-1} ตามลำดับ จากเหตุผลดังกล่าวการสร้างสมการสำหรับทำนายค่าปริมาณแอมิโลสจึงเลือกจำนวนคลื่นสำหรับสร้างสมการ 2 ช่วง ได้แก่ $8,620-5,128$ cm^{-1} และ $7,142-4,012$ cm^{-1} เพื่อเปรียบเทียบว่าช่วงจำนวนคลื่นใดที่เหมาะสมสำหรับสร้างสมการทำนายค่า

ปริมาณแอมิโลสด้วยวิธี PLSR มากที่สุดเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องสูง และค่าความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการต่ำที่สุด

จากตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.7 พบว่าสมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าปริมาณแอมิโลส คือ สมการที่สร้างขึ้นจากสเปกตรัมเริ่มต้นช่วงจำนวนคลื่น $8,620-5,128 \text{ cm}^{-1}$ โดยสมการที่สร้างขึ้นมีการจัดกลุ่มตัวแปรเดิมเป็นตัวแปรใหม่ได้ 3 แฟกเตอร์ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง ค่าความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ และ RPD เท่ากับ 0.88, 1.14% และ 2.26 ตามลำดับ โดยพบว่าจำนวนคลื่นที่ตำแหน่ง $6,896$ และ $5,263 \text{ cm}^{-1}$ มีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณแอมิโลสมาก เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับพันธะ C-H และโมเลกุลของสตาร์ชซึ่งพันธะและโมเลกุลที่เกี่ยวข้องนั้นมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของแอมิโลสและโมเลกุลสตาร์ชที่เป็นองค์ประกอบหลักภายในข้าว นอกจากนี้ Tsuchikawa *et al.* (2003) พบว่าจำนวนคลื่นที่ตำแหน่ง $7,042$ และ $6,775 \text{ cm}^{-1}$ มีความสัมพันธ์กับส่วนอสัณฐาน (Amorphous regions) ของโครงสร้างของเม็ดแป้ง

จากผลการทดลองพบว่า สมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายปริมาณแอมิโลสในงานวิจัยครั้งนี้มีความแม่นยำกว่ารายงานการวิจัยของ Delwiche *et al.* (1996) ตรวจสอบปริมาณแอมิโลสของข้าวขาวขนาดเต็มเมล็ดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบการสะท้อนกลับของแสงช่วงความยาวคลื่น $1,100-2,500$ นาโนเมตร พบว่าสมการที่สร้างขึ้นด้วยวิธี PLSR มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.887 และค่า SEP เท่ากับ 1.33% ตามลำดับ

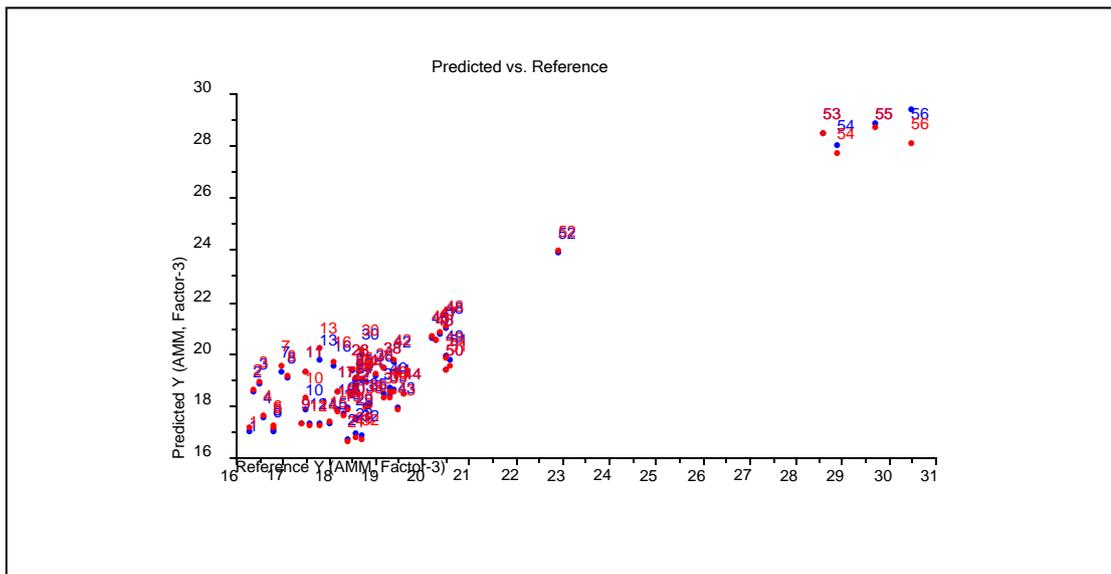
ตารางที่ 4.7 สรุปสมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดด้วยวิธี PLSR

| คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ | วิธีการปรับแต่งสเปกตรัม ¹⁾ | จำนวนคลื่น (cm ⁻¹) | แฟกเตอร์ | กลุ่มสร้างสมการ (Calibration set) | | กลุ่มการทวนสอบความถูกต้องของสมการ (Validation set) | | RPD ²⁾ |
|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|----------|-----------------------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|-------------------|
| | | | | RMSEC | R ² _{cal} | RMSEP | r ² _{val} | |
| ปริมาณโปรตีน (%) | MSC | 10,000-4,000 | 7 | 1.01 | 0.95 | 1.64 | 0.87 | 2.58 |
| ปริมาณแอมิโลส (%) | Original | 8,620-5,128 | 3 | 1.02 | 0.89 | 1.14 | 0.88 | 2.26 |
| ค่าความคงตัวของเจล (มม.) | SNV+Sav.GoL_2 nd deriv | 10,000-4,000 | 5 | 2.01 | 0.95 | 3.20 | 0.88 | 2.41 |
| ค่าการสลายเมล็ดข้าวในต่าง | MSC | 10,000-4,000 | 6 | 0.44 | 0.91 | 0.52 | 0.86 | 2.43 |

หมายเหตุ: ¹⁾ MSC คือ การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ และ SNV คือ การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

²⁾ RPD คือ สัดส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าทางเคมีและค่า SEP ของตัวอย่างในกลุ่มที่ใช้ในการทดสอบความแม่นยำของสมการแคลิเบรชันและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

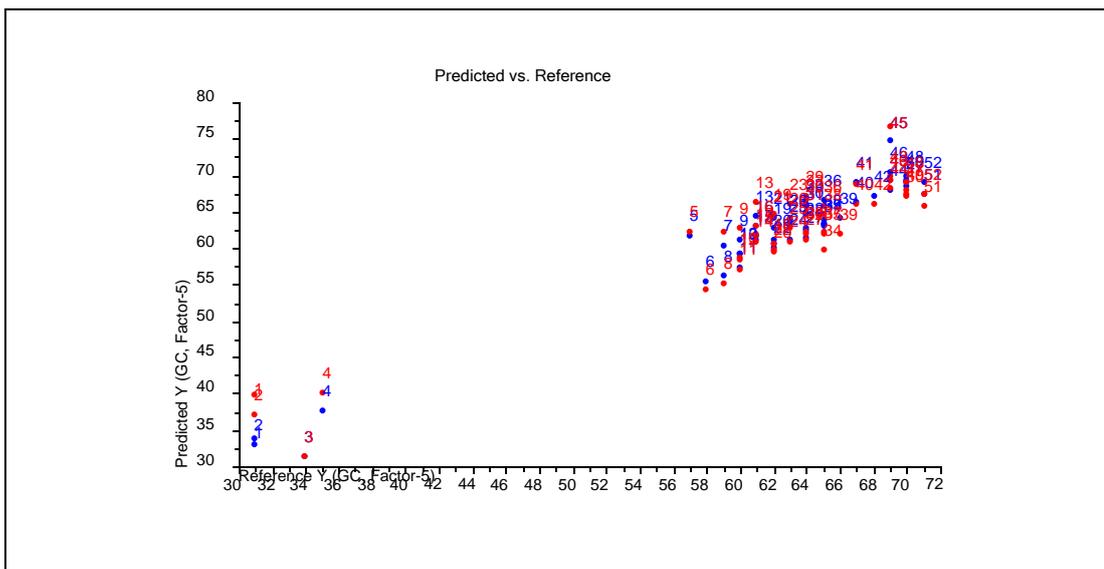
นอกจากนี้ยังพบว่าสมการสำหรับทำนายปริมาณแอมิโลสดังกล่าวยังมีความแม่นยำกว่าสมการทำนายปริมาณแอมิโลสของ Shimizu *et al.* (1999) ซึ่งตรวจสอบปริมาณแอมิโลสในข้าวญี่ปุ่นขนาดเต็มเมล็ดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบการส่องผ่านของแสงช่วงความยาวคลื่น 833-1,050 นาโนเมตร ด้วยวิธี PLSR พบว่าสมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าปริมาณแอมิโลสมีค่า SEP เท่ากับ 1.25% และเมื่อนำสมการที่สร้างขึ้นมาตรวจสอบความแม่นยำของสมการพบว่า มีความแม่นยำน้อยเนื่องจากปริมาณแอมิโลสของตัวอย่างข้าวญี่ปุ่นที่นำมาสร้างสมการมีค่าในช่วงแคบ คือ 13.2-20.7% ในขณะที่ Bao, Cai & Corke (2001) ใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบสะท้อนกลับช่วงความยาวคลื่น 400-2,500 นาโนเมตร ตรวจสอบปริมาณแอมิโลสของแป้งข้าวด้วยวิธีทางสถิติ PLSR พบว่าสมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายปริมาณแอมิโลสนั้นมีค่า SEP สูงถึง 1.39%



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

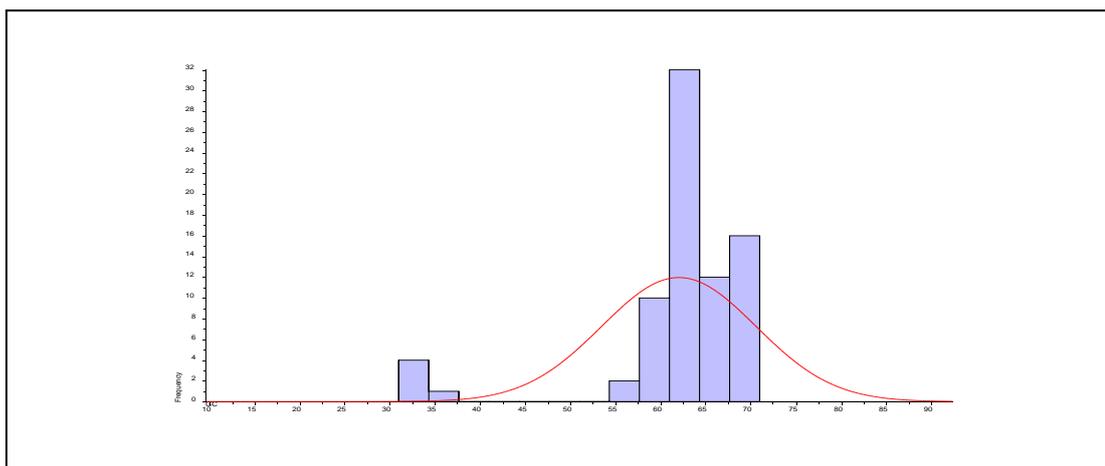
4.4.3 การสร้างสมการทำนายค่าความคงเจล

สมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าความคงตัวของเจลข้าวสาร คือ สมการที่สร้างขึ้นจากสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับวิธีแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง ช่วงจำนวนคลื่น $10,000-4,000 \text{ cm}^{-1}$ โดยสมการที่สร้างขึ้นมีการจัดกลุ่มตัวแปรเดิมเป็นตัวแปรใหม่ได้ 4 แฟกเตอร์ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ ค่าความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ และค่า RPD เท่ากับ 0.88, 3.20 มิลลิเมตร และ 2.41 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7) โดยพบว่าสมการดังกล่าวมีความแม่นยำค่อนข้างต่ำสำหรับการทำนายค่าความคงตัวของเจลของข้าวขาวขนาดเต็มเมล็ด อย่างไรก็ตาม Bao, Cai & Corke (2001) สรุปว่าสมการที่สร้างขึ้นเพื่อตรวจสอบค่าความคงตัวของเจลแป้งข้าวที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.81 และมีค่า SEP เท่ากับ 7.12 สามารถนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวได้ นอกจากนี้สมการดังกล่าวยังสามารถอธิบายได้ด้วยการเปรียบเทียบค่าความคงตัวของเจลที่วิเคราะห์ได้ทางเคมีกับค่าที่ได้จากการสมการ แสดงดังภาพที่ 4.8



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

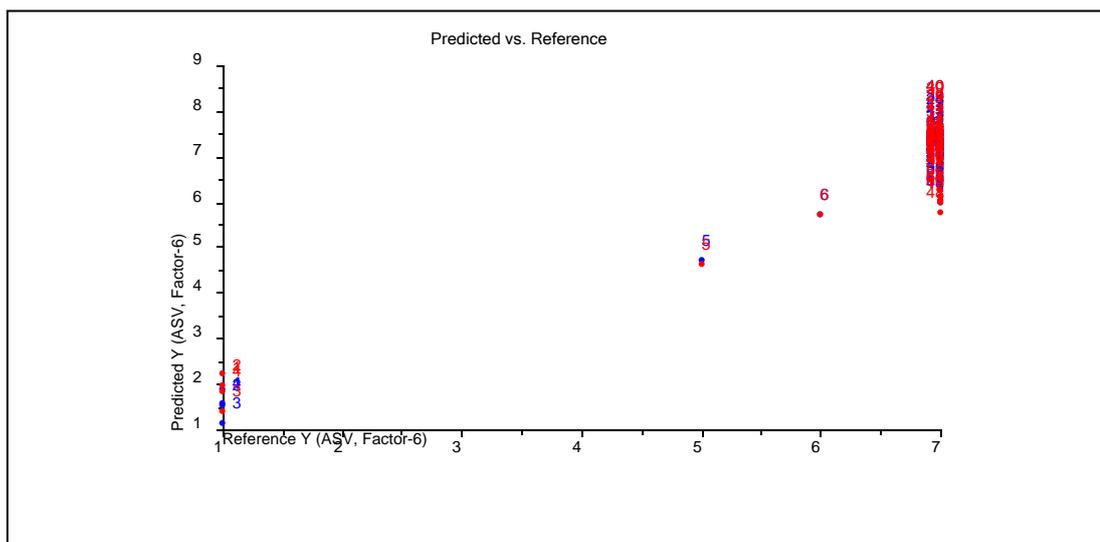
จากภาพที่ 4.8 พบว่าค่าความคงตัวของเจลส่วนใหญ่อยู่ในช่วงเจลแป้งนุ่มซึ่งเป็นลักษณะของข้าวหอมมะลิและข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำ โดยเฉพาะตัวอย่างข้าวหอมมะลิซึ่งมีจำนวนมากในการวิจัยครั้งนี้ ในขณะที่กลุ่มข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำ ปริมาณแอมิโลสปานกลาง และปริมาณแอมิโลสสูงมีจำนวนน้อย จึงส่งผลให้การกระจายค่าทางเคมีไม่เป็นแบบปกติ (Non-normal distribution) (ภาพที่ 4.9) และมีผลทำให้ค่าทำนายมีค่าน้อยกว่าค่าจริงและสมการมีความแม่นยำต่ำ (รณฤทธิ์ ฤทธิธ, 2552, หน้า 112) เพื่อลดปัญหาดังกล่าวควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างข้าวทั้ง 3 กลุ่มให้มีจำนวนตัวอย่างใกล้เคียงกับข้าวหอมมะลิเพื่อให้การกระจายค่าทางเคมีเป็นแบบสมมาตร



ภาพที่ 4.9 การกระจายค่าทางเคมีแบบไม่เป็นปกติของค่าความคงตัวของเจล

4.4.4 การสร้างสมการทำนายค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง

สมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง คือสมการที่สร้างขึ้นจากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ ช่วงจำนวนคลื่น $10,000-4,000 \text{ cm}^{-1}$ โดยสมการที่สร้างขึ้นมีการจัดกลุ่มตัวแปรเดิมเป็นตัวแปรใหม่ได้ 6 แฟกเตอร์ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ ค่าความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง และค่า RPD เท่ากับ 0.86, 0.52 ของค่าระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง (Units on a 1-7 visual scale), และ 2.43 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการ (สีน้ำเงิน) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (สีแดง)

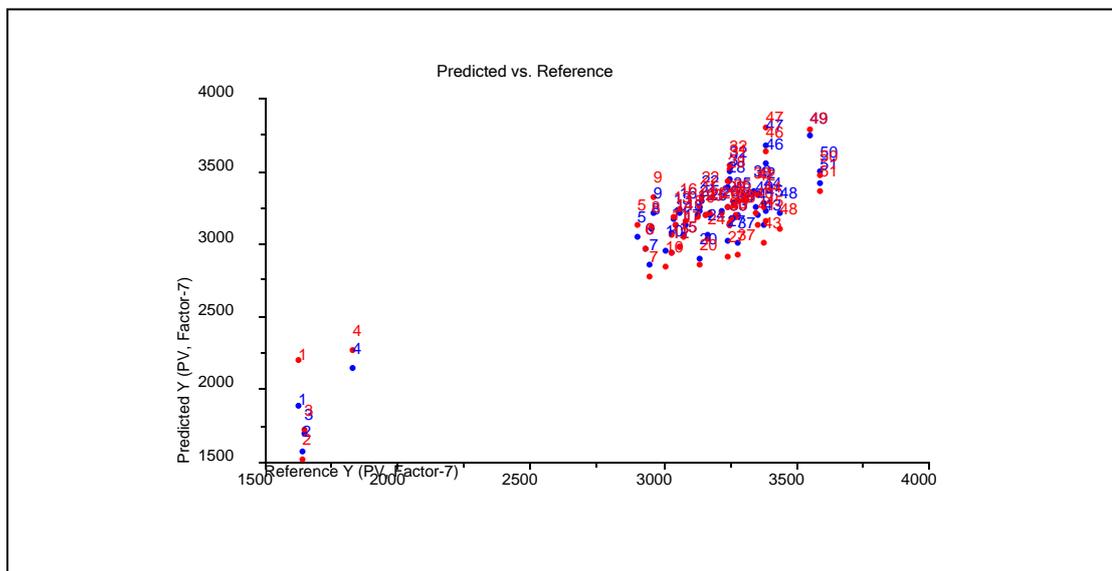
จากการศึกษารายงานการวิจัย พบว่าสมการสำหรับทำนายค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่างด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ที่สร้างขึ้นนั้นไม่ค่อยมีความแม่นยำในการทำนายค่าทางเคมีดังกล่าว โดย Delwiche *et al.* (1996) ตรวจสอบระดับการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่างความเข้มข้น 1.5% ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ช่วงความยาวคลื่น 1,140-1,800 นาโนเมตร ด้วยวิธีทางสถิติ PLSR พบว่าสมการที่สร้างขึ้นมีการจัดกลุ่มตัวแปรเดิมเป็นตัวแปรใหม่ได้ 6 แฟกเตอร์ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ค่า SEP และ Bias เท่ากับ 0.822, 0.43 และ -0.08 ตามลำดับ โดย Wadsworth (1994) อธิบายว่าค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างมีความสัมพันธ์กับโมเลกุลของน้ำที่ความยาวคลื่น 1,930 และ 1,450 นาโนเมตร อย่างไรก็ตาม Srisawas (2009) พบว่าเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้สามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่างได้ โดยสมการที่เหมาะสมสร้างขึ้นจากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับให้ราบเรียบ (Smoothing) แต่มีการจัดกลุ่มตัวแปรเดิมเป็นตัวแปรใหม่สูงถึง 19 แฟกเตอร์ เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าสูงถึง 0.806 และมีค่า SEP เท่ากับ 0.545 ซึ่งสมการที่มีตัว

แปรใหม่สูงถึง 19 แฟกเตอร์นั้นยังไม่มีความแม่นยำในการทำนายค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง

4.4.5 การสร้างสมการสำหรับทำนายค่าคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าว

4.4.5.1 ค่าความหนืดสูงสุด

สมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าความหนืดสูงสุดของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ด คือ สมการที่สร้างขึ้นจากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ ช่วงจำนวนคลื่น $10,000-4,000 \text{ cm}^{-1}$ โดยสมการที่สร้างขึ้นมีการจัดกลุ่มตัวแปรเดิมเป็นตัวแปรใหม่ได้ 7 แฟกเตอร์ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ และค่าความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ เท่ากับ 0.78 และ 209 RVU ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.11 และเมื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการจากกลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง พบว่ามีค่า RPD เท่ากับ 1.79



ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าความหนืดสูงสุดระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการ (สีน้ำเงิน) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (สีแดง)

ตารางที่ 4.8 สรุปสมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายคุณสมบัติทางด้านความหนืดของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดด้วยวิธี PLSR

| คุณสมบัติด้านความหนืด (RVU) | วิธีการปรับแต่งสเปกตรัม ¹⁾ | จำนวนคลื่น (cm ⁻¹) | แฟกเตอร์ | กลุ่มสร้างสมการ (Calibration set) | | กลุ่มการทดสอบความถูกต้องของสมการ (Validation set) | | RPD ²⁾ |
|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|----------|-----------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------------|-------------------|
| | | | | RMSEC | R ² _{cat} | RMSEP | r ² _{val} | |
| ค่าความหนืดสูงสุด | MSC | 10,000-4,000 | 7 | 147 | 0.89 | 209 | 0.78 | 1.79 |
| ค่าการแตกตัวของแป้งสุก | Original | 10,000-4,000 | 5 | 88 | 0.85 | 106 | 0.79 | 1.83 |
| ค่าความคงตัวของแป้งสุก | Original | 10,000-4,000 | 6 | 195 | 0.92 | 237 | 0.89 | 2.68 |
| ค่าความหนืดสุดท้าย | MSC + Sav.Gol_2nd deriv ⁴⁾ | 10,000-4,000 | 3 | 151 | 0.86 | 181 | 0.80 | 2.68 |
| ค่าความหนืดหลังการทำเย็น | MSC | 10,000-4,000 | 5 | 111 | 0.85 | 141 | 0.77 | 1.72 |

หมายเหตุ: ¹⁾ MSC คือ การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ และ SNV คือ การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

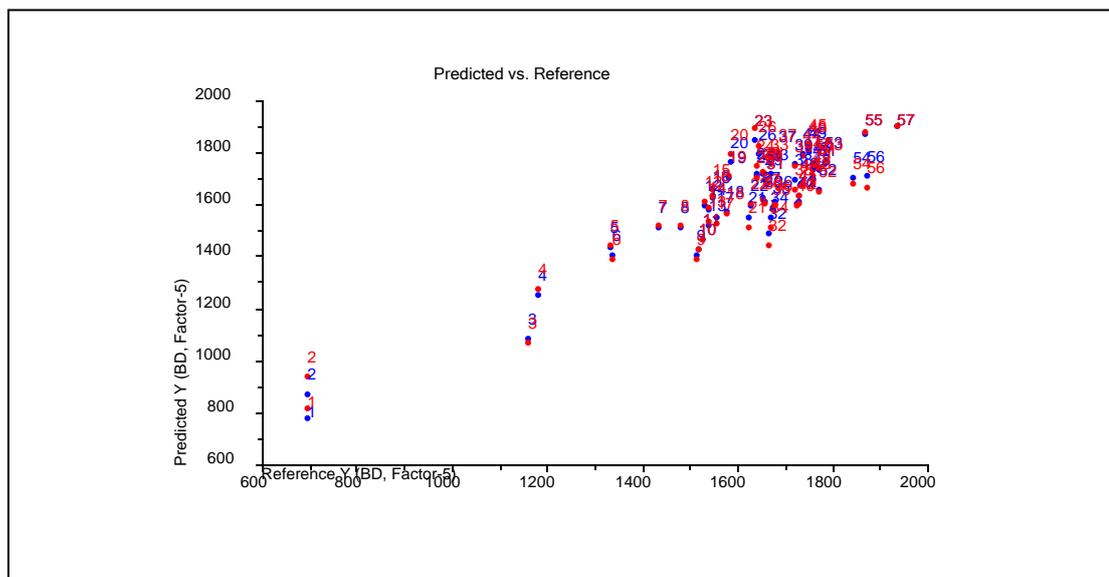
²⁾ RPD คือ สัดส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าทางเคมีและค่า SEP ของตัวอย่างในกลุ่มที่ใช้ในการทดสอบความแม่นยำของสมการแคลิเบรชันและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

³⁾ Sav.Gol_2nd deriv (Savitzky Golay 2nd derivative, 10 points averaging, 2nd polynomial order) คือ การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการแปลงให้เป็นอนุพันธ์อันดับสอง

⁴⁾ MSC + Sav.Gol_2nd deriv (Multiplicative Scatter Correction + Savitzky Golay 2nd derivative, 10 points averaging, 2nd polynomial order) คือ การปรับสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณร่วมกับวิธีการแปลงค่าให้เป็นอนุพันธ์อันดับสอง

4.4.5.2 ค่าการแตกตัวของแป้งสุก

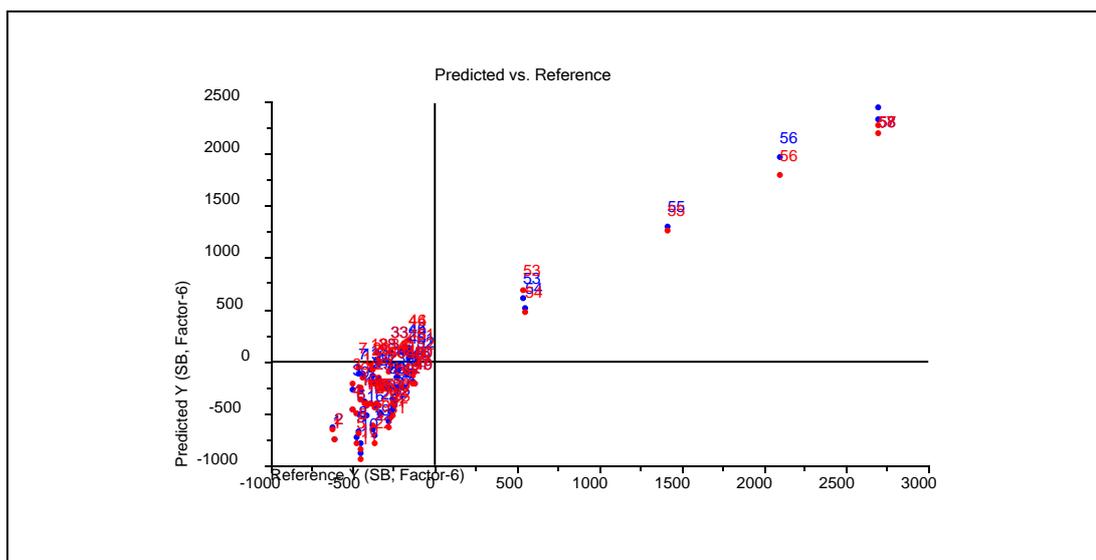
สมการที่สร้างขึ้นจากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณเป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำนายค่าการแตกตัวของแป้งสุกของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ด แสดงดังตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.12 โดยสมการที่สร้างขึ้นมีการจัดกลุ่มตัวแปรใหม่เป็นตัวแปรเดิมได้ 5 แฟกเตอร์ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ ค่าความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ และค่า RPD เท่ากับ 0.79, 106 RVU และ 1.83 ตามลำดับ



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

4.4.5.2 ค่าความคงตัวของแป้งสุก

สมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าความคงตัวของแป้งสุกของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ด คือ สมการที่สร้างขึ้นจากสเปกตรัมเริ่มต้น ช่วงจำนวนคลื่น $10,000-4,000 \text{ cm}^{-1}$ แสดงดังตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.13 โดยสมการที่สร้างขึ้นมีการจัดกลุ่มตัวแปรใหม่เป็นตัวแปรเดิมได้ 6 แฟกเตอร์ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ ค่าความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ และค่า RPD เท่ากับ 0.89, 237 RVU และ 2.68 ตามลำดับ



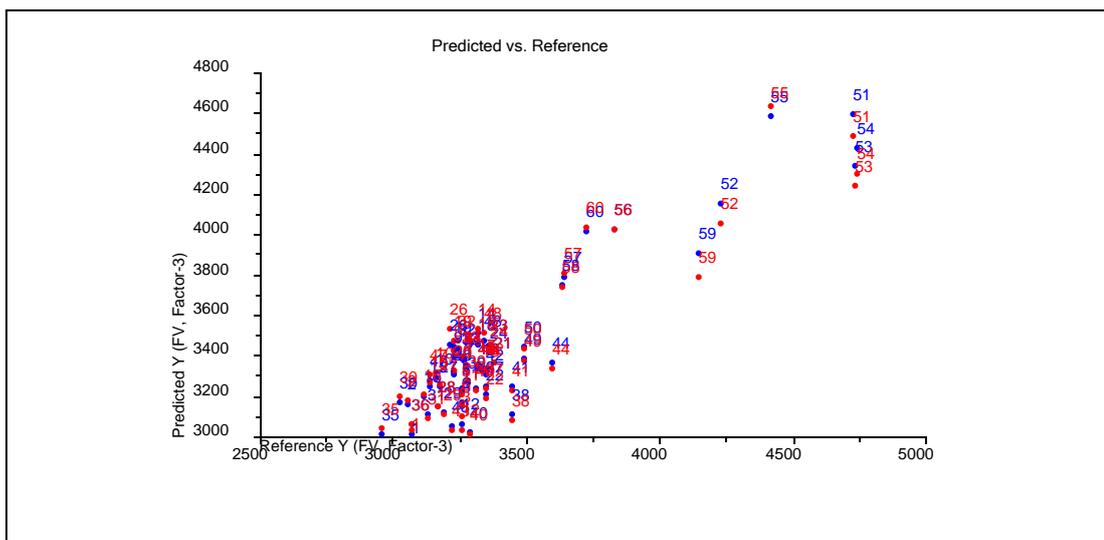
ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าความคงตัวของแป้งสุกระหว่างค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมี (Reference value) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ด้วยวิธี PLSR ของกลุ่มตัวอย่างที่สร้างสมการ (สีน้ำเงิน) และกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ (สีแดง)

4.4.5.4 ค่าความหนืดสุดท้าย

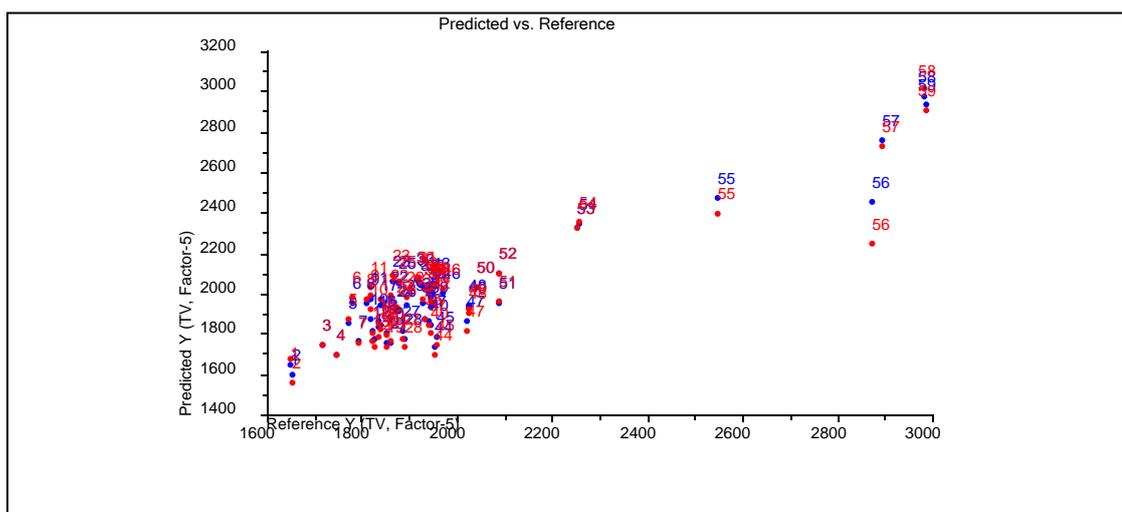
สมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายคุณสมบัติความหนืดของแป้งด้านค่าความหนืดสุดท้าย แสดงดังตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.14 พบว่าสมการที่สร้างขึ้นจากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณร่วมกับวิธีแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง ช่วงจำนวนคลื่น $10,000-4,000 \text{ cm}^{-1}$ มีความเหมาะสมที่สุดในการทำนายค่าความหนืดของตัวอย่างข้าว โดยพบว่าสมการที่สร้างขึ้นมีการจัดกลุ่มตัวแปรใหม่เป็นตัวแปรเดิมได้ 3 แฟกเตอร์ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ ค่าความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ และค่า RPD เท่ากับ 0.80, 181 RVU และ 2.68 ตามลำดับ

4.4.5.5 ค่าความหนืดหลังการทำเย็น

สมการที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าความหนืดหลังการทำเย็นของตัวอย่างข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดกลุ่มข้าวหอมมะลิ ข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำ ข้าวปริมาณปานกลาง และข้าวปริมาณแอมิโลสสูง คือ สมการที่สร้างขึ้นจากสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน ช่วงจำนวนคลื่น $10,000-4,000 \text{ cm}^{-1}$ แสดงดังตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.15 โดยสมการที่สร้างขึ้นมีการจัดกลุ่มตัวแปรใหม่เป็นตัวแปรเดิมได้ 5 แฟกเตอร์ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ ค่าความคลาดเคลื่อนของกลุ่มตรวจสอบความถูกต้องของสมการ และค่า RPD เท่ากับ 0.77, 141 RVU และ 1.72 ตามลำดับ



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



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

จากผลการวิจัยดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ทำนายค่าคุณสมบัติทางด้านความหนืดของข้าวกล้องขนาดเต็มเมล็ด โดย Radhika *et al.* (1994) พบว่าคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวมีอิทธิพลมาจากสายโซ่ปีของโมเลกุลแอมิโลเพกทิน และความแปรปรวนระหว่างอัตราส่วนของโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ซึ่งมีผลทำให้การทำนายค่าคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ไม่มีความแม่นยำ อย่างไรก็ตาม Shimizu *et al.* (2001) Bao, Cai & Corke (2001) และ Meadows &

Barton II (2002) พบว่าสมการที่สร้างขึ้นจากเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้มีความแม่นยำสูงในการทำนายค่าคุณสมบัติทางด้านความหนืดของข้าว

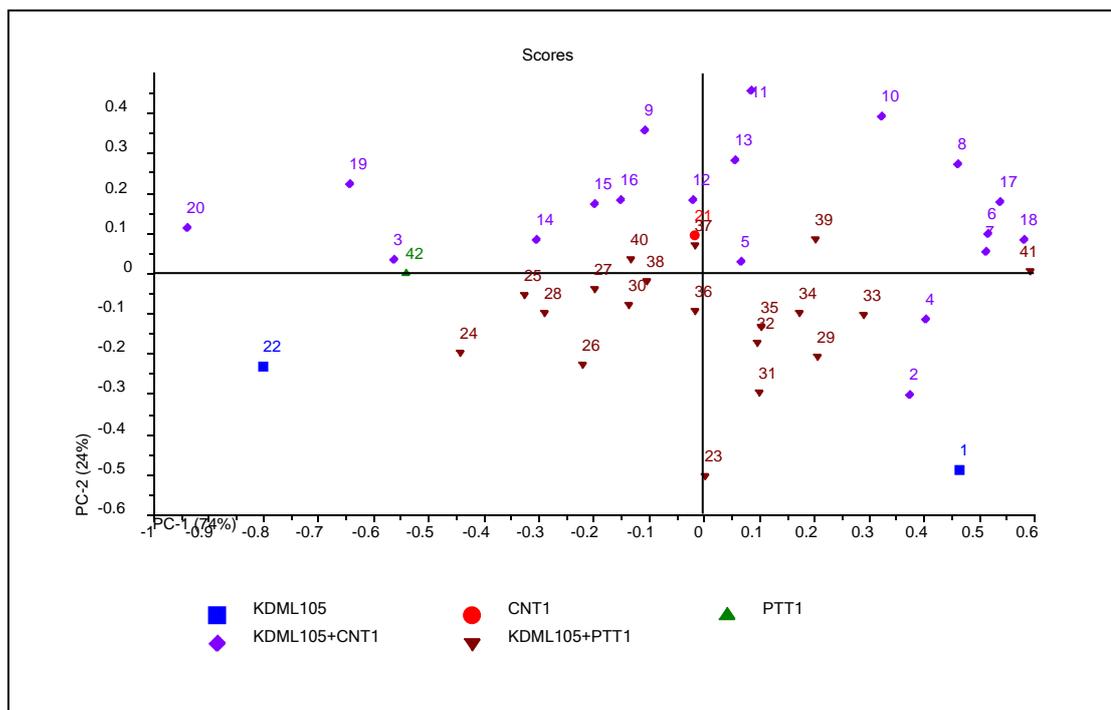
ดังนั้น สมการที่สร้างขึ้นด้วยวิธีทางสถิติ PLSR จึงมีความเหมาะสมในการทำนายค่าคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดของข้าวหอมมะลิ ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสสูง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.5 การสร้างสมการทำนายสำหรับตรวจสอบการปลอมปนข้าวหอมมะลิจากข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 เป็นพันธุ์ข้าวสำคัญที่นิยมนำมาปลอมปนในข้าวหอมมะลิ เนื่องจากข้าวทั้ง 2 พันธุ์ มีคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีกายภาพใกล้เคียงกับข้าวหอมมะลิ อาทิเช่น เมล็ดยาว เรียว มีกลิ่นหอม ลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่มโดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มข้าวหอมเช่นเดียวกับข้าวหอมมะลิแต่ไม่ได้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มข้าวหอมมะลิไทยนั้น จะเป็นข้าวที่มีกลิ่นหอม ลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่ม แต่มีราคาถูกกว่าข้าวหอมมะลิ จึงนิยมนำผสมกับข้าวหอมมะลิ (Cheaupun, Wongpiyachon & Kongseree, 2005, pp. 44-45) ในขณะที่ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ถึงแม้จะเป็นข้าวที่อยู่ในกลุ่มปริมาณแอมิโลสสูง แต่ค่าความคงตัวของเจลแป้งมีลักษณะนุ่มปานกลาง จึงส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกนุ่ม ร่วน เมื่ออายุการเก็บรักษาไม่เกิน 4 เดือน ดังนั้น ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 จึงนิยมนำมาผสมกับข้าวหอมมะลิ เนื่องจากมีคุณลักษณะตรงกับความต้องการของผู้บริโภค เพราะจะมีกลิ่นหอมจากข้าวหอมมะลิ และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกนุ่ม ร่วน ไม่ละเอียดเกินไปเหมือนข้าวหอมมะลิ (งามชื่น คงเสรี, 2545, หน้า 23) อย่างไรก็ตามข้าวทั้งสองพันธุ์ยังมีคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่แตกต่างกับข้าวหอมมะลิ โดยเฉพาะด้านความหนืด (ตารางที่ 4.2) การผสมข้าวทั้งสองพันธุ์ในข้าวหอมมะลิจึงทำให้คุณภาพการหุงต้ม รับประทาน และแปรรูปของข้าวหอมมะลิลดลง และมีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคตลอดจนส่งผลให้มูลค่าของข้าวหอมมะลิในตลาดลดลง

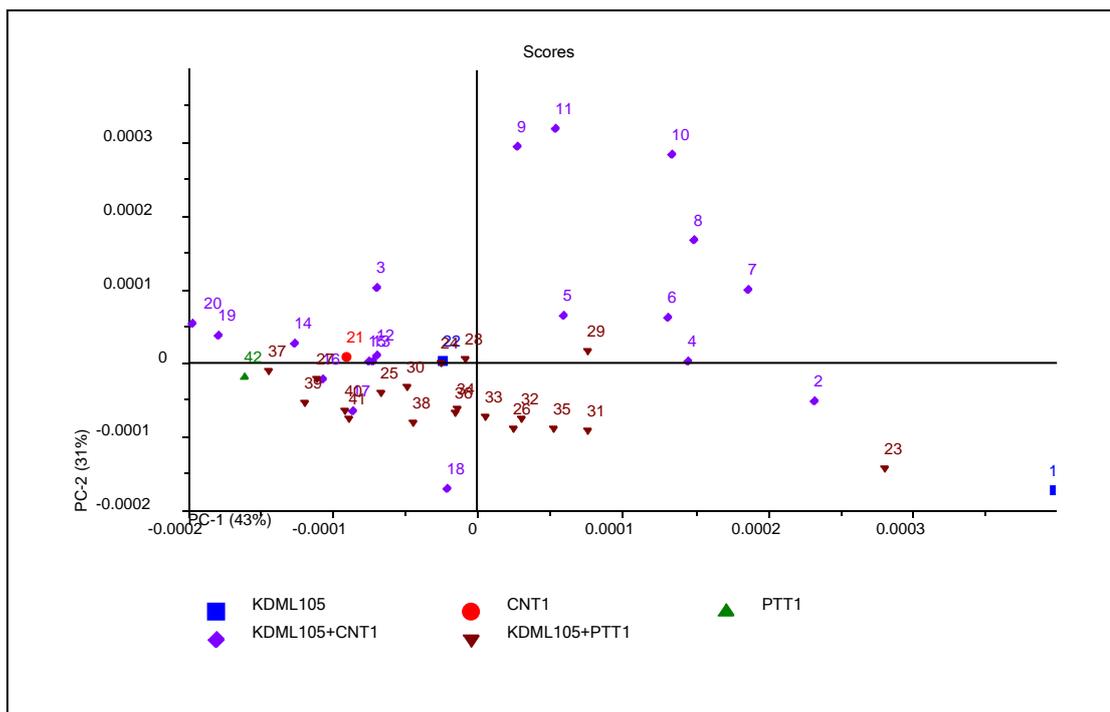
การสร้างสมการทำนายสำหรับทำนายตรวจสอบการปลอมปนข้าวหอมมะลิจากข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ตามคุณลักษณะของสเปกตรัมเมื่อวัดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก สามารถทำได้โดยนำสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีต่าง ๆ ช่วงความยาวคลื่น $10,000-4,000 \text{ cm}^{-1}$ มาวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ผลการวิเคราะห์การปลอมปนข้าวหอมมะลิจากสเปกตรัมเริ่มต้น แสดงดังภาพที่ 4.16 ซึ่งแสดงการกระจายตัวของสเปกตรัมข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวทั้งสองพันธุ์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันในแผนภาพค่าคะแนนปัจจัย (Score plot) ซึ่งประกอบด้วย 2 องค์ประกอบ โดยสามารถอธิบายค่าความแปรปรวนรวมได้ 98% โดยพบว่าข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจะถูกจัดวางให้อยู่ในตำแหน่งด้านบนซ้ายและขวาของแผนภาพค่าคะแนนปัจจัย ในขณะที่ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 จะอยู่บริเวณตรงกลางของแผนภาพคะแนนปัจจัย นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% (หมายเลข 1 และ 22) จะจำแนกออกจากตัวอย่างข้าวอื่น ๆ ได้อย่างชัดเจน ในทางตรงกัน

ข้ามข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% (หมายเลข 42) จะไม่สามารถจำแนกออกจากข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 90 : 10 (หมายเลข 3) ได้ เนื่องจากมีค่าความหนืดสูงสุด ค่าการแตกตัวของแป้งสุก และค่าความหนืดหลังการทำเย็นใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4.4 และ 4.6) เช่นเดียวกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% (หมายเลข 21) ก็ไม่สามารถจำแนกออกจากข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วน 25 : 75 (หมายเลข 37) ได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 4.16 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมเริ่มต้นของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

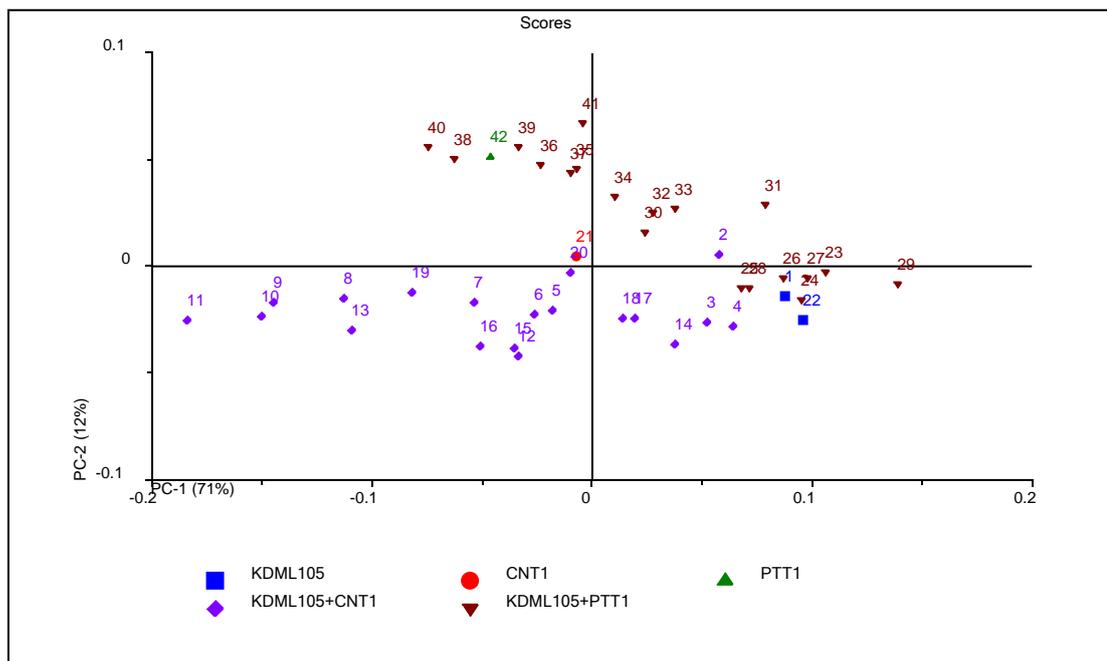
ภาพคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมตัวอย่างข้าวที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง แสดงดังภาพที่ 4.17 พบว่าองค์ประกอบ 1 (PC_1) และองค์ประกอบ 2 (PC_2) สามารถอธิบายค่าความแปรปรวนรวมได้ 74% จากแผนภาพค่าคะแนนปัจจัยดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่าข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% (หมายเลข 1) สามารถแยกออกจากตัวอย่างข้าวอื่น ๆ ได้อย่างชัดเจนในขณะที่ข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% อีกตัวอย่าง (หมายเลข 22) ไม่สามารถแยกออกจากตัวอย่างข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 90 : 10 ได้ เนื่องจากมีปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายเมล็ดข้าวในต่าง และคุณสมบัติด้านความหนืดใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองที่ได้จึงพบว่าการผสมข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ในข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ปริมาณ 10% จะไม่สามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวหอมมะลิได้เนื่องจากมีคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่ใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.17 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง

นอกจากนี้จากภาพที่ 4.17 ยังพบว่าข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% (หมายเลข 42) ยังไม่สามารถแยกออกจากตัวอย่างข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 25 : 75 (หมายเลข 37) ได้อย่างชัดเจน ในขณะที่ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% (หมายเลข 21) ก็ไม่สามารถแยกออกจากตัวอย่างข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 45 : 55 (หมายเลข 12) และ 40 : 60 (หมายเลข 13) ได้

ภาพที่ 4.18 อธิบายลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และตัวอย่างข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ โดยพบว่าผลการทดลองที่ได้แตกต่างจากลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมเริ่มต้น (ภาพที่ 4.16) และภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง (ภาพที่ 4.17) กล่าวคือข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% และข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วนแตกต่างกันจะถูกจัดวางที่ตำแหน่งด้านบนซ้ายและขวาของแผนภาพค่าคะแนนปัจจัย ในขณะที่ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่อัตราส่วนแตกต่างกันจะอยู่ในตำแหน่งบริเวณตรงกลางของแกน PC_1 และ PC_2

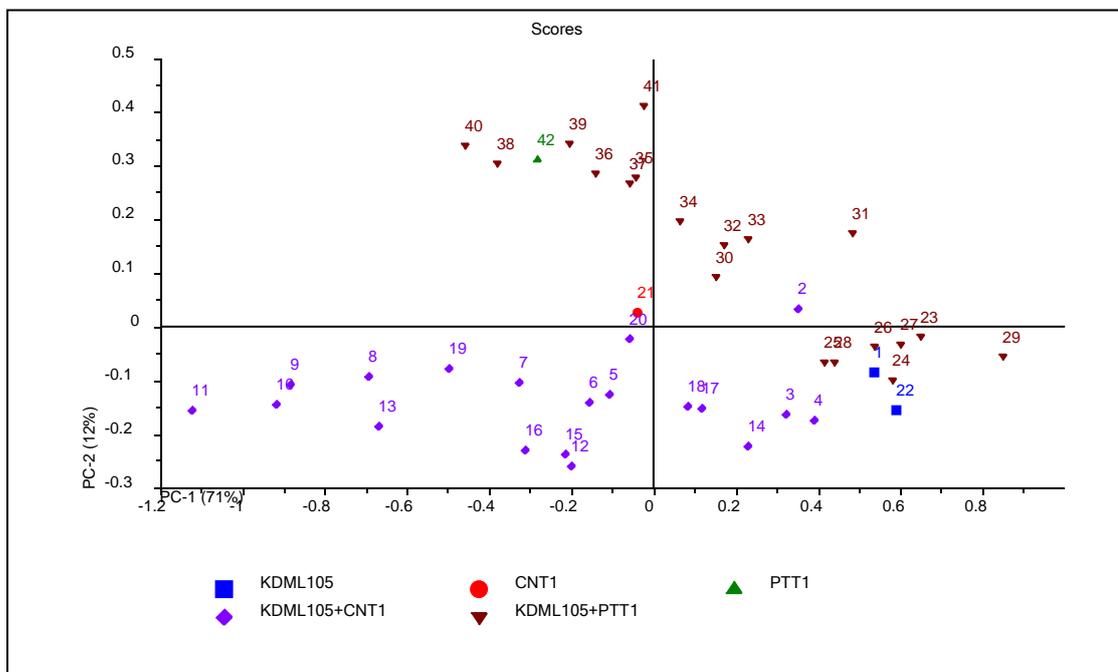


ภาพที่ 4.18 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การเจิงแบบผลคูณ

จากภาพที่ 4.18 ยังพบว่าข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% (หมายเลข 1 และ 22) ไม่สามารถจำแนกออกจากตัวอย่างข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 90 : 10 (หมายเลข 24), 80 : 20 (หมายเลข 26) และ 75 : 25 (หมายเลข 27)ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% (หมายเลข 42) ไม่สามารถจำแนกออกจากตัวอย่างข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 20 : 80 (หมายเลข 38) และ 15 : 85 (หมายเลข 39) เนื่องจากมีอัตราส่วนของข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในอัตราส่วนที่สูงถึงถึง 85% จึงส่งผลให้คุณลักษณะของสเปกตรัมและคุณสมบัติด้านเคมีกายภาพใกล้เคียงกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% จึงทำให้ไม่สามารถจำแนกตัวอย่างข้าวดังกล่าวได้ เช่นเดียวกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% (หมายเลข 21) ที่ไม่สามารถจำแนกออกจากข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ที่อัตราส่วน 5 : 90 (หมายเลข 20) เนื่องจากมีคุณภาพใกล้เคียงกับข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 จากผลการทดลองดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าการผสมข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปริมาณ 10-25% จะไม่สามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้ โดยใช่วิธีการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางด้านความหนืดที่ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวสามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ได้ ถ้ามีข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ผสมตั้งแต่ 30% ขึ้นไป

ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของตัวอย่างที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน แสดงดังภาพที่ 4.19 ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับ

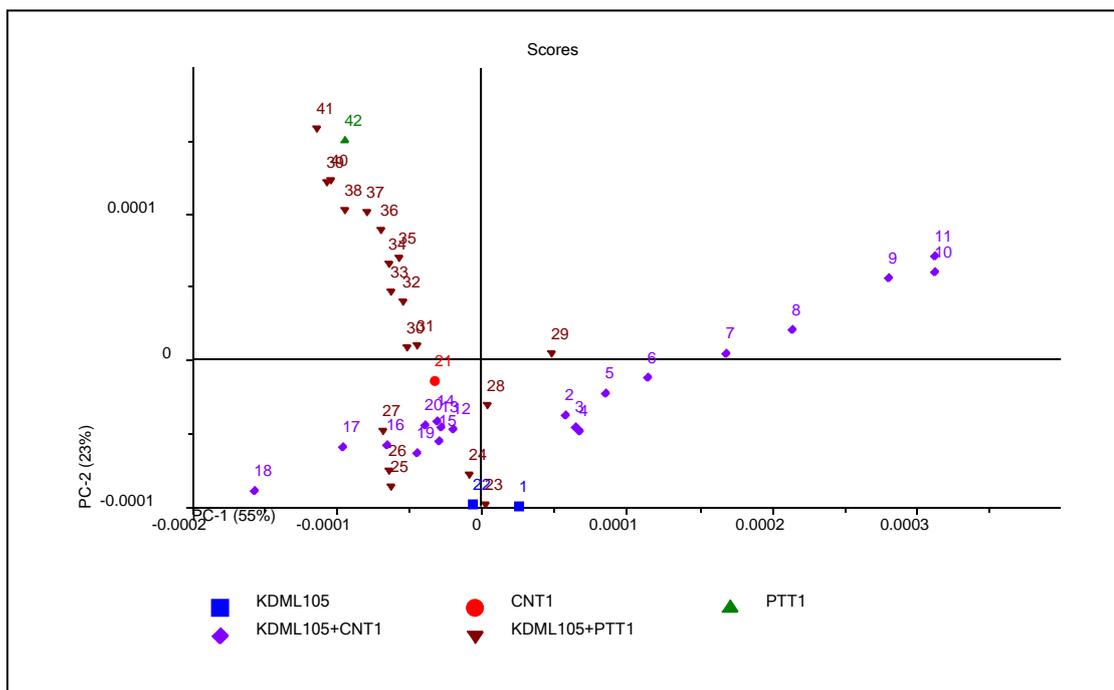
ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของตัวอย่างที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับการแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (ภาพที่ 4.18) ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณและการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานสามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ออกจากข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ได้ ที่มีการผสมข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ตั้งแต่ 30% ขึ้นไป



ภาพที่ 4.19 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

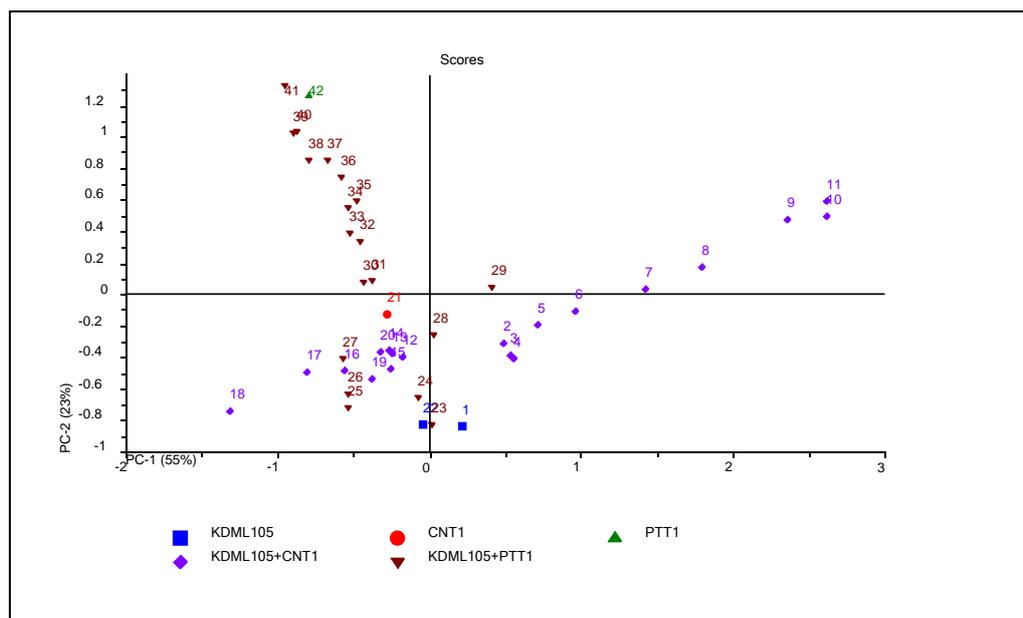
ภาพที่ 20 และ 21 แสดงลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% ข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันเมื่อผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับการแก้การกระเจิงแบบผลคูณร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง และสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง โดยพบว่าองค์ประกอบที่ 1 และองค์ประกอบที่ 2 สามารถอธิบายค่าความแปรปรวนได้เท่ากันคือ 78% เมื่อพิจารณาการจัดวางตำแหน่งของตัวอย่างในภาพค่าคะแนนปัจจัยจะพบว่าข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% และข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจะถูกจัดวางในตำแหน่งด้านซ้ายบนและล่างขององค์ประกอบที่ 2 (PC_2) ในขณะที่ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% จะถูกวางกระจายอยู่ไ้ในตำแหน่งด้านล่างซ้ายขององค์ประกอบที่ 2 (PC_2) และ

องค์ประกอบที่ 1 (PC₁) ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการจำแนกการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105



ภาพที่ 4.20 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง

เมื่อพิจารณาความสามารถในการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จะพบว่าการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง และวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สองนั้น ไม่สามารถจำแนกตัวอย่างข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 แท้ 100% (หมายเลข 1 และ 22) ออกจากตัวอย่างข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่อัตราส่วนเท่ากับ 95 : 5 (หมายเลข 23) และ 90 : 10 (หมายเลข 24) ได้ นั่นแสดงว่าทั้งสองวิธีมีประสิทธิภาพในตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่ผสมในข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ในปริมาณที่ต่ำถึง 5% ได้ ซึ่งจะมีประโยชน์มากในการนำไปประยุกต์ใช้ในทางการค้าข้าว



ภาพที่ 4.21 ลักษณะภาพค่าคะแนนปัจจัยของสเปกตรัมข้าวพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 แท้ 100% พันธุ์ปทุมธานี 1 แท้ 100% พันธุ์ชัยนาท 1 แท้ 100% และข้าวพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 และชัยนาท 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง

เมื่อพิจารณาความสามารถในการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 นั้น จะพบว่าวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลักสามารถจำแนกข้าวสารพันธุ์ชาวดอกมะลิ 100 (หมายเลข 1 และ 22) ออกจากตัวอย่างข้าวที่มีข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมตั้งแต่ 5% ขึ้นไป (หมายเลข 2) ได้อย่างชัดเจนทุกวิธีการปรับแต่งสเปกตรัม อย่างไรก็ตามผลการวิจัยในครั้งนี้ยังพบว่าการผสมข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่มีอายุการเก็บรักษาไม่เกิน 4 เดือน กับข้าวสารพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 ช่วงอัตราส่วน 40-70% ยังไม่สามารถจำแนกการออกจากตัวอย่างข้าวสารพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 ที่ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ช่วงอัตราส่วน 20-30% ได้ ทั้งนี้อาจจะมีเหตุผลมาจากคุณสมบัติค่าความคงตัวของเจลของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่มีลักษณะเป็นเจลนุ่ม-ปานกลางจึงทำให้คุณสมบัติด้านความหนืดของตัวอย่างข้าวดังกล่าวไม่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น สรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักสามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 และข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง และวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สองมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105% จากข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 เนื่องจากสามารถตรวจสอบตัวอย่างข้าวสารพันธุ์ชาวดอกมะลิ 105 ที่มีข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ผสมในปริมาณที่ต่ำถึง 5% ได้ สำหรับการตรวจสอบการปลอมปนข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 นั้นจะพบว่าเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้สามารถตรวจสอบได้อย่างแม่นยำเมื่อใช้ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัย

1.1 ตัวอย่างข้าวที่นำมาใช้ในการทดลอง จำนวน 60 ตัวอย่าง ประกอบด้วยข้าวหอมมะลิ ข้าวปริมาณแอมิโลสต่ำ ข้าวปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวปริมาณแอมิโลสสูง จากการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพพบว่า ปริมาณโปรตีนไม่สามารถนำมาใช้ในการจำแนกข้าวหอมมะลิออกจากข้าวกลุ่มอื่นได้ แต่ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง และคุณสมบัติด้านความหนืดสามารถนำมาใช้ในการจำแนกข้าวหอมมะลิออกจากข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสสูงได้ แต่ไม่สามารถนำมาจำแนกข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำได้

1.2 จากการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมกับข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันนั้น พบว่าปริมาณโปรตีน ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างของตัวอย่างข้าวดังกล่าวไม่แตกต่างกัน จึงไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ได้ แต่คุณสมบัติด้านความหนืด ได้แก่ ความหนืดสูงสุดสามารถตรวจสอบการปลอมปนได้เมื่อข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ผสมข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 80-90% และค่าการแตกตัวของแป้งสุก ค่าความคงตัวของแป้งสุก ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าความหนืดหลังการทำเย็นสามารถตรวจสอบตัวอย่างข้าวที่มีข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 ผสมตั้งแต่ 55, 45, 20 และ 45% ขึ้นไป ตามลำดับ

1.3 ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างสามารถตรวจสอบการปลอมปนของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ได้อย่างแม่นยำที่สุด ในขณะที่ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล และคุณสมบัติด้านความหนืดก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบการปลอมปนของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จากการที่ข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ผสมตั้งแต่ 10% ขึ้นไป ยกเว้นค่าการแตกตัวของแป้งสุกที่สามารถตรวจสอบได้เมื่อมีการปลอมปนเพียง 5% ในขณะที่ปริมาณโปรตีนไม่สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบการปลอมปนได้

1.4 การสร้างสมการที่เหมาะสมในการทำนายค่าคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารเต็มเมล็ดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ นั้น พบว่าการสร้างสมการด้วยวิธีทางสถิติ PLSR มีความเหมาะสมและแม่นยำในการทำนายค่าคุณภาพของข้าวสารขนาดเต็มเมล็ดของข้าวหอมมะลิ ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ ข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสปานกลาง และข้าวกลุ่มที่มีปริมาณแอมิโลสสูง

1.5 การประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ร่วมกับวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก หรือ PCA สามารถตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 และข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สอง และวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับวิธีการแปลงค่าด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับที่สองมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ปทุมธานี 1 สำหรับการตรวจสอบการปลอมปนข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จากข้าวสารพันธุ์ชัยนาท 1 นั้นพบว่า เทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้ นั้นสามารถตรวจสอบได้อย่างแม่นยำเมื่อใช้ร่วมกับวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

2. ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยครั้งนี้ พบว่าการกระจายค่าทางเคมีของคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของตัวอย่างข้าว ได้แก่ ปริมาณแอมิโลส ค่าความคงตัวของเจล ค่าการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่าง และคุณสมบัติด้านความหนืดมีลักษณะเป็นแบบไม่ปกติ ส่งผลให้ค่าที่ได้จากการทำนายด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีอินฟราเรดย่านใกล้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี เนื่องจากค่าที่วิเคราะห์ได้ทางเคมีมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย เพื่อลดอิทธิพลดังกล่าวควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างให้มากพอ เพื่อให้มีการกระจายค่าทางเคมีแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution) จะทำให้ได้สมการที่ใช้สำหรับทำนายค่าความหนืดของข้าวสารมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- กรมการค้าภายใน. (2553). ปริมาณการส่งออกข้าวปี 2553. *วารสารข้าวไทย*, 4(21), 036-037.
- กรมการค้าภายใน. (2545). มาตรฐานข้าวและข้าวหอมมะลิไทย. กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์.
- กรมการค้าต่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์. (1997). ข้าวหอมมะลิไทยและข้าวเจ้า. กรมการค้าต่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์.
- กรมการค้าต่างประเทศ (2554). ปัญหาข้าวหอมมะลิไทย. สืบค้นเมื่อ 14 กรกฎาคม, 2554, จาก http://www.moc.go.th.ewt_news.php?nid=944&filename_index.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2550). *เทคโนโลยีของแป้ง*. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กัญญา เชื้อพันธ์. (2545). *คุณภาพข้าวทางกายภาพ*. ใน *คุณภาพข้าวและการตรวจสอบข้าวปนในข้าวหอมมะลิไทย*. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและอุตสาหกรรม.
- การวิเคราะห์โปรตีน. (2008). *Food Focus Thailand*. หน้า 42-45.
- งามชื่น คงเสรี. (2539). *คุณภาพข้าวสารและข้าวสุก*. เอกสารการฝึกอบรมหลักสูตรการเก็บรักษาคุณภาพข้าวสารและการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์เพื่อการส่งออก. ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ. 23 หน้า.
- งามชื่น คงเสรี. (2545). *คุณภาพข้าวสวย*. ใน *คุณภาพข้าวและการตรวจสอบข้าวปนในข้าวหอมมะลิไทย*. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและอุตสาหกรรม.
- _____. (2547). *คุณภาพข้าวสวย*. ใน *คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย*. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและอุตสาหกรรม.
- ธงชัย สุวรรณสิขณณ์ และปิติพร ฤทธิเรืองเดช. (2552). *การวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ (Qualitative and quantitative analysis)*. ใน *เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้ในอุตสาหกรรมอาหาร*. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 6-2 ถึง 6-33.
- ผดุงศักดิ์ วานิชชัง. (2535). *การจัดการโรงสีข้าว*. ชลบุรี: ภาควิชาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตรศาสตร์ บางพระ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล.
- _____. (2552). *หลักปฏิบัติเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด (การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและการป้องกันมลพิษ) อุตสาหกรรมโรงสีข้าว*. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- มโนวิช เรืองดิษฐ์ และยุทธภูมิ สัมพันธ์รักษ์. (2553). *การวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนในอาหารโดยเทคนิค Dumas combustion*. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*. หน้า 13-16.
- รณฤทธิ์ ฤทธิธรม. (2552a). *การสร้างระบบ NIR สำหรับการวิเคราะห์ประจำวัน (Establishment of NIR system for Routine Analysis)*. ใน *เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้ในอุตสาหกรรมอาหาร*. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 7-1 ถึง 7-16.

- รณฤทธิ์ ฤทธิธรม. (2552b). *การประยุกต์ใช้ NIR ในเมล็ดพืช (Application of NIR to grains and seed)*. ใน เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้ในอุตสาหกรรมอาหาร. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 8-1 ถึง 8-17.
- สมาคมโรงสีข้าวไทย. (2553). *ราคาข้าว*. สืบค้นเมื่อ 23 เมษายน, 2553, จาก <http://www.thairicemiller.com/index.php?option=com> .
- ศุมาพร เกษมสำราญ. (2552). *เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้ในอุตสาหกรรมอาหาร*. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2544). การใช้เครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็วในการวัดความหนืดของแป้ง. บริษัท จาร์พาเทคโนโลยี จำกัด.
- _____. (2547). *ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. (2552). *การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์ (Pretreatment of spectra for analyses)*. ใน เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้ในอุตสาหกรรมอาหาร. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 5-1 ถึง 5-23.
- AACC. (1999). *Amylose content of rice*. Approved Methods of the AACC 61-03. 9ed. American Association of Cereal Chemists. Minnesota, USA.
- AACC. (2000a). *Crude protein—Combustion method*. Approved Methods of the AACC 46—30. 10ed. American Association of Cereal Chemists. Minnesota, USA.
- AACC. (2000b). *Determination of the pasting properties of rice with Rapid Visco Analyzer*. Approved Methods of the AACC 61—02. 10ed. American Association of Cereal Chemists. Minnesota, USA.
- AACC. (2000c). *Moisture content—Air oven method*. Approved Methods of the AACC 44—15A. 10ed. American Association of Cereal Chemists. Minnesota, USA.
- Aphithanaphong, M. (2004). Rice and its aroma. *Journal of University of the Thai Chamber of Commerce*, 24(2), 36—50.
- Bahmaniar, M.A. & Ranjbar, G.A. (2007). Response of rice (*Oryza sativa* L.) cooking quality properties to nitrogen and potassium application. *Pakistan Journal of Biological Science*, 10(11), 1180—1884.
- Ballabio, D. & Todeschini, R. (2009). *Multivariate classification for qualitative analysis*. In D.A. Sun, *Infrared spectroscopy for food quality analysis and control*. Elsevier Inc.: New York. pp. 83—103.

- Bao, J.S., Cai, Y.Z. & Corke, H. (2001). Prediction of rice starch quality parameters by near-infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Food Science*, 66(7), 936-939.
- Barker, M. & Rayens, W. (2003). Partial least squares for discrimination. *Journal of Chemometrics*, 17(3), 166–173.
- Barton II, F.E., Windham, W.R., Champagne, E.T. & Lyon, B.G. (1998). Optimal geometrics for the development of rice quality spectroscopic chemometric models. *Cereal Chemistry*, 75, 315–319.
- Barton II, F.E., Himmelsbach, D.S., McClung, A.M. & Champagne, E.T. (2000). Rice quality by spectroscopic analysis: precision of three spectral regions. *Cereal Chemistry*, 77(5), 669–672.
- Bett-Garber, K.L., Champagne, E.T., McClung, A.M., Moldenhauer, K.A., Linscombe, S.D. & McKenzie, K.S. (2001). Categorizing rice cultivars based on cluster analysis of amylose content, protein content and sensory attributes. *Cereal Chemistry*, 78(5), 551–558.
- Blakeney, A.B. (1979). *Instron measurement of cooked rice texture*. In Proceedings of the Workshop on Chemical Aspects of Rice Grain Quality. IRRI, Los Banos, Laguna Philippines. pp. 343-353.
- Buttery, R.G., Lung, L.C., Juliano, B.O., & Turnbaugh, J.G. (1983). Cooked rice aroma and 2-acetyl-1-pyrroline. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 31, 823-826.
- Cagampang, G.B., Perez, C.M., & Juliano, B.O. (1973). A gel consistency test for eating quality of rice. *Journal Science Food and Agricultural*, 24, 1589-1594.
- Champagne, E.T., Bett-Garber, K.L., Grimm, C.C., McClung, A.M., Moldenhauer, K.A., Linscombe, S., McKenzie, K.S & Barton II, F.E. (2001). Near-infrared reflectance analysis for prediction of cooked rice texture. *Cereal Chemistry*, 78(3), 358-362.
- Cheapun, K., S. Wongpiyachon, & N. Kongseree. (2005). *Improving rice grain quality in Thailand*. In K, Toriyama, K.L. Heong and B. Hardy, Rice is life scientific perspectives for the 21st century. Proceeding of the World Rice Research Conference, Tsukuba, Japan.
- Chen, H., Marks, B.P. & Siebenmorgen, T.J. (1997). Quantifying surface lipid content of milled rice via visible/near infrared spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 74(6), 826–831.

- Cho, S.Y., Choi, S.G. & Rhee, C. (1998). Determination of degree of retrogradation of cooked rice by near infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 6, A335—A359.
- Delwiche, S., Bean, M.M., Miller, R.E., Webb, B.D. & Williams, P.C. (1995). Apparent amylose content of milled rice by near-infrared reflectance spectrophotometry. *Cereal Chemistry*, 72(2), 182-187.
- Delwiche, S.R., McKenzie, K.S. & Webb, B.D. (1996). Quality characteristics in rice by near-infrared reflectance analysis of whole-grain milled samples. *Cereal Chemistry*, 73(2), 257-263.
- Gibson, T.S., Solah, V.A. & McCleary, B.V. (1997). A procedure to measure amylose in cereal starch and flours with concanavalin A. *Journal of Cereal Science*, 25: 111-119.
- Gomez, K.A. & Veskosit, P. (1973). Protein content of farm-grown rices in the Philippines and in Thailand. *International Rice Commission Newsletter*. 22(3), 15—20.
- Gravois, K.A. & Webb, B.O. (1997). Inheritance of long grain rice amylograph viscosity characteristics. *Euphytica*, 97(1), 25-29.
- Harushima, Y., Yano, M., Shomura, A., Sato, M., Shimano, T., Kuboki, Y., Yamamoto, T., Lin, S.Y., Antonio, B.A., Parco, A., Kajiya, H., Huang, N., Yamamoto, K., Nagamura, Y., Kurata, N., Khush, G.S. & Sasaki, T. (1998). A high-density rice genetic linkage map with 2275 markers using a single F₂ population. *Genetics*, 148, 479-494.
- Himmelsbach, D.S., Barton-II, F.E., McClung, A.M. & Champagne, E.T. (2001). Protein and apparent amylose content of milled rice by NIR—FT/Raman spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 78(4), 488—492.
- Juliano, B.O., Albano, E.L. & Cagampang, G.B. (1964a). Variability in protein content, amylose content, and alkali digestibility of rice varieties in Asia. *Philippine Agriculturist*, 48, 234-241.
- Juliano, B.O., Cagampang, G.B., Cruz, L.J. & Santiago, R.G. (1964b). Some physicochemical properties of rice in Southeast Asia. *Cereal Chemistry*, 41, 275-286.
- Juliano, B.O., Bautista, G.M., Lugal, J.C. & Reyes, A.C. (1964c). Studies on the physicochemical properties of rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 12, 131-138.
- Juliano, B.O. (1971). A simplified assay for milled rice amylose. *Cereal Science Today*, 16, 334—338.

- Juliano, B.O. (1972). *Criteria of rice quality*. In Rice Chemistry and Technology. American Association of Cereal Chemists, St Paul, MM, U.S.A. pp 443-524.
- _____. (1985). *Criteria and tests for rice grain qualities*. In Rice Chemistry and Technology. American Association of Cereal Chemists, St Paul, MM, U.S.A.
- _____. 1993. **Grain structure, composition and consumer's criteria for quality**. In Rice in human nutrition. Rome, Italy: The international rice research institute and food and agriculture organization of the United Nations.
- _____. (1993). *Grain structure, composition and consumer's criteria for quality*. In Rice in human nutrition. Rome, Italy: The international rice research institute and food and agriculture organization of the United Nations.
- Kawamura, S., Natsuka, M. & Itoh, K. (1997). Determination of undried rough rice constituent content using near-infrared transmission spectroscopy. *Transaction of the ASAE*, 42(3), 813–818.
- Keush, P. (2011). *Test for starch in food: starch-iodine complex*. Retrieved August 3, 2011, from http://www.uni-regensburg.de/Fakultaeten/nat_Fak_IV/Organische_Chemie/Didaktik/keusch/p29_lbm-e.htm.
- Kim, S.S., Rhyu, M.R., Kim, J.M. & Lee, S.H. (2003). Authentication of rice using near infrared reflectance spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 80(3), 346–349.
- Kongseree, N. (2002). *Quality of cooked rice*. In Rice grain quality and identification of mixed rice varieties in Thai Hom Hom Mali rice. Bangkok: The Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives. (in Thai).
- Kwon, Y.K. & Cho, R.K. (1998). Identification of rice varieties using near infrared spectroscopy. *Journal Near Infrared Spectroscopy*, 6, A67–A73.
- Leach, H.W., Mc Cowen, L.D. & Schoch, T.J. (1959). Structure of the starch granules. In swelling and solubility patterns of various starches. *Cereal Chemistry*, 36, 534–544.
- Li, W.S. & Shaw, J.T. (1997). Determination the fat acidity of rough rice by near infrared reflectance spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 74(5), 556–560.
- Lin, L.H., Lu, F.M. & Chang, Y.C. (2006). Development of a near infrared imaging system for determination of rice moisture. *Cereal Chemistry*, 83(5), 498–504.

- Little, R.R., Hilder, G.B. & Dawson, E.H. (1958). Differential effect of dilute alkali on 25 varieties of milled white rice. *Cereal Chemistry*, 35, 111-126.
- Liu, C.C., Shaw, J.T., Poong, K.Y., Hong, M.C. & Shen, M.L. (2006). Wavelength selection for classifying paddy rice by near-infrared spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 83(4), 335–339.
- Liu, F. & He, Y. (2008). Classification of bands of instant noodles using Vis/NIR spectroscopy and chemometrics. *Food Research International*, 41, 562–567.
- Marshall, W.E. & Wadsworth, J.I. (1993). *Rice science and technology*. Marcel Dekker : New York. pp. 470.
- Meadows, F. & Barton II, F.E. (2002). Determination of rapid visco analyser parameters in rice by near-infrared spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 79(4), 563-566.
- Nakamura, Y., Sakurai, A., Inaba, Y., Kimura, K., Iwasawa, N. & Nagamine, T. (2002). The fine structure of amylopectin in endosperm from Asian cultivated rice can be largely classified into two classes. *Starch/Stärke*, 54, 117-131.
- Natsuga, M. & Kawamura, S. (2006). Visible and near-infrared reflectance spectroscopy for determining physicochemical properties of rice. *Transaction of ASABE*, 49(4), 1069–1070.
- Navasearttavisoot, N. (2004). *Prediction of Thai rice qualities by near infrared spectroscopy*. A thesis in degree of Master of Science in Agro–Industrial Product Development. Department of Product Development, Kasetsart University, Thailand. (in Thai).
- Nicolaï, B.M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K.I. & Lammertyn, J. (2007). Nondestructive measurement of fruit and vegetables quality by means of NIR spectroscopy: a review. *Postharvest Biology Technology*, 46, 99-108.
- Nishi, A., Nakamura, Y., Tanaka, N. & Satoh, H. (2001). Biochemical and gene analysis of effects of amylose-extender mutation in rice endosperm. *Plant Physiology*, 127, 459-472.
- Ootake, Y. & Kokot, S. (1998a). Discrimination between glutinous and non-glutinous rice by vibrational spectroscopy. I: Comparison of FT–NIR DRIFT, PAS and Raman spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 6, 341–249.
- _____. (1998b). Discrimination between glutinous and non-glutinous rice by vibrational spectroscopy. II: Effect of spectral pre-treatment on the

- classification of two types of rice. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 6, 251–258.
- Osborne, B.G., Martens, B., Thomson, M. & Fearn, T. (1993). Authentication of Basmati rice using near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 1: 77-83.
- Park, J.K., Kim, S.S. & Kim, O.K. (2001). Effect of milling ratio on sensory properties of cooked rice and on physicochemical properties of milled and cooked rice. *Cereal Chemistry*, 78(2), 151–156.
- Patindol, J., Flowers, A., Kuo, M-I., Wang, Y.J. & Gealy, D. (2006). Comparison of physicochemical properties and starch structure of red rice and cultivated rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 2712–2718.
- Patindol, J., Gu, X. & Wang, Y.J. (2009). Chemometric analysis of the gelatinization and pasting properties of long grain rice starches in relation to fine structure. *Starch/Stärke*, 61, 3–11.
- Patrick, R.M. & Hoskins, F.H. (1974). Protein and amino acid content of rice as affected by application of nitrogen fertilizer. *Cereal Chemistry*, 51, 84–95.
- Perdon, A. A., Siebenmorgen, T.J., Mauromoustakos, A., Griffin, V.K. & Johnson, E.R. (2001). Degree of milling effects on rice pasting properties. *Cereal Chemistry*, 78(2), 205–209.
- Pitiphunpong, S. and Suwannaporn, P. 2009. Physicochemical properties of KDML105 rice cultivar from different cultivated location in Thailand. *Journal of Science and Food Agriculture*, 89(13), 2186–2190.
- Prathepha, P., Daipolmak, V., Samappito, S. & Baimai, V. (2005). An assessment of alkali degradation, waxy protein and their relation to amylose content in Thai rice cultivars. *Science Asia*, 31, 69-75.
- Rinnan, A., NØrgaard, L., Berg, F.V.D., Thygesen, J., Bro, R. & Engelsen, S.B. (2009). *Data pre-processing (pp. 29-48)*. In D.A. Sun, *Infrared spectroscopy for food quality analysis and control*. New York: Elsevier Inc.
- Rittiron, R., Saranwong, S. & Kawano, S. (2004). Useful tips for constructing a near infrared–based quality sorting system for single brown–rice kernels. *Journal Near Infrared Spectroscopy*, 12, 133–139.

- Rittiron, R., Saranwong, S. & Kawano, S. (2005). Detection of variety contamination in milled Japanese rice using a single kernel near infrared technique in transmittance mode. *Journal Near Infrared Spectroscopy*, 13, 19–25.
- Romía, M.B. & Bernàrdez, M.A. (2009). *Multivariate calibration for quantitative analysis*. In D.A. Sun, *Infrared spectroscopy for food quality analysis and control*. Elsevier Inc., New York. pp. 51–79.
- Rossini, K., Verdun, S., Cariou, V., Qannari, E.M. & Fogliatto, F.S. (2011). PLS discriminant analysis applied to conventional sensory profiling data. *Food Quality and Preference*, Paper published In Press.
- Shimizu, N., Katsura, J., Blakeney, A.B., Kimura, T., Yoshizaki, S., Okadome, Hiroshi, Toyoshima, H. & Ohtsubo, K. (1998). Evaluating techniques for rice grain quality using near infrared transmission spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 6, A111–A116.
- Shimizu, N., Yanagisawa, T., Okadome, H., Yoyoshima, H., Andren, H., Kimura, T. & Ohtsubo, K. (2001). Determination of maximum viscosity of milled rice flours using near-infrared transmittance spectroscopy. *Food Science Technology Research*, 7(2), 104-109.
- Shimizu, N., Okadome, H., Yanagisawa, T., Andren, H., Thente, K., Kimura, T. & Ohtsubo, K. (2003). Application of visible/near-infrared transmittance spectroscopy for the improvement of amylose determination accuracy. *Food Science Technology Research*, 9(2), 134–136.
- Sirisoomboon, P., Tanaka, M., Fujita, S. & Kojima, T. (2007). Evaluation of pectin constituents of Japanese pear by near infrared spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 701–707.
- Sohn, M., Barton-Il, F.E, McClung, A.M. & Champagne, E.T. (2004a). Near–infrared spectroscopy for determination of protein and amylose in rice flour through use of derivatives. *Cereal Chemistry*, 81(3), 341–344.
- Sohn, M., Himmelsbach, D.S. & Barton-Il, F.E. (2004b). A comparative study of fourier transform raman and NIR spectroscopic methods for assessment of protein and apparent amylose in rice. *Cereal Chemistry*, 81(4), 429–433.

- Srisawas, W. (2009). *Evaluation of cooked rice texture by near infrared spectroscopy*. Doctoral dissertation No. FB-09-04, Asian Institute of Technology, 2009. Bangkok: Asian Institute of Technology.
- Stermer, R.A., Watson, C.A. & Diseman, E. (1977). Infrared spectra of milled rice. *Transaction ASAE*, 20, 547-549, 557.
- Suwannaporn, P., Pitiphunphong, S. & Champangen, S. (2007). Classification of rice amylose content by discriminant analysis of physicochemical properties. *Starch/Stärke*, 59, 171-177.
- Theanjumpol, P., Ripon, S., Karaboon, S., Suwapanit, K., Thanapornpoonpong, S. and Vearasilp, S. 2005. Aromatic Thai rice identification by near infrared reflectance spectroscopy. Conference on International Agricultural Research for Development. Stuttgart-Hohenheim, October 11-13, 2005.
- Tsuchikawa, S. 2007. Sampling techniques. In Ozaki, Y., Fred McClure, W. and Christy, A.A., *Near infrared spectroscopy in food science and technology*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey. pp. 145-162.
- Umemoto, T., Yano, M., Satoh, H. & Shomura, A. (2002). Mapping of a gene responsible for the difference in amylopectin structure between japonica-type and indica-type rice varieties. *Theory Apply Genetic*, 104, 1-8.
- Virginia university. (2011). *Chapter 7 carbohydrates*. Retrieved August 3, 2011, from website: <http://www.virginia.edu/Heide/chapter7/chp7.htm>.
- Villareal, C.P., Cruz, N.M.D. & Juliano, B.O. (1994). Rice amylose analysis by near- infrared transmittance spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 71, 292-296.
- Wadsworth, J.K. (1994). *Degree of milling*. In W.E. Marshall and J.I. Wadsworth, *Rice science and technology*. New York: Marcel Dekker. pp. 139-176.
- Wang, H.L., Wan, X.Y., Bi, J.C., Wang, J.K., Jiang, L., Chen, L.M., Zhai, H.Q. & Wan, J.M. (2006). Quantitative analysis of fat content in rice by near-infrared spectroscopy technique. *Cereal Chemistry*, 83(4), 402-406.
- Williams, P., Sobering, D. & Antoniszyn, J. (1998). *Protein testing methods at the Canadian Grain Commission*. pp. 1-14.

- Williams, P. (2007). *Near infrared technology—getting the best out of light: A short course in the practical implementation of near infrared spectroscopy for the user*. PDK Grain, Nanaimo, British Columbia, and Winnipeg, Manitoba.
- Williams, P. & Norris, K. (2001). *Near infrared technology in the agricultural and food industries*. Second ed. American Association of Cereal Chemist, Minnesota, USA.
- Windham, W., Lyon, B.G., Champagne, E.T., Barton, F.E. II., Webb, B.D., McClung, A.M., Moldenhauer, K.A., Linscombe, S. & McKenzie, K.S. (1997). Prediction of cooked rice texture quality using near infrared reflectance analysis of whole grain milled samples. *Cereal Chemistry*, 74, 626–632.
- Workmand, J. & Weyer, L. (2008). *Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy*. New York: CRC Press.
- Wu, J.G. & Shi, C.H. (2004). Prediction of grain weight, brown rice weight and amylose content in single rice grains using near infrared reflectance spectroscopy. *Field Crops Research*, 87, 13–21.
- _____. (2007). Calibration model optimization for rice cooking characteristics by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Food Chemistry*, 103, 1054–1061.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส ด้วยวิธี AACC (1999)

การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส ด้วยวิธี AACC (1999)

การเตรียมสารละลาย

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 นอร์มัล
ซังโซเดียมไฮดรอกไซด์ จำนวน 80 กรัม ละลายในน้ำกลั่น จำนวน 800 มิลลิลิตร ในขวดแก้วปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร
2. สารละลายกรดกลูเซียมอะซิติกเข้มข้น 1 นอร์มัล
ละลายกรดกลูเซียมอะซิติก ปริมาตร 60 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น จำนวน 800 มิลลิลิตร ในขวดแก้วปริมาตรขนาดความจุ 1,000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร
3. สารละลายไอโอดีน
ซังไอโอดีน จำนวน 0.2000 กรัม และโพแทสเซียมไอโอดेट จำนวน 2.000 กรัม ละลายในน้ำกลั่น จำนวน 80 มิลลิลิตร ในขวดแก้วปริมาตรสีชาขนาด 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้นาน 24 ชั่วโมง หรือจนไอโอดีนละลายหมด ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 มิลลิลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งแป้งข้าวสารที่สกัดไขมันแล้ว จำนวน 150 มิลลิกรัม ใส่ในขวดแก้วปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมเอทิลแอลกอฮอล์ 95% ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าเบา ๆ
2. ปิเปตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 นอร์มัล จำนวน 9 มิลลิลิตร ปั่นกวนตัวอย่างด้วยเครื่องปั่นกวนระบบแม่เหล็ก นาน 10 นาที ให้เป็นน้ำแป้ง แล้วนำไปต้มในน้ำเดือด นาน 10 นาที เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ปิเปตสารละลายแป้ง ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตรชุดใหม่ เติมน้ำกลั่น จำนวน 50 มิลลิลิตร ปิเปตกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 1 มิลลิลิตร แล้วปิเปตสารละลายไอโอดีน จำนวน 2 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ นาน 10 นาที
4. วัดความเข้มของสีของสารละลายด้วยเครื่องสเปกโตรสโคปที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยอ่านค่าเป็นแอบซอร์เบ้นซ์ (Absorbance) หลังปรับเครื่องสเปกโตรสโคปด้วยแบลนค์ (Blank) ให้ได้ค่าแอบซอร์เบ้นซ์เท่ากับ 0 (ศูนย์)
5. สำหรับการทำให้แบลนค์ให้ทำเช่นเดียวกับวิธีดังกล่าวข้างต้น แต่ไม่ใส่ตัวอย่าง โดยเติมสารละลายกรดกลูเซียมอะซิติก ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีนปริมาตร 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 มิลลิลิตร และนำไปวัดความเข้มของสีด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร เช่นเดียวกัน
6. การทำกราฟมาตรฐาน ในการทดลองนี้จะใช้สารละลายผสมระหว่างโพแทสเซียมแอมิโลสมาตรฐานกับแอมิโลเพคตินในอัตราส่วนแตกต่างกัน (แสดงดังตารางภาคผนวกที่ 1) จากนั้นนำสารละลายผสมมาทำการทดลองเช่นเดียวกับการเตรียมสารละลายตัวอย่างและวัดค่าการดูดกลืนแสง จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายผสมมาสร้างกราฟมาตรฐานกับค่าปริมาณแอมิโลส (0,

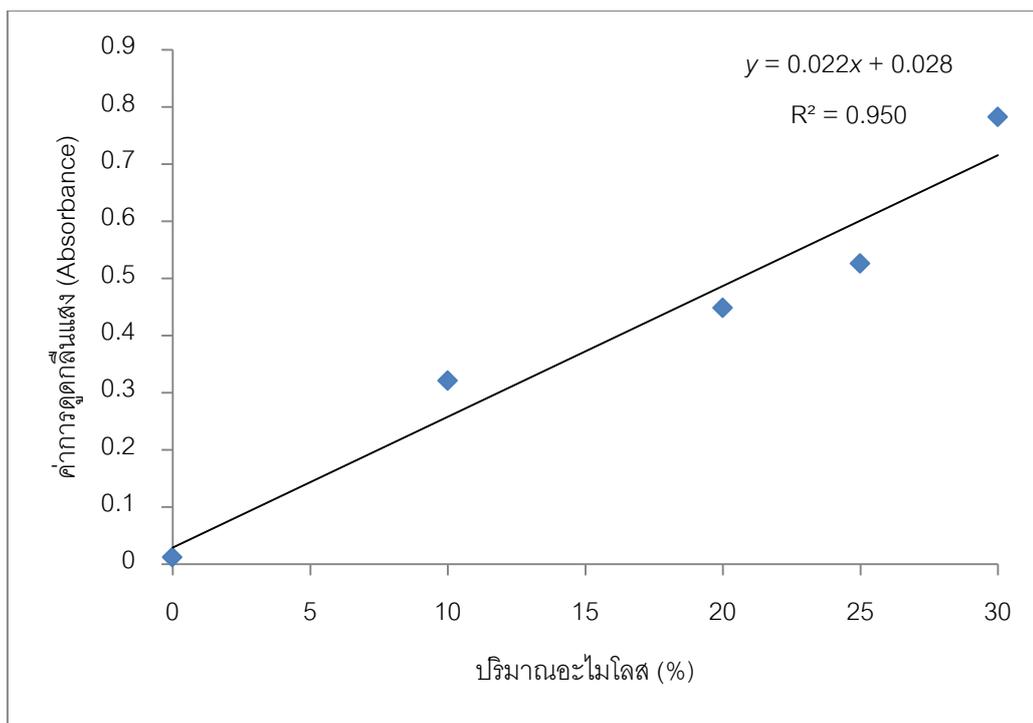
10, 20, 25 และ 30%) แสดงดังภาพภาคผนวกที่ 1 จากนั้นจึงนำค่าแอบซอร์เบ้นซ์ของแต่ละตัวอย่างมาเทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วคำนวณหาค่าปริมาณแอมิโลสตามสูตรของ Phil Williams (Personal contact)

$$AAC_{WMR} (\%) = \frac{AAC_{FL} \times (100 - MC_{WMR})}{100 - MC_{FL}}$$

| | | | |
|-------|-------------|-----|---------------------------------------|
| เมื่อ | AAC_{WBR} | คือ | ปริมาณแอมิโลสของข้าวสารเต็มเมล็ด (%) |
| | AAC_{FL} | คือ | ปริมาณแอมิโลสของแป้งข้าว (%) |
| | MC_{WBR} | คือ | ปริมาณความชื้นของข้าวสารเต็มเมล็ด (%) |
| | MC_{FL} | คือ | ปริมาณความชื้นของแป้งข้าว (%) |

ตารางภาคผนวกที่ 1 อัตราส่วนความเข้มข้นของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน

| ปริมาณแอมิโลส (%, มาตรฐานแห้ง) | อัตราส่วนของสารละลายผสม | | |
|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------|
| | แอมิโลส (1 มก./มล.) | แอมิโลเพกติน (1 มก./มล.) | 0.09 N NaOH |
| 0 | 0.0 | 7.0 | 3 |
| 10 | 1.0 | 6.0 | 3 |
| 20 | 2.0 | 5.0 | 3 |
| 25 | 2.5 | 4.5 | 3 |
| 30 | 3.0 | 4.0 | 3 |



ภาพผนวกที่ 1 กราฟความเข้มข้นของแอมโมเนียมาตรฐาน

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ด้วยวิธี AACC (2000a)

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ด้วยวิธี AACC (2000a)

1. ชั่งสาร Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) จำนวน 100 มิลลิกรัม นำมาอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100°C นาน 24 ชั่วโมง และนำมาทำให้เย็นในเดสิคเคเตอร์
2. ทำการแคลิเบรทเครื่องวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมดด้วยแบลงค์ จำนวน 8 ครั้ง จากนั้นนำ EDTA ซึ่งเป็นสารมาตรฐานที่ทราบปริมาณคาร์บอน (Carbon) และไนโตรเจน (Nitrogen) ที่แน่นอนมาทำการแคลิเบรทเครื่องก่อนทำการวิเคราะห์ตัวอย่างแบ่งซ้ำวักล้อง
3. ชั่งน้ำหนักแบ่งซ้ำสาร จำนวน 250 มิลลิกรัม ใส่ในแผ่นตีบุกบาง (Tin foil) ห่อเป็นแคปซูลเล็ก ๆ และนำไปใส่ในเครื่องสุ่มตัวอย่างอัตโนมัติ (Autosampler) จากนั้นแคปซูลของตัวอย่างข้างต้นจะถูกนำไปหย่อนลงในหลอดเผาไหม้ (combustion tube) ที่ทำจากควอทซ์หรือเหล็กกล้าซึ่งให้อุณหภูมิสูงถึง 1,020°C ภายใต้บรรยากาศแก๊สฮีเลียมซึ่งไหลผ่านตลอดเวลา จากนั้นจึงนำแก๊สออกซิเจนผ่านเข้ามา ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยากับตีบุกได้ SnO₂ พร้อมกับคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิสูงถึง 1,800°C ซึ่งช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น คาร์บอนจะถูกเปลี่ยนไปเป็น CO₂ และไนโตรเจนถูกเปลี่ยนไปเป็น N₂ และออกไซด์อื่น ๆ ของไนโตรเจน ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สผสม N₂, NO_x, H₂O, O₂ และ CO₂ ซึ่งจะถูกพาโดยแก๊สฮีเลียมไหลผ่านหลอดที่มีหลอดทองแดงตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ บรรจุอยู่ ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 650°C จะทำให้ NO_x เปลี่ยนไปเป็น N₂ และเกิด CuO ขึ้น จากนั้นจะผ่านไปยังคอลัมน์ที่บรรจุด้วยใยลวดเงิน (silver wool) ซึ่งใช้จับแก๊สของธาตุซัลเฟอร์และเฮไลด์ต่าง ๆ และแยก CO₂ และ N₂ โดยใช้ chromatographic column (Porapak QS) โดยจะให้ N₂ ถูกพาออกมาก่อน CO₂ ซึ่งจะตรวจวัดได้โดย thermal conductivity detector (TCD)
4. ทำการตรวจสอบความแม่นยำของเครื่องด้วยสารมาตรฐาน EDTA หลังจากวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดของแบ่งซ้ำสาร ทุก ๆ 20 ตัวอย่าง
5. การคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด จะทำได้โดยเทียบกับการวิเคราะห์สารมาตรฐานที่ทราบปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนที่แน่นอน
6. การคำนวณหาปริมาณโปรตีนทำได้โดยนำค่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์มาคูณด้วยค่าแฟกเตอร์ 5.95

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ค่าความคงตัวของเจล ตามวิธีของ Cagampang *et al.* (1973)

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ค่าการสลายเมล็ดข้าวในต่าง ตามวิธีของ Little *et al.* (1958)

การวิเคราะห์ค่าการสลายเมล็ดข้าวในต่าง

การเตรียมสารละลาย

1. การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำได้ 2 วิธี คือ
 - 1.1 เตรียม Working solution โดยตรง ชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 19.54 กรัม ละลายในน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้เดือดแล้วปิดฝาทิ้งไว้ให้เย็น เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร
 - 1.2 เตรียม Working solution จาก Stock solution
 - 1.2.1 ชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 588.2 กรัม ละลายในน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้เดือด แล้วปิดฝาทิ้งไว้ให้เย็น เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร เก็บไว้เป็น Stock solution สำหรับเจือจางต่อไป
 - 1.2.2 นำ Stock solution จาก 1.2.1 ปริมาตร 33 มิลลิลิตร มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร สำหรับใช้เป็น Working solution
2. การหาความเข้มข้นของสารละลาย Working solution
 - 2.1 ออบสารโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลทที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเดสิคเคเตอร์
 - 2.2 ชั่งสารโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท จำนวน 0.5000 กรัม โดยอ่านให้ได้น้ำหนักที่แท้จริง
 - 2.3 ละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลทในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร หยดสารละลายฟีนอล์ฟธาลีนเข้มข้น 1% ลงไป 3 หยด ไทเทรตกับสารละลาย Working solution จนสารละลายเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีชมพู บันทึกปริมาตรของ Working solution ที่ใช้ไปเป็นมิลลิลิตร
 - 2.4 ทำแบลงค์ตามวิธีการเดียวกับข้อ 2.3 โดยไม่ใช้สารโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท
 - 2.5 คำนวณหาความเข้มข้นของ Working solution ดังนี้

$$\text{โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (\%)} = \frac{P}{204.23} \times \frac{56.109}{V - B} \times 100$$

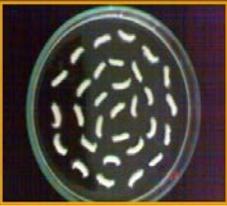
- เมื่อ
- V = ปริมาตรของ Working solution ที่ใช้ในการไทเทรตกับโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท (มิลลิลิตร)
- B = ปริมาตรของ Working solution ที่ใช้ในการไทเทรตกับแบลงค์ (มิลลิลิตร)
- P = น้ำหนักของสารโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลท (กรัม)

วิธีการวิเคราะห์

1. สุ่มเมล็ดข้าวสารเต็มเมล็ด จำนวน 100 เมล็ด แบ่งใส่จานเพาะเชื้อ (Petri dish) จำนวน 4 จาน ๆ ละ 25 เมล็ด แล้ววางบนพื้นราบสีดำ
2. เติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลงในจานเพาะเชื้อประมาณจานละ 100 มิลลิลิตร ให้เมล็ดข้าวทุกเมล็ดจมอยู่ในสารละลาย และให้แต่ละเมล็ดอยู่ห่างกันพอสมควรแล้วปิดฝาทิ้งไว้ให้อยู่กับที่ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่ขยับจานเพาะเชื้อเป็นเวลา 23 ชั่วโมง
3. ตรวจสอบเมล็ดข้าวโดยพิจารณาอัตราการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายต่างแต่ละเมล็ดตามลักษณะการสลาย ดังตารางภาคผนวกที่ 2
4. การวินิจฉัย เมล็ดข้าวที่มีระดับการสลายตั้งแต่ระดับ 1 ถึงระดับ 5 เป็นเมล็ดข้าวที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิไทย

ตารางภาคผนวกที่ 2 ระดับการสลายของเมล็ดข้าวในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

1.7%

| ระดับ | การสลายของเมล็ดข้าว | ลักษณะการสลายของเมล็ดข้าว | อุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชัน |
|-------|---|--|-------------------------------|
| 1 |  | ลักษณะของเมล็ดข้าวไม่เปลี่ยนแปลง | สูง |
| 2 |  | เมล็ดข้าวงอกตัว | สูง |
| 3 |  | เมล็ดข้าวงอกตัวและมีแป้งกระจายออกมา บางส่วนของเมล็ดข้าว | สูง |
| 4 |  | เมล็ดข้าวงอกตัวและมีแป้งกระจายออกมา รอบเมล็ดข้าวเป็นบริเวณกว้าง | ปานกลาง |
| 5 |  | ผิวของเมล็ดข้าวปริทางขวางหรือทางยาวและ มีแป้งกระจายออกมารอบเมล็ดเป็นบริเวณ กว้าง | ปานกลาง |
| 6 |  | เมล็ดข้าวสลายตัวตลอดทั้งเมล็ด มีลักษณะ เป็นเมือกชุ่มขาว | ต่ำ |
| 7 |  | เมล็ดข้าวสลายตัวตลอดทั้งเมล็ดและมี ลักษณะเป็นเมือกใส | ต่ำ |

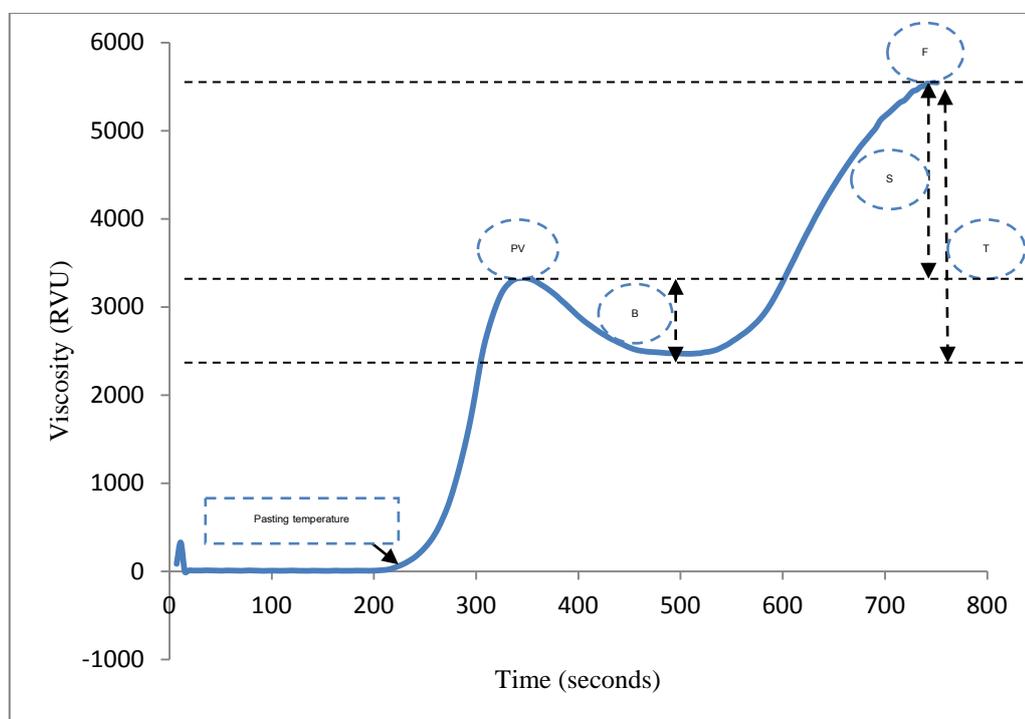
ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว ด้วยวิธี AACC
(2000b)

การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งน้ำหนักแป้งข้าวสาร จำนวน 3 ± 0.01 กรัม ที่ความชื้น 14% (น้ำหนักเปียก) จากนั้นเปิดน้ำกลั่น จำนวน 25 ± 0.10 มิลลิลิตร ใส่ลงในกระบอกอลูมิเนียมของเครื่อง
2. นำแป้งตัวอย่างที่ชั่งไว้เทใส่กระบอกอลูมิเนียม กวนแป้งให้ละลายเข้ากับน้ำ เมื่อเตรียมตัวอย่างเสร็จแล้ว นำกระบอกอลูมิเนียมที่มีน้ำแป้งใส่ใบกวนเข้าที่เครื่อง RVA จากนั้นกดกระบอกตัวอย่างน้ำแป้งลงในช่องรับของเครื่อง RVA เครื่องทำงานอัตโนมัติโดยรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 50°C แล้วให้ความร้อนด้วยอัตราประมาณ 12°C ต่อนาที จนได้อุณหภูมิที่ 95°C ที่ให้อยู่ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 2 นาที ให้ความเย็นด้วยอัตราประมาณ 12°C ต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิที่ 50°C หรือต่ำกว่านี้ นาน 2 นาที ลักษณะกราฟ RVA ของน้ำแป้ง แสดงดังภาพภาคผนวกที่ 3



ภาพภาคผนวกที่ 3 กราฟ RVA ที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของน้ำแป้งของข้าวสาร

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ปรากฏบนกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของน้ำแป้งด้วยเครื่องวัดความหนืดอย่างรวดเร็ว มีรายละเอียดดังนี้

อุณหภูมิแป้งสุก (Pasting temperature) คือ อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ใน 20 วินาที และทำให้แป้งเริ่มพองตัวกลางเป็นเจล มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{C}$

ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) คือ ความสามารถในการพองตัวของผลึกแป้ง ในระหว่างต้มที่ 95°C มีหน่วยเป็น RVU

ความหนืดต่ำสุด (Holding strength) คือ ความหนืดต่ำสุดระหว่างการทำเย็น มีหน่วยเป็น RVU

การแตกตัวของแป้งสุก (Breakdown) คือ ผลต่างของความหนืดสูงสุดกับความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU

ความคงตัวของแป้งสุก (Setback or Consistency) คือ ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุดมีหน่วยเป็น RVU ใช้คาดคะเนการเปลี่ยนแปลงความแข็งของข้าวสุกเมื่อเย็นตัวลง

ความหนืดสุดท้ายของแป้งสุก (Final viscosity) คือ ความสามารถในการพองตัวของผลึกแป้งในระหว่างต้มที่ 50°C มีหน่วยเป็น RVU ใช้คาดคะเนการเปลี่ยนแปลงความพองตัวของเมล็ดข้าวเมื่อหุงสุก

ภาคผนวก ฉ

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ด้วยวิธี AACC (2000c)

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

1. อบถั่วอัลมอนด์พร้อมเปลือกในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130°C นาน 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน
2. จากนั้นชั่งตัวอย่างข้าวสารที่ผ่านการบดอย่างหยาบด้วยเครื่องบดเมล็ดข้าว จำนวน 5 กรัม ในถั่วอัลมอนด์ นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 130°C นาน 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ ชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาปริมาณความชื้นจากสูตร

$$\text{ความชื้น (\%)} = \left[\frac{(B-C)}{(B-A)} \right] \times 100$$

- โดยที่ A คือ น้ำหนักถั่วอัลมอนด์พร้อมเปลือก
 B คือ น้ำหนักถั่วอัลมอนด์พร้อมเปลือกและข้าวบดก่อนอบ
 C คือ น้ำหนักถั่วอัลมอนด์พร้อมเปลือกและข้าวบดหลังอบ

ภาคผนวก ข

การสร้างสมการทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารที่จำนวนคลื่นและวิธีการปรับแต่ง
สเปคตรัมที่แตกต่างกัน

ตารางภาคผนวกที่ 3 สรุปการสร้างสมการทำนายคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสารที่
จำนวนคลื่นและวิธีการปรับแต่งสเปกตรัมที่แตกต่างกัน

| Spectra pre-processing | Wavenumbers (cm^{-1}) | PC | Calibration | | Validation | | Bias | RPD |
|--------------------------------------|-------------------------------------|----------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|--------------|-------------|
| | | | RMSEC | R^2_{cat} | RMSEP | r^2_{val} | | |
| ปริมาณโปรตีน | | | | | | | | |
| Original | 10,000–4,000 | 14 | 1.06 | 0.94 | 1.60 | 0.87 | 0.02 | 2.56 |
| MSC | | 7 | 1.01 | 0.95 | 1.64 | 0.87 | 0.10 | 2.58 |
| SNV | | 11 | 1.36 | 0.91 | 1.78 | 0.85 | 0.52 | 2.38 |
| Sav.Gol_2nd deriv | | 8 | 1.47 | 0.89 | 2.36 | 0.74 | 0.17 | 1.79 |
| MSC + Sav.Gol_2nd deriv | | 8 | 1.31 | 0.91 | 2.10 | 0.79 | 0.12 | 1.75 |
| SNV + Sav.Gol_2nd deriv | | 8 | 1.29 | 0.92 | 2.07 | 0.80 | 0.12 | 1.73 |
| ปริมาณแอมิโลส | | | | | | | | |
| Original | 10,000–4,000 | 4 | 1.01 | 0.89 | 1.17 | 0.86 | -0.16 | 2.20 |
| MSC | | 5 | 1.17 | 0.85 | 1.58 | 0.74 | 0.00 | 1.63 |
| SNV | | 5 | 1.17 | 0.85 | 1.63 | 0.71 | 0.00 | 1.58 |
| Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 0.81 | 0.93 | 1.68 | 0.70 | -0.18 | 1.53 |
| MSC + Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 0.96 | 0.90 | 1.67 | 0.73 | -0.11 | 1.54 |
| SNV + Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 0.96 | 0.90 | 1.70 | 0.70 | -0.11 | 1.51 |
| Original | 8,620–5,128 | 3 | 1.02 | 0.89 | 1.14 | 0.88 | -0.15 | 2.26 |
| MSC | | 3 | 1.31 | 0.82 | 1.59 | 0.73 | -0.00 | 1.62 |
| SNV | | 6 | 1.12 | 0.87 | 1.52 | 0.76 | -0.09 | 1.69 |
| Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 0.96 | 0.90 | 1.74 | 0.70 | -0.19 | 1.45 |
| MSC + Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 0.88 | 0.92 | 1.64 | 0.73 | -0.22 | 1.57 |
| SNV + Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 0.85 | 0.92 | 1.70 | 0.70 | -0.22 | 1.57 |
| Original | 7,142–4,012 | 3 | 1.03 | 0.86 | 1.15 | 0.85 | -0.15 | 2.24 |
| MSC | | 5 | 1.24 | 0.83 | 1.65 | 0.71 | -0.04 | 1.56 |
| SNV | | 4 | 1.28 | 0.82 | 1.62 | 0.74 | -0.05 | 0.06 |
| Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 1.10 | 0.87 | 1.83 | 0.61 | -0.12 | 1.41 |
| MSC + Sav.Gol_2nd deriv | | 3 | 1.45 | 0.77 | 1.81 | 0.65 | -0.16 | 1.42 |
| SNV + Sav.Gol_2nd deriv | | 3 | 1.45 | 0.77 | 1.77 | 0.67 | -0.16 | 1.42 |
| ค่าความคงตัวของเจล | | | | | | | | |
| Original | 10,000–4,000 | 6 | 2.79 | 0.91 | 3.60 | 0.84 | -0.18 | 2.14 |
| MSC | | 6 | 2.98 | 0.89 | 3.83 | 0.82 | -0.30 | 2.02 |
| SNV | | 6 | 2.98 | 0.89 | 3.70 | 0.82 | -0.31 | 2.09 |
| Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 2.03 | 0.95 | 3.29 | 0.88 | 0.11 | 2.35 |
| MSC + Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 2.00 | 0.95 | 3.30 | 0.88 | 0.09 | 2.34 |
| SNV + Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 2.01 | 0.95 | 3.20 | 0.88 | 0.08 | 2.41 |
| ค่าการสลายเมล็ดข้าวในสารละลาย | | | | | | | | |
| ต่าง | | | | | | | | |
| Original | 10,000–4,000 | 3 | 0.56 | 0.86 | 0.63 | 0.82 | 0.06 | 2.01 |
| MSC | | 6 | 0.44 | 0.91 | 0.52 | 0.86 | 0.14 | 2.43 |
| SNV | | 5 | 0.46 | 0.90 | 0.53 | 0.88 | 0.11 | 2.39 |
| Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 0.43 | 0.92 | 0.68 | 0.81 | 0.14 | 1.86 |
| MSC + Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 0.39 | 0.93 | 0.55 | 0.87 | 0.14 | 2.30 |
| SNV + Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 0.39 | 0.93 | 0.56 | 0.86 | 0.14 | 2.26 |

ตารางภาคผนวกที่ 3 (ต่อ)

| Spectra pre-processing | Wavenumbers (cm^{-1}) | PC | Calibration | | Validation | | Bias | RPD |
|--|-------------------------------------|----------|-------------|--------------------|------------|--------------------|-------------|-------------|
| | | | RMSEC | R^2_{cat} | RMSEP | r^2_{val} | | |
| ค่าความหนืดสูงสุด | | | | | | | | |
| Original | 10,000–4,000 | 1 | 190 | 0.81 | 201 | 0.81 | 6.48 | 1.86 |
| MSC | | 7 | 147 | 0.89 | 209 | 0.78 | 4.22 | 1.79 |
| SNV | | 7 | 147 | 0.89 | 220 | 0.79 | 4.04 | 1.70 |
| Sav.Gol_2nd deriv | | 6 | 61 | 0.98 | 218 | 0.76 | 10.61 | 1.72 |
| MSC + Sav.Gol_2nd deriv | | 6 | 59 | 0.98 | 220 | 0.75 | 8.90 | 1.70 |
| SNV + Sav.Gol_2nd deriv | | 6 | 59 | 0.98 | 217 | 0.76 | 8.91 | 1.72 |
| ค่าการแตกตัวของแป้งสุก | | | | | | | | |
| Original | 10,000–4,000 | 5 | 88 | 0.85 | 106 | 0.79 | -15.64 | 1.83 |
| MSC | | 5 | 97 | 0.82 | 118 | 0.74 | -8.48 | 1.64 |
| SNV | | 5 | 97 | 0.82 | 119 | 0.76 | -8.50 | 1.63 |
| Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 73 | 0.90 | 116 | 0.74 | -10.80 | 1.67 |
| MSC + Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 62 | 0.92 | 112 | 0.76 | -15.50 | 1.73 |
| SNV + Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 62 | 0.93 | 113 | 0.77 | -15.50 | 1.74 |
| ค่าความคงตัวของแป้งสุก | | | | | | | | |
| Original | 10,000–4,000 | 6 | 195 | 0.92 | 237 | 0.89 | -43.26 | 2.68 |
| MSC | | 7 | 189 | 0.92 | 255 | 0.87 | -24.22 | 2.57 |
| SNV | | 5 | 225 | 0.89 | 272 | 0.85 | -21.40 | 2.41 |
| Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 210 | 0.91 | 342 | 0.76 | -18.44 | 1.92 |
| MSC + Sav.Gol_2nd deriv | | 4 | 241 | 0.88 | 388 | 0.69 | -3.92 | 1.69 |
| SNV + Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 184 | 0.93 | 309 | 0.80 | -11.30 | 2.12 |
| ค่าความหนืดสุดท้าย | | | | | | | | |
| Original | 10,000–4,000 | 1 | 146 | 0.87 | 153 | 0.86 | 19.00 | 2.68 |
| MSC | | 4 | 157 | 0.85 | 183 | 0.80 | 10.11 | 2.24 |
| SNV | | 5 | 149 | 0.86 | 179 | 0.81 | 9.57 | 2.29 |
| Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 104 | 0.93 | 167 | 0.83 | 2.85 | 2.46 |
| MSC + Sav.Gol_2nd deriv | | 3 | 151 | 0.86 | 181 | 0.80 | 17.00 | 2.68 |
| SNV + Sav.Gol_2nd deriv | | 5 | 108 | 0.93 | 179 | 0.81 | 2.69 | 2.29 |
| ค่าความหนืดสุดท้ายหลังการทำเย็น | | | | | | | | |
| Original | 10,000–4,000 | 1 | 130 | 0.80 | 139 | 0.78 | 5.24 | 1.74 |
| MSC | | 5 | 112 | 0.85 | 143 | 0.77 | 0.28 | 1.69 |
| SNV | | 5 | 111 | 0.85 | 141 | 0.77 | 0.32 | 1.72 |
| Sav.Gol_2nd deriv | | 2 | 135 | 0.79 | 154 | 0.73 | -16.90 | 1.57 |
| MSC + Sav.Gol_2nd deriv | | 4 | 111 | 0.85 | 144 | 0.77 | -8.67 | 1.68 |
| SNV + Sav.Gol_2nd deriv | | 4 | 111 | 0.85 | 144 | 0.76 | -8.67 | 1.68 |